

ŁUKI RUROCIĄGÓW TRANSPORTU PNEUMATYCZNEGO ODPORNE NA ZUŻYCIE

S. JURA¹, Z. JURA²

¹ Politechnika Śląska, Katedra Odlewnictwa
44-100 Gliwice, ul. Towarowa 7

² Politechnika Śląska, Katedra Mechaniki Teoretycznej
44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 25

STRESZCZENIE

Przedstawiono jak można wykorzystać podstawowe badania zużycia ściernego erozyjnego według Bittera do prawidłowej konstrukcji łuków. Dzięki odpowiedniej konstrukcji można uzyskać dla tych samych materiałów nawet dziesięciokrotny wzrost trwałości łuków. Zastosowanie elementów wewnątrz łuku zwiększa trwałość wielokrotnie.

1. WPROWADZENIE

Problem techniczny zużycia ściernego maszyn i urządzeń jest jednym z podstawowych. Wykonano wiele badań, opracowano wiele wzorów określających zużycie i trwałość elementów. Metodą kolejnych przybliżeń dopracowano technologicznie szereg maszyn, których trwałość jest zadowalająca. Zadowolenie to jednak po pewnym czasie jest niewystarczające i w ten sposób rozpoczynają się ponowne poszukiwania.

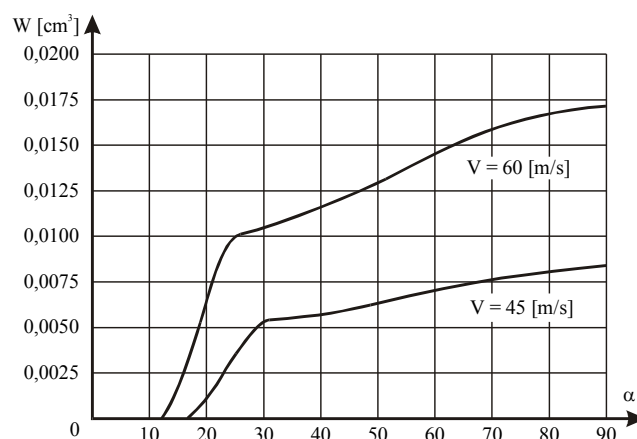
W pracy tej wykorzystano wyniki badań w Katedrze Odlewnictwa dotyczące zużycia ściernego erozyjnego. Wykorzystano teorię zużycia erozyjnego według Bittera [1] rozwijając ją w zakresie eksperymentu co doprowadziło do określenia energii zużycia ściernego i cech materiałowych decydujących o zużyciu. Wyniki tych badań przedstawiono w wielu publikacjach [2,3,4]. Dla przykładu przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych zużycia ściernego na rys. 1 i 2. Wykresy zużycia w funkcji kąta uderzenia

¹ *prof. dr hab. inż.*

² *dr inż.*

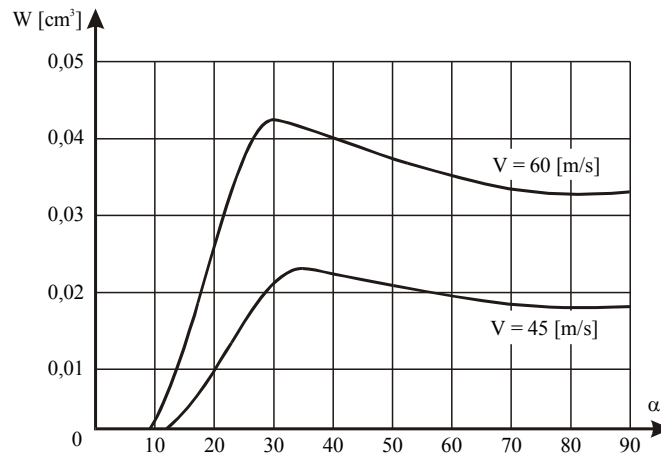
strumienia ściernego charakteryzują się kilkoma cechami. Dla niskich kątów oddziaływania nie obserwuje się zużycia. Początek zużycia rozpoczyna się od kąta α_p . Dla miękkich materiałów obserwuje się maksimum zużycia dla kąta α_o (rys. 2). Powyżej kąta α_o obserwuje się zmniejszanie zużycia ściernego dla materiałów miękkich. Mogą jednak być materiały dla których następuje wzrost zużycia, są to materiały twarde. Zużycie ściernego takiego tworzywa przedstawiono na rys.1.

Takie przedstawienie funkcji zużycia erozyjnego pozwala na opracowanie konstrukcji maszyn i elementów o najmniejszym zużyciu czyli o największej trwałości.



Rys. 1. Wykres zużycia ściernego żeliwa Z1Cr12 w funkcji kąta uderzenia strugi piasku

Fig. 1. Diagram of abrasive wear of Z1Cr12 Cast iron vs. sand stream angle



Rys. 2. Wykres zużycia ściernego stali St3S w funkcji kąta uderzenia strugi piasku

Fig. 2. Diagram of abrasive wear of St3S Cast iron vs. sand stream angle

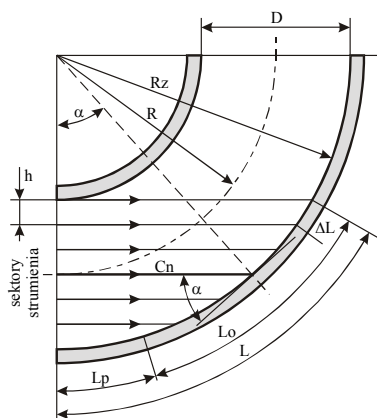
Rozwinięcie teorii zużycia ściernego wg Bittera pozwala poszukiwać najlepszych materiałów dla określonych warunków pracy urządzeń. Stąd konstruowanie maszyn i urządzeń powinno rozpoczynać się od określenia warunków pracy ich elementów. Na tej bazie należy dobierać odpowiednie materiały, a w razie trudności optymalizacyjnych należy zmienić konstrukcję dla stosowania odpowiednich materiałów.

2. ŁUKI W SYSTEMACH RUROWYCH TRANSPORTU PNEUMATYCZNGO

W systemach transportu pneumatycznego pyłów i materiałów sypkich najbardziej narażonym na zużycie są łuki. Elementy te zmieniają kierunek strumienia pyłu. Ziarna pyłu uderzają pod odpowiednim kątem o "zewnątrzną" ściankę łuku ścierając materiał z którego został zbudowany. Przyjmuje się, że o trwałości łuku decyduje materiał. Jest to oczywistą prawdą, powstaje jednak pytanie jak konstrukcja łuku wpływa na trwałość. Znając materiały oraz wykresy zużycia ściernego w funkcji kąta oddziaływania strumienia które przedstawiono na rys. 1 i 2 można podając próbę określenia wpływu konstrukcji łuku na jego trwałość.

2.1. Geometria łuku

Na rys.3 przedstawiono geometrię łuku bez uwzględnienia ewentualnych kolnierzy łączących. Przyjęto oznaczenia które są niezbędne w toku dalszych obliczeń. Parametrami tymi są: R – promień gięcia łuku, R_z – zewnętrzny promień łuku, D – średnica łuku (rurociągu), α - kąt uderzenia cząstki o zewnętrzną ściankę łuku (dla R_z), h – dzielnik średnicy D na sektory strumienia, L_p – odcinek łuku o nieistotnym zużyciu dla $\alpha < \alpha_p$ (z wykresu na rys. 1 i 2), L_o – odcinek łuku podlegający intensywnemu zużyciu ściernemu, C – połowa cięciwy łuku dla poszczególnych sektorów.

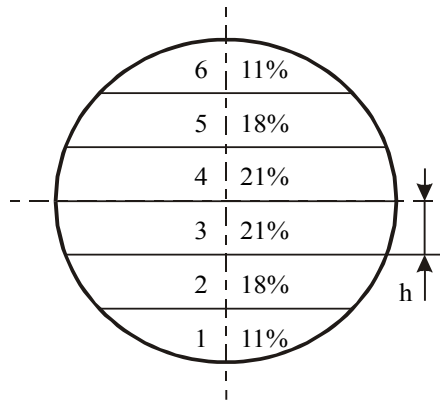


Rys. 3. Geometria i charakterystyczne parametry łuku

Fig. 3. Geometry and characteristic parameters of arc

Powierzchnie przekroju rurociągu podzielono na 6 sektorów ($n = 6$). Każdy sektor posiada powierzchnię określoną jako procent ($U\%$) całej powierzchni przekroju rurociągu.

Określenie udziału powierzchniowego U poszczególnych sektorów jest niezbędne do obliczenia zużycia ściernego. Podział przekroju rurociągu na sektory 1 – 6 oraz ich udział procentowy U [%] w stosunku do całego przekroju przedstawiono na rys.4.



Rys. 4. Podział przekroju rurociągu na sektory (h) i udział procentowy powierzchni U % dla poszczególnych sektorów

Fig. 4. Division of pipe intersection into sectors (h) and percent participation of U % surface for various sectors

Na odpowiadający odcinek łuku uderza odpowiednia procentowo masa pyłu. W badaniach doświadczalnych stosowano masę 1 kg piasku dla każdego badanego kąta określając funkcję zużycia:

$$V_D = f(\alpha) \quad [\text{cm}^3] \quad (1)$$

Dla wyznaczenia kąta α uderzenia cząstek o zewnętrzną powierzchnię łuku należy obliczyć cięciwę C dla każdego sektora według wzoru:

$$C_n = \sqrt{n \cdot h(2R_z - n \cdot h)} \quad (2)$$

Kąt α wyznaczono ze wzoru:

$$\text{tg} \alpha = \frac{C_n}{\left(R_z - nh \right)} \quad (3)$$

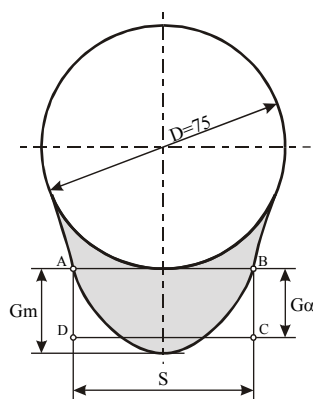
Długości łuków wyznaczono ze wzoru:

$$L = \frac{\alpha}{180} \pi \cdot R_z \quad (4)$$

Obliczenie tych wielkości jest niezbędna do określenia geometrii zużycia erozyjnego łuków oraz umiejscowienia odcinka łuku podlegającego intensywnemu zużyciu.

2.2. Zużycie erozyjne łuków

Obserwowane zużycie łuków w systemach transportu pneumatycznego jest złożone. W pierwszym etapie zużycia cząstki wylatujące z prostego rurociągu uderzają o ściankę zewnętrzną łuku. Następnie odbijają się lub ześlizgują po powierzchni zewnętrznej łuku aż do rurociągu prostego. W rurociągu prostym następuje ujednorodnienie strumienia pyłu. W praktyce obserwuje się przetarcie łuku w pobliżu wejścia strumienia. Przekrój przetartego łuku przedstawiono na rys.5. Zewnętrzny kontur rysunku to geometria zużycia. Część zużyta jest na tym rysunku zakreskowana. Dla uproszczenia obliczeń zużycia, szczególnie wyznaczenia głębokości zużycia ścianek przyjęto prostokąt zastępczy ABCD spełniający warunek, że jego powierzchnia jest zbliżona do zużytej rzeczywistej powierzchni.



Rys. 5. Geometria zużycia erozyjnego łuku o promieniu gięcia $R=1000$ mm

Fig. 5. Geometry of arc erosion wear with bend radius $R=1000$ mm

Odcinek $AB = S$ jest szerokością średnią zużycia rurociągu. Szerokość ta jak wynika z pomiarów wynosi:

$$S \cong \frac{2}{3} D \quad (5)$$

Średnia głębokość wytarcia dla każdego kąta α wynikającego z podziału sektorowego wynosi G_α . Natomiast przyjęto że maksymalna głębokość wytarcia wynosi:

$$G_m = 1,2 G_\alpha \quad (6)$$

Objętość zużycia ściernego dla każdego kąta α , dla odpowiednich sektorów wynosi:

$$V_\alpha = G_\alpha \cdot S \cdot \Delta L \quad [\text{mm}^3] \quad (7)$$

gdzie: ΔL – stanowi odcinek łuku odpowiedni dla każdego sektora. Korzystając z tego wzoru łatwo jest wyznaczyć średnią głębokość zużycia łuku odpowiadającą każdemu sektorowi. Średnią głębokość wytarcia określa wzór:

$$G_\alpha = \frac{M \cdot V_\alpha}{S \cdot \Delta L} \quad [\text{mm}] \quad (8)$$

gdzie: M – masa przetransportowanego materiału [Mg].

Dla obliczenia zużycia ściernego łuków systemów transportu pneumatycznego przyjęto następujące założenia:

- przy wlocie cząstek do łuku ich ruch jest nadal prostoliniowy aż do momentu zderzenia się z zewnętrzną ścianką (R_z)
- dalszy ruch cząstek w łuku odbywa się w sposób poślizgowy,
- na wlocie do łuku strumień pyłu jest jednorodny,
- ziarna pyłu (materiału transportowanego) nie spotykają się na powierzchni ścierniej.

3. OBLICZENIE ZUŻYCIE ŚCIERNEGO ŁUKU DLA WYBRANYCH TWORZYW

Dla obliczeń zużycia ściernego łuków przyjęto przykładowo: żeliwo chromowe (ZiCr12) oraz stal węglową (St3S). Zużycie doświadczalne dla tych tworzyw, według metody opracowanej w Katedrze Odlewnictwa, przedstawiono na rys. 1 i 2. Zależności zużycia objętościowego doświadczalnego przedstawiono w funkcji kąta:

$$V_D = f(\alpha) \quad [\text{cm}^3] \quad (9)$$

dla zakresu:

$$0 < \alpha \leq 90 \quad [\text{deg}] \quad (10)$$

Zużycie ściernie erozyjne tych stopów pojawia się od pewnego kąta:

$$\alpha_p > 0 \quad (11)$$

- wielkość tego kąta określają właściwości mechaniczne tworzywa oraz dynamika strumienia pyłu.

Wykorzystując wyniki badań doświadczalnych dla szybkości strugi 45 [m/s], wyznaczono zużycie objętościowe dla każdego kąta α odpowiadające sektorom.

Obliczenia zużycia ściernego erozyjnego przeprowadzono dla różnych łuków o następujących wymiarach konstrukcyjnych:

- łuki o średnicy $D = 100$ [mm] każdy o promieniu gięcia: $R = 500; 1000; 1500$ [mm],

- łuki o średnicy $D = 300$ [mm] każdy o promieniu gięcia: $R = 1500; 3000; 4500$ [mm].

Każdy przekrój rurociągu podzielono na 6 sektorów obliczając dla nich odpowiednie kąty zderzenia strugi.

Korzystając z wyników badań doświadczalnych obliczono zużycie ściernie objętościowe dla fragmentów łuku odpowiadających odpowiednim sektorom. Przy czym obliczano zużycie dla strumienia o masie 1000 kg i szybkości 45 [m/s]. Wzór opisujący całkowite zużycie w odpowiednim sektorze przedstawia wzór:

$$V_n = V_D \cdot U_n \cdot 1000 \quad (12)$$

Całkowitą głębokość zużycia obliczono dla rurociągu o średnicy 100 [mm], i przetransportowaniu 1 [Mg] piasku według wzoru:

$$G_\alpha = \frac{V_n}{S \cdot \Delta L} \quad (13)$$

W rurociągu o średnicy 300 [mm], i przetransportowaniu 10 [Mg] piasku według wzoru:

$$G_\alpha = \frac{10 \cdot V_n}{S \cdot \Delta L} \quad (14)$$

Pełne wyniki obliczeń zużycia ściernego łuków przedstawiono graficznie na rys. 6 i 7. Na tych rysunkach przedstawiono średnią głębokość wytarcia G_α . Na osi poziomej przedstawiono umiejscowienie tego wytarcia na długości łuku. Dla łuków o średnicy $D = 100$ [mm] zużycie to sięga, mierząc po łuku, do odległości $L = 600$ [mm]. Dla rurociągu o średnicy $D = 300$ [mm] zużycie sięga do odległości $L = 1800$ [mm]. To zestawienie graficzne porównawcze pokazuje jak stosowane materiały zmieniają zużycie ściernie. Im większy promień gięcia łuku tym mniejsze zużycie. Zwiększając łuki z 500 do 1500 [mm] zmniejsza się sumaryczne zużycie prawie dziewięciokrotnie; stosując żeliwo Z1Cr12 oraz przy zastosowaniu stali St3S zmniejsza się czterokrotnie. Podobne wyniki uzyskuje dla rurociągu $D = 300$ [mm] i o promieniach gięcia $R = 1500; 3000; 4500$ [mm]. Głębokość wytarcia dla największego promienia gięcia jest $4 \div 6$ razy mniejsza niż dla małych pro-

mieni gięcia. Przedstawione wyniki obliczeń inspirują do analiz o budowie łuków w systemach transportu pneumatycznego.

4. NOWA KONSTRUKCJA ŁUKÓW

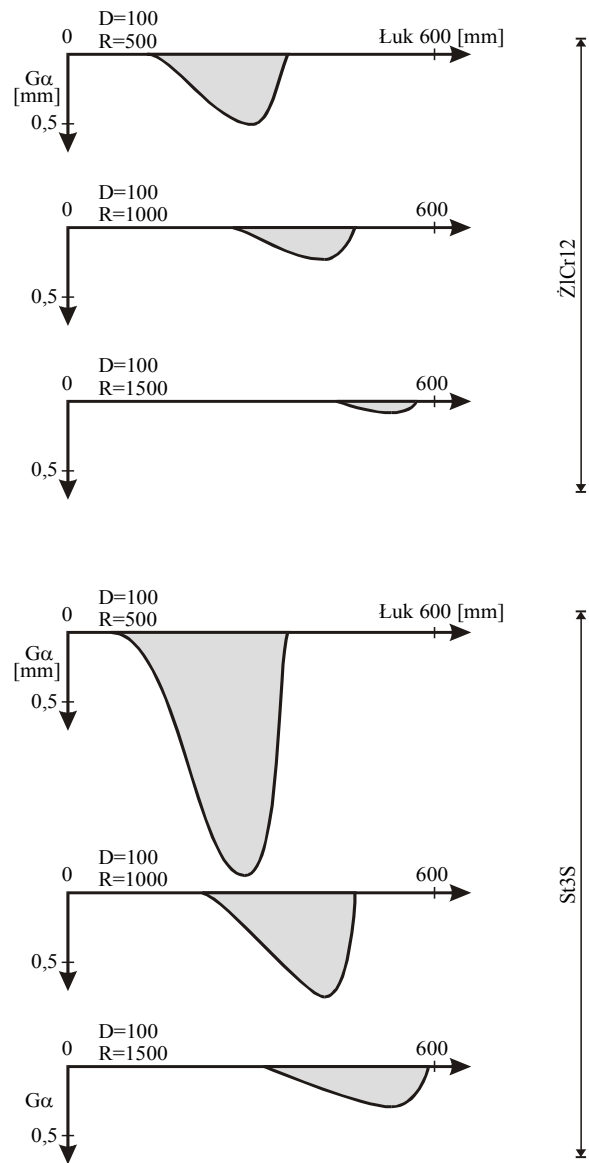
Analizując wyniki zużycia łuków transportu pneumatycznego przedstawione na rys. 6 i 7 oraz w tabeli nr 3 stwierdzić należy, że tylko pewien fragment łuku jest intensywnie ścierany. Wyliczenia te potwierdza praktyka eksploatacji systemów transportu pneumatycznego. Stwierdza się, że dalsza część łuku, za obszarem intensywnego ścierania, nie jest nieznacznie zużywana. Obserwuje się czasem zużycie prostego odcinka rurociągu wynikające z odbicia strugi. Być może, że jest to związane z geometrią połączenia i niedokładnością montażu. Zjawisko to musi być nadal obserwowane i analizowane.

Przetarcie rurociągu powoduje wstrzymanie dalszej eksploatacji linii transportowej. Wymienia się przetarty łuk w całości. Na podstawie przedstawionych wyników zużycia taki tok postępowania wydaje się niewłaściwy. Łuki w systemach transportu pneumatycznego wykonuje się jako zbrojone wewnątrz wkładkami ze stopów odpornych na zużycie ściernie. Tak wykonane łuki są drogie co znacznie podwyższa koszt eksploatacji systemów transportowych.

W nowych konstrukcjach lub wymienionych należałoby łuki dzielić na część intensywnie zużywaną i część końcową łuku. Odcinek L łuku można łatwo wyliczyć według przedstawionego schematu. Odcinek ten należy nieznacznie powiększyć (ok. 10 ÷ 20 %) tak aby stanowiła podziałkę łuku na odcinki określone podziałką kątową np. 15; 30; 45 [deg]. Sposób rozwiązania takiej konstrukcji łuków przedstawiono na rys. 8 i 9.

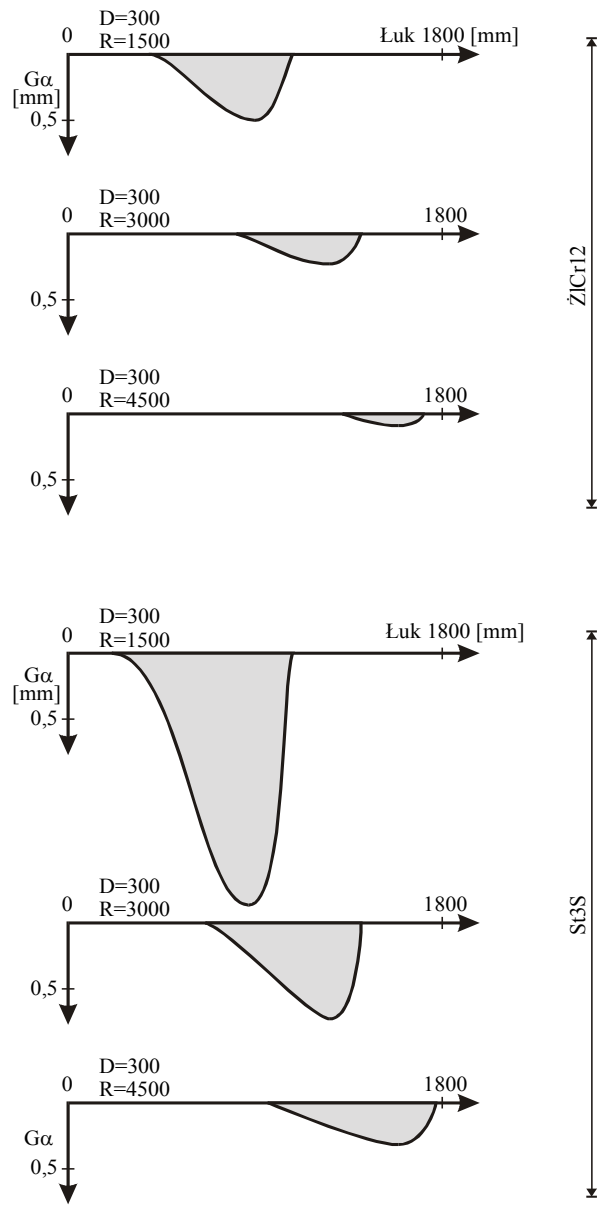
Jak widać z tych rysunków odcinki dalsze łuku mogą być konstruowane o mniejszym promieniu a tym samym będą krótsze. Tak więc nowy łuk dwupromieniowy może być znacznie krótszy a tym samym tańszy. Odcinek AB należy konstruować o dużym promieniu gięcia. Następne odcinki BC mogą być konstruowane o znacznie mniejszym promieniu gięcia.

Stosując rozwiązanie AC przedstawione na rys.9 zmniejsza się zużycie całkowite 3,5 razy dla żeliwa Cr12 i 2,1 razy dla stali St3S w porównaniu do łuku przedstawionego na rys.8. Stosując proponowane rozwiązania konstrukcyjne można znacznie zwiększać trwałość łuków w systemach transportu pneumatycznego pyłów.

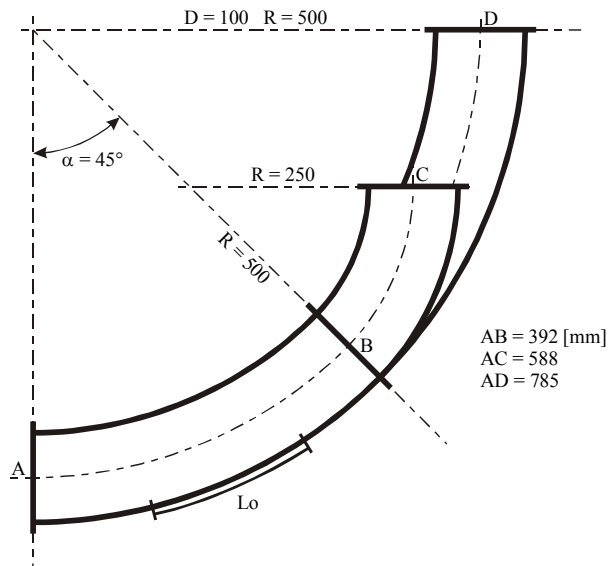


Rys. 6. Graficzne przedstawienie wyników zużycia ściernego łuków o średnicy $D=100$ [mm] wykonanych z żeliwa i stali

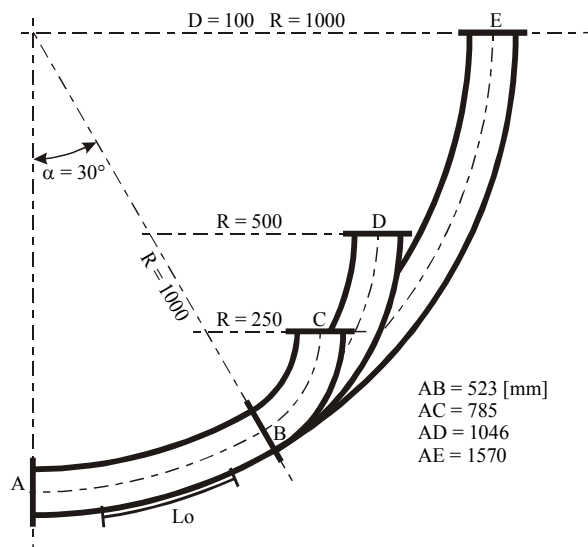
Fig. 6. Graphical representation of arcs' abrasive wear with diameter $D=100$ [mm] made of cast iron and steel



Rys. 7. Graficzne przedstawienie wyników zużycia ściernego łuków o średnicy $D=300$ [mm] wykonanych z żeliwa i stali
 Fig. 7. Graphical representation of arcs' abrasive wear with diameter $D=300$ [mm] made of cast iron and steel



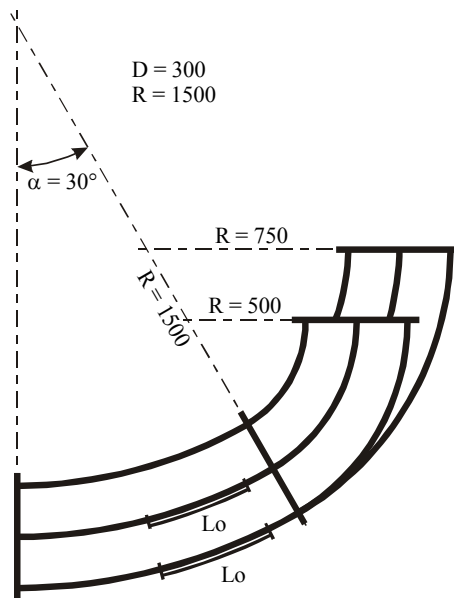
Rys. 8. Konstrukcja łuku systemów transportu pneumatycznego o dwóch promieniach gięcia
 Fig. 8. Arc construction of pneumatic conveying systems with two bend radiuses



Rys. 9. Konstrukcja łuku systemów transportu pneumatycznego o dwóch promieniach gięcia
 Fig. 9. Arc construction of pneumatic conveying systems with two bend radiuses

5. ŁUKI Z PRZEGRODĄ WEWNĘTRZNĄ

Łuki o dużych średnicach powyżej 200 [mm] można konstruować z przegrodą wewnętrzną rys. 10. Jednym ze sposobów jest umieszczenie przegrody wzdłuż osi łuku. Taka konstrukcja rozdziela strumień masy na dwie części. Jeżeli przyjąć że strumień jest jednorodny na całym przekroju rurociągu to w łuku zostanie rozdzielony na dwie części. Jedna część będzie ścierać zewnętrzną ściankę łuku a druga przegrodę wewnętrzną. Wyniki obliczeń zużycia przedstawiono na rys. 11. Na rysunku tym przedstawiono łuk o dwóch promieniach gięcia. Odcinki intensywnie ścierane na łuku zewnętrznym oraz na przegrodzie zaznaczono podwójną linią.

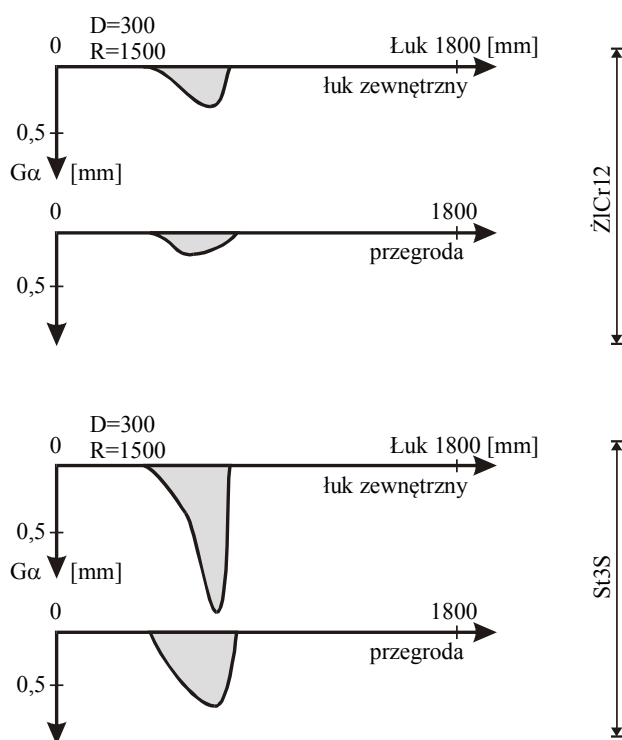


Rys. 10. Konstrukcja łuku systemu transportu pneumatycznego z przegrodą wewnętrzną o dwóch promieniach gięcia

Fig. 10. Arc's construction pneumatic conveying system with internal partition with two bend radiuses

Ogólnie można by było stwierdzić, że zużycie całkowite będzie takie same jak dla łuku bez przegrody. Wykorzystując teorię zużycia ściernego erozyjnego i obliczając zużycie, okazuje się za sumaryczne zużycie dla tego rozwiązania jest dwukrotnie mniejsze. Dla żeliwa chromowego zużycie wynosi 18000 [mm³], natomiast dla stali St3S wynosi 88100 [mm³]. Wyniki obliczeń zużycia dla łuku bez przegrody wynoszą odpowiednio 45100 [mm³] i 154640 [mm³].

Wyniki obliczeń również przedstawiono graficznie na rys.11. Analizując te wykresy można zaobserwować znacznie mniejsze zużycie dla łuków z przegrodą. Stosowanie więc tego typu rozwiązań przynosi znaczne efekty eksploatacyjne systemów transportu pneumatycznego. Dodatkowo zwiększony efekt trwałości uzyskuje się przy niesymetrycznym umieszczeniu przegrody.



Rys. 11. Graficzne przedstawienie zużycia ściernego łuku o średnicy $D=300$ [mm] o promieniu gięcia $R=1500$ [mm] z zainstalowaną przegrodą wewnętrzną

Fig. 11. Graphical presentation of arc abrasive wear with diameter $D=300$ [mm] and bend radius $R=1500$ [mm] with internal partition inside.

6. PODSUMOWANIE

W Katedrze Odlewnictwa Politechniki Śląskiej opracowano i przebadano wiele stopów odpornych na zużycie. Dzięki rozwinięciu teorii Bittera określono funkcję zużycia ściernego erozyjnego dla całego zakresu kątów od 0 do 90 [deg]. Znajomość takiej funkcji pozwala na optymalną konstrukcję elementów urządzeń i maszyn dla wybranego tworzywa. Równocześnie znajomość procesu oddziaływania cząstek (ciał) na elementy urządzeń pozwala na optymalizację konstrukcji. Zastosowanie tych rozwiązań do konstrukcji łuków transportu pneumatycznego pozwala zwiększyć trwałość tych systemów. Zwiększenie promienia gięcia łuków zwiększa znacznie ich trwałość – nawet dziesięciokrotnie. Dla obniżenia kosztów wytwarzania tego rodzaju łuków należy zastosować dwa lub trzy różne promienie gięcia co znacznie zmniejsza ich długość, a tym samym zmniejsza koszt wytwarzania.

Stosując przegrody wewnątrz łuku zmniejsza się zużycie, czyli zwiększa trwałość rurociągów. Stosując prawidłową konstrukcję łuków można wielokrotnie zwiększyć trwałość a dobierając odpowiednie materiały odporne na ścieranie korzyści te znacznie się zwiększają.

LITERATURA

- [1] BITTER I.: *A study of erosion phenomena*, Wear 6, 1968.
- [2] JURA S., STUDNICKI A.: *Badania porównawcze zużycia erozyjnego niektórych stopów żelaza*. Krzepnięcie Metali i Stopów, nr 34, 1997.
- [3] JURA S., SUCHOŃ J.: *Zużycie erozyjne stopów żelaza jedno i wielofazowych*. Krzepnięcie Metali i Stopów, nr 34, 1997.
- [4] JURA S.: *Zasady doboru tworzyw odlewniczych odpornych na ścieranie*. Krzepnięcie Metali i Stopów, nr 34, 1997.

ARCS OF PNEUMATIC CONVEYING WITH WEAR RESISTANCE

SUMMARY

In this paper we present the possibilities of application of investigations on abrasive wear by Bitter for the correct arcs' construction. The increase of arcs durability – even ten times – can be obtained by using the proper construction. The application of elements inside the arc increases a durability repeatedly.

Recenzował: prof. dr hab. inż. Adam Gierek