

Janusz SZWABOWSKI

## MECHANIZM RUCHU MASY BETONOWEJ W TRANSPORCIE RUROWYM

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono analizę reologiczną warunków transportu masy betonowej w rurociągach. Sformułowano możliwe przypadki jego wystąpienia w prostym odcinku rurociągu. Wyniki analizy zinterpretowano technologicznie w oparciu o krzywe płynięcia, uwzględniając wpływ struktury masy.

### Wstęp

Zakres stosowania transportu rurowego masy betonowej w wykonawstwie robót betonowych w naszym budownictwie szybko rośnie. Przyczyną są zalety tego rodzaju transportu, z których najistotniejszymi są: pełna mechanizacja procesu transportu i układania masy betonowej, duża wydajność niemożliwa do uzyskania innymi środkami, ciągłość betonowania oraz możliwość mechanizacji kompleksowej całego ciągu technologicznego robót betonowych.

Pomimo coraz powszechniejszego stosowania transportu rurowego w robotach betonowych, obserwuje się szereg niewłaściwości technologicznych w realizacji tego transportu, prowadzących do nieprawidłowego korzystania z tych urządzeń, ich częstych awarii i zniszczenia. Wynika to z braku rozpoznania i znajomości mechanizmu ruchu masy betonowej w transporcie rurowym i wynikających stąd wymogów technologicznych.

### 1. Analiza reologiczna ruchu masy betonowej w rurociągu

Transport rurowy masy betonowej realizuje się przez przemieszczenie jej w sztywnych lub elastycznych rurociągach, w efekcie wywarcia określonego i ukierunkowanego ciśnienia. W dotychczas znanych rozwiązaniach ciśnienie to może być wywierane za pomocą pompy tłokowej, sprężonego powietrza lub rotacyjnej pompy wyciskowej, przy czym dla każdego rodzaju pompy ciśnienie w funkcji czasu może mieć różną charakterystykę. Założymy jednak, że  $p = \text{const}$ , co prowadzi do pominięcia efektów inercyjnych ruchu masy.

O charakterze i mechanizmie ruchu masy betonowej w rurociągu decyduje jej struktura. Z tego punktu widzenia masę betonową traktować należy jako trójfazowy układ dyspersyjny, o wysokiej koncentracji fazy stałej (rozproszonej) w fazie ciekłej (rozpraszającej), który powstaje w wyniku zmieszania kruszywa i spoiwa (faza stała) z wodą (faza ciekła) w atmosferze powietrza [1]. Stan struktury masy betonowej ulegać może znacznym zmia-

nom, w zależności od udziału poszczególnych składników w jednostce objętości masy. Można go opisać kompleksowo, podanym przez autora w pracy [1] zespołem syntetycznych parametrów struktury, zwanych wskaźnikami dyspersji: stosu okruskowego  $D_s$ , zaczynu  $D_z$  i masy betonowej  $D_m$ .

W określonym, użytecznym technologicznie przedziale wartości tych wskaźników, własności reologiczne masy betonowej uważać można za niezmiennie w sensie jakościowym i zgodnie z ustaleniami autora [1] opisywać je równaniem reologicznym ciała lepkoplastycznego

$$\tau - \tau_0 = \eta_{pl} \dot{\gamma}, \quad (1)$$

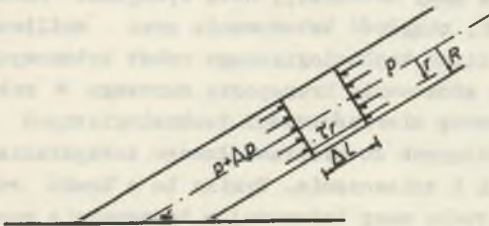
gdzie:

$\tau$  - naprężenie ścinające  $N/m^2$ ,

$\tau_0$  - granica płynności, inaczej graniczne naprężenie ścinające,  $N/m^2$ ,

$\dot{\gamma}$  - prędkość płynięcia postaciowego, 1 /sek,

$\eta_{pl}$  - lepkość plastyczna,  $N \text{ sek}/m^2$ .



Jeśli zatem masę betonową wprowadzić do rurociągu pod ciśnieniem wywieranym przez pompę, to zakładając pomijalność odkształceń objętościowych, rozkład sił w prostym wycinku rurociągu o długości  $\Delta l$  przedstawić można jak na rys. 1.

Warunek równowagi będzie

Rys. 1. Rozkład sił w elemencie masy transportowanej rurociągiem

$$\pi r^2 \Delta p - 2 \pi r \Delta L \tau_r - \pi r^2 \Delta L C_{om} \cdot \sin \alpha = 0 \quad (2)$$

skąd naprężenie ścinające w odległości  $r$  od osi rurociągu

$$\tau_r = \frac{r \Delta p}{2 \Delta L} + \frac{1}{2} r C_{om} \sin \alpha; \quad (3)$$

W przypadku transportu pionowego  $\sin \alpha = 1$ , wtedy

$$\tau_r = \frac{r \Delta p}{2 \Delta L} + \frac{1}{2} r C_{om} \quad (4)$$

zaś w przypadku transportu poziomego  $\sin \alpha = 0$ , więc

$$\tau_r = \frac{r \Delta p}{2 \Delta L} \quad (5)$$

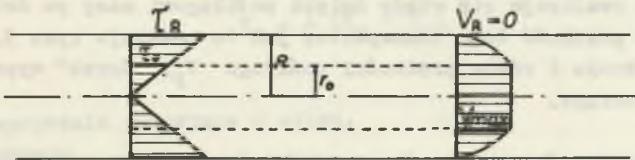
$$\begin{aligned} \text{Dla } r = 0 & \quad \tau_r = 0 \\ r = R & \quad \tau_r = \tau_R = \frac{R}{2} \frac{\Delta p}{\Delta L} \end{aligned}$$

Naprężenie ścinające równe granicy płynności masy  $\tau_0$  wystąpi w odległości  $r_0$  od osi rurociągu, przy czym

$$r_0 = 2 \tau_0 \frac{\Delta L}{\Delta p} \quad (6)$$

Transport masy rurociągiem może wówczas nastąpić w jednym z następujących przypadków:

- a) Gdy naprężenia ścinające  $\tau_r$  w części lub w całym przekroju rurociągu będą większe od granicy płynności masy  $\tau_0$  (rys. 2), zaś suma sił adhezji i tarcia ( $T_A + T_f$ ) na styku masa - ścianka rurociągu będzie większa od siły  $T_R$  ścinającej ten styk.



Rys. 2. Rozkład naprężeń ścinających i prędkości transportu masy betonowej w przekroju rurociągu w przypadku gdy  $\tau_R > \tau_0$  i  $T_A + T_f > T_R$

Sumę sił adhezji i tarcia określić można z wyrażenia

$$T_A + T_f = (\mu_A + \mu_f) \Delta p_r 2\pi R \Delta L = (\tau_A + \tau_f) 2\pi R \Delta L, \quad (7)$$

gdzie:

$\mu_A$  i  $\mu_f$  - współczynniki adhezji i tarcia,

$\Delta p_r$  - składowa ciśnienia w masie w kierunku promienia,

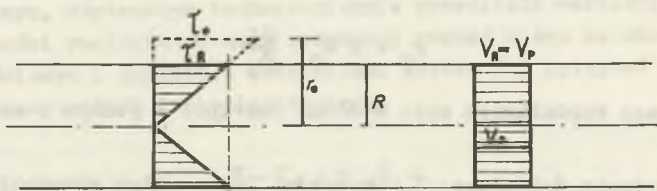
zaś siłę ścinającą w styku jako

$$T_R = 2 \tau_R \pi R \Delta L, \quad (8)$$

Prędkość transportu masy jest w przekroju zróżnicowana, zaś jej rozkład pokazano na rys. 2. W obrębie  $r < r_0$  transport realizuje się jako ruch sztywnego "korka" masy, zaś w obrębie  $r > r_0$  jako płynięcie lepko-plastyczne. Stąd też taki rodzaj transportu nosi w reologii nazwę płynięcia "korkowego" (plug flow), charakterystycznego dla ośrodków lepko-plastycznych.



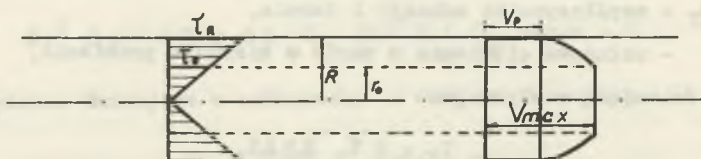
- b) Gdy naprężenia ścinające  $\tau_r$  będą w całym przekroju mniejsze od granicy płynności masy  $\tau_0$  (rys. 3), lecz suma sił adhezji i tarcia ( $T_A + T_f$ ) na styku masa - ścianka rurociągu będzie mniejsza od siły  $T_R$  ścinającej ten styk.



Rys. 3. Rozkład naprężeń ścinających i prędkości transportu masy betonowej w przekroju rurociągu w przypadku gdy  $\tau_R < \tau_0$  i  $T_A + T_f < T_R$

Transport realizuje się wtedy dzięki poślizgowi masy po ściankach rurociągu, zaś prędkość tego transportu, jak to pokazuje rys. 3, jest stała w całym przekroju i równa prędkości poślizgu  $V_p$ . "Korek" wypełnia cały przekrój rurociągu.

- c) Gdy naprężenia ścinające  $\tau_r$  w części lub w całym przekroju rurociągu będą większe od granicy płynności masy  $\tau_0$  (rys. 4), zaś suma sił adhezji i tarcia ( $T_A + T_f$ ) na styku masa - ścianka rurociągu będzie mniejsza od siły  $T_R$  ścinającej ten styk. Transport realizuje się wtedy jako łączny efekt płynięcia lepko-plastycznego i poślizgu masy na ściance rurociągu. Prędkość transportu w tym przypadku jest sumą prędkości płynięcia lepko-plastycznego i prędkości poślizgu po ściance rurociągu.



Rys. 4. Rozkład naprężeń ścinających i prędkości transportu masy betonowej w przekroju rurociągu w przypadku, gdy  $\tau_R > \tau_0$  i  $T_A + T_f < T_R$

Uogólniając, we wszystkich rozważanych przypadkach charakter i prędkość transportu masy betonowej w rurociągu są funkcją własności reologicznych transportowanej masy, określonych jej równaniem reologicznym i wartościami jego parametrów  $\tau_0$ ,  $\eta_{pl}$  (lub krzywą jej płynności) oraz parametrów technologicznych procesu czyli gradientu ciśnienia  $\frac{\Delta p}{\Delta l}$  w rurociągu

i jego średnicy  $2R$ . Charakter tej funkcji jest jednak różny w każdym z rozważanych przypadków, co oczywiście ma określone konsekwencje technologiczne.

Jeżeli transport masy w rurociągu jest efektem płynięcia lepko-plastycznego (rys. 2), to rozkład jego prędkości w rurze określa równanie [3]:

$$v = \frac{1}{\eta_{pl}} \left[ \frac{(R^2 - r^2)}{4 \Delta L} \Delta p - (R-r) \tau_o \right] \quad (9)$$

Gdy transport masy następuje w wyniku poślizgu sztywnego rdzenia ("kor-ka") masy po ściance rurociągu (rys. 3), to jego prędkość jest stała w całym przekroju rdzenia, zaś jej wartość wg badań S. Morinagi [4] jest liniowo zależna od ciśnienia. Biorąc pod uwagę, że dla rozpoczęcia poślizgu musi być pokonana adhezja masy do ścianki na ich styku, zależność tę można przedstawić równaniem

$$v_p = \frac{1}{k} (\tau_R - \tau_A), \quad (10)$$

gdzie:

- $\tau_R$  - naprężenie ścinające w styku,
- $\tau_A$  - adhezja,
- $k$  - współczynnik prędkości poślizgu.

Jeżeli na rozważanym styku wystąpi efekt ściany, to pomiędzy masą betonową a ścianką rury będzie warstewka zaczynu o pewnej grubości "e". Prędkość transportu będzie wówczas efektem płynięcia lepko-plastycznego warstewki zaczynu i można ją określić z równania (9), podstawiając zamiast granicy płynności masy  $\tau_o$  granicę płynności zaczynu  $\tau_{oz}$  i zamiast lepkości masy  $\eta_{pl}$  lepkość zaczynu  $\eta_{plz}$  oraz przyjmując  $r = R - e$ . Wtedy prędkość umownego poślizgu (po warstewce zaczynu) będzie

$$v_p = \frac{e}{\eta_{plz}} \left[ \frac{(R-e) \Delta p}{2 \Delta L} - \tau_{oz} \right] \quad (11)$$

Wreszcie gdy transport jest sumą efektów poślizgu i płynięcia plastycznego masy (rys. 4), to rozkład prędkości w przekroju rurociągu w wypadku czystego poślizgu można zapisać jako

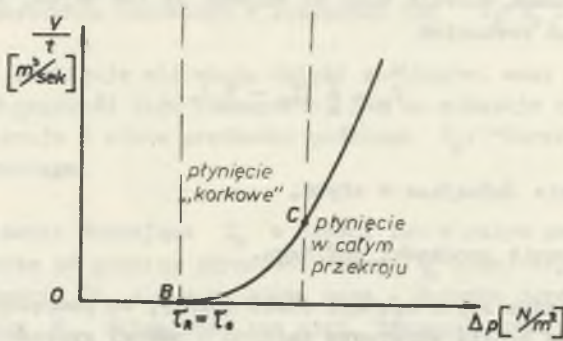
$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{\eta_{pl}} \left[ \frac{(R^2 - r^2)}{4 \Delta L} \Delta p - (R - r) \tau_o \right] + \frac{1}{k} (\tau_R - \tau_A) = \\ &= \frac{1}{\eta_{pl}} \left[ \frac{(R^2 - r^2)}{4 \Delta L} \Delta p - (R - r) \tau_o \right] + \frac{1}{k} \left( \frac{R \Delta p}{2 \Delta L} - \tau_A \right), \end{aligned} \quad (12)$$

zaś w wypadku umownego poślizgu (po warstwie zaczynu) jako

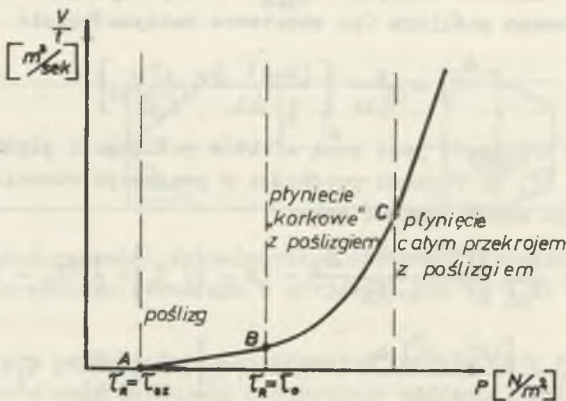
$$v = \frac{1}{\eta_{pl}} \left[ \frac{(R^2 - r^2) \Delta p}{4 \Delta L} - (R-r) \tau_0 \right] + \frac{e}{\eta_{plz}} \left[ \frac{(R - e) \Delta p}{2 \Delta L} - \tau_{oz} \right], \quad (13)$$

W równaniach (12), (13) pierwszy człon jest prędkością lepkoplastycznego płynięcia masy, zaś drugi człon, w zależności od rodzaju poślizgu, jest prędkością poślizgu czystego (12) lub umownego (13).

Graficzną interpretację omawianych przypadków transportu masy w rurociągu o średnicy  $R$  i długości  $l$  pod ciśnieniem  $\Delta p$  pokazują rys. 5 i 6.



Rys. 5. Krzywa płynięcia masy betonowej w rurociągu bez poślizgu po ścianie



Rys. 6. Krzywa płynięcia masy betonowej w rurociągu przy jednoczesnym poślizgu



## 2. Interpretacja technologiczna warunków transportu masy betonowej w rurociągu

Z analizy reologicznej warunków transportu masy betonowej w rurociągu wynika, że w określonych technicznych warunkach realizacji tego transportu (określone  $R$ ,  $L$ ,  $\Delta p$ ) możliwość i charakter jego wystąpienia zależy od wartości parametrów reologicznych masy betonowej a niekiedy i zaczynu. Chodzi tu głównie o granicę płynności  $\tau_0$  i lepkość plastyczną  $\eta_{pl}$ .

Jak wykazano w pracy [5],  $\tau_0$  jest funkcją struktury masy betonowej, przy czym jeśli stan tej struktury opisać zespołem wskaźników dyspersji zaproponowanym przez autora w pracy [5]

$$D_s = \frac{P_{dw}}{S_{ws}^k};$$

$$D_z = \frac{W}{S_{ws}^c + S_{ws}^p};$$

$$D_m = \frac{V_z}{S_s^k}.$$

gdzie:

$P_{dw}$  - porowatość właściwa dostępna dla wody,  $m^3/kg$ ,

$S_{ws}^k$  - powierzchnia właściwa statyczna stosu,  $m^2/kg$ ,

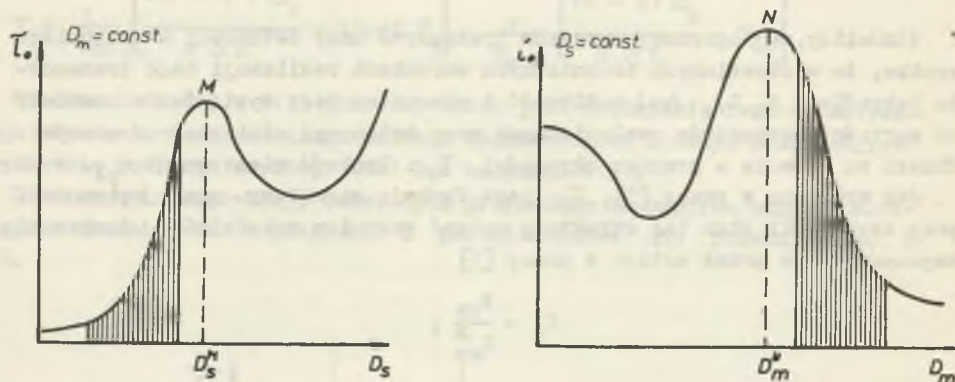
$W$  - objętość wody w  $m^3$  masy,  $m^3$ ,

$S_{ws}^c, S_{ws}^p$  - powierzchnia właściwa statyczna cementu i pyłu,  $m^2/kg$ ,

$V_z$  - objętość zaczynu w  $m^3$  masy,  $m^3$ ,

$S_s^k$  - powierzchnia statyczna stosu,  $m$ ,

zależności  $\tau_0(D_s)$  i  $\tau_0(D_m)$  będą miały charakter pokazany na rys. 7. Z krzywych tych wynikają ważne wskazówki technologiczne dla mas betonowych transportowanych rurociągiem. Przy narzuconym zwykle względami wytrzymałościowymi betonu wskaźniku  $D_z$  ( $\frac{W}{C}$  lub  $\frac{W}{C+P}$ ) należy w taki sposób kształtować strukturę betonu, by wartość  $\tau_0$  mieściła się w przedziale określonym na rysunku, tzn. aby stos okruszowy był zawsze przepełniony zaczynem, zaś wartość tego przepełnienia określana stosunkiem  $\frac{D_m}{D_s} = \varphi_{kz} > 1,3$ . Przy spełnieniu tego warunku istnieje możliwość realizacji transportu jako łącznego efektu poślizgu i płynięcia plastycznego masy. Z wykresów  $\tau_0(D_s)$  i  $\tau_0(D_m)$  wynika, że w technologicznie użytecznym przedziale zmienności wskaźników  $D_s$  i  $D_m$  ze zmniejszeniem się  $\tau_0$  płynięcie plastyczne obejmować będzie coraz większą część przekroju rury. Możliwość wystąpienia poślizgu uwarunkowana jest wartością granicy płynności zaczynu  $\tau_{Oz}$ , która jest funkcją wskaźnika dyspersji zaczynu [5]. Otóż zaczyn cementowy winien mieć taką granicę płynności, by z jednej strony nie wywoływać zbyt dużych



Rys. 7. Zależności  $\tau_0$  od wskaźnika dyspersji stosu  $D_s$  i wskaźnika masy  $D_m$  przy określonym  $D_2=0$

więzi kapilarnych w masie, zaś z drugiej strony, by nie zachodziło wyciekanie zaczynu ze stosu okruskowego czyli jego segregacja. Inaczej mówiąc, zaczyn powinien mieć taką wytrzymałość postaciową, by przenieść obciążenie gradientem ciśnienia w strefach międzyziarnowych.

Natomiast prędkość transportu a więc i jego wydajność w ustalonych warunkach ciśnienia, średnicy i długości rurociągu zależy głównie od lepkości masy  $\eta_{pl}$  i lepkości zaczynu  $\eta_{plz}$  (rys. 5 i 6). O prędkości płynięcia plastycznego masy decyduje jej lepkość, przy czym ze wzrostem  $D_m$  będzie ona malała. Prędkość poślizgu w warstwie zaczynu jest natomiast zależna od lepkości zaczynu  $\eta_{plz}$ , która maleje ze wzrostem  $D_2$ . Jak z powyższego wynika, w warunkach jednoczesnego wystąpienia poślizgu i płynięcia plastycznego masy o prędkości transportu decyduje zarówno lepkość masy  $\eta_{pl}$  jak i lepkość zaczynu  $\eta_{plz}$ . Z analizy stosowanych rozwiązań i parametrów technicznych transportu rurowego masy wynika, że w większości przypadków transport zachodzi w wyniku poślizgu rdzenia masy po ściance za pośrednictwem "smarującej" warstewki zaczynu. Poślizg bezpośredni wystąpić może jedynie, gdy dla  $\tau_0(D_s)$ ,  $D_s > D_s^M$  lub dla  $\tau_0(D_m)$ ,  $D_m < D_m^N$  (rys.7).

Za optymalną należy uznać taką strukturę masy, która przy określonych parametrach technicznych realizacji transportu zapewni uzyskanie efektów poślizgu lepkiego i płynięcia masy łącznie, bez wystąpienia segregacji. Uzyskuje się wtedy największą wydajność transportu.



## LITERATURA

- [1] Szwabowski J.: O reologii masy betonowej, cz. I. O właściwościach reologicznych masy betonowej. Arch.Inż.Łąd. z. 4 1975 PAN.
- [2] Szwabowski J.: Podstawy teoretyczne i metody pomiaru cech reologicznych masy betonowej. Inż. i Bud. nr 5/71.
- [3] Reiner M.: Deformation, strain and flow. H.K. Lewis. London 1960.
- [4] Morinaga S.: Pumpability of concrete and pumping pressure in pipelines. RILEM Sem.Proc. vol. 3 Leeds 1973.
- [5] Szwabowski J.: O reologii masy betonowej cz.II. Wpływ struktury masy betonowej na granicę jej płynności. Arch.Inż.Łąd. z. 4, 1975 PAN.

МЕХАНИЗМ ДВИЖЕНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ  
В ТРУБОВОМ ТРАНСПОРТЕ

## Р е з ю м е

В работе представлен реологический анализ условий транспорта бетонной смеси в трубопроводе. Определена технологическая интерпретация результатов анализа с использованием кривых текучести при учёте влияния структуры смеси.

MECHANISM OF MOVEMENT OF A CONCRETE MIX  
IN PIPELINES TRANSPORT

## S u m m a r y

In the paper a rheological analysis of conditions of the concrete mix transport in a pipeline has been presented. Possible cases and criteria of their occurrence for a straight part of the pipeline have been formulated. A technological interpretation of the analysis results on flow curves, taking into account the influence of the mix structure, has been given.