

Politechnika Wrocławska

Zbigniew Lawrowski

Bezobsługowe łożyska ślizgowe

Wrocław 2001

Książka zawiera informacje o łożyskach ślizgowych nie wymagających dozoru smarowniczego, a zatem bezobsługowych. Jej treść skoncentrowana jest na materiałach samosmarownych, stanowiących istotę takich łożysk. Podaje się też wskazówki konstrukcyjne dotyczące łożysk z tych materiałów. Książka może być użyteczna dla konstruktorów i eksploatorów maszyn a także dla studentów Wydziałów Mechanicznych Politechnik.

Opiniodawca
Wiesław ZWIERZYCKI

Opracowanie redakcyjne

Korekta

Tytuł jest dotowany przez Komitet Badań Naukowych w ramach projektu badawczego nr 7 T07C 026 17 oraz dofinansowany przez Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

ISBN

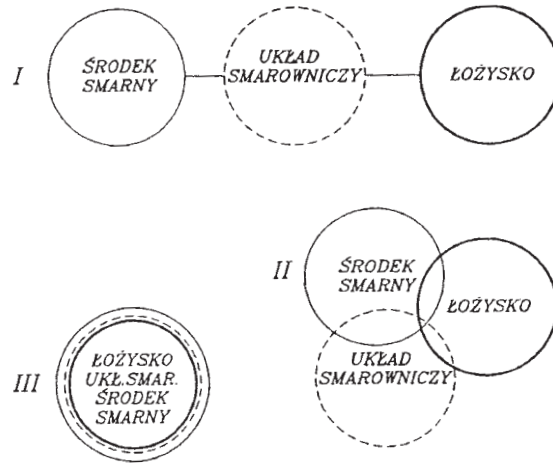
1. WPROWADZENIE

1.1. DEFINICJE

„Ślizgowe łożysko bezobsługowe” (ang. *service-free bearing* a także *self-lubricating bearing*, niem. *wartungsfreies Gleitlager* a także *selbstschmierendes Gleitlager*, ros. *samosmazuwajuščijsja podšipnik skolženia*) to nazwa łożyska nie wymagającego obsługi smarowniczej. Jest to zatem łożysko bez konwencjonalnego smarowania, tj. bez doprowadzania środka smarnego z zewnątrz układu czop–panew. W łożyskach takich środek smarny zawarty jest w obrębie tego układu, np. w ściance panwi albo w jej warstwie wierzchniej.

Jak widać, synonimem nazwy „łożysko bezobsługowe” jest nazwa „łożysko samo-smarowne”, która wiąże się z tzw. dozorem smarowniczym. Ze względu na sposób zapewnienia dostawy środka smarnego do szczeliny smarowej łożyska, rozróżniamy łożyska z dozorem, z ograniczonym dozorem i bez dozoru smarowniczego. Te ostatnie są oczywiście łożyskami bezobsługowymi. Jeśli środek smarny jest wprowadzany do szczeliny smarowej łożyska z zewnątrz, to mówimy o łożysku z dozorem smarowniczym. Niezależnie od tego, czy smarowanie jest ręczne czy automatyczne. Jeśli do łożyska nie trzeba doprowadzać środka smarnego, lub tylko ewentualnie trzeba go okresowo uzupełniać, to mówimy o takich łożyskach: w pierwszym wypadku – „bez dozoru” w drugim zaś wypadku – „z ograniczonym dozorem”. Trzeba przy tym wyraźnie podkreślić, że chodzi tu o środek smarny w samym łożysku, tj. w obrębie zespołu czopa i panwi. Określenia te nie obejmują zatem łożysk smarowanych konwencjonalnie, nawet jeśli środek smarny jest zawarty w obudowie łożyska, np. w łożyskach smarowanych pierścieniem.

Na rysunku 1 przedstawiono za [6] schematy łożysk ślizgowych według opisanego wyżej podziału, a na rysunku 2 przykłady łożysk wymienionych grup.



Rys. 1. Podział łożysk ślizgowych ze względu na dozór smarowniczy: I – łożyska smarowane konwencjonalnie (łożyska z dozorem), II – układ smarowniczy i środek smarny znajdują się w obrębie zespołu czop-panew, III – układ smarowniczy i środek smarny są zespolone w panwi (lub na czopie); II i III są łożyskami bez dozoru smarowniczego, bezobsługowymi

MODEL	czop i panew rozdzielone warstwa smaru dostarczanego z zewnątrz	smar umieszczony w materiale panwi (lub czopa)	panew z materiału samo-smarującego (ms), panew lub czop pokryte ms
SCHEMAT	I	II	III
TARCIE	płynne mieszane	mieszane, wewnętrzne (w smarach stałych)	wewnętrzne (w smarach stałych) suche techn..
PRZYKŁADY	 <i>smarowanie pierścieniowe</i> <i>smarowanie ciśnieniowe</i>	 <i>pormety</i> <i>Glacier DX</i>	 <i>smarujące tworzywa szt., węgielgrafit</i>

Rys. 2. Przykłady łożysk z grup wymienionych na rys. 1

1.2. GENEZA

Zapoczątkowany w połowie XX wieku niezwykle szybki rozwój ślizgowych łożysk bezobsługowych, nie wymagających ani układu smarowniczego, ani też obsługi (dozoru), wynikał z rozwoju elektroniki, motoryzacji oraz maszyn lekkich (papierniczych, spożywczych, gospodarstwa domowego itp.). Stawiano wymagania prostej budowy łożysk, ich łatwego montażu i demontażu, niebrudzenia otoczenia i – przede wszystkim – minimalnych zabiegów obsługowych.

Pierwszymi łożyskami bezobsługowymi, które na szeroką skalę weszły do użytku, były pormety (spiekane tulejki żelazne lub brązowe), nasycone olejem. Z czasem do grupy samosmarnych materiałów, z których wykonuje się łożyska bezobsługowe, dołączyły polimery i ich kompozyty. Te właśnie materiały są obecnie powszechnie stosowane w budowie łożysk bezobsługowych.

1.3. OBSZARY ZASTOSOWAŃ ŁOŻYSK BEZOBSŁUGOWYCH ORAZ PRZEGLĄD MATERIAŁÓW SAMOSMAROWNYCH

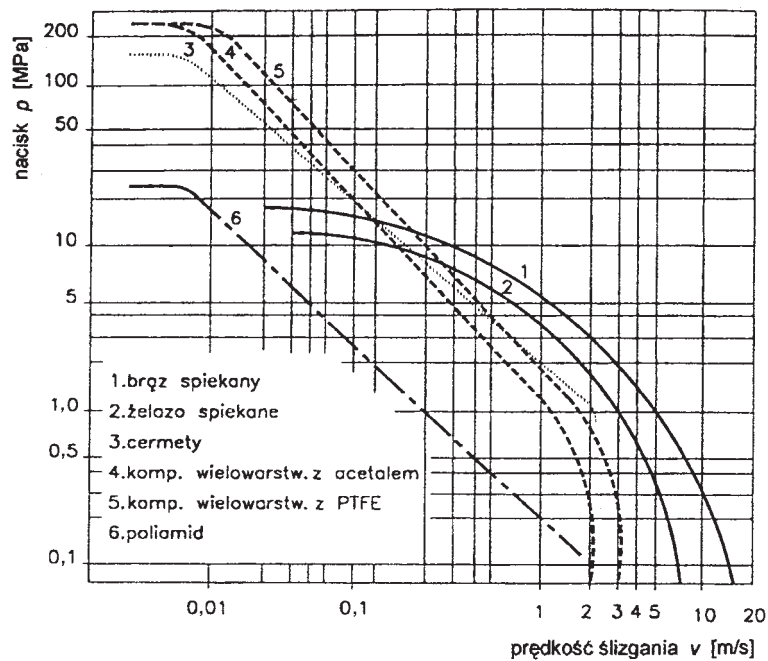
Rozpowszechnienie łożysk bezobsługowych i ich dalszy rozwój związane są z ich właściwościami. Obszary zastosowań tych łożysk można sklasyfikować następująco:

- węzły maszynowe, w których nie może być stosowane smarowanie konwencjonalne ze względu na jego nieefektywność, np. w otoczeniu o niskich lub wysokich temperaturach, próżni, w środowisku chemicznie aktywnym itp.,
- w maszynach i urządzeniach, w których smarowanie konwencjonalne może zabrudzić wytwór, np. w maszynach przemysłu spożywczego, papierniczego, włókienniczego i podobnych,
- w wypadkach, gdy obsługa smarownicza jest niemożliwa, trudna lub wątpliwa, a także gdy jest ona nieopłacalna.

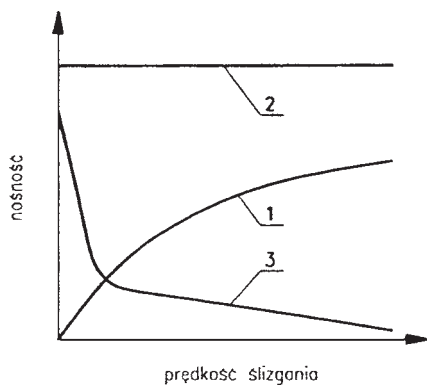
Właściwości bezobsługowych łożysk ślizgowych zależą od właściwości samosmarownych materiałów ich panwi. Są one charakteryzowane obciążalnością, zazwyczaj ograniczoną przez dopuszczalną temperaturę, a czasem intensywnością zużycia. Dodatkowo właściwości te są charakteryzowane maksymalną temperaturą pracy łożyska, wartościami współczynnika tarcia (zazwyczaj o stal), odpornością na czynniki chemiczne i inne.

Na rysunku 3 pokazano przykładowe tzw. krzywe graniczne określające obszary dopuszczalnych obciążeń i prędkości typowych materiałów stosowanych na panwie łożysk bezobsługowych. Jak widać z tego wykresu, możliwe obszary zastosowań łożysk bezobsługowych zawierają się w granicach małych i średnich prędkości ślizgania. Im mniejsza ta prędkość, tym większe jest możliwe obciążenie łożyska. Zilustrowano to na rys. 4, na którym schematycznie podano zarówno krzywą graniczną łożyska bezobsługowego, jak i przebiegi nośności łożyska smarowanego hydrodynamicznie oraz

hydrostatycznie. Warto zwrócić uwagę, że wyodrębniająca się grupa łożysk bezobsługowych ma zastosowanie specjalne, do określonych celów: stanowią one doskonałe uzupełnienie łożysk smarowanych konwencjonalnie, szczególnie łożysk hydrodynamicznych w okresie ich rozruchu.

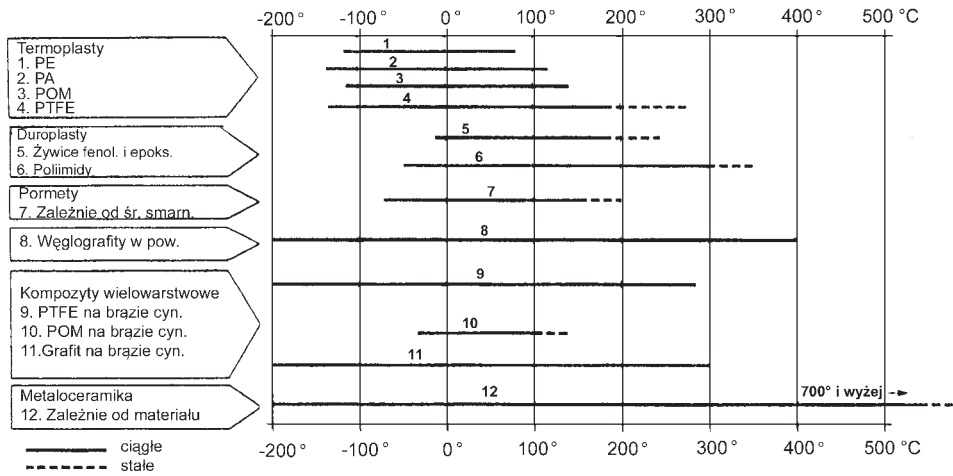


Rys. 3. Krzywe graniczne (nośności w funkcji prędkości ślizgania) dla różnych materiałów samosmarownych [1]

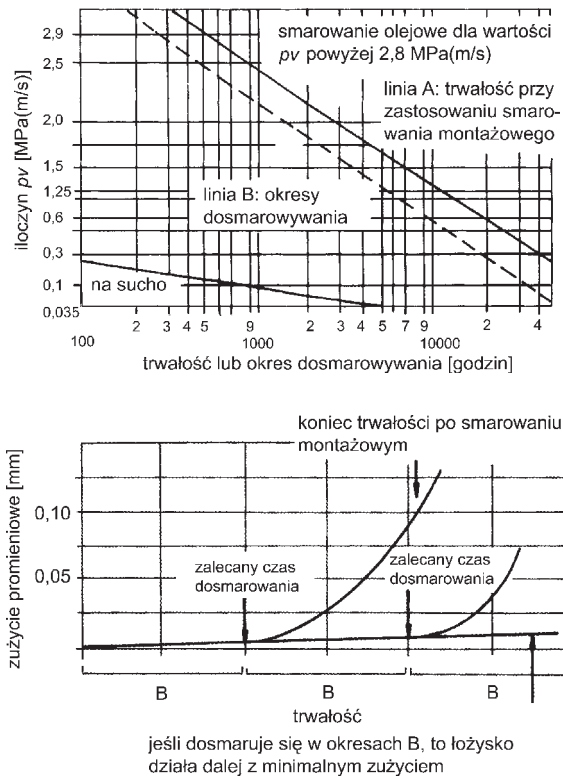


Rys. 4. Schemat zależności nośności łożysk ślizgowych od prędkości ślizgania; 1 – łożysko hydrodynamiczne, 2 – łożysko hydrostatyczne, 3 – łożysko bezobsługowe

W wielu wypadkach o zastosowaniu materiałów na łożyska bezobsługowe może decydować ciepło tarcia. Na rysunku 5 podano dopuszczalne wartości temperatury dla typowych materiałów na łożyska bezobsługowe. Z zestawienia widać, że pod wzglę-



Rys. 5. Dopuszczalne wartości temperatury dla różnych materiałów na łożyska bezobsługowe [1]



Rys. 6. Trwałość łożyska z panwiami z kompozytów wielowarstwowych *Glacier DX* w zależności od iloczynu p_v oraz warunków smarowania [9]

Tabela 1. Zestawienie ważniejszych własności niektórych materiałów na łożyska bezobsługowe [1]

Materiał	Pomety nasycone olejem		Polimery		Kompozyty polimerowe		Węgiel-grafit
	żelazne	brązowe	poliamid	poliimid	z warstwą ślizgową		
					PTFE+wypeł.	acetal+wypeł.	
Wytrzymałość na nacisk [MPa]	80÷180		70	110	250	250	100÷200
Dopuszczalna prędkość ślizgania [m/s]	15	20 (30)	2	2 (3)	2	3	10
Dopuszczalny nacisk p [MPa]	1÷4 (10)		do 25	do 15	20÷50	20÷50	do 50
Max. wartość iloczynu p·v [MPa·(m/s)]	20		0,05	0,20	1,5÷2,0		0,4÷1,8
Dopuszczalna temp. (chwilowa) [°C]	-60÷180 (200)		-130÷100 (120)	-50÷250 (300)	-200÷280	-40÷100 (130)	-200÷350 (500)
Współczynnik tarcia po stali (bez smarowania)	0,04÷0,12 (bez dodatkowego smarowania)		0,20÷0,35	0,07÷0,15	0,08÷0,25	0,07÷0,20	0,10÷0,25
Przewodność cieplna [W/(m·K)]	20÷40		0,3	0,4÷1,0	46	2	10÷65
Wymagany luz bieżkowy [% średnicy wału]	0,05÷0,15		0,5÷1,0		0,1÷0,5		0,3÷0,5
Wymagany stan powierzchni wału	szlifowana Rz ~ 1 μm		ciężniona, szlifowana Rz < 1÷4 μm		szlifowana (ciężn.) Rz < 1÷2 μm	szlifowana ciążniona Rz < 2÷3 μm	szlifowana Rz < 1 μm
Dokładność bieżkowania	bardzo duża		średnia	duża	duża	średnia	średnia
Odporność na naciski krawędziowe	zła		dobra		średnia	dobra	zła

dem odporności cieplnej mamy już duży wybór takich materiałów. Jednakże, oczywiście, nie jest to jedynym kryterium wyboru materiału na łożysko bezobsługowe. Do sprawy tej wrócimy na końcu książki.

Istotną charakterystyką łożysk bezobsługowych jest ich trwałość. Jest ona mierzona zazwyczaj liczbą godzin pracy łożyska do osiągnięcia stanu niezdatności. Trwałość zależy od intensywności zużywania materiału panwi, a intensywność zużywania od warunków pracy łożyska, przede wszystkim od obciążenia i prędkości poślizgu. Na rysunku 6 podano przykładowo zależność trwałości łożyska z panwiami z kompozytów wielowarstwowych (będzie o nich mowa w dalszym tekście) od iloczynu $p v$ oraz warunków smarowania.

Uzupełnieniem ogólnych informacji o materiałach na łożyska bezobsługowe jest tabela 1, w której podano informacje o istotniejszych ich własnościach.

2. POROWATE ŁOŻYSKA SPIEKANE (PORMETY)

2.1. ROZWÓJ (wg [4])

Rozwój i przemysłowe zastosowanie porowatych łożysk spiekanych datuje się od lat trzydziestych XX wieku. Obfitość patentów na takie łożyska i powiększenie obszaru ich zastosowań przypada zaś na lata powojenne, tj. na lata pięćdziesiąte i sześćdziesiąte.

Jednakże geneza tych łożysk łączy się z początkami i rozwojem metalurgii proszków. Pierwszy patent dotyczący łożysk produkowanych z proszków metalowych uzyskał w roku 1870 Gwynn. Z proszku cyny otrzymanego przez piłowanie oraz dodatku pozostałości po destylacji ropy naftowej prasowano kształtki, o których pisano, że mogą pracować przy dużych obciążeniach, nawet bez smarowania.

Prasowanie i spiekanie, a więc prototyp technologii współczesnych łożysk porowatych opatentowano i wdrożono w początkach XX wieku (lata 1909–1916, Löwendahl, Gilson, Hannover i inni). Stosowano przeważnie proszki miedzi i cyny, bądź ich tlenków redukowanych grafitem. Ciekawe rozwiązanie zaproponował w roku 1916 Rich: wytwarzanie łożysk samosmarownych przez pokrywanie ziarn grafitu ołowiem i mieszanie ich ze stopionym babilitem. Ten model odbiega oczywiście od „klasycznego” pormetu, tj. spieku porowatego.

Lata dwudzieste i trzydzieste ubiegłego wieku to intensywny rozwój nowych postaci i technologii porowatych łożysk spiekanych. Jako podstawowy materiał przeważa jeszcze miedź, lecz już w latach trzydziestych odnotowuje się pierwsze próby zastosowania porowatych łożysk żelaznych (z niskowęglowej stali) i żelazno-grafitowych (Koprživ – dawny Związek Radziecki, Kramer – Niemcy, Short i Koehring – Wielka Brytania i in.). Prace nad pormetami żelaznymi trwały nieprzerwanie przez okres wojny, a po wojnie zostały jeszcze zintensyfikowane. Powstały dziesiątki nowych patentów na technologię samosmarownych łożysk porowatych.

W latach powojennych wykryły się dwa gatunki porowatych łożysk spiekanych: brązowe, oparte na mieszaninie miedzi i cyny, przeważnie z dodatkiem grafitu, oraz żelazne z dodatkiem lub bez dodatku grafitu. W tym okresie badano najskuteczniejszą porowatość tych łożysk oraz udoskonalano szczegóły ich budowy, np. przez wprowadzenie dodatkowych wewnętrznych zbiorniczków na olej (Patton, 1950 r.), dodanie dwusiarczku molibdenu (Bowden, 1950 r.), nasycenie porów policzterofluoro-

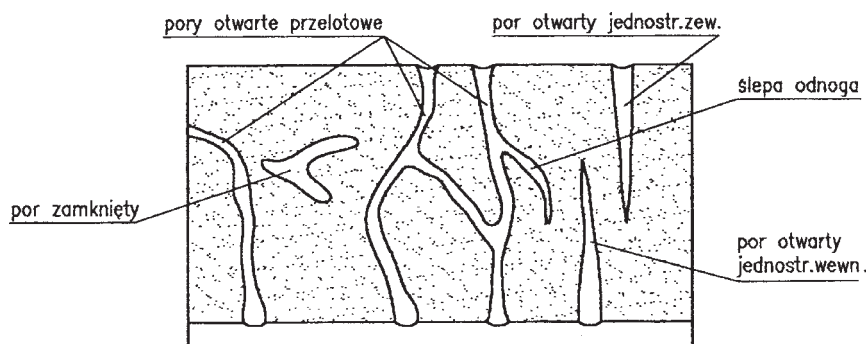
etylenem (Blainey, Ricklin, Miller, 1954–1955) i inne. Notabene ten ostatni sposób modyfikacji pormetów stał u podłoża współczesnych kompozytów warstwowych wypełnianych firmy Glacier oraz im podobnych. O tych kompozytach będzie mowa w dalszych rozdziałach.

2.2. BUDOWA I DZIAŁANIE PORMETÓW

Pormety swoją strukturą przypominają gąbkę: w ściance tulejki (dlaczego używa się wyłącznie tulejek, zobaczymy na końcu tego podrozdziału) znajdują się pory, stanowiące kanaliki włoskowate. Porowatość struktury pormetów uzyskuje się w procesie technologicznym prasowania odpowiednich proszków, a następnie spiekania wypraski w odpowiedniej temperaturze, w atmosferze ochronnej (zazwyczaj wodoru), dla uniknięcia utleniania ziaren proszku a w wypadku dodatku grafitu także zapobieżenia jego wypalaniu. W celu zwiększenia porowatości spieków stosuje się niekiedy substancje (np. lotne chlorki, azotan amonu, stearyniany i inne), które ułatwiają się w procesie technologicznym zwiększają liczbę kanalików włoskowatych.

W produkcji łożysk porowatych zazwyczaj wystarcza tzw. porowatość naturalna, uzyskiwana w procesie prasowania i spiekania proszku, bez specjalnych dodatków porotwórczych. Szczegóły dotyczące technologii łożysk spiekanych można znaleźć w podstawowym dziele [4].

Cechą szczególną pormetów jest porowatość, tj. zawartość porów w całej objętości spieku. Rozróżnia się porowatość: całkowitą (objętość wszystkich porów), czynną albo otwartą (dostępną dla oleju) oraz bierną albo zamkniętą (nieдоступną dla oleju). Znaczenie dla pormetu jako łożyska ma oczywiście porowatość otwarta. Na rysunku 7 pokazano schemat kształtu porów. Optymalna (ze względu na zawartość oleju w porach oraz ze względu na wytrzymałość materiału) porowatość czynna łożysk spiekanych wynosi od 20% do 30%.



Rys. 7. Schemat kształtu porów

Pormet staje się łożyskiem samosmarownym w chwili nasycenia go środkiem smarowym, zazwyczaj olejem. Nasycanie (impregnacja) olejem odbywa się albo przez zanurzenie w odpowiednio długim czasie tulejki w gorącym oleju, albo metodą próżniową, w której wypompowuje się w odpowiedniej komorze powietrze, po czym doprowadza olej.

Przyrównanie pometu do gąbki jest słuszne w wypadku nasycania próżniowego. W obydwóch wypadkach sprawcą wejścia oleju do porów jest podciśnienie. Natomiast przy nasycaniu w gorącym oleju mamy do czynienia przede wszystkim z działaniem sił kapilarnych w naczyniach włoskowatych, jakimi są pory.

Szczególną cechą tribologiczną łożysk porowatych, stanowiącą o ich szerokim stosowaniu, jest samosmarowność dzięki zapasowi oleju w porach. Podczas pracy łożyska olej z porów wypływa do szczeliny smarowej, powodując odpowiedni proces smarowania. Ze względu na ograniczoną ilość oleju oraz ze względu na przepuszczalność ścianki – tarcie w łożyskach z pometów jest zazwyczaj mieszane, z dużym udziałem tarcia płynnego. W szczególnych wypadkach może w nich zachodzić także tarcie płynne (np. przy niewielkich obciążeniach, większych prędkościach i odpowiednio dobranym oleju) [18].

Mechanizm wypływu oleju z porowatej ścianki opiera się głównie na różnicy rozszerzalności cieplnej oleju i metalowego szkieletu tulejki. Na początku ruchu (przy zimnym łożysku) pewną rolę gra również odkształcenie sprężyste materiału tulejki pod wpływem nacisku czopa, powodując wyciskanie oleju z porów (analogia do gąbki!).

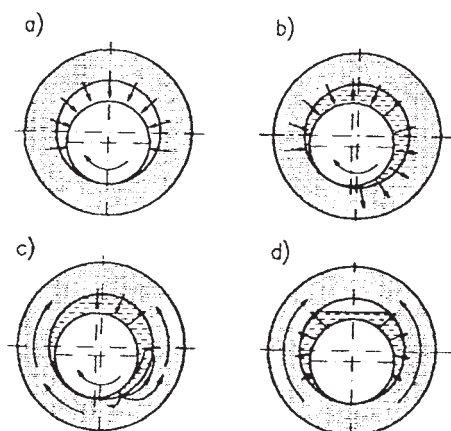
Dla sprawdzenia ilości oleju wypływającego z porów wykonano pomiary [18], które wykazały, że ilość ta całkowicie wystarcza do wypełnienia szczeliny smarowej, a nawet przewyższa jej objętość. W związku z tym wysunięto hipotezę, że dodatkową i to nie małą rolę odgrywają tu poduszki powietrzne, powstałe podczas nasycania pometu w ślepych odnogach porów.

Wskutek ruchu czopa w obecności oleju w szczelinie smarowej powstaje ciśnienie hydrodynamiczne, które w następnej fazie ruchu zmienia całkowicie mechanizm smarowania. W obszarze wysokich ciśnień olej jest wtłaczany z powrotem do ścianki porowatej, przepływa przez nią i w obszarze niskich ciśnień wypływa z porów znów do szczeliny smarowej. Na rysunku 8 pokazano schemat samosmarowania łożyska porowatego.

Aż do chwili ustalenia się równowagi cieplnej łożyska działa równocześnie wpływ termiczny, tj. wypływ spowodowany różnicą rozszerzalności cieplnej oleju i metalu. Z chwilą osiągnięcia równowagi cieplnej przy danym obciążeniu łożyska i prędkości obrotowej czopa istnieje już tylko ciśnieniowa cyrkulacja oleju w obrębie szczeliny smarowa – ścianka porowata – szczelina smarowa.

Po zmniejszeniu obciążenia łożyska oraz po zatrzymaniu czopa następuje resorpcja oleju do porów wskutek ochłodzenia szkieletu metalowego i medium.

Na rysunku 8 pokazano schemat opisanego samosmarowania łożyska porowatego.



Rys. 8. Schemat samosmarowania porotów; a – rozruch, b – ruch, termiczny wypływ oleju + ciśnieniowe krążenie, c – stan równowagi cieplnej – krążenie ciśnieniowe, d – postój, wyrównawczy przepływ oleju w ścianie łożyska porowatego

2.3. WŁAŚCIWOŚCI RUCHOWE

2.3.1. NOŚNOŚĆ

Nośność tradycyjnego, nieporowatego łożyska ślizgowego w zakresie najbezpieczniejszym, tj. przy tarcu płynnym, jest funkcją parametrów ruchowych (p, v), konstrukcyjnych (luz łożyskowy, lepkość oleju) i technologicznych (stan współpracujących powierzchni).

W łożysku porowatym na nośność dodatkowo wpływają:

- ograniczona ilość oleju i prędkość jego obiegu,
- zmniejszenie wyporu hydrodynamicznego wskutek połączenia przestrzeni szczeliny smarowej poprzez pory i ich ujścia w czołach tulei z atmosferą, a także poprzez połączenie obszaru wysokich ciśnień w szczelinie smarowej z obszarem ciśnień niskich.

Nośność łożysk porowatych, tj. takiego obciążenia, przy którym może ono jeszcze bezpiecznie pracować, można określić za pomocą badań doświadczalnych oraz drogą analizy teoretycznej.

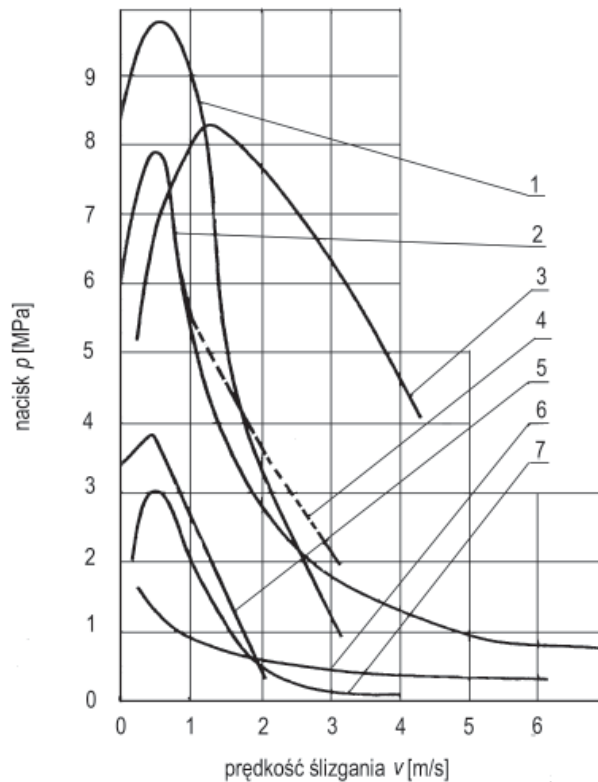
Badania doświadczalne były i nadal są prowadzone na szeroką skalę. Zazwyczaj określa się dopuszczalne obciążenia dla danych prędkości poślizgu. Niestety przyjmuje się przy tym różne kryteria granicznych obciążeń, co oczywiście znacznie ogranicza zarówno porównywalność, jak i wiarygodność danych. Często takimi kryteriami są graniczna temperatura łożyska lub graniczne zużycie. Kryterium cieplne jest bardziej od-

powiednie ze względu na starzenie oleju, a przede wszystkim ze względu na niebezpieczeństwo bezpowrotnej jego utraty wskutek wypływu przez czoła tulejki. Zazwyczaj ogranicza się temperaturę łożyska porowatego do 60 °C, w wyjątkowych wypadkach do 80 °C.

Na rysunku 9 pokazano przykładowe krzywe zależności nośności od prędkości obwodowej, zwane często „krzywymi granicznymi”, pochodzące z różnych badań.

Na wykresach tych zwracają uwagę: duża rozbieżność wyników (w skrajnych wypadkach, przy małych prędkościach, wynosząca jak 1:5), gwałtowny spadek nośności przy zwiększanej prędkości oraz zmniejszająca się nośność przy bardzo małych prędkościach.

Duża rozbieżność wyników pochodzi nie tylko z przyjmowania różnych kryteriów granicznych, ale także z różnych warunków badań. Gwałtowny spadek nośności ze wzrostem prędkości wynika z ograniczonej ilości oleju w porach, a przez to ograniczonej możliwości chłodzenia łożyska. Wreszcie, zmniejszająca się nośność przy małych



Rys. 9. Krzywe graniczne według: 1 – firmy „Glissa” (Szwecja), 2 – Belaka (Czechy), 3 – Bleicherta (Niemcy), 4 – Rakovskiego (Rosja), 5 – Hummela (Niemcy), 6 – firmy „Ferrolit” (Szwecja), 7 – badania własne

prędkościach jest wynikiem przewagi kryterium „awaryjnego” nad kryterium „cieplnym”: przy małych prędkościach ilość ciepła jest zbyt mała dla wydzielania się dostatecznej ilości oleju z porów, występuje tarcie mieszane z dużym udziałem tarcia suchego, co grozi awaryjnym zużyciem (np. adhezyjnym).

Zarówno przedstawione przykładowe wyniki badań jak i praktyka przemysłowa wskazują, że porowate łożyska spiekane samosmarowne stanowią doskonałe uzupełnienie tradycyjnych łożysk (nieporowatych) smarowanych konwencjonalnie, pracujących przy tarcia płynnym. Pormety – ze względu na nośność – mają swoje miejsce w budowie maszyn, szczególnie przy małych prędkościach poślizgu. W tych warunkach, jak wiadomo, często trudno uzyskać wystarczający wypór w łożyskach smarowanych hydrodynamicznie.

Analizy teoretyczne dotyczące nośności pormetów w warunkach tarcia płynnego prowadzono już od lat sześćdziesiątych XX wieku. Jakkolwiek są one obarczone wieloma uproszczeniami, interesujące są ich wyniki. Wskazują one bowiem na tendencje i możliwości sterowania nośnością pormetów. W pracy [20] przeprowadzono syntezę wspomnianych analiz. Wynika z niej, że:

1. Nośność łożysk porowatych jest zależna od współczynnika konstrukcyjnego o postaci

$$II = k \frac{\Phi}{(R - r)^3}, \quad (1)$$

gdzie: k jest współczynnikiem zależnym od stosunków wymiarów łożyska, F współczynnikiem przepuszczalności pormetu, R promieniem panwi, r promieniem czopa.

Dla danych wymiarów tulejki łożyskowej (promienia i grubości ścianki) liczba Sommerfelda ($So = p\psi^2/\eta\omega$) będzie zależna od tego współczynnika oraz od mimośrodowości względnej

$$So = f(II, \varepsilon). \quad (2)$$

Ze wzrostem II nośność dla danej mimośrodowości maleje, co jest oczywiste, ponieważ czynnik ten jest wprost proporcjonalny do przepuszczalności. Luz łożyskowy wpływa na wielkość łuku na obwodzie łożyska pozostającego pod ciśnieniem hydrodynamicznym oleju (przy zwiększonym luzie zmniejsza się obszar ciśnieniowy), a tym samym na wartość II .

Zależność $So = f(II, \varepsilon)$ można nazwać warunkiem tarcia płynnego dla łożysk porowatych. Przy założonej chropowatości powierzchni roboczych, wymiarach tulejki i czopa oraz przepuszczalności i przy określonych parametrach ruchowych (p, ω) można tak dobrać olej (tj. jego lepkość η), aby uzyskać co najmniej równość $p\psi^2/\eta\omega = So(II, \varepsilon)$.

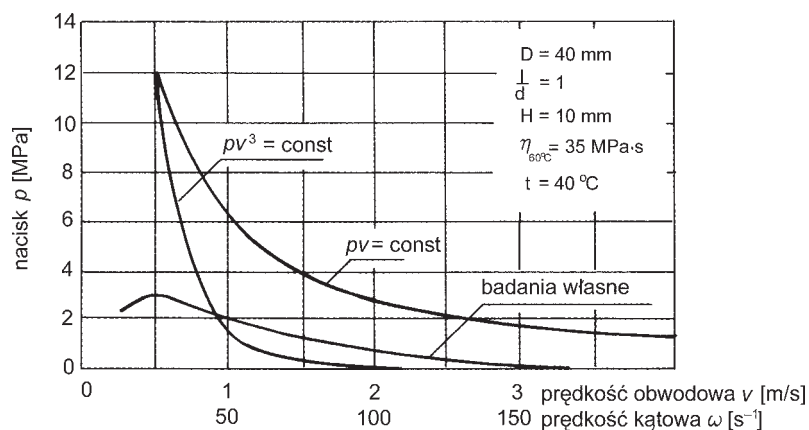
2. Dobór oleju wymaga znajomości temperatury roboczej łożyska ze względu na zmianę lepkości ze zmianą temperatury, w związku z czym, rozważając nośność łoży-

ska porowatego, należy uwzględnić także warunek równowagi cieplnej łożyska. Przy tarcu płynnym w łożysku nieporowatym współczynnik tarcia jest zależny od mimośrodowości czopa w panwi. W łożyskach porowatych na wielkość tę ma dodatkowo wpływ czynnik II . Ze zwiększaniem II współczynnik tarcia rośnie. Jest to oczywiste, jeśli uwzględnić, że liczba Sommerfelda – przy równej mimośrodowości – jest mniejsza dla łożysk porowatych niż dla monolitów (co wynika z przytoczonych rozważań teoretycznych).

Podane wyżej wyniki analiz teoretycznych są – niestety – trudne do wykorzystania w praktyce inżynierskiej: w konstrukcji i eksploatacji maszyn i urządzeń. Dlatego w dalszym ciągu prowadzi się badania doświadczalne, których wyniki podano przykładowo na rys. 9.

Bezpośrednie porównanie danych z teorii z danymi doświadczalnymi jest – niestety – trudne ze względu na różne układy, w jakich rozpatruje się łożyska porowate w teorii i praktyce. Teoria zajmuje się przede wszystkim zmianą nośności przy zmianie parametru porowatości II , podczas gdy dla praktyki przy ustalonej wartości II ważna jest zmiana nośności przy zmianie prędkości ślizgania.

Na wykresie pokazanym na rys. 10 przedstawiono próbę porównania wyników badań nad żelaznymi łożyskami porowatymi przeprowadzonych przez autora z danymi z teorii. Przeprowadzono ją na zasadach podanych niżej.



Rys. 10. Porównanie wartości teoretycznych nośności z danymi doświadczalnymi

Przebieg krzywej nośności jest warunkowany stanem cieplnym łożyska. Jeśli przyjmując stałą lepkość oleju w warunkach granicznych, to z bilansu cieplnego można wyprowadzić równanie

$$pv = \frac{\alpha A \Delta t}{\mu dl} = \frac{K}{\mu}, \quad (3)$$

gdzie: A jest chłodzoną, zewnętrzną powierzchnią łożyska, Δt przyrostem jego temperatury, d i l zaś są wymiarami łożyska.

Dalej można pójść dwiema drogami: albo przyjąć stałą średnią wartość współczynnika tarcia μ dla obliczeń wstępnych, albo też podstawiać odpowiednie wartości μ , które zależą przy tarcu płynnym od parametru S_o .

Na rysunku 10 podano:

– krzywą graniczną typu $p\nu = \text{const} = 6 \text{ MPa(m/s)}$ dla łożyska badanego przez autora, lecz zbudowaną na podstawie danych z teorii;

– krzywą $p\nu^3 = \text{const}$, którą zbudowano z uwzględnieniem zależności współczynnika tarcia od liczby Sommerfelda S_o ;

– krzywą graniczną z badań własnych.

Jak widać z tego porównania, krzywe graniczne określone doświadczalnie przebiegają poniżej krzywych teoretycznych. Jedynie krzywa $p\nu^3$ przy większych prędkościach daje niższe wartości dopuszczalnych nacisków niż krzywa doświadczalna. O ile przy większych prędkościach i małych naciskach przebiegi krzywych są stosunkowo zgodne, co świadczyłoby o różnicy tylko w wartościach a nie w funkcji, o tyle w zakresie małych prędkości i większych nacisków (większe wartości S_o) krzywa doświadczalna wyraźnie odchyła się od wszystkich krzywych teoretycznych. Świadczy to o pracy łożyska w tym obszarze przy tarcu mieszanym. Fakt ten został potwierdzony pomiarami oporu elektrycznego między czopem i panwią podczas badań prowadzonych przez autora.

Tendencja możliwie prostego określania dopuszczalnego obciążenia samosmarownych łożysk z pometów za pomocą funkcji hiperbolicznych typu $p\nu$ powoduje stosunkowo duże odchylenia od realnych możliwości tych łożysk. Na przykład zalecana przez jedną z wytwórni [10] wartość $p\nu = 1,8 \text{ MPa(m/s)}$ jest zgodna tylko w dość wąskim zakresie prędkości ($\nu = 1\text{--}2 \text{ m/s}$) z wynikami badań. Natomiast poza tym zakresem dopuszczalne naciski są o wiele niższe niż wynikałoby to z podanej wartości tej funkcji. Może to być szczególnie niebezpieczne dla obszaru bardzo małych prędkości, przy których nie wydziela się wystarczająca ilość oleju z porów, występuje – jak już wspomiano – tarcie mieszane i może nastąpić zatarcie łożyska, a w najlepszym wypadku jego intensywne zużywanie. W tej sytuacji najlepszą radą jest korzystanie z wykresów $p\text{--}\nu$ sporządzonych na podstawie badań doświadczalnych.

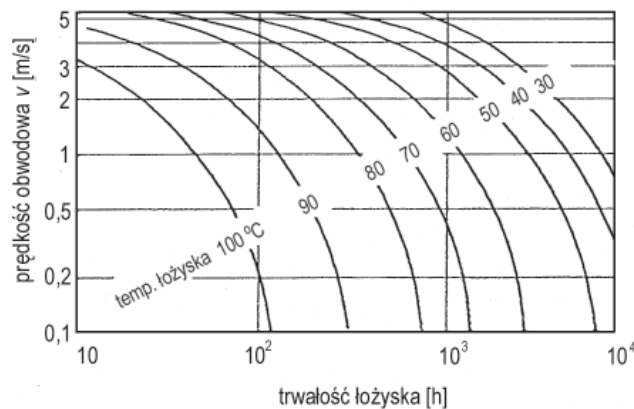
2.3.2. TRWAŁOŚĆ

Trwałość zespołów tribologicznych określana jest zazwyczaj granicznym zużyciem ich elementów. W wypadku samosmarownych łożysk porowatych rzecz ma się inaczej. Łożyska te osiągają niezdatność wtedy, gdy wyczerpie się ich zdolność smarownicza. Może to nastąpić albo wskutek wycieku oleju na zewnątrz łożyska (przy zbyt wysokiej temperaturze), albo wskutek odparowania oleju. Tej drugiej okoliczności sprzyja ciąg powietrza obmywającego łożysko, np. w wentylatorze (tzw. efekt wentylacyjny). Pogorszenie pracy łożyska z pometu może być także spowodowane starzeniem się oleju.

Starzenie oleju jest w pormetach przyspieszane katalitycznym oddziaływaniem metalu na rozległych powierzchniach porów.

Przed wyciekaniem oleju przez czoła tulejki oraz przed jego nadmiernym odparowywaniem zabezpiecza się ograniczeniem temperatury roboczej łożyska. Jak już wspomiano, graniczną temperaturą łożysk z pormetów przy ich samosmarowaniu jest 60 °C do 80 °C, zależnie od lepkości oleju stosowanego do ich nasycania. Temperatura łożyska jest związana z iloczynem pv , określającym natężenie pracy łożyska, a więc i wpływającym na jego bilans cieplny. Łożyska pracujące poniżej krzywych granicznych, o których była mowa w poprzednim podrozdziale, powinny w normalnych warunkach (tj. bez efektu wentylacyjnego) pracować co najmniej 1000 godzin. Po tym czasie, lub co roku, zaleca się uzupełniać olej w porach przez dosycenie pometu. Starzeniu się oleju w pormetach zapobiega się stosując odpowiednie dodatki uszlachetniające [21].

Na rysunku 11 pokazano zależność trwałości łożysk porowatych od prędkości obwodowej czopa oraz od temperatury łożyska.



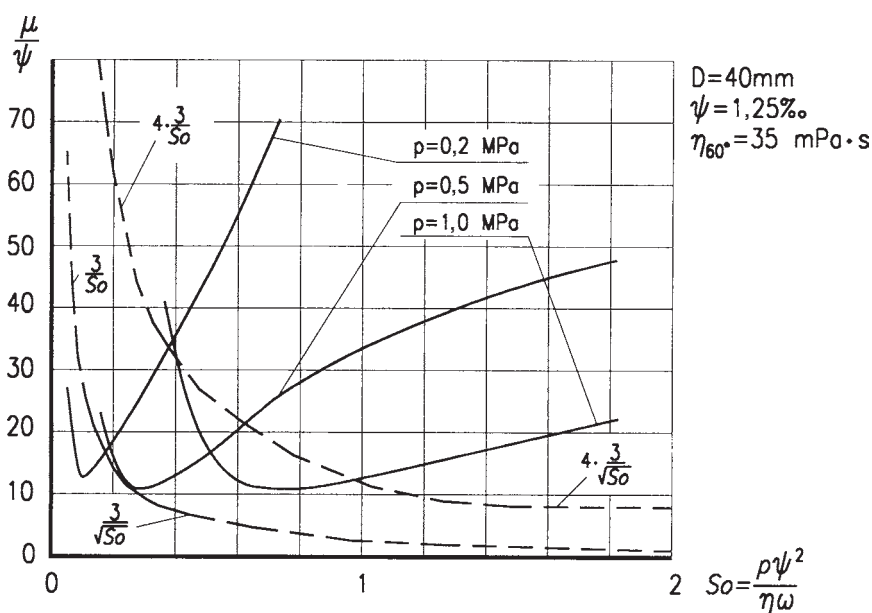
Rys. 11. Trwałość łożysk porowatych: okresy koniecznego uzupełnienia oleju w porach [21]
(Według: M.J. Neale, *Tribology Handbook*; za zgodą wyd. Butterworth Heinemann)

2.3.3. TARCIE

Tarcie w łożysku powoduje straty energetyczne i jest przyczyną jego zużycia. Te skutki tarcia łagodzi się – jak wiadomo – za pomocą smarowania. Warunki samosmarowania pormetów (ograniczona ilość oleju w porach, zależność ilości oleju w szczelinie smarowej od ciepła tarcia) ograniczają znacznie obszar występowania w nich najbezpieczniejszego rodzaju tarcia – tarcia płynnego. Pracują więc one zazwyczaj przy tarcii mieszanym, co oczywiście wywołuje określone straty, o których jest mowa wyżej. Pociągające jest jednak to, że współczesne pormety mają tak dobrany olej oraz tak okre-

ślone krzywe graniczne, że jeśli już występuje tarcie mieszane, to jest w nim duży udział tarcia płynnego. Co oczywiście łagodzi skutki tarcia.

Na rysunku 12 podano przykładowo zmierzone wartości współczynnika tarcia oraz – dla porównania – przebieg wartości tego współczynnika dla łożyska nieporowatego (dolna krzywa) oraz powiększonego w stosunku $S_o/S_{o\text{por}} \approx 4$ współczynnika tarcia (wartość proponowana w rozważaniach teoretycznych nad warunkami tarcia płynnego w pormetach) dla pometu. Założono przy tym wartość mimośrodowości względnej $\varepsilon = 0,96$.



Rys. 12. Porównanie wartości teoretycznych współczynnika tarcia z danymi doświadczalnymi

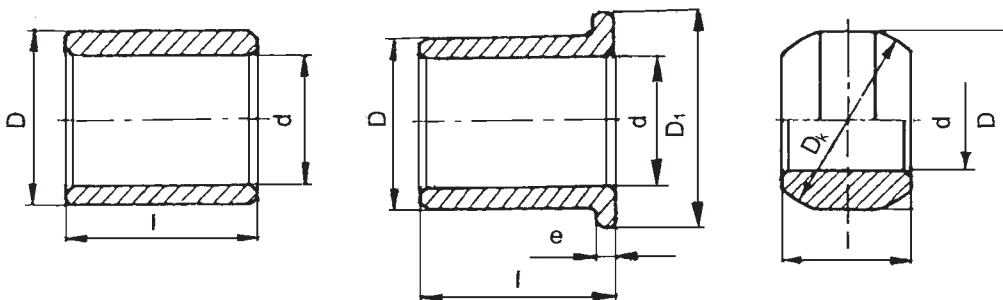
Na wykresie widać wyraźnie, że przy małych wartościach S_o (w danym wypadku – przy większych wartościach prędkości) wartości doświadczalne współczynnika tarcia mieszczą się w paśmie pomiędzy obydwiema krzywymi teoretycznymi. Natomiast przy większych wartościach S_o współczynnik tarcia gwałtownie rośnie. Świadczy to o tym, że łożysko pracuje przy tarcu mieszanym, prawdopodobnie z dużym udziałem tarcia suchego. Trzeba także zwrócić uwagę na to, że przy większych obciążeniach współczynnik tarcia maleje. Mniejsze wartości współczynnika tarcia przy stałym obciążeniu i dużych prędkościach oraz przy stałej prędkości i dużym obciążeniu należy przypisać zwiększonemu wpływowi oleju z porów wskutek zwiększonego ciepła tarcia.

Polepszenie warunków smarowania, a przez to zmniejszenie tarcia oraz zwiększenie trwałości łożysk z pometów można osiągnąć przez smarowanie uzupełniające, o którym będzie mowa w dalszym tekście.

2.4. KONSTRUKCJA WĘZŁÓW ŁOŻYSKOWYCH

Jak już wspomniano wcześniej, pormety na łożyska ślizgowe stosuje się wyłącznie w postaci tulejek. Ma to uzasadnienie w opisywanym mechanizmie samosmarowania.

Rodzaje łożysk porowatych podane są w normach (patrz wykaz Polskich Norm na końcu książki), a szczegółowe informacje o nich podają katalogi firmowe, np. [10], [12]. Na rysunku 13 pokazano najczęściej stosowane rodzaje łożysk porowatych.



Rys. 13. Podstawowe postacie łożysk porowatych: a – tuleja prosta, b – tuleja z kołnierzem, c – tuleja baryłkowa

Łożyska porowate są dostarczane w postaci gotowej do montażu: tulejki są kalibrowane obustronnie, z odpowiednimi tolerancjami, łożyska baryłkowe mają kalibrowany i tolerowany otwór wewnętrzny. Wytwórcie łożysk porowatych podają zazwyczaj informacje dotyczące zarówno rodzajów i wymiarów produkowanych łożysk porowatych, jak i tolerancji, sposobów montażu itp. Tulejki są zazwyczaj wciskane w obudowę, natomiast łożyska baryłkowe (samonastawne) są dociskane pokrywami.

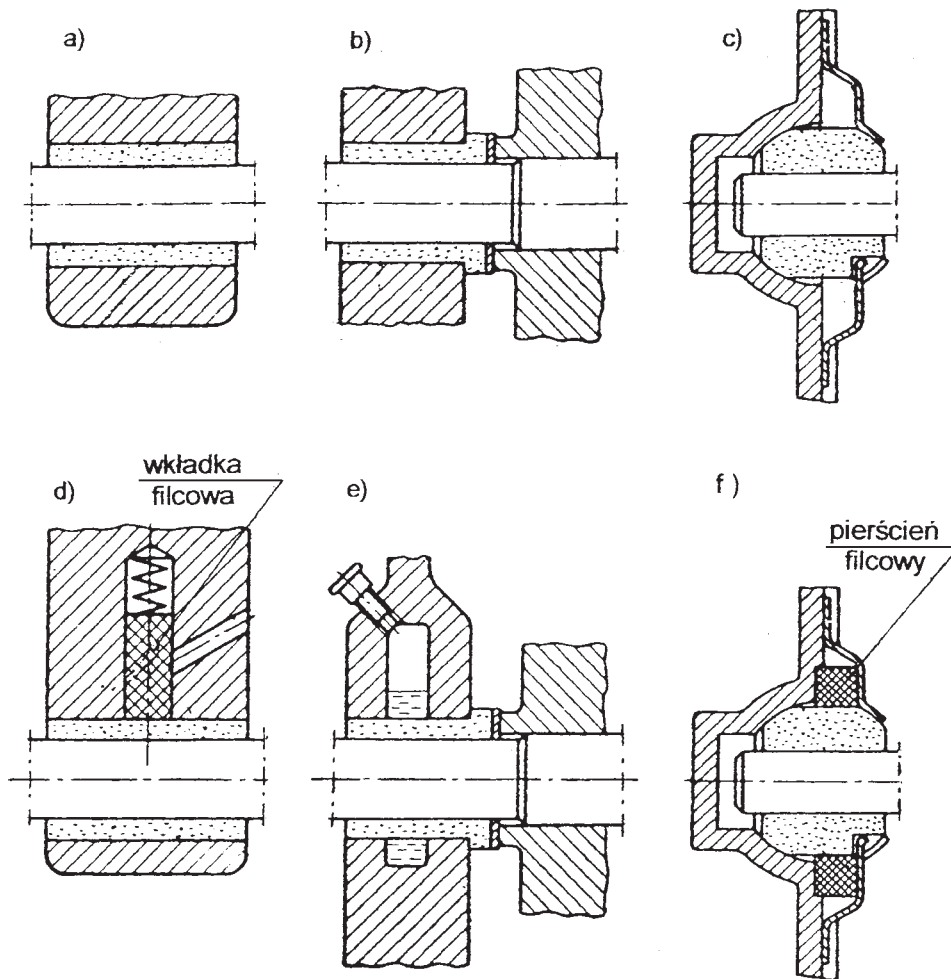
Na rysunku 14 pokazano przykłady wbudowania łożysk z pormetów.

Montaż tulei prostych i tulei z kołnierzem polega na ich wtlaczaniu w otwór obudowy. Stosuje się zazwyczaj połączenie lekko wtlaczane, korzystając z informacji firmowych co do tolerancji wykonania tulejek. Powinien on odbywać się przy użyciu tulei i trzpienia prowadzącego. Pokazano to na rys. 15.

Po wciśnięciu tulei zmniejsza się średnica wewnętrzna łożyska. Według [10] zmniejszenie to wynosi w przybliżeniu:

- dla tulei o grubości ścianki < 2 mm = wartości zmniejszenia średnicy zewnętrznej,
- dla tulei o grubości ścianki od 2 do 5 mm = około połowy wartości zmniejszenia się średnicy zewnętrznej,
- dla tulei o grubości ścianki > 5 mm – zmiana wynosi mniej niż połowę zmiany średnicy zewnętrznej.

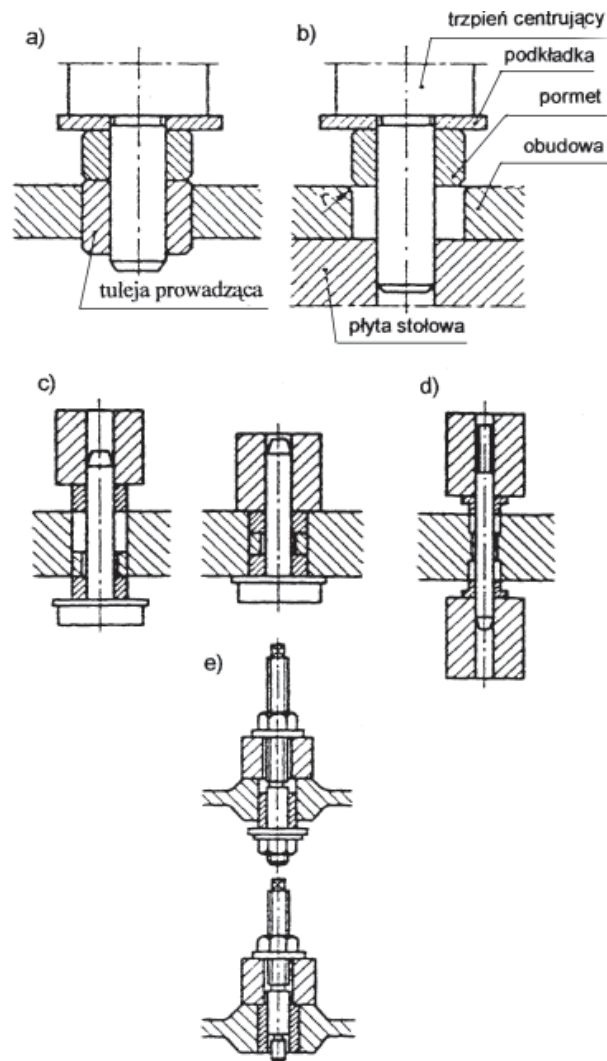
Jeśli się stosuje obudowę cienkościenną lub ze stopów aluminium albo cynkowych, to średnica wewnętrzna tulei pozostaje praktycznie bez zmiany.



Rys. 14. Przykłady wbudowania łożysk z pometów; a – tulejka prosta wciśnięta w obudowę, b – tulejka z kołnierzem wciśnięta w obudowę, c – tulejka baryłkowa ustalana w obudowie przy pomocy pokrywy, d, e, f – łożyska ze smarowaniem uzupełniającym [4]

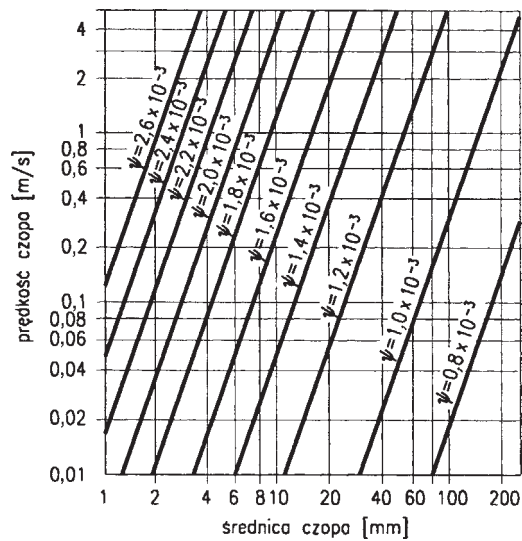
Ponieważ te dane są przybliżone, więc zaleca się – szczególnie przy seryjnej produkcji odpowiedzialnych zespołów łożyskowych – sprawdzenie rzeczywistego wymiaru średnicy wewnętrznej wciśniętej tulei.

Wielkość **luzu łożyskowego** w układach z tulejami z pometów ma – w stosunku do łożysk z panwiami litymi – poszerzone znaczenie. Chodzi o cyrkulację oleju podczas samosmarowania. Ogólnie biorąc, podobnie jak w łożyskach z panwiami litymi – luz łożyskowy powinien być zwiększany dla zwiększających się prędkości obwodowych. W wypadku pometów zwiększanie luzu – w określonych granicach – sprzyja zwięks-



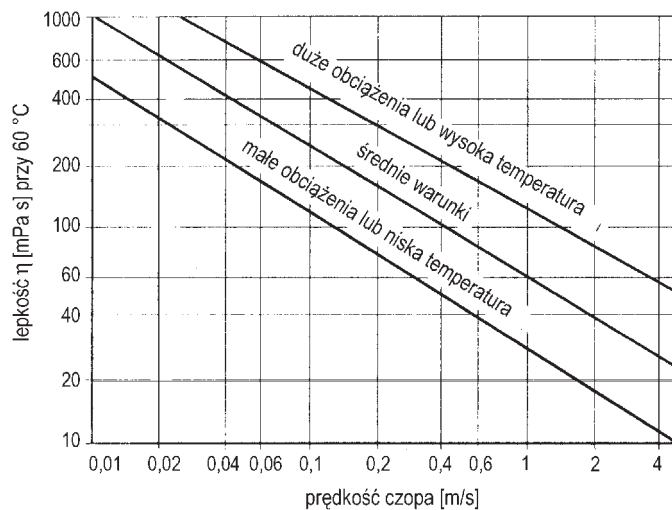
Rys. 15. Przykłady wciskania tulei porowatej do obudowy; a – wciskanie jednej tulei za pomocą tulei prowadzącej i trzpienia prowadzącego, b – wciskanie jednej tulei za pomocą trzpienia prowadzącego, c – wciskanie dwóch tulei za pomocą jednego trzpienia, d – wciskanie dwóch tulei kołnierzowych za pomocą jednego trzpienia, e – wciskanie tulei za pomocą specjalnego przyrządu [10]

szeniu obciążalności łożyska [18] dzięki zwiększonej ilości oleju w szczelinie smarowej. Ponadto należy mieć na uwadze, że pod wpływem ciepła tarcia luz łożyskowy się zmienia. Z drugiej strony, jeśli wymagane jest dokładne prowadzenie czopa lub cichobieżność – wymagane jest stosowanie zmniejszonych luzów. Na rysunku 16 podano – w postaci wykresu – zalecane wartości przeciętnych luzów łożyskowych.

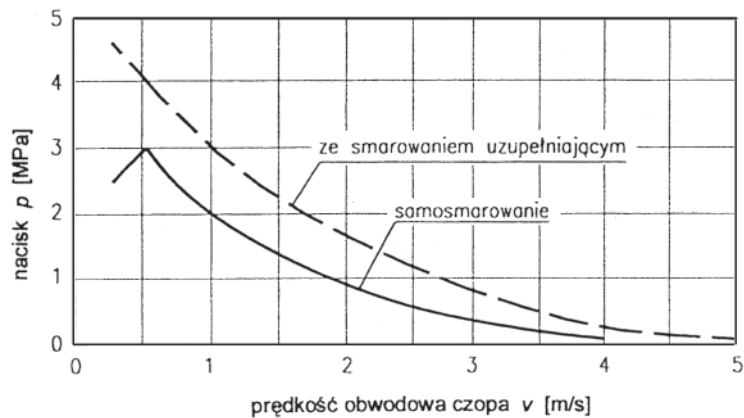


Rys. 16. Wartości luzów łożyskowych, wg [24];
 $\psi = L/d$ – luz względny (L – luz średnicowy)

Czopy wałów współpracujące z pometami, wykonywane ze stali węglowej, powinny mieć chropowatość w przedziale: $R_a = 0,3\text{--}0,8 \mu\text{m}$, a ich twardość, dla przeciętnych obciążeń, powinna wynosić 220–240 HB. W cięższych warunkach pracy zaleca się stosowanie czopów szlifowanych ze stali węglowych wyższej jakości, ulepszanych cieplnie do twardości około 50 HRC.



Rys. 17. Wytyczne doboru lepkości oleju, odniesione do temperatury 60 °C, wg [24]



Rys. 18. Zwiększenie nośności łożyska porowatego dzięki smarowaniu uzupełniającemu; badania własne na pometach żelaznych o średnicy 40 mm

Smarowanie łożysk z pometów (samosmarowanie) odbywa się za pomocą oleju, jakim są one fabrycznie nasycone. Wytwórnice dostarczają na ogół porowatych łożysk spiekanych nasyconych olejem o właściwościach odpowiadających przeciętnym, najczęściej występującym, warunkom pracy. Jednakże dobór lepkości oleju, szczególnie dla łożysk, które mają pracować w nietypowych warunkach (np. przy dużych obciążeniach, dużych prędkościach albo w wysokich temperaturach) powinno się dobierać odpowiedni, do tych warunków olej. Na rysunku 17 pokazano wykres zależności potrzebnej lepkości oleju od prędkości czopa oraz od warunków pracy łożyska.

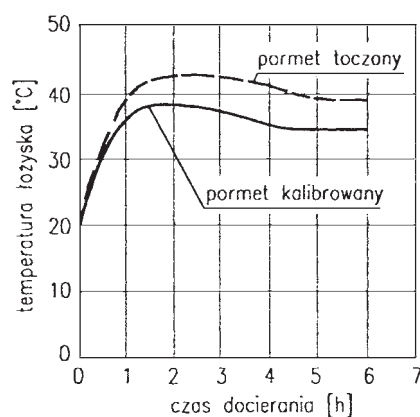
Smarowanie dodatkowe (uzupełniające), pokazane na rysunku 14, pozwala na zwiększenie nośności łożyska (rys. 18), a przede wszystkim jego trwałości. Uzyskuje się to dzięki zwiększeniu ilości oleju w obiegu w obrębie ścianki porowatej i szczeliny smarowej (polepszenie chłodzenia, uzupełnianie ubytków oleju spowodowanych jego odparowywaniem). Dosycanie wkładki filcowej lub dopełnianie zapasowego zbiorniczka powinno się robić tym samym olejem, jakim były fabrycznie nasycone pomety.

2.5. EKSPLOATACJA

Z istoty samosmarownych łożysk porowatych wynikają minimalne zabiegi obsługowe. Ograniczają się one do (ewentualnego) docierania wstępnego łożyska oraz dosycania pometu po upływie czasu określonego jego trwałością w określonych warunkach pracy. Dotyczy to także dosycania wkładek filcowych podczas smarowania uzupełniającego.

Docieranie wstępne dotyczy przede wszystkim pormetów, których powierzchnie robocze z jakichś względów były toczone. Pormety z powierzchniami roboczymi kalibrowanymi w zasadzie nie wymagają wstępnego docierania, chociaż mogłoby ono także sprzyjać lepszej współpracy czopa z tulejką, a tym samym zwiększyć trwałość łożyska.

Na rysunku 19 pokazano przebieg docierania łożysk o powierzchniach roboczych toczonej i kalibrowanej (z badań własnych). Miarą dotarcia była ustalona temperatura łożyska. Widać wyraźnie, że łożysko z toczoną powierzchnią roboczą docierało się dłużej i przy wyższej temperaturze. Świadczy to o słuszności zalecania tego zabiegu dla łożysk z pormetów z toczoną powierzchnią roboczą.



Rys. 19. Docieranie wstępne tulejek toczonej i kalibrowanych, $d = 40$ mm, $p = 1$ MPa, $v = 0,25$ m/s

2.6. PODSUMOWANIE WIADOMOŚCI NA TEMAT ŁOŻYSK POROWATYCH

W ciągu 50 lat intensywnego rozwoju porowate łożyska ślizgowe znalazły szerokie zastosowanie w przemyśle lekkim (w artykułach gospodarstwa domowego, maszynach przemysłu spożywczego, papierniczego, włókienniczego) oraz w motoryzacji (w łożyskowaniu urządzeń pomocniczych).

Znajdują one zastosowanie wszędzie tam, gdzie – przy niezbyt dużych obciążeniach i prędkościach obwodowych czopa – niemożliwe jest stosowanie smarowania konwencjonalnego.

Pormety podczas samosmarowania wypełniają lukę w obszarze zastosowań łożysk hydrodynamicznych przy małych i bardzo małych prędkościach i niezbyt dużych obciążeniach. Stosując pormety w łożyskach smarowanych konwencjonalnie, zyskujemy na niezawodności ich działania: w wypadku przerwania smarowania, a także w okresach rozruchu i wybiegu – samosmarowność tych łożysk jest zabezpieczeniem przed nadmiernym zużyciem, a nawet zatarciem.

Aby uniknąć błędów popełnianych często w początkowym okresie rozwoju wytwarzania i stosowania pormetów, trzeba mieć na uwadze ich właściwości opisane m.in. w tym rozdziale. Należy pamiętać, że wskutek ograniczonej ilości oleju w porach, łożyska te są o wiele słabiej chłodzone niż łożyska smarowane konwencjonalnie. W związku z tym obszar ich zastosowania jest ograniczony granicznymi wartościami nacisku p i prędkości obwodowej czopa v , ze względu na maksymalną temperaturę łożyska.

Tulejki z pormetów (tylko tulejki, ze względu na krążenie oleju w układzie: ścianka porowata–szczelina smarowa–ścianka porowata) są znormalizowane. W konstrukcji łożyskowań korzysta się zazwyczaj z informacji zawartych w katalogach wytwórni pormetów. W katalogach firmowych podawane są także informacje dotyczące nośności tych łożysk oraz ich montażu.

Pormety mają już ustalone miejsce w budowie maszyn, a ich doskonalenie trwa nadal. Idzie ono w dwóch kierunkach: kształtowania odpowiedniej porowatej matrycy oraz znalezienia odpowiedniego środka smarnego do jej nasycania.

Dzięki wieloletnim badaniom i weryfikacji praktycznej ustalono optymalną porowatość tych materiałów. Wynosi ona 20–30% (zazwyczaj ok. 22–25%). To optimum jest kompromisem pomiędzy tendencją do maksymalnej objętości oleju w porach i koniecznością utrzymania możliwie dużej wytrzymałości (szczególnie na ściskanie) pormetu. W tym miejscu trzeba podkreślić, że pormety – ze względu na swoją strukturę – nie wytrzymują obciążeń dynamicznych.

Jakkolwiek czyniono próby wytwarzania i stosowania (do celów łożyskowania) pormetów z różnych metali, to jednak w praktyce ostały się dwie grupy materiałów: pormety żelazne (ze stali niskowęglowej) i pormety brązowe. Obydwa rodzaje produkowane są także z dodatkiem grafitu. Można zatem powiedzieć, że co do matrycy porowatej rozwój pormetów w pewnym sensie się ustabilizował.

Bardziej dynamicznie przedstawia się rozwój środka smarnego stosowanego do wypełniania porowatej matrycy. Istotnym krokiem w tym przedmiocie było zastosowanie przez firmę Glaciar wypełniania pormetów smarami stałymi w postaci PTFE i poliacetalu, zmieszanych z proszkiem ołowiu. O tych kompozytach będzie mowa w następnym rozdziale.

Dalszy postęp w doskonaleniu „klasycznych” pormetów łożyskowych będzie jednak polegał na doborze nowych olejów oraz ich kompozycji z różnymi dodatkami, m.in. smarów stałych. Te środki powinny zwiększyć obciążalność pormetów, szczególnie w zakresie małych prędkości, tj. wtedy, gdy istnieje niebezpieczeństwo zatarcia (przez stworzenie możliwie trwałej warstewki granicznej).

3. ŁOŻYSKA Z TWORZYW SZTUCZNYCH

3.1. WSTĘP

Tworzywa sztuczne (ang. *plastics*, niem. *Kunststoffe*, ros. *plastmassy*) to materiały, których głównym (niekiedy jedynym) składnikiem są polimery (a także barwniki, stabilizatory, wypełniacze, zmiękczacze i inne dodatki). Przymiotnik „sztuczne” w tej nazwie mówi, że nie są to tworzywa naturalne, lecz otrzymywane sztucznie, za pomocą syntezy.

Polimery – o nich będzie mowa w tym rozdziale – to nazwa wzięta z języka angielskiego (*polymers*), a pochodząca ze złożenia dwóch greckich słów: *πολυς* (*polis*) – wiele + *μερος* (*meros*) – część = *πολυμερης* – (*polymeris*) – wieloczęściowy. Tak więc polimery to substancje powstające przez połączenie się (polimeryzację) wielu prostych cząsteczek (merów) jednakowych (wtedy jest homopolimer) lub różnych (wtedy powstaje kopolimer). Substancje te mają odmienne własności chemiczne i fizyczne od substancji wyjściowych. O polimerach mówi się, że są to substancje wielkocząsteczkowe, ponieważ ich budowa to połączenia wielkich cząsteczek (makromolekuł), na które składa się wielka liczba atomów łączących się wzajemnie za pomocą wiązań kowalencyjnych. Makromolekuły tworzą się z małych cząsteczek zwanych monomerami. Monomery nazywa się potocznie „cegiełkami” polimerów.

3.2. PODZIAŁ I OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA POLIMERÓW

3.2.1. PODZIAŁ

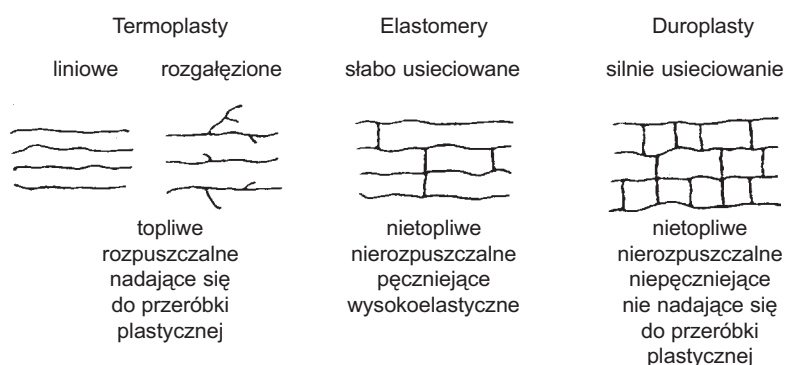
Polimery można podzielić – według budowy molekularnej, a tym samym według wynikających z niej własności – zasadniczo na: termoplasty, elastomery i duroplasty.

Termoplasty są (z nielicznymi wyjątkami) tworzywami, które po podgrzaniu miękną, a po ostudzeniu twardnieją. Operacja taka może być powtarzana wielokrotnie, pod

warunkiem, że nie zostanie przekroczona granica destrukcji cieplnej. Zazwyczaj „przeżywiają” one takie działania bez zmian strukturalnych.

Elastomery to tworzywa słabo usieciowane, które (w temperaturze pokojowej) wykazują dużą elastyczność (jak np. guma). Szczególną ich cechą jest bardzo mały moduł sprężystości jak też bardzo duża powtarzalna rozciągliwość.

Duroplasty są tworzywami, które podczas procesu wytwarzania względnie przeróbki nieodwracalnie twardnieją. To twardnienie jest reakcją chemiczną, wywołaną przez aktywację termiczną (tworzywa termoutwardzalne) lub chemiczną (tworzywa chemoutwardzalne). Zachodzi wtedy silne trójwymiarowe usieciowanie tworzywa. Podany wyżej podział polimerów zilustrowano schematycznie na rysunku 20.



Rys. 20. Podział i ogólna charakterystyka polimerów [1]

3.2.2. STRUKTURA POLIMERÓW

Strukturę polimerów rozważa się w kategoriach chemicznych i fizycznych. Zagadnienie **struktury chemicznej** dotyczy wiązań chemicznych oraz tworzenia się makromolekuł w procesie polimeryzacji. Ze względu na charakter tej książki nie będzie ono rozwijane.

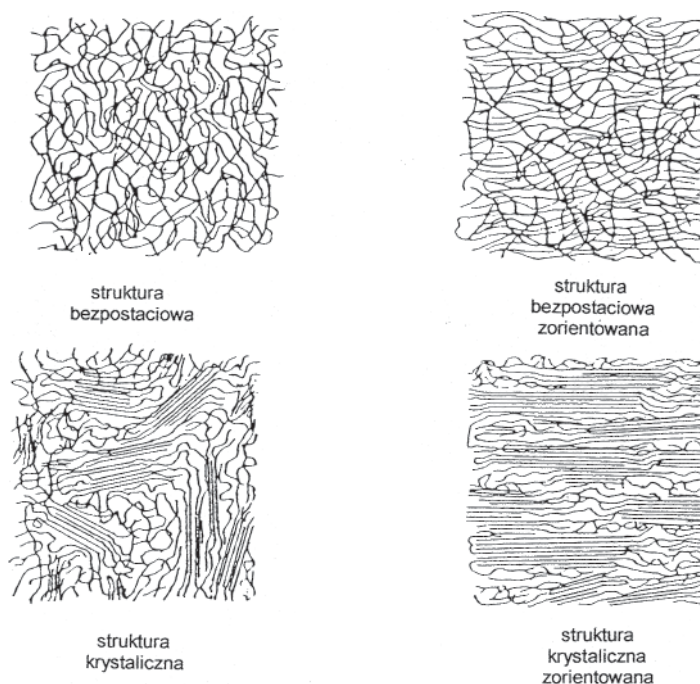
Struktura fizyczna polimerów wiąże się z jednej strony ze składem chemicznym i konfiguracją łańcuchów molekuł (tj. czynnikami stanowiącymi o ich strukturze chemicznej), z drugiej zaś strony zależy ona od warunków wytwarzania i przetwarzania tych materiałów.

Łańcuchy cząsteczek, w warunkach swobody, przyjmują postać podobną do nici w nieuporządkowanym kłębk. Taka ruchliwość makromolekuł jest duża w roztworach lub – przy wysokiej temperaturze – w stopionym polimerze. Podczas ochładzania stopionego termoplastu lub odparowywania rozpuszczalnika z roztworu termoplastu może zachodzić zestalanie się *bezpostaciowe* lub częściowo *krystaliczne*. To, w jakiej strukturze zestali się polimer (bezpostaciowej czy częściowo krystalicznej) zależy głównie

od wspomnianych wyżej „cegiełek” i od tego, czy istnieją boczne grupy wzdłuż łańcucha molekuł [1].

W termoplastach bezpostaciowych makromolekuły układają się bezładnie, na podobieństwo waty. W sprzyjających warunkach, podczas ochładzania stopionego polimeru (przy ograniczaniu ruchliwości molekuł) może zająć krystalizacja: pojawiają się obszary struktury krystalicznej. Obszary te, zwane *krystalitami*, są – podobnie jak w układach dwufazowych – osadzone w bezpostaciowej osnowie polimeru. Liczba i wielkość krystalitów zależą od liczby zarodków, a także od przebiegu chłodzenia stopionego polimeru.

Na rysunku 21 pokazano schematycznie omówione struktury termoplastów. Podczas ich przeróbki może dodatkowo zająć orientacja molekuł danej struktury.

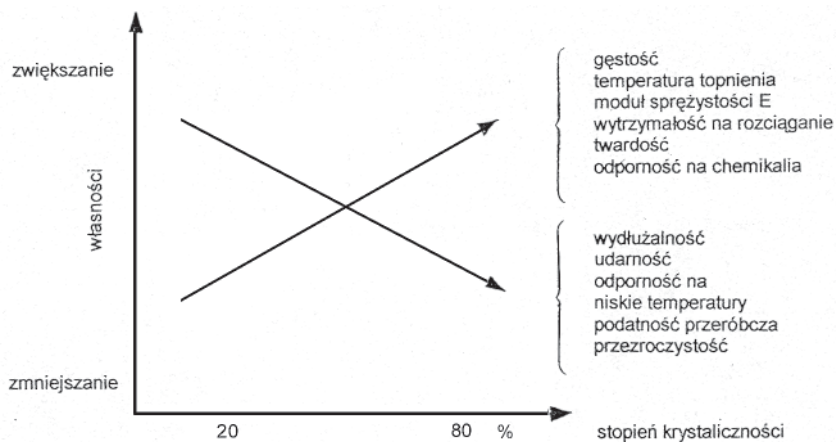


Rys. 21. Schematy struktur termoplastów [1]

Udział struktury krystalicznej w termoplastach, tzw. *stopień krystaliczności*, wynosi od 20 do 80%, w wyjątkowych wypadkach może nawet dochodzić do 95%. Można go regulować za pomocą odpowiednich warunków wytwarzania.

Od stopnia krystaliczności zależy wiele własności polimerów. Pokazano to schematycznie na rysunku 22.

Polimery o częściowej krystaliczności są przeważnie białe lub mętne, natomiast bezpostaciowe są przezroczyste (o ile oczywiście ich wygląd nie zostanie zmieniony przez dodatki, np. barwniki).



Rys. 22. Jakościowy schemat zmian własności częściowo krystalicznych termoplastów w zależności od stopnia krystaliczności [1]

3.2.3. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA POLIMERÓW

Struktura polimerów wpływa oczywiście także na ich właściwości tribologiczne. Dlatego na wstępie ogólnej charakterystyki tych tworzyw wymienione będą polimery według rodzaju struktury.

Do częściowo krystalicznych polimerów stosowanych najczęściej na łożyska bezobsługowe należą termoplasty:

- fluoroplasty: polichloroetylen (PTFE), fluorowany etyleno-propylen (FEP),
- poliacetale (POM – polioksymetyleny),
- poliamidy (PA),
- polietyleny (PE).

Wśród polimerów bezpostaciowych (amorficznych) znajdują się:

- poliwęglany (PC),
- żywice epoksydowe (EP, są to tworzywa utwardzalne – duroplasty),
- poliimidy (PI, tworzywa te są w większości bezpostaciowe, mogą też być zarówno termoplastyczne, jak i termoutwardzalne).

O szczegółach dotyczących poszczególnych tworzyw będzie mowa w dalszej części tego rozdziału. W tym miejscu przedstawiona będzie ogólna charakterystyka polimerów w aspekcie stosowania ich na łożyska ślizgowe.

Tworzywa sztuczne rozpoczęły swoją „karierę” w latach II wojny światowej jako materiały mające zastąpić niektóre deficytowe metale kolorowe (miedź, cynę, cynk, ołów i inne). W latach powojennych, gdy okazało się, że mogą być one nie tylko materiałem zastępczym, lecz równorzędnym – wobec metali – materiałem konstrukcyjnym, nastąpił gwałtowny rozwój chemii związków wielkocząsteczkowych i produkcji poli-

merów. Sprzyjał temu rozwój motoryzacji, elektroniki, przemysłu lekkiego (przede wszystkim artykułów gospodarstwa domowego) a także badań kosmicznych.

Szerokie stosowanie tworzyw sztucznych jako materiałów łożyskowych, jakie zauważa się w ostatnich latach, spowodowane jest wieloma cennymi ich zaletami. Są to przede wszystkim: dobra odporność na zatarcie (nieszczepianie się ze stalą), dobre właściwości ślizgowe (małe tarcie przy współpracy ze stalą) niektórych polimerów (także bez smarowania), dobra odporność chemiczna, niewrażliwość na korozję, łatwość formowania gotowych elementów (np. panewek) oraz wykonywania cienkich powłok przeciwiernych. Duże możliwości uszlachetniających modyfikacji tych materiałów i tworzenia kompozytów – to dodatkowa ich zaleta.

Mają one, niestety, także wady, o których należy pamiętać zarówno podczas ich wyboru jako materiałów ślizgowych, jak też podczas eksploatacji węzłów, w których znajdują się węzły polimerowe. Podstawową wadą polimerów jest ich mała odporność na ciepło i możliwość ich destrukcji po przekroczeniu dopuszczalnego stanu cieplnego. Większość tych tworzyw wykazuje dużą chłonność cieczy, co powoduje ich pęcznienie. Fakt ten, łącznie z dużą wartością współczynnika rozszerzalności cieplnej, powoduje konieczność stosowania znacznie większych luzów niż przy stosowaniu tworzyw metalowych. Inną wadą tworzyw sztucznych jest ich mała przewodność cieplna, są one po prostu izolatorami cieplnymi. W węzłach, w których występuje wysoka temperatura, wada ta, łącznie ze wspomnianą wcześniej wadą małej odporności cieplnej, może doprowadzić do zniszczenia zespołu wskutek mięknięcia (w wypadku termoplastów) lub zwęglenia (w wypadku duroplastów) oraz spowodowania tym zatarcia.

Wiele z wymienionych wad da się usunąć bądź złagodzić przez odpowiednią modyfikację tworzywa lub konstrukcję węzła łożyskowego. Na przykład polepszenie przewodności cieplnej uzyskuje się przez wypełnianie polimeru proszkiem brązowym lub grafitowym, a także przez stosowanie cienkich powłok z polimerów. Szerzej na ten temat będzie mowa w dalszej części tego rozdziału, szczególnie w części traktującej o kompozytach polimerowych.

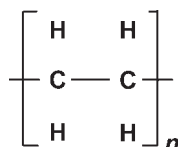
Na zakończenie tej ogólnej charakterystyki polimerów i w nawiązaniu do rysunku 22 warto jeszcze wspomnieć o zależności właściwości tribologicznych od rodzaju struktury fizycznej tych tworzyw. Uważa się, że krystaliczna struktura sprzyja obciążalności polimerów i ich odporności na zużywanie, natomiast struktura bezpostaciowa ułatwia poślizg. Zatem: istnieje jakieś optimum udziału obydwóch tych faz – krystalicznej i bezpostaciowej – które zapewnia możliwie dużą obciążalność polimerów i ich odporności na zużywanie i możliwie małe tarcie (zazwyczaj o stal). Słuszność tego spostrzeżenia potwierdzają zarówno wyniki badań laboratoryjnych, jak i praktyka przemysłowa, co przekłada się na wytypowanie określonych polimerów jako nadających się na łożyska ślizgowe. Będzie o nich mowa w dalszym tekście.

Z charakteru tej książki wynikają ograniczenia dotyczące szczegółowego opisu chemii i technologii polimerów. Zainteresowanych w tym przedmiocie odsyłam do literatury specjalistycznej, np. [23].

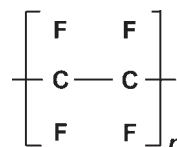
3.3. PRZEGLĄD POLIMERÓW ŚLIZGOWYCH

3.3.1. FLUOROPLASTY

Fluoroplasty (polietyleny fluorowane) są polimerami, w monomerach których wszystkie atomy wodoru (jak np. w etylenach) są zastąpione przez atomy fluoru. Pokazano to na rysunkach 23 i 24.



Rys. 23. Monomer polietylenu



Rys. 24. Monomer policzterofluoroetylenu

Najpopularniejszym polimerem z tej grupy jest policzterofluoroetylen, ponadto należą do niej: fluorowany etyleno-propylen i polichlorotrójfluoroetylen.

Policzterofluoroetylen (politetrafluoroetylen, PTFE) wynaleziono w roku 1933 (Moissan). Na skalę przemysłową polimer ten zaczęła wytwarzać w roku 1946 firma Du Pont de Nemours (USA) pod nazwą *teflon*. Od tej pory produkcja i zastosowanie PTFE rośnie bez przerwy, ze względu na jego cenne właściwości użytkowe, o których będzie mowa niżej. Tworzywo to produkuje się obecnie na świecie pod wieloma nazwami firmowymi, jak np. fluon, hostaflon, polyflon, halon, algaflon, rulon, teran, tetraflon, soreflon, ftoroplast i inne. W Polsce policzterofluoroetylen produkują Zakłady Azotowe w Tarnowie pod nazwą *tarflen*.

PTFE jest polimerem krystalicznym o temperaturze topnienia 325 °C. Przy tym polimer ten ma wyjątkowo dużą lepkość w stanie stopionym, co wyklucza możliwość stosowania technologii wtrysku. Formuje się go więc metodami wytłaczania.

Dzięki silnym wiązaniom atomów węgla i fluoru PTFE jest niezwykle stabilny, chemicznie obojętny. Ma on strukturę wysokokrystaliczną, natomiast w temperaturze 330 °C przechodzi w strukturę całkowicie bezpostaciową. Strukturę molekularną tego tworzywa pokazano na rysunku 25. Atomy węgla otoczone są atomami fluoru, układając się w linii śrubowej i tworząc rodzaj słupka. Poszczególne „słupki” stykają się ze sobą poprzez warstewki bezpostaciowe lub nieuporządkowanej struktury, co stwarza tak zwane płaszczyzny łatwego poślizgu. Dzięki temu policzterofluoroetylen wykazuje małe tarcie na sucho (nawet do $\mu = 0,04$).

Na tak małe tarcie, które jest powodem powszechnego stosowania PTFE wszędzie tam, gdzie konieczne jest jego zmniejszenie, składają się:

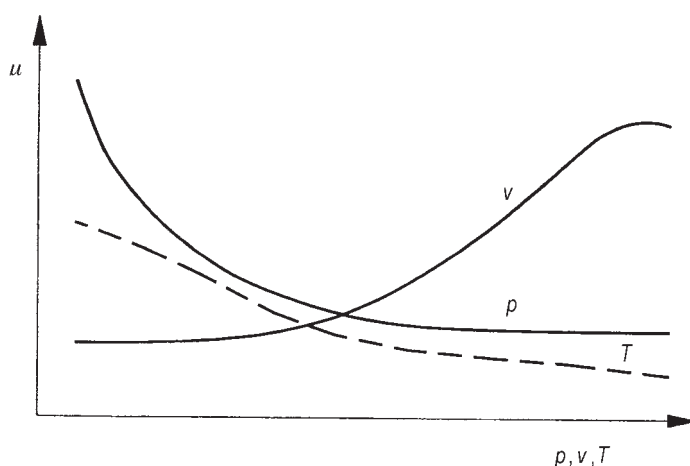
- wspomniane płaszczyzny łatwego poślizgu w strukturze tego polimeru,
- stosunkowo duża adhezja do powierzchni metalowych, szczególnie do stali,



Rys. 25. Struktura molekularna policzterofluoroetylenu

– powlekanie współpracujących powierzchni warstewką PTFE, dzięki czemu tarcie odbywa się w styku PTFE-PTFE.

Interesujące jest zachowanie się policzterofluoroetylenu pod wpływem czynników ruchowych: obciążenia i prędkości, a także temperatury. Statyczny współczynnik tarcia zmniejsza się pod wpływem obciążenia. Prędkość poślizgu i temperatura mają także istotny wpływ na tarcie tego tworzywa [2]. Pokazano to schematycznie na rysunku 26.



Rys. 26. Schemat zależności współczynnika tarcia policzterofluoroetylenu od warunków ruchowych

Policzterofluoroetylen jest – niestety – mało wytrzymały mechanicznie: płyne na zimno już przy umiarkowanych naciskach ($\sim 2\text{--}4$ MPa) i umiarkowanych temperaturach (~ 110 °C). Dlatego stosuje się go zazwyczaj jako bazę kompozytów polimerowych bądź jako ich wypełniacz (patrz: kompozyty).

Fluorowany etyleno-propylen (FEP, neoflon, fluoroplast-4M) jest kopolimerem PTFE i heksafluoropropyleny. Tworzywo to właściwościami zbliżone jest do PTFE, ma jednak nieco gorsze właściwości tribologiczne ($\mu \sim 0,1$). Natomiast łatwiejsze jest jego kształtowanie – metodami z wytopu. Temperatura topnienia FEP wynosi 290 °C.

W tabeli 2 zebrano dane dotyczące właściwości wymienionych fluoroplastów.

Tabela 2. Własności fizyczne i mechaniczne fluoroplastów [2]

Własność	Jednostka	PTFE	FEP
Gęstość	g/cm ³	2,13÷2,30	2,12÷2,18
Moduł sprężystości podłużnej	GPa	0,3÷0,8	0,4÷0,7
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	9	8
Wydłużenie przy zerwaniu	%	400	300
Moduł sprężystości poprzecznej	GPa	0,6÷0,7	0,65
Wytrzymałość na skręcanie		nie pęka	nie pęka
Twardość Shore'a D		50÷65	55
Przewodność cieplna	W/(m·K)	0,25	0,25
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	×10 ⁻⁶ , K ⁻¹	120÷200	80÷120
Maksymalna temperatura pracy	°C	150÷200	150÷200
Wodochłonność, 24 h, 3 mm grubości	%	< 0,01	< 0,01

3.3.2. POLIACETALE

Nazwa poliacetale (polioksymetyleny, POM) obejmuje homo- i kopolimery formaldehydu. Są one zbudowane z liniowych łańcuchów cząsteczek, określonych powtarzającymi się wiązaniami atomów węgla i tlenu. Homopolimery poliacetali mają ściśle uporządkowaną budowę, natomiast kopolimery mają łańcuchy nieregularne. W wyniku tego, te ostatnie mają obniżoną krystaliczność, co obniża nieco ich własności mechaniczne. Przewyższają one jednak homopolimery pod względem odporności termicznej i odporności na zasady i wodę [1].

Poliacetale są tworzywami mocnymi, sztywnymi, odpornymi na ciepło, wilgoć i rozpuszczalniki, oleje i benzynę. Reagują jednak z kwasami i substancjami utleniającymi. Tworzywa te cechują się dobrymi właściwościami ślizgowymi i dobrą odpornością na zużycie. Stosuje się je zarówno w postaci „czystej” (tj. bez wypełniaczy), jak też jako tworzywo bazowe kompozytów, a także jako ich wypełniacze. Będzie o tym mowa w rozdziale o kompozytach. Korzystną cechą poliacetali jest łatwość ich przeróbki – możliwość kształtowania elementów metodą wtrysku.

W handlu występują te tworzywa pod nazwami firmowymi, jak np. delrin, celcon, milcon, hostaform, tarnoform (Zakłady Azotowe w Tarnowie) i inne.

W tabeli 3 wymieniono ważniejsze własności poliacetali.

Tabela 3. Własności fizyczne i mechaniczne poliacetali [2]

Własność	Jednostka	Niewypełniane	Wypełniane 30% wag. PTFE
Gęstość	g/cm ³	1,40÷1,43	1,51
Moduł sprężystości podłużnej	GPa	2,3	2,7
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	4,8	45
Wydłużenie przy zerwaniu	%	50	6
Moduł sprężystości poprzecznej	GPa	–	2,6
Wytrzymałość na skręcanie	MPa	–	70
Twardość Shore'a D		65	58
Przewodność cieplna	W/(m·K)	0,23	0,23
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	×10 ⁻⁶ , K ⁻¹	81	97
Maksymalna temperatura pracy	°C	85÷105	–
Wodochłonność, 24 h, 3 mm grubości	%	0,20÷0,25	–

3.3.3. POLIAMIDY

Poliamidy (PA) są jednymi z najstarszych i najszerzej stosowanych polimerów. Popularność swoją zawdzięczają one włóknom sztucznym, opatentowanym przez firmę (wspominaną już przy omawianiu PTFE) Du Pont de Nemours (USA) w roku 1937 pod nazwą **nylon**. Nazwa ta pochodzi ze złożenia fragmentów słów: New York-London. Produkcję nylonu rozpoczęto w roku 1940, a zastosowanie tego włókna do wytwarzania pończoch i rajstop nie tylko rozpowszechniło poliamidy, lecz – podobnie jak Du Pont-owski teflon (PTFE) – utrwaliło – do dziś funkcjonującą potocznie – nazwę wszystkich poliamidów jako nylon.

O ogromnym rozpowszechnieniu poliamidów świadczy duża liczba nazw firmowych tego tworzywa, jak np. – oprócz nylonu – nylatron, nylafil, perlon, kapron, stylon (polskie włókna poliamidowe), trogamid, miramid, ultramid, rilsan, grilon, maranyl, renyl, technyl, amilan, akulon i inne. W Polsce głównym producentem poliamidów, pod nazwą tarnamid, są Zakłady Azotowe w Tarnowie.

Poliamidy są częściowo krystalicznymi, liniowymi tworzywami zawierającymi azot. W ich oznaczeniach technicznych obok symbolu literowego (PA) znajdują się cyfry, które oznaczają liczbę atomów węgla w cząsteczkach surowców wyjściowych; w wypadku dwóch liczb pierwsza z nich odnosi się do aminy, druga do kwasu (dwuaminy idwuzasadowe kwasy są surowcami do produkcji poliamidów). Tak więc mamy poliamidy: PA 6, PA 6,6, PA 6,10, PA 11, PA 6,12, PA 12 i inne. Poliamidy PA 6 oraz PA 6,6 są najczęściej stosowane, między innymi, także na łożyska ślizgowe.

Jakkolwiek nie wykazują one tak małych wartości współczynnika tarcia o stal jak fluoroplasty, szczególnie PTFE, to ich dużą zaletą jest dobra odporność na zużycie (w ra-

mach dopuszczalnych wartości p_v). Stwierdzono też dobre tłumienie drgań przez to tworzywo oraz zmniejszanie hałasu.

Stopień krystaliczności poliamidów związany jest zależnością liniową z ich gęstością. Większa krystaliczność powoduje (por. też rys. 22): zwiększenie twardości, zmniejszenie chłonności wody, a tym samym ograniczenie zmian wymiarów, zwiększenie modułu sprężystości i podniesienie granicy plastyczności, zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie, ściskanie i zginanie, ale też zmniejszenie udarności. Krystaliczność poliamidów waha się, zależnie od warunków wytwarzania, od 10 do 50%. Stosunek faz: krystalicznej i bezpostaciowej nie jest stały. Może się on zmieniać podczas eksploatacji pod wpływem obciążenia mechanicznego i cieplnego, tym bardziej, że energia tworzenia sieci molekularnych w poliamidach jest niska. Na przykład podczas rozciągania poliamidów zachodzi ich rekrytalizacja.

Rodzaj struktury ma znaczny wpływ na zachowanie się poliamidów podczas tarcia. Stwierdzono, że utworzenie bezpostaciowej warstwy wierzchniej (przez szybkie chłodzenie stopionej w kąpeli olejowej przy ok. 150 °C warstwy wierzchniej) wpływa na zmniejszenie tarcia o ok. 20–25%. Z drugiej jednak strony, jak już wspomniano, struktura krystaliczna osiągnięta przez powolne chłodzenie wpływa na zwiększenie odporności poliamidów na zużycie. Istnieje zatem wspomniane wcześniej optimum stosunku obydwóch faz ze względu na możliwie małe tarcie i małe zużycie. W związku z tym sugeruje się unikanie czystej struktury bezpostaciowej w warstwie wierzchniej panewek poliamidowych i dlatego zaleca się np. zdejmowanie warstewki powierzchniowej o grubości ok. 0,1 mm z panewek poliamidowych odlewanych (w warstewce tej tworzy się wskutek szybkiego chłodzenia struktura bezpostaciowa).

Poliamidy są bardzo podatne przeróbco: można je odlewać, wtryskiwać i fluidyzować (dla tworzenia powłok). Właściwości tribologiczne poliamidów często się polepsza za pomocą różnych wypełniaczy, tworząc *kompozyty wypełniane*. Będzie o tym mowa w dalszym tekście.

W tabeli 4 zestawiono dane dotyczące ważniejszych własności poliamidów.

Tabela 4. Własności fizyczne i mechaniczne poliamidów [2]

Własność	Jednostka	Niewypełniane	Wypełniane 30% wag. wł. szkl.
Gęstość	g/cm ³	1,12÷1,13	1,4
Moduł sprężystości podłużnej	GPa	2,6÷2,9	–
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	81	192
Wydłużenie przy zerwaniu	%	60÷200	2,5
Moduł sprężystości poprzecznej	GPa	2,8	8,9
Wytrzymałość na skręcanie	MPa	–	280
Twardość Shore'a D		75	85
Przewodność cieplna	W/(m·K)	0,24	–
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	×10 ⁻⁶ , K ⁻¹	45÷100	23
Maksymalna temperatura pracy	°C	110	110
Wodochłonność, 24 h, 3 mm grubości	%	1,2÷1,6	0,9

3.3.4. POLIETYLENY

Polietyleny (PE) są tworzywami termoplastycznymi o strukturze łańcuchowej rozwidlonej. Struktura ta jest częściowo krystaliczna, a stopień krystaliczności zależy od sposobu wytwarzania tworzywa i – co za tym idzie – od liczby i długości rozgałęzień łańcucha.

Rozróżnia się polietylen wysokociśnieniowy, o małej gęstości (PE-LD, *low density*), i polietylen niskociśnieniowy, o dużej gęstości (PE-HD, *high density*). PE-LD jest silnie rozgałęziony i może osiągnąć stopień krystaliczności do 60%, natomiast PE-HD jest słabo rozgałęziony i dlatego osiąga większy stopień krystaliczności – do 80%.

Poza wymienionymi podstawowymi rodzajami polietylenów wytwarza się także różne ich modyfikacje, jak np. PE-LLD – polietylen liniowy o małej gęstości, PE-HD-HMW – polietylen o dużej gęstości i dużym ciężarze cząsteczkowym, PE-HD-UHMW – polietylen o dużej gęstości i bardzo dużym ciężarze cząsteczkowym (*ultrahigh-molecular-weight*).

Możliwość tworzenia wielu odmian polietylenów o zróżnicowanych właściwościach powoduje ich powszechne zastosowanie: od wszelkiego rodzaju folii, opakowań itp. po armaturę, elementy wyposażenia samochodów, artykuły gospodarstwa domowego, sprzęt sportowy (deski surfingowe wytwarza się z PE-HD-HMW a ślizgi nart z PE-HD-UHMW [23]) i elementy maszyn.

Na łożyska ślizgowe stosuje się zazwyczaj polietylen niskociśnieniowy, o dużej gęstości i bardzo dużym ciężarze cząsteczkowym PE-HD-UHMW. Tworzywo to cechuje się bardzo dużą odpornością na zużywanie i uderzenia oraz małą wodochłonnością. Niestety wykazuje ono dość duże tarcie: współczynnik tarcia polietylenów o stal wynosi od 0,15 do 0,30. Tę cechę polietylenów trzeba mieć na uwadze, jeśli chce się je zastosować na łożyska bez smarowania.

Polietyleny są także – niestety – mało odporne na ciepło. Temperatura pracy dla tych tworzyw nie powinna przekraczać 60 °C. Tworzywa te szybciej niż inne, używane na panewki łożysk ślizgowych, tracą swoje własności wytrzymałościowe ze wzrostem temperatury. Tak np. w temperaturze –60 °C ich wytrzymałość na rozciąganie wynosi 38 MPa, przy 20 °C spada do 15–20 MPa, a w temperaturze 60 °C wynosi już tylko 8 MPa. Podobnie zmieniają się i inne rodzaje wytrzymałości tego tworzywa. Wadę tę można częściowo usunąć przez odpowiednie modyfikacje tego tworzywa.

Tworzywa te nie reagują z zasadami, kwasami i solami. Są natomiast mało odporne na utlenianie, zarówno wobec utleniaczy (roztwory kwasu azotowego, nadtlenuki), jak też przy działaniu promieniowania słonecznego. Dla ochrony przed destrukcyjnym działaniem nasłonecznienia dodaje się do polietylenów z reguły stabilizatory.

Polietyleny noszą, podobnie jak inne polimery, nazwy firmowe, takie jak np. alathon, dylan, carlona, novatec, petrothene, lupolen, marlex, mirathen, stamylan i inne [23].

W tabeli 5 zestawiono ważniejsze dane dotyczące właściwości polietylenów.

Tabela 5. Własności fizyczne i mechaniczne polietylenów UHMW [2]

Własność	Jednostka	Niewypełniane	Wypełniane 30% wag. wł. szkl.
Gęstość	g/cm ³	0,93,0,94	1,18÷1,28
Moduł sprężystości podłużnej	GPa	0,5÷0,8	5÷6,3
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	15÷20	52÷62
Wydłużenie przy zerwaniu	%	400÷500	1,5÷2,5
Moduł sprężystości poprzecznej	GPa	0,69÷1,17	5÷5,6
Wytrzymałość na skręcanie	MPa	7÷9	77÷82
Twardość Shore'a D		63÷65	70
Przewodność cieplna	W/(m·K)	0,48	0,37
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	×10 ⁻⁶ , K ⁻¹	130	48
Maksymalna temperatura pracy	°C	105	105
Wodochłonność, 24 h, 3 mm grubości	%	< 0,01	0,02÷0,06

3.3.5. POLIWĘGLANY

Poliwęglany (PC) są liniowymi tworzywami termoplastycznymi należącymi do grupy poliestrów, tj. polimerów, które w łańcuchu zawierają grupy estrowe. Mają one duży ciężar cząsteczkowy i niską krystaliczność (dlatego zalicza się je raczej do tworzyw bezpostaciowych). Cechują się one kilkoma cennymi własnościami, takimi jak bardzo dobra odporność na uderzenia, dobra przezroczystość, mała rozszerzalność cieplna i wysoka temperatura destrukcji cieplnej. Polimery te mogą być przerabiane wszystkimi sposobami stosowanymi do wytwarzania elementów z tworzyw sztucznych. Ceną ich zaletą jest mały skurcz i dlatego stosuje się je między innymi do wytwarzania elementów maszyn wymagających wąskich tolerancji, takich jak np. koła zębate i łożyska ślizgowe, w tym także łożyska samosmarowne [2].

Niestety, zarówno tarcie, jak i zużycie poliwęglanów jest dość duże. Istotne polepszenie właściwości tribologicznych tych tworzyw uzyskuje się przez ich wypełnianie wzmacniające odporność na zużywanie (np. włóknem szklanym), a także polepszające właściwości ślizgowe (np. policzterofluoroetylenem). Takie kompozyty wypełniane (patrz także rozdział o kompozytach) mają dobre właściwości tribologiczne przy zachowaniu wspomnianych wyżej dobrych własności fizycznych i mechanicznych.

W handlu poliwęglany znajdują się pod różnymi nazwami firmowymi, takimi jak np. duron, ekonol, lexan, makrolon, orgalan, polycarbafil, polygard, royalit i inne.

W tabeli 6 zestawiono ważniejsze własności tych tworzyw.

Tabela 6. Własności fizyczne i mechaniczne poliwęglanów [2]

Własność	Jednostka	Niewypełniane	Wypełn. 15% PTFE +20% wł. szkl. (wag)
Gęstość	g/cm ³	1,2÷1,22	1,43÷1,5
Moduł sprężystości podłużnej	GPa	2,3÷3,1	8,3
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	52÷59	85÷103
Wydłużenie przy zerwaniu	%	120÷165	2
Moduł sprężystości poprzecznej	GPa	1,92÷2,24	5,9÷6,3
Wytrzymałość na skręcanie	MPa	75÷86	125÷160
Twardość Shore'a D	50÷55		70
Przewodność cieplna	W/(m·K)	0,18	–
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	×10 ⁻⁶ , K ⁻¹	80÷95	23
Maksymalna temperatura pracy	°C	135	135
Wodochłonność, 24 h, 3 mm grubości	%	0,12÷0,15	0,11

3.3.6. ŻYWICE EPOKSYDOWE

Żywice epoksydowe (PE) znajdują coraz szersze zastosowanie w różnych dziedzinach gospodarki, w tym także w budowie maszyn, ze względu na możliwości tworzenia z nich różnych kompozytów i wykonywania z nich półproduktów oraz gotowych elementów.

Należą one do polimerów typu duroplastów, tj. tworzyw utwardzalnych, przy czym mogą być utwardzane chemicznie za pomocą utwardzaczy lub też mogą się utwardzać pod wpływem ciepła (żywice chemoutwardzalne i termoutwardzalne).

W budowie łożysk bezobsługowych stosuje się żywice epoksydowe jako wypełniacze smarami stałymi, takimi jak grafit, dwusiarczek molibdenu MoS₂ i innymi. Kompozyty takie służą jako surowiec do wytwarzania panewek lub też nanosi się je w postaci cienkich warstw ślizgowych na stalowe podłoża tych elementów łożysk.

Żywice epoksydowe noszą różne nazwy handlowe: epibond, epidian, epikate, epocast, epodite, epolite, epon, eposet i inne [23].

W tabeli 7 zestawiono istotniejsze dane dotyczące tego tworzywa.

Tabela 7. Własności fizyczne i mechaniczne żywic epoksydowych [2]

Własność	Jednostka	Niewypełniane	Wypełniane włóknem szklanym
Gęstość	g/cm ³	1,1÷1,8	1,6÷2,0
Moduł sprężystości podłużnej	GPa	2,4÷4,0	21
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	30÷90	69÷138
Wydłużenie przy zerwaniu	%	3÷6	4
Moduł sprężystości poprzecznej	GPa	10÷14	14÷32
Wytrzymałość na skręcanie	MPa	55÷100	69÷210
Twardość Shore'a D		75	90
Przewodność cieplna	W/(m·K)	0,19	0,17÷0,42
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	×10 ⁻⁶ , K ⁻¹	45÷65	11÷15
Maksymalna temperatura pracy	°C	130	260
Wodochłonność, 24 h, 3 mm grubości	%	0,08÷0,15	0,05÷0,20

3.3.7. POLIIMIDY

Poliimidy (PI) są polimerami o długich łańcuchach z charakterystycznymi powtarzającymi się grupami imidowymi, stanowiącymi integralną część głównego łańcucha. Łańcuchy polimeryczne tych tworzyw zawierają pierścienie aromatyczne na zmianę z łańcuchami heterocyklicznymi. Z powodu wielokrotnych wiązań między tymi grupami, poliimidy wykazują największą wśród polimerów stabilność termiczną. Wykorzystuje się to między innymi w budowie łożysk samosmarownych pracujących w podwyższonych temperaturach (do 315 °C) i przy dużych obciążeniach (chwilowo nawet do 35 MPa w temperaturze 325 °C [2]).

Tworzywa te są odporne na zużywanie i mają bardzo dobre właściwości ślizgowe. W porównaniu z innymi polimerami wykazują one małą rozszerzalność cieplną, bardzo dobrą odporność na pękanie nawet w granicznej temperaturze 315 °C oraz wybitną odporność na promieniowanie.

W tabeli 8 przedstawiono główne ich własności fizyczne i mechaniczne.

Poliimidy wytwarza się głównie jako polimery termoutwardzalne (duropasty). Przetwarza się je i wykonuje z nich elementy w procesie prasowania, spiekania lub wytłaczania. Ta ostatnia technologia stwarza, niestety, pewne trudności.

O ile niewypełniane poliimidy mają – jak wspomniano wyżej – bardzo dobre właściwości ślizgowe, o tyle ich właściwości przeciwdrobnoustrojowe można jeszcze poprawić przez wypełnianie tego tworzywa grafitem, dwusiarczkiem molibdenu (MoS₂) i polichloro- fluoroetylenem (PTFE).

W handlu tworzywa te noszą nazwy firm, w których powstały, np.: Vespel (elementy spiekane), Kapton (folie), Apical i inne.

Obecnie wytwarza się także termoplastyczną modyfikację poliamidów jako **poliamidoimidy (PAI)**. Tworzywa te zawierają w swojej strukturze zarówno grupy amido-

Tabela 8. Własności fizyczne i mechaniczne poliimidów [2]

Własność	Jednostka	Niewypełniany	Wypełniany 50% włóknem szkl.	Wypełniany 15% wag. grafitem
Gęstość	g/cm ³	1,41	1,70	1,38
Moduł sprężystości podłużnej	GPa	1,3	–	1,8
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	117	186	66
Wydłużenie przy zerwaniu	%	10	< 1	4,5
Moduł sprężystości poprzecznej	GPa	–	22,4	3,8
Wytrzymałość na skręcanie	MPa	–	345	110
Twardość Shore'a D		85	90	85
Przewodność cieplna	W/(m·K)	0,5	0,36	0,86
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	×10 ⁻⁶ , K ⁻¹	51	13	49
Maksymalna temperatura pracy	°C	315	315	315
Wodochłonność, 24 h, 3 mm grubości	%	–	0,7	0,19

we, jak i grupy imidowe. Zaletą tych tworzyw jest łatwa przetwarzalność – możliwość wykonywania elementów za pomocą wszystkich technik przetwórstwa tworzyw sztucznych, m. in. za pomocą wtrysku. Za tę zaletę płaci się nieco obniżoną odpornością termiczną tego tworzywa (porównaj dane w tabelach 8, 9 i 10).

W tabeli 9 zebrano ważniejsze własności fizyczne i mechaniczne poliamidoimidów.

Tabela 9. Własności fizyczne i mechaniczne poliamidoimidów [2]

Własność	Jednostka	Niewypełniane	Wypełniane 3% wag. PTFE + 12% wag. grafitem
Gęstość	g/cm ³	1,40	1,45
Moduł sprężystości podłużnej	GPa	5,0	4,7
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	185	135
Wydłużenie przy zerwaniu	%	12	6
Moduł sprężystości poprzecznej	GPa	4,6	6,3
Wytrzymałość na skręcanie	MPa	211	182
Twardość Shore'a D		70	85
Przewodność cieplna	W/(m·K)	0,24	0,36
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	×10 ⁻⁶ , K ⁻¹	36	27
Maksymalna temperatura pracy	°C	260	260
Wodochłonność, 24 h, 3 mm grubości	%	0,28	0,22

Poliamidoimidy mają podobne właściwości tribologiczne jak poliimidy i podobnie jak tamte tworzywa są często wypełniane smarami stałymi dla polepszenia tych właściwości. Na przykład tworzywa te do stosowania na samosmarowne łożyska ślizgowe wypełnia się PTFE i grafitem. W celu zwiększenia odporności poliamidoimidów na zużywanie zaleca się także dodatkowe wygrzewanie wyprasek w temperaturze 245÷260 °C w czasie od 24 h do 5 dni [23].

Nazwy handlowe tych tworzyw to: kernel, nolimold, pyrolin, rodeftal, torlon i inne.

W uzupełnieniu danych zawartych w tabelach 2–9, w tabeli 10 zestawiono informacje o tribologicznych właściwościach polimerów i niektórych ich kompozytów.

Tabela 10. Tribologiczne właściwości polimerów ślizgowych i niektórych ich kompozytów [2]

Materiał	Graniczna wartość p_v [MPa·(m/s)] (przy v [m/s])	Maksymalna temperatura pracy [°C]	Intensywność zużywania $\times 10$ [mm ³ /(N·m)]	Współczynnik tarcia
PTFE niewypełniany	0,06 (0,5)	110–150	4000	0,04÷0,10
PTFE + włókno szkl.	0,35 (0,05÷5,00)	200	1,19	0,10÷0,25
PTFE + włókno grafit.	1,05 (5,0)	200	–	0,10
Acetal	0,14 (0,5)	85÷105	9,5	0,20÷0,30
Acetal + PTFE	0,19(0,5)	–	3,8	0,15÷0,27
Acetal + PTFE	0,09 (5,0)	–	–	–
Polietylen UHMW	0,10 (0,5)	105	–	0,15÷0,30
Polietylen UHMW + włókno szklane	0,19 (0,5)	105	–	0,15÷0,30
Poliamid	0,14 (0,5)	110	38,0	0,20÷0,40
Poliamid + grafit	0,14 (0,5)	150	3,0	0,10÷0,25
Poliwęglan	0,03 (0,05)	135	480	0,35
Poliwęglan + PTFE + włókno szklane	1,05 (0,5)	135	5,8	0,20
Poliwęglan + PTFE	0,06 (0,5)	135	–	0,15
Poliimid	3,50 (0,5)	315	30	0,15÷0,30
Poliimid + grafit	3,50 (0,5)	315	5	0,10÷0,30
Poliamidoimid	3,50 (0,5)	260	–	0,15÷0,30
Poliamidoimid +PTFE + grafit	1,75 (0,5)	260	–	0,08÷0,30
Żywica epoksydowa + włókno szklane	1,75 (0,5)	260	–	0,30÷0,50

Uwagi: Współczynnik tarcia był mierzony przy współpracy ze stalą.
Przybliżone dane pochodzą z różnych badań.

3.4. KOMPOZYTY POLIMEROWE

3.4.1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA I PODZIAŁ KOMPOZYTÓW

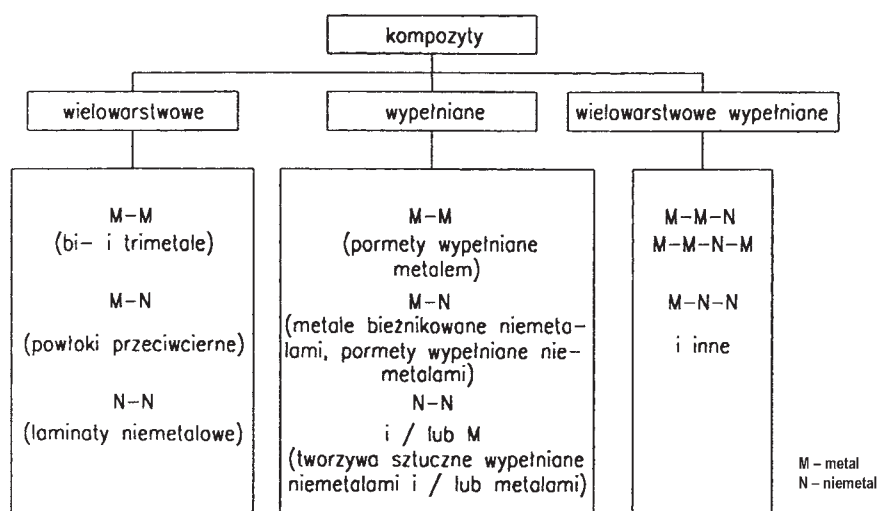
Przez kompozyt rozumie się tworzywo uzyskane ze skojarzenia kilku materiałów podstawowych w jedną całość w celu uzyskania odpowiednich jego własności fizycznych, chemicznych, mechanicznych, a wypadku kompozytów ślizgowych – także właściwości tribologicznych. Własności te i właściwości są różne od własności i właściwości poszczególnych składników.

Kompozyt ma strukturę heterogeniczną, zawierającą dwie lub więcej faz, powstałych z jego składników. Fazy te mogą być ciągłe lub też jedna z nich albo więcej może być rozproszona w osnowie.

Pełny opis kompozytu powinien zawierać nie tylko nazwy jego składników, lecz także dane o kształcie i o wymiarach ich cząstek, układzie tych cząstek, a przede wszystkim o stężeniu poszczególnych składników. Korzystne jest podawanie stężenia w udziałach objętościowych. Niestety, większość publikacji podaje je w udziałach wagowych, co jest w pewnym sensie uzasadnione techniką eksperymentu. Podobnie ma się sprawa z danymi o kształcie, wymiarach i ułożeniu cząstek składników kompozytów. Często ten brak danych wynika po prostu z tajemnicy patentowej lub tajemnicy handlowej.

Na rysunku 27 podano ogólny podział kompozytów ślizgowych.

W pierwszej grupie kompozytów ślizgowych znajdują się kompozyty wielowarstwowe, inaczej laminaty. Kompozyty typu M-M: bi- i trimetale są stosowane na cienko-



Rys. 27. Podział kompozytów ślizgowych

ścienne łożyska smarowane konwencjonalnie, np. w silnikach spalinowych. Ponieważ nie są to materiały samosmarowne – nie będą one omawiane w tej książce.

Pozostałe kompozyty, te najczęściej stosowane w łożyskach bezobsługowych, będą omówione w kolejności układu podziału na rysunku 27.

3.4.2. POWŁOKI PRZECIWCIERNE

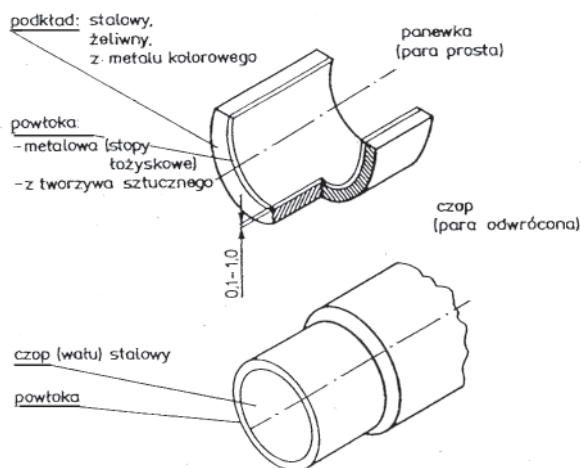
Powłokami nazywamy cienkie warstewki powierzchniowe nałożone na podłoże i umocowane na tym podłożu dzięki adhezji. Najstarszymi powłokami są powłoki malarskie.

Powłoki przeciwcierne stosuje się ze względu na dwie główne ich zalety: przeciwcierność, tj. możliwość pracy przy stosunkowo małym tarcu (także na sucho), oraz możliwość łatwego odprowadzania ciepła przez metalowe podłoże. Na podłoża tych powłok stosuje się stal, żeliwo i stopy metali kolorowych. Na same zaś powłoki stosuje się wymienione w poprzednich punktach polimery – czyste lub (częściej) wypełnione. W tym ostatnim wypadku kompozyt będzie się zaliczał do trzeciej grupy według podziału na rysunku 27.

Na rysunku 28 przedstawiono dwa warianty powłok w łożysku: powłokę na panewce i powłokę na czopie.

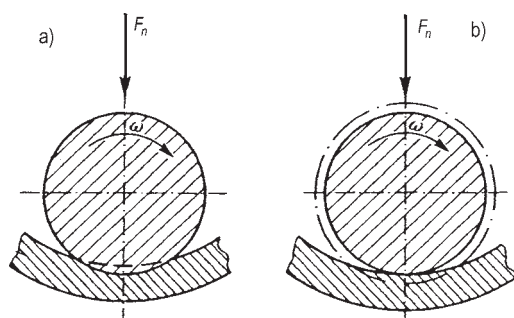
Ze względów wykonawczych a także ekonomicznych, zazwyczaj stosuje się powłoki przeciwcierne na panwiach. Natomiast zaletą powłok na czopach wałów jest zwiększona zdolność odprowadzania ciepła tarcia z łożyska – przez współpracującą z wałem metalową panew. W obydwóch wypadkach, ze względu na małe grubości powłok, minimalizowane są skutki pęcznienia czy też rozszerzania cieplnego.

Warto przy okazji zwrócić uwagę na informację na rysunku 28 o tym, że skojarzenie panwi, mającej powłokę przeciwcierną, z twardym czopem stalowym stanowi tzw. parę prostą, czop zaś powleczony warstewką przeciwcierną i skojarzony z twardszą panew-



Rys. 28. Kompozyty warstwowe typu M-N

ką metalową utworzy parę odwróconą. Zakłada się przy tym, że ruchomym elementem jest czop. To rozróżnienie może być istotne przy rozważaniu zużywania się elementów łożyska. W parze prostej występuje intensywniejsze miejscowe zużywanie panwi, natomiast w parze odwróconej sytuacja jest odwrotna: intensywniej, lecz równomiernie zużywa się czop. Zilustrowano to na rysunku 29.



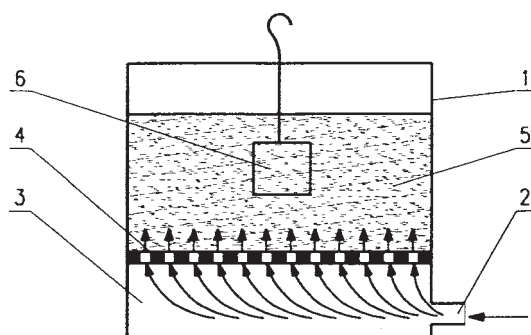
Rys. 29. Schemat prostej (a) i odwróconej (b) pary tarcia w łożysku (przy ruchomym czopie)

Do wytwarzania powłok stosuje się różne metody. Można je podzielić na trzy grupy:

- 1) nanoszenie powłoki na wstępnie ogrzany element,
- 2) nanoszenie powłoki na zimny element,
- 3) nanoszenie powłoki w procesie nagrzewania.

Metody należące do pierwszej grupy polegają na umieszczeniu wstępnie podgrzanego elementu w proszku polimeru, dzięki czemu tworzywo topi się na powierzchni elementu, a po ostygnięciu tworzy powłokę. Element poddawany takiej obróbce musi być oczywiście podgrzany do temperatury wyższej niż temperatura topnienia danego polimeru.

Jedną z efektywniejszych metod tej grupy stanowi fluidyzacja. Metoda ta polega na umieszczeniu podgrzanego elementu w zawieszynie proszku polimeru we fluidyzatorze, którego schemat pokazano na rysunku 30.



Rys. 30. Schemat fluidyzacji; 1 – wanna fluidyzacyjna, 2 – dopływ powietrza, 3 – komora powietrzna, 4 – dno porowate, 5 – ładunek fluidalny (zawieszina proszku polimeru w powietrzu), 6 – podgrzany wstępnie element do powleczenia polimerem

Grubość nafluidyzowanej powłoki i jej strukturę reguluje się stężeniem zawiesiny, temperaturą elementu oraz czasem trzymania tego elementu we fluidyzatorze.

Odmianą tej metody jest napylenie gorącego elementu strumieniem powietrza z proszkiem polimeru bez użycia fluidyzatora. Stosuje się ją na ogół do nakładania powłok polimerowych na duże powierzchnie.

Do tej grupy technologii powłok polimerowych zalicza się także zanurzanie gorącego przedmiotu w sproszkowanym polimerze lub też obtaczanie elementu po takim proszku.

Jeśli wytwarza się powłoki z żywic termoutwardzalnych, np. epoksydowych, to konieczne będzie dodatkowe zainstalowanie pieca do ich usieciowania.

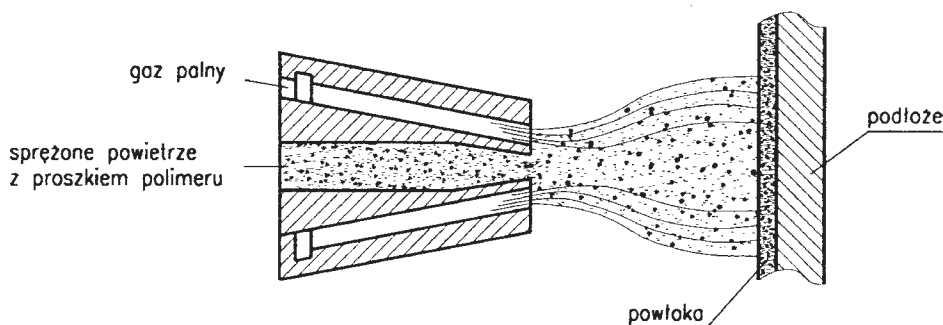
Metody drugiej grupy mogą stanowić samodzielny sposób wytwarzania powłok, mogą też być pierwszym etapem ich tworzenia.

W pierwszym wypadku chodzi o wytwarzanie powłok przez nakładanie powłok pędzlem, przez natrysk lub przez kąpiel. Do takiego sposobu nakładania powłok używa się polimerów w zawiesinach.

W drugim wypadku tworzenie powłoki składa się z dwóch etapów: nanoszenia polimeru na powierzchnię metalową, a następnie nagrzewania i roztopienia polimeru na tej powierzchni. Podstawowym mechanizmem nanoszenia polimeru w tej metodzie jest elektryczne ładowanie jego cząstek i ich osadzanie na powierzchni metalowej, przy czym przenoszenie tych cząstek może się odbywać za pomocą pola elektrycznego lub za pomocą sprężonego powietrza.

Do grupy tej zalicza się także elektroforezę, tj. wykorzystywanie przesuwania cząstek polimeru tworzącego zawiesinę, pomiędzy elektrodami, pod działaniem pola elektrostatycznego.

Główną metodą trzeciej grupy jest natrysk płomieniowy. Polega ona na nagraniu powierzchni powlekanego elementu otwartym płomieniem przez rozpylacz, którym podaje się jednocześnie sproszkowany polimer. W płomieniu cząstki polimeru mięknią, po czym rozplývają się po gorącej powierzchni. Sposobem tym można wytwarzać powłoki na elementach o dowolnych wymiarach, a także na ich częściach. Na rysunku 31 pokazano schematycznie tę metodę.



Rys. 31. Schemat tworzenia powłoki polimerowej za pomocą natrysku płomieniowego

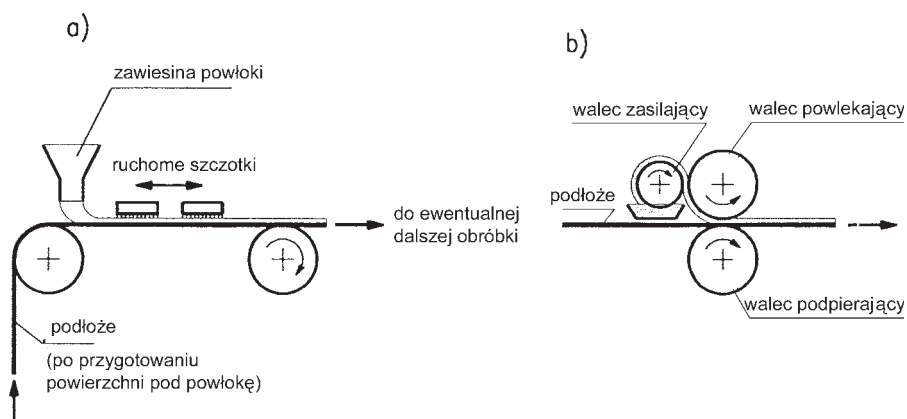
Innym sposobem zaliczanym do tej grupy technologii powłok polimerowych jest nanoszenie powłok za pomocą promieniowania lampy kwarcowej. Mechanizm jest podobny do tego, jaki jest w natrysku płomieniowym, ale źródłem ciepła jest lampa kwarcowa.

Pewną odmianą obydwóch tych sposobów jest nanoszenie powłok z masy roztopionego polimeru za pomocą jej natryskiwania na podgrzany przedmiot.

Oprócz opisanych technik wykonywania powłok polimerowych są jeszcze inne, stanowiące bądź ich modyfikacje przystosowane np. do produkcji wielkoseryjnej, bądź wynikające ze specyfiki polimeru. Przykładem pierwszej z wymienionych wersji może być automatyczne nakładanie powłoki sposobem malarskim lub metodą „rotaprintową” – z zawiesiny polimeru. Pokazano to schematycznie na rysunku 32. Druga wersja dotyczy np. policzterofluoroetylen (PTFE). Ze względu na dużą odporność cieplną tego tworzywa oraz małą jego adhezję do metalu nie można zastosować go do wytwarzania powłok sposobami opisanymi wyżej. PTFE nanosi się na powierzchnie metalowe metodą spiekania, wciskania w porowatą matrycę (np. pormetu) lub naklejania cienkich folii za pomocą specjalnych klejów. W wypadku spiekania powłoka z PTFE jest porowata, co jest korzystne ze względu na smarowanie: olej zatrzymany w porach powłoki stanowi awaryjną rezerwę smarową.

O ile do wytwarzania powłok przeciwciernych z polimerów ślizgowych nie są potrzebne środki wiążące je z metalowym podłożem, o tyle powłoki ze smarów stałych wymagają lepiszcza. Jako smarów stałych używa się zazwyczaj grafitu i dwusiarczku molibdenu MoS₂. Rzadziej stosuje się dwusiarczek wolframu WS₂, który góruje co prawda nad dwusiarczkiem molibdenu odpornością cieplną, jest jednak od niego droższy. Na lepiszcza używa się żywic utwardzalnych. Dane o obydwóch rodzajach tych tworzyw zestawiono w tabelach 11 oraz 12.

Jak widać z tych tabel, do smarów stałych zaliczono także policzterofluoroetylen PTFE. Ten polimer jest ślizgowo uniwersalny: stosuje się go jako monolit (rzadziej),



Rys. 32. Nakładanie powłok na taśmę z zawiesiny polimeru; a) sposobem malarskim, b) metodą „rotaprintową”

Tabela 11. Smary stałe stosowane na powłoki przeciwciernie

Rodzaj smaru stałego	Zakres temperatury pracy [°C]	Współczynnik tarcia po stali
Grafit	-240÷430	0,1÷0,2
Dwusiarczek molibdenu MoS ₂	-240÷350	0,05÷0,20
Dwusiarczek wolframu WS ₂	-240÷500	0,1÷0,2
Policzterofluoroetylen PTFE	-240÷200	0,05÷0,15

Tabela 12. Lepiszczka do wytwarzania powłok przeciwciernych

Rodzaj lepiszcza	Temperatura sieciowania [°C]	Zakres temperatury pracy [°C]
Żywice akrylowe	50÷120	0÷100
Żywice poliestrowe	80÷220	-30÷200
Żywice fenolowe	100÷200	-30÷160
Żywice epoksydowe	180÷200	÷200
Żywice silikonowe	150÷250	÷300
Polimidy	110÷200	-200÷250

jako bazę kompozytów ślizgowych oraz jako smar stały, zarówno w omawianych powłokach przeciwciernych, jak też jako wypełniacz kompozytów ślizgowych.

Porównując dane zawarte w obydwóch powyższych tabelach widzimy, że dopuszczalna temperatura wymienionych lepiszczy *organicznych* jest na ogół niższa od dopuszczalnej temperatury dla smarów stałych. Dlatego odporność cieplna lepiszczy jest zazwyczaj decydująca w doborze zestawu składników powłok przeciwciernych.

Do bardzo wysokiej temperatury (powyżej 300 °C) stosuje się lepiszcza *nieorganiczne*, o których będzie mowa później.

Poniżej będą omówione pokrótce własności wspomnianych składników powłok przeciwciernych ze smarów stałych.

Smary stałe charakteryzują się tym, że są złożone z warstw, których elementy są ze sobą silnie związane, natomiast więzi pomiędzy warstwami są słabe. Dzięki temu materiały te są odporne na ściskanie i podatne na ścinanie (przesuwanie warstw), co jest warunkiem przeciwcierności. Innymi słowami mówiąc, materiały warstwowe (lamelarne) służące jako smary stałe muszą mieć tak zwane *powierzchnie łatwego poślizgu*. Jak widzieliśmy, powierzchnie takie ma policzterofluoroetylen (PTFE).

Grafit jest krystaliczną odmianą węgla. Jest materiałem miękkim, błyszczącym. Barwiące właściwości tego minerału znane były już w starożytności, lecz wzmianki o jego technicznym zastosowaniu pochodzą dopiero z XV wieku, kiedy to w Bawarii użyto rodzimego grafitu do wytwarzania tygli. W XVI wieku zaczęto stosować grafit do pro-

dukcji rysików w ołówkach. Jako smaru stałego zaczęto używać grafitu w XIX wieku, szczególnie do smarowania ślizgowych zespołów maszyn parowych.

Nazwa grafit pochodzi od greckiego słowa γραφω (grafo), co oznacza – pisać. Przez dłuższy czas mylono grafit z innym minerałem – molibdenitem (będzie o nim mowa niżej) i dopiero w XVIII wieku zaczęto rozróżniać obydwie minerały.

Rozróżnia się dwie podstawowe grupy grafitów: naturalny i syntetyczny. Grafit naturalny jest minerałem o różnym stopniu krystaliczności – od bliskiej zeru do bardzo wysokiej oraz różnej czystości (do 90% zawartości węgla). Ten rodzaj grafitu ma połysk srebrzystoszary.

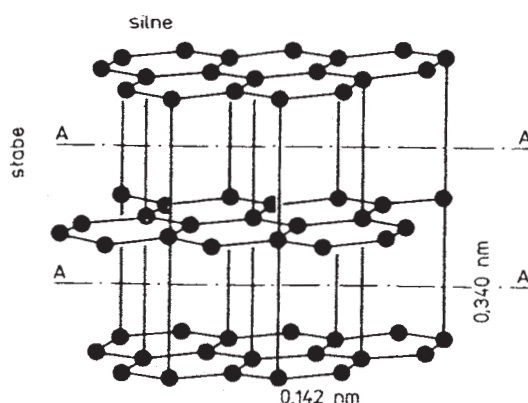
Ze względu na wyczerpujące się złoża grafitu naturalnego, zróżnicowaną jego krystaliczność i zanieczyszczenia oraz ze względu na duże zapotrzebowanie na to tworzywo – większość obecnie stosowanych grafitów pochodzi z syntezy chemicznej. Wytwarza się je bądź z węgla kamiennego, bądź też z koksu naftowego w temperaturze 2000÷3000 °C, w piecu elektrycznym. Ten rodzaj grafitu ma połysk szaroczarny.

Grafit ma heksagonalno-warstwową strukturę z płaszczyznami łatwego poślizgu. Pokazano ją na rysunku 33.

Małe opory tarcia grafitu zależą od otoczenia. Współczynnik tarcia w otoczeniu atmosferycznym wynosi od 0,1 do 0,2, przy czym mniejsze wartości dotyczą większej wilgotności. Adsorbowane na krawędziach sieci krystalicznej cienkie filmy tlenu i pary wodnej sprzyjają znacznemu obniżeniu oporów przesuwania się warstw grafitu. Natomiast w otoczeniu próżni współczynnik tarcia grafitu może osiągnąć nawet wartość 0,5, a zużycie tego tworzywa gwałtownie się zwiększa. Powyżej 500 °C grafit zaczyna się utleniać, przy czym wartość współczynnika tarcia zaczyna się zwiększać. Interesujące jest zachowanie się grafitu w próżni: ze wzrostem temperatury opory tarcia maleją.

Dwusiarczek molibdenu MoS_2 występuje – podobnie jak grafit – w dwóch postaciach: jako naturalny i jako syntetyczny.

Naturalny dwusiarczek molibdenu wytwarza się z minerału o nazwie molibdenit. Nazwa pochodzi od greckiego słowa μολυβδος (molibdos) – ołów, ponieważ starożyt-



Rys. 33. Struktura grafitu; A–A – płaszczyzny poślizgu

ni Grecy mylili ołów z molibdenitem a nawet z grafitem. Ma on zabarwienie szaroniebieskie. Natomiast syntetyczny MoS_2 otrzymywany z pierwiastków ma odcień czarny.

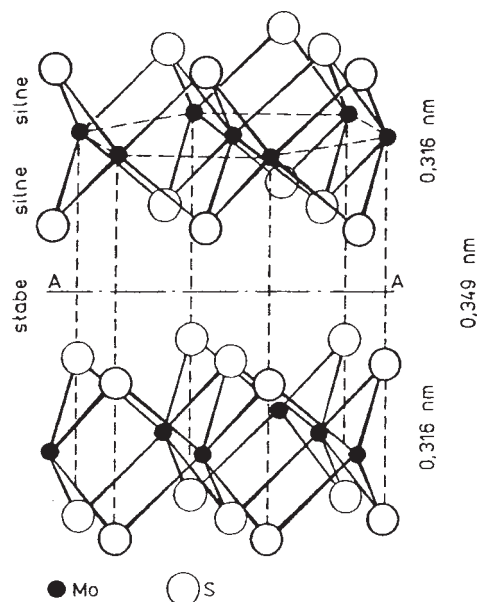
Substancja ta ma – podobnie jak grafit – strukturę heksagonalną, z płaszczyznami łatwego poślizgu. Pokazano ją na rysunku 34.

Podobnie jak grafit, dwusiarczek molibdenu wykazuje małe wartości współczynnika tarcia ($0,1 \div 0,2$). Tarcie to jednak – w przeciwieństwie do grafitu – nie zależy od adsorbowanych filmów; wręcz przeciwnie, mogą one zmniejszać jego właściwości smarne (o czym niżej).

Niskie wartości współczynnika tarcia MoS_2 utrzymują się do temperatury około 200°C , po czym następuje ich wzrost wskutek stopniowego utleniania się MoS_2 do MoO_3 . Proces ten zachodzi szczególnie ostro powyżej 400°C , to jest temperatury intensywnego utleniania dwusiarczku molibdenu. Ponieważ trójtlenek molibdenu ma właściwości ściernie, w tym stanie zamiast smarowania zachodzi intensywne zużywanie elementów smarowanych dwusiarczkiem molibdenu.

W próżni dwusiarczek molibdenu rozkłada się w temperaturze 800°C i wtedy tarcie gwałtownie się zwiększa.

Dotąd wymienione były cechy wspólne obydwóch najczęściej stosowanych smarów stałych – grafitu i dwusiarczku molibdenu: podobna sieć krystaliczna, podobny mechanizm smarowania i podobne wartości współczynnika tarcia. Pierwszą różnicę między nimi odnotowano wyżej: grafit wykazuje najlepsze właściwości w otoczeniu wilgotnym, dodajmy tu jeszcze: nienajlepsze właściwości smarne w tleniu i całkowicie nie nadaje się on do smarowania w azocie. Natomiast dwusiarczek molibdenu zachowuje



Rys. 34. Struktura dwusiarczku molibdenu; A–A – płaszczyzny poślizgu

się odwrotnie: wykazuje on dobre właściwości smarne w azocie, gorzej zachowuje się w tlenie i całkiem źle w wilgotnym otoczeniu. Te właściwości obydwóch tworzyw powinny być brane pod uwagę przy projektowaniu samosmarownych łożysk ślizgowych, w których mają one pełnić rolę smarów.

Dwusiarczek wolframu WS_2 jest „najmłodszym” w grupie smarów stałych. Strukturą i właściwościami jest on podobny do dwusiarczku molibdenu. Góruje on nad nim przede wszystkim większą odpornością cieplną (porównaj tab. 11) oraz dobrymi właściwościami tribologicznymi w wodzie i bardzo dobrymi w próżni. Wadą WS_2 jest niestabilność struktury, a przede wszystkim wysoka cena. Powoduje to ograniczone stosowanie tego smaru stałego.

O policzterofluoroetylenie (PTFE), zaliczanym także do smarów stałych, była mowa w punkcie 3.3.1.

W następnej kolejności zostaną pokrótce omówione lepiszcza.

Materiały na lepiszcza powinny cechować się dwiema podstawowymi właściwościami: powinny mieć odpowiednią kohezję „w sobie” oraz przyczepność (adhezję) do podłoża. Dzielą się one na organiczne i nieorganiczne.

Do grupy lepiszczy organicznych należą różnego rodzaju żywice syntetyczne. Stosuje się je do temperatur nie przekraczających 300 °C.

Lepiszczta nieorganiczne dzielą się z kolei na dwie podgrupy [2]:

– bazujące na solach i zawierające wodę szklaną, do temperatury 600 °C, a nawet wyżej;

– ceramiczne (tlenkowe), zawierające krzemionkę (SiO_2) oraz tlenek kobaltu (CoO), do temperatur 800÷1000 °C.

Ze względu na specyficzne zastosowanie lepiszczy drugiej grupy, poniżej będą omówione krótko tylko lepiszcza organiczne.

Żywice akrylowe (PAA) cechują się dobrą odpornością na starzenie i są tanie. Ponieważ mogą być utwardzane także na zimno, nadają się szczególnie do powłok na podłożach o małej odporności cieplnej. Tworzą one dość twarde powłoki, ale nie są odporne na rozpuszczalniki. Nie są też zbyt odporne na ciepło.

Żywice poliestrowe (UP) mają, podobnie jak żywice akrylowe, dobrą odporność na starzenie i mogą być także utwardzane na zimno. Są one stosowane do tworzenia wszelkiego rodzaju laminatów (np. w budowie łodzi). W stosunku do żywic akrylowych mają znacznie większy zakres odporności na ciepło.

Żywice fenolowe (PF) wykazują dobrą przyczepność do powierzchni i są twardsze od żywic akrylowych, ale wymagają wyższych temperatur utwardzania. Za pomocą odpowiednich modyfikacji można jednak uzyskać żywice z tej grupy utwardzające się także w temperaturze pokojowej [23].

O **żywicach epoksydowych (EP)** była mowa już wcześniej. Dodajmy, że mają one doskonałą odporność na rozpuszczalniki i bardzo dobrą przyczepność do podłoża. Są jednak bardziej miękkie niż żywice fenolowe. Modyfikacje epoksy-fenolowe łączą dobre własności obydwóch tych żywic.

Żywice silikonowe (SI) odznaczają się przede wszystkim dużą odpornością cieplną, lecz są dość miękkie i mają niezbyt dobrą przyczepność do podłoża. Natomiast

poliimidy (PI), o których też wcześniej była mowa, mają zarówno dużą odporność cieplną, jak i dużą twardość, co sprzyja stosowaniu ich na wysokoobciążone węzły ślizgowe.

W zakończeniu tego punktu, traktującego o powłokach przeciwiernych, warto przypomnieć, że tworzy się je bądź z „czystych” polimerów ślizgowych, takich jak np. poliamidy, poliacetale, poliimidy i inne, bądź też – przy użyciu odpowiednich lepiszczy – ze smarów stałych, takich jak grafit, dwusiarczek molibdenu i inne. W tym ostatnim wypadku mamy oczywiście do czynienia już z pewną grupą kompozytów warstwowych wypełnianych.

Dla pełniejszego obrazu powłok przeciwiernych, poniżej przedstawia się za [2] niektóre dane dotyczące technologii tych kompozytów. Wybrano tylko te informacje, które dotyczą najczęściej stosowanych sposobów wytwarzania tych powłok.

Za pomocą **fluidyzacji** nakłada się zazwyczaj jednoskładnikowe powłoki z termoplastów, takich jak np. poliamidy, polietyleny. Można też fluidyzować powłoki z policzterofluoroetyleny, jednakże bardziej skutecznym i częściej stosowanym sposobem tworzenia powłok z tego tworzywa jest natrysk i spiekanie proszku. Temperatura nagrzania fluidyzowanego elementu zależy od temperatury topnienia danego polimeru. Dla poliamidów wynosi ona od 160 do 260 °C, a dla polietylenów od 105 do 135 °C. Fluidyzacja pozwala na uzyskiwanie stosunkowo grubych powłok: od 20 do 500 µm. Zazwyczaj konieczna jest dodatkowa obróbka mechaniczna (skrawaniem) nafluidyzowanych powłok dla uzyskania potrzebnego wymiaru (np. średnicy tulejki łożyskowej) i gładkości powierzchni.

Powłoki z innych polimerów, zarówno jednoskładnikowe jak też wypełniane smarami stałymi (grafitem, dwusiarczkiem molibdenu, policzterofluoroetylenem), nakłada się zazwyczaj metodami **natrysku**, **kąpieli**, **malowania** lub **nawalcowywania** (wspomniana wcześniej metoda „rotaprintowa”). Temperatura procesu nakładania powłok zależy od rodzaju lepiszcza i waha się w granicach od 25 do 200 °C. Grubość powłok nanoszonych wymienionymi sposobami wynosi od 7,5 do 50 µm [2].

Specyficzną metodą wytwarzania powłok z polimerów jest wspomniane wcześniej napylenie elektrostatyczne. Przypomnijmy sobie, że chodzi o umieszczanie cząstek proszku polimeru na podłożu z zastosowaniem pola elektrostatycznego. Końcowym zabiegiem tej metody jest stopienie polimeru na podłożu za pomocą jakiegoś źródła ciepła (płomienia, lampy kwarcowej itp.). Tym sposobem można nakładać powłoki zarówno z termoplastów, jak i duroplastów. Stosowana jest ona chętnie do nakładania powłok z PTFE.

Podobne zastosowanie ma także **natrysk płomieniowy**, omówiony w metodach wykonywania powłok polimerowych, zilustrowany schematycznie na rysunku 31.

Na zakończenie tego bardzo krótkiego opisu technologii powłok przeciwiernych trzeba jeszcze wspomnieć o przygotowaniu podłoża przed nałożeniem powłok oraz o ich obróbce końcowej. Powierzchnia podłoża pod powłokę musi być oczyszczona i od tłuszczona. Ponadto korzystne jest zwiększenie powierzchni przylegania powłoki do

podłoża przez jej schropowacenie. W tym celu stosuje się zazwyczaj piaskowanie i trawienie powierzchni podłoża.

Obróbka końcowa zależy od przeznaczenia powłoki. Zazwyczaj chodzi o określony kształt, wymiar i gładkość. W wypadku wspomnianych tulejek łożyskowych najczęściej konieczne jest toczenie na określony wymiar średnicy otworu łożyska i uzyskanie potrzebnej gładkości powierzchni. W wypadku nakładania powłok na taśmy, z których potem będą wykonywane elementy łożysk (tulejki, pierścienie oporowe), obróbka końcowa polega przeważnie na walcowaniu powłoki.

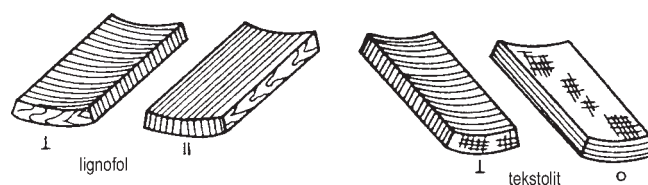
Współczesne metody nakładania cienkich powłok pozwalają zarówno na dokładną regulację ich grubości jak i dużą ich gładkość, co eliminuje dodatkową obróbkę końcową.

3.4.3. LAMINATY NIEMETALOWE

W budowie łożysk ślizgowych wypróbowano dwa rodzaje laminatów niemetalowych: laminaty ze sklejki drewnianej, znane pod nazwą *lignofol*, oraz laminaty z tkaniny bawełnianej, znane pod nazwą *tekstolit*. W obydwóch wypadkach warstwy materiału (drewna lub tkaniny bawełnianej) sklejane są na gorąco za pomocą żywic fenolowo-formaldehydowych typu rezolowego lub nowolakowego.

Na rysunku 35 pokazano schematy tych laminatów.

Popularność tych tworzyw w latach pięćdziesiątych XX wieku wynikała z potrzeby zastąpienia drogich i deficytowych metali kolorowych stosowanych na panwie łożysk



Rys. 35. Przykłady laminatów typu niemetal-niemetal

ślizgowych. Lignofol jako materiał łożyskowy ma ponadto swe źródło w historii łożyskowania. Drewno jest bowiem jednym z najstarszych materiałów stosowanych w węzłach tarcia. Co prawda w węzłach smarowanych, między innymi wodą.

Szczególnym rodzajem drewna stosowanym na węzły ślizgowe jest *gwajak* (*Guaiacum officinale*). Jest ono bardzo twarde i zawiera około 30% żywicy (gwajakol), która zapewnia temu gatunkowi drewna bardzo dobre właściwości ślizgowe; jest ono samosmarujące. Materiał ten znalazł zastosowanie między innymi w łożyskowaniu wałów okrętowych. Ze względu na cenę tego drewna próbowano zastąpić je właśnie lignofolem. Samosmarowność lignofolu (a także tekstolitu) usiłowano uzyskać przez nasycenie tych kompozytów olejem na gorąco. Badania laboratoryjne i praktyka eksploatacyj-

na pokazały jednak, że opisywane materiały mogą pracować raczej podczas smarowania, a ich niewielka samosmarowność może być tylko rezerwą awaryjną.

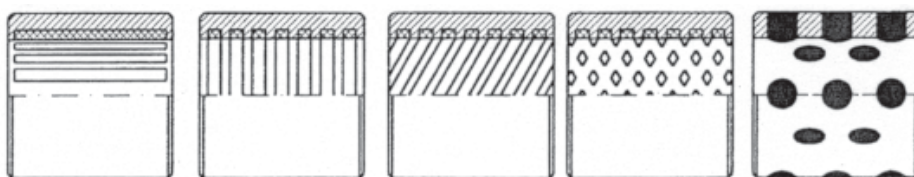
Ogromny rozwój tworzyw sztucznych, jaki rozpoczął się w połowie ubiegłego wieku zmarginalizował znaczenie tych kompozytów.

3.4.4. KOMPOZYTY WYPEŁNIANE TYPU METAL-NIEMETAL

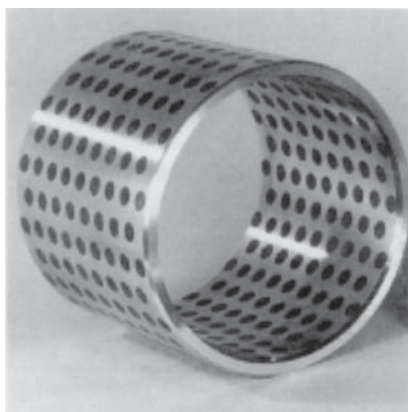
Kompozyty tego typu składają się z osnowy metalowej, w której rozmieszczone są wypełniacze – smary stałe. Ze względu na konfigurację tych wypełniaczy i sposób ich rozmieszczenia, można rozróżnić dwa podstawowe rodzaje kompozytów typu M-N: kompozyty bieżnikowane wkładkami smarów stałych oraz kompozyty wypełniane smarami stałymi w całej swojej masie.

Kompozyty bieżnikowane mają rowkowaną warstwę wierzchnią bądź otwory, w których umieszcza się wkładki ze smarów stałych (PTFE, grafitu, poliamidów, poliimidów i innych). Podczas tarcia czopa o panew smar pokrywa cienką warstwą zarówno powierzchnię panwi jak i czopa, zmniejszając tarcie i przeciwdziałając nadmiernemu zużyciu tych elementów.

Na rysunku 36 pokazano schematy wymienionych kompozytów, a na rysunku 37 fotografię tulei łożyskowej, kompozytu z wkładkami z grafitu.



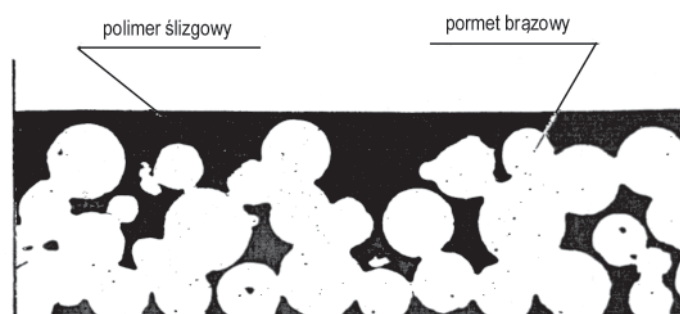
Rys. 36. Przykłady panewek metalowych bieżnikowanych smarem stałym [14], [1]



Rys. 37. Brązowa tuleja łożyskowa z grafitowymi wkładkami [1]

Wypełniane kompozyty metalowe z wypełniaczami innymi niż polimery, takimi jak np. grafit lub dwusiarczek molibdenu, będą omówione oddzielnie, w następnym rozdziale.

Do polimerowych kompozytów wypełnianych typu M-N należą pormety wypełniane polimerami, zazwyczaj policzterofluoroetylenem PTFE. Kompozyty te stanowiły w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku pewną alternatywę dla pormetów nasycanych olejem, szczególnie dla łożysk pracujących w wyższych temperaturach, lub gdy wymagana była ochrona przed zabrudzeniem olejem. Schemat takiego kompozytu przedstawiono na rysunku 38.



Rys. 38. Schemat kompozytu wypełnianego typu M-N: pormet wypełniony polimerem

Pormety nasyca się bądź zawiesiną polimerową, bądź też przez wciskanie polimeru (np. PTFE) w pory. Ten rodzaj kompozytów nie rozprzestrzenił się zbytnio i nie stanowi konkurencji dla pormetów tradycyjnie nasycanych olejem.

Jest on natomiast prototypem współczesnych kompozytów wielowarstwowych wypełnianych, w których stanowi jedną z warstw. Będzie o tym mowa w dalszym tekście.

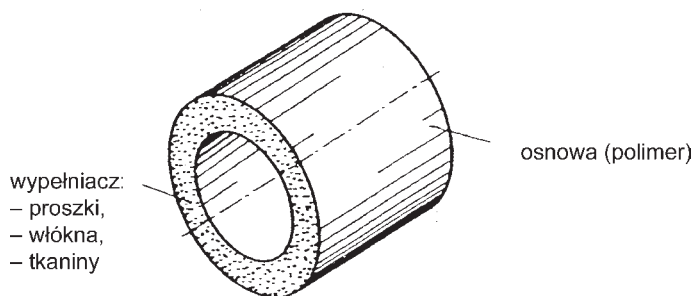
3.4.5. KOMPOZYTY WYPEŁNIANE TYPU NIEMETAL-NIEMETAL I (LUB) METAL

Ten rodzaj kompozytów jest najszerszej stosowany ze względu na możliwości jakie daje użycie różnych polimerów na osnowę, a przede wszystkim ze względu na możliwość stosowania różnych wypełniaczy, zarówno co do ich rodzaju jak i stężenia. Ponadto taki kompozyt jest najczęściej składnikiem kompozytów warstwowych wypełnianych, o których będzie mowa dalej.

Na rysunku 39 pokazano schemat tego rodzaju kompozytów.

Na **osnowę** stosuje się polimery ślizgowe, wymienione w punkcie 3.2.3 i opisane w punkcie 3.3. Najszersze zastosowanie mają: policzterofluoroetylen (PTFE), poliamidy (PA), poliacetale (POM) oraz żywice epoksydowe (EP).

Wypełniacze mają zadanie polepszać własności (fizyczne, mechaniczne, elektryczne) i właściwości (tarciove, przeciwzużyciowe i inne) kompozytów. Ze względu na skutki, jakie one wywołują odróżnia się wypełniacze (ang. *fillers*) od wzmacniaczy (ang. *reinforcements*). Ta druga nazwa dotyczy wypełniaczy dodawanych do polimerów dla polepszenia ich własności wytrzymałościowych.



Rys. 39. Schemat kompozytów wypełnianych

Jako wypełniacze używa się: proszków, włókien i tkanin. Mogą one być organiczne (zazwyczaj polimery) lub nieorganiczne (np. metale, grafit, dwusiarczek molibdenu i inne).

Proszki o wielkości ziaren od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów są dodawane do polimerowej osnowy dla polepszenia własności fizycznych i właściwości tribologicznych kompozytów. I tak:

- proszki miedzi i jej stopów (przede wszystkim brązów) dodaje się dla polepszenia przewodności cieplnej kompozytów,
- proszek ołowiu dodawany jest zarówno dla zwiększenia przewodności cieplnej jak i w celu polepszenia właściwości ślizgowych kompozytów,
- w podobnym celu dodawany jest proszek grafitu,
- proszki polimerów (najczęściej policzterofluoroetyleny lub poliimidu) służą polepszeniu właściwości ślizgowych kompozytów,
- w podobnym celu dodawany jest proszek dwusiarczku molibdenu lub (rzadziej) dwusiarczku wolframu.

Obok głównych celów, wymienionych wyżej, dodatek proszków do polimerowej osnowy powoduje zazwyczaj polepszenie stabilności wymiarowej kompozytów. Stabilność tę osiąga się także przez dodanie niemetalowych proszków z tlenku cynku, siarczany baru, talku [27].

Włókna są dodawane do polimerów zarówno dla polepszenia ich własności fizycznych (zwiększenia przewodności cieplnej, zmniejszenia rozszerzalności cieplnej) i mechanicznych (zwiększenia wytrzymałości na rozciąganie, udarowości, odporności na pełzanie), jak i w celu polepszenia ich właściwości tribologicznych (zmniejszenia tarcia, zmniejszenia zużycia).

Włókna szklane stosuje się powszechnie ze względu na ich niską cenę. Są to typowe wzmocniacze. Mają one jednak tę wadę, że – w niektórych układach – mogą intensywnie ścierać elementy metalowe, szczególnie stopy aluminium oraz stali niskowęglowej. Dlatego zarówno włókna szklane jak i inne postacie wypełniaczy szklanych (np. kulki szklane) stosuje się zazwyczaj w połączeniu z włóknami z PTFE. Musi przy tym być utrzymana odpowiednia technologia, bowiem sam zestaw materiałów nie daje jeszcze dobrego kompozytu. Podobnie jak sam przepis kulinarny nie gwarantuje jeszcze dobrej potrawy (patrz też dalszy tekst).

Włókna węglografitowe służą zarówno do wzmocniania kompozytu jak i – przede wszystkim – do zwiększenia jego przewodności cieplnej, zmniejszenia rozszerzalności cieplnej i polepszenia właściwości ślizgowych. Otrzymuje się je albo z poliakronitrylu (PAN), albo ze specjalnego paku ropopochodnego. Włókna wytwarzane z PAN mają dużą wytrzymałość i odporność na zużywanie, natomiast włókna z paku cechują się wysokim modułem sprężystości [2]. Włókna węglowe bardziej zużywają przeciwpoверхnię niż włókna o dużym stopniu grafityzacji, dlatego do wytwarzania kompozytów ślizgowych stosuje się zazwyczaj te ostatnie. Interesującą właściwością kompozytów wypełnianych włóknami węglografitowymi jest odporność na ładowanie elektrostatyczne, co jest jednym z istotnych problemów w budowie maszyn biurowych i włókienniczych. W stosunku do kompozytów wypełnianych włóknami szklanymi przewodność cieplna kompozytów z włóknami węglowymi jest dwukrotnie większa, a rozszerzalność cieplna dwukrotnie mniejsza, co przybliża te kompozyty właściwościami do metali [1].

Włókna aramidowe (z poliamidów aromatycznych) mają własności mechaniczne (wytrzymałość na rozciąganie) leżące pomiędzy tymi właściwościami dla włókien szklanych i włókien węglowych. Stwarza to oczywiście dodatkowe możliwości tworzenia zróżnicowanych kompozytów polimerowych. W szczególności cenne jest to, że – w przeciwieństwie do włókien szklanych i węglografitowych – kierunek ich ułożenia w osnowie kompozytu nie wpływa na jego własności i właściwości. Obok tej quasi-izotropowości mechanicznej i tribologicznej kompozyty wypełniane włóknami aramidowymi cechują się tym, że nie zużywają elementu współpracującego. Jest to bardzo ważne dla współpracy z takimi metalami, jak niehartowane stale i stopy metali nieżelaznych, szczególnie aluminium i miedzi. Również tarcie kompozytów z tymi włóknami o metale jest stosunkowo nieduże. Ponadto kompozyty takie cechują się następującymi zaletami: izotropowe – a więc niezależne od kierunku – rozszerzanie cieplne i skurcz, a tym samym odporność na wypaczenie oraz mały ciężar [1].

Typowy jest dodatek 10÷20% wagowy włókien do polimerów. Większa zawartość włókien czyni kompozyty za twardymi do obróbki i mniej podatnymi we współpracy z czopem. W szczególnych wypadkach, gdy żądana jest duża wytrzymałość i odporność na pełzanie, zawartość tych wypełniaczy sięga 50÷60% wagowo.

Włókna mają zazwyczaj średnicę 5÷10 μm i mogą być długie, ciągłe, mogą być też mielone lub cięte. Mielone włókna są najkrótsze, mają od 30 do 3000 μm długości (średnio 300 μm). Natomiast włókna cięte mają długość od 5 do 50 mm.

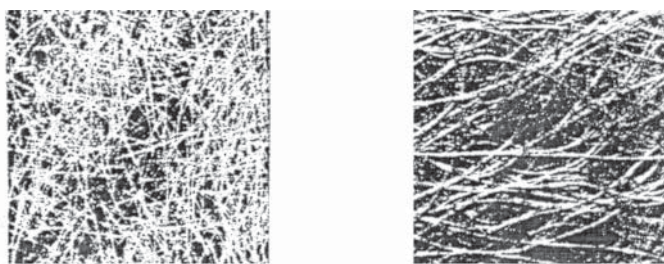
Stosuje się też włókna ciągłe w postaci przędzy w zwojach lub w taśmach zaimpregnowanych. Służą one m. in. do nawijania na czopy wałów (por. wspomniany wcześniej układ pary odwróconej).

Ze splotu włókien tworzy się **tkaniny**. Służą one do wzmacniania kompozytów bądź do polepszania ich właściwości ślizgowych. W pierwszym wypadku stosuje się tkaniny z włókna szklanego, w drugim zaś z policzterofluoroetylenu PTFE.

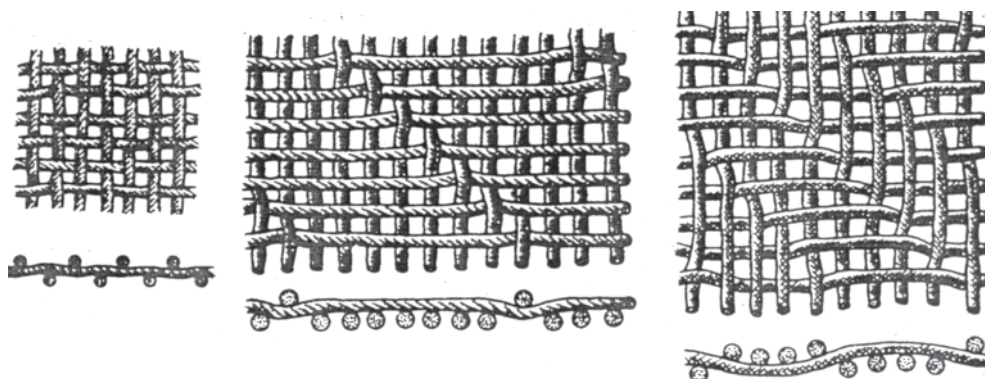
Włókna mogą być rozmieszczone w kompozycie kierunkowo lub losowo. Włókna długie są zazwyczaj odpowiednio orientowane, natomiast włókna krótkie rozmieszczone są w osnowie chaotycznie.

Rozmiar i orientacja włókien w polimerowej osnowie są niezmiernie ważne dla właściwości kompozytu. Największą odporność kompozytu na zużywanie uzyskuje się wtedy, gdy włókna usytuowane są prostopadle do powierzchni tarcia. Jednakże tak usytuowane twarde włókna, takie jak węglowe o małym stopniu grafityzacji lub szklane, mogą powodować intensywne zużywanie współpracującego elementu. Dlatego należy je orientować równoległe do powierzchni tarcia.

Na rysunku 40 pokazano fotografie włókien szklanych, a na rysunku 41 schematy tkanin z takich włókien.



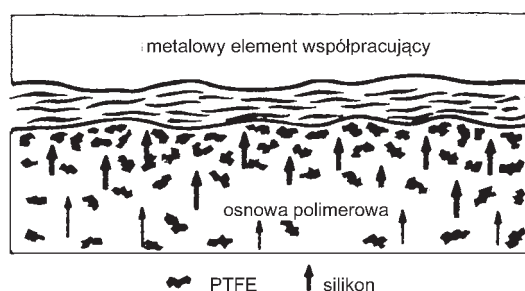
Rys. 40. Włókna szklane; a – cięte, b – ciągłe



Rys. 41. Rodzaje splotów tkanin szklanych; a – płócienny, b – satynowy, c – rządkowy [29]

Najczęściej stosuje się splot satynowy, ponieważ zapewnia on dobrą elastyczność, a tym samym możliwość dobrego ułożenia w kształtce, np. w tulei łożyskowej. Podobne tkaniny wykonuje się także z włókien węglografitowych oraz z policzterofluoroetyleny, PTFE. Są to, oczywiście, wypełniacze mające zadanie zmniejszenia tarcia.

Oprócz wypełniaczy stałych stosuje się także wypełniacze ciekłe – syntetyczne oleje smarne [1], [2]. Olejami tymi nasycza się porowatą matrycę, co wspomaga kompozyt w zmniejszaniu tarcia i zużycia. Stosuje się także połączenie takich wypełniaczy z wypełniaczami stałymi, np. PTFE. Na rysunku 42 pokazano schemat samosmarowania takiego kompozytu.

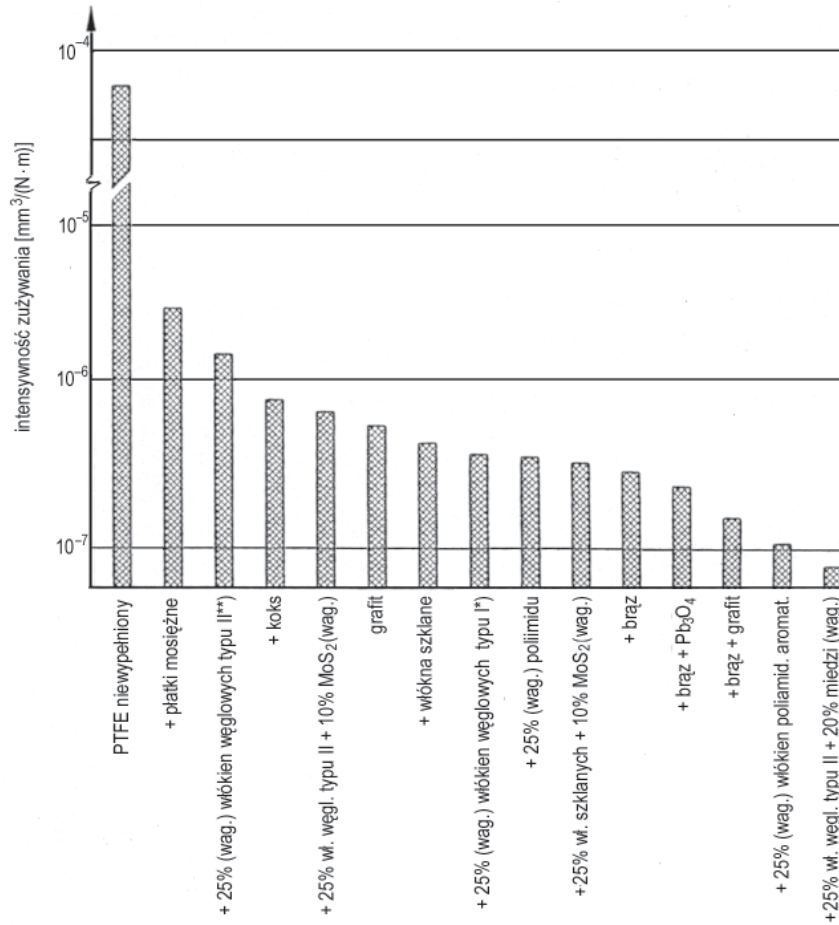


Rys. 42. Schemat samosmarowania kompozytu termoplast + PTFE + silikon [1]; silikon dyfundujący do powierzchni wspomaga przeciwciernie działanie PTFE

Jakkolwiek wszystkie wymienione wcześniej polimery ślizgowe mogą być używane na osnowę kompozytów, to – ze względu na doskonałe właściwości ślizgowe – najczęściej stosuje się na nią policzterofluoroetylen (PTFE). Do takiego stwierdzenia upoważnia np. fakt, że intensywność zużycia PTFE wypełnionego wypełniaczami nieorganicznymi lub organicznymi można zredukować od 100 do 1000 razy! [2]. Ponadto wypełnianie smarami stałymi, takimi jak np. MoS_2 , dodatkowo zmniejsza tarcie. Dlatego poniżej podane zostaną bardziej szczegółowe dane dotyczące właśnie kompozytów opartych na osnowie tego tworzywa.

Na rysunku 43 przedstawiono intensywność zużycia różnych kompozytów PTFE. Jak widać, zależnie od składu kompozytów, można zmniejszyć ich zużycie o ponad rząd wielkości, a w stosunku do czystego PTFE nawet o ponad dwa rzędy wielkości, co potwierdza opinię zawartą w poprzednim akapicie.

Dodatek wypełniaczy do PTFE nie tylko modyfikuje charakterystyki tarcia i zużyciowe kompozytu, lecz także wpływa na zależność intensywności zużycia od temperatury. Stwierdzono, że zużycie kompozytów PTFE z wypełniaczami nieorganicznymi (jak np. włókna szklane, węglowe, proszek brązu) wzrasta gwałtownie ze wzrostem temperatury w przedziale od 20 °C do 130 °C, natomiast zużycie kompozytów z wypełniaczami organicznymi (takimi jak np. włókna poliimidowe, z aromatycznych poliamidów) pozostaje bez zmian do ok. 150 °C, a potem zaczyna wzrastać [2].



*) włókna węglowe typu I mają wysoki moduł sprężystości

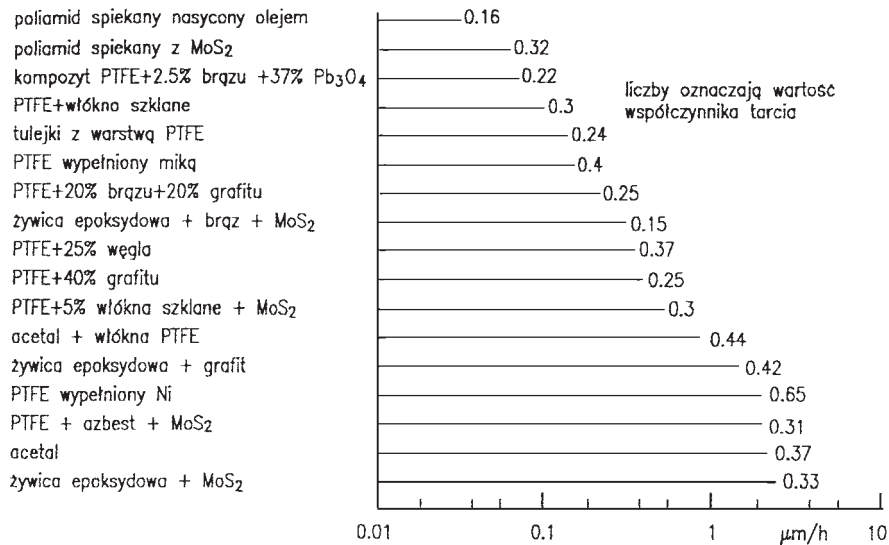
***) włókna węglowe typu II mają dużą wytrzymałość lecz niski moduł sprężystości

Rys. 43. Ilustracja wpływu wypełniaczy na zużycie kompozytów PTFE; badania prowadzono na modelu „sworzeń-pierścien”, przy tarceniu kompozytów PTFE o polerowaną stal nierdzewną o chropowatości powierzchni $R_a = 0,15 \mu\text{m}$ [2]

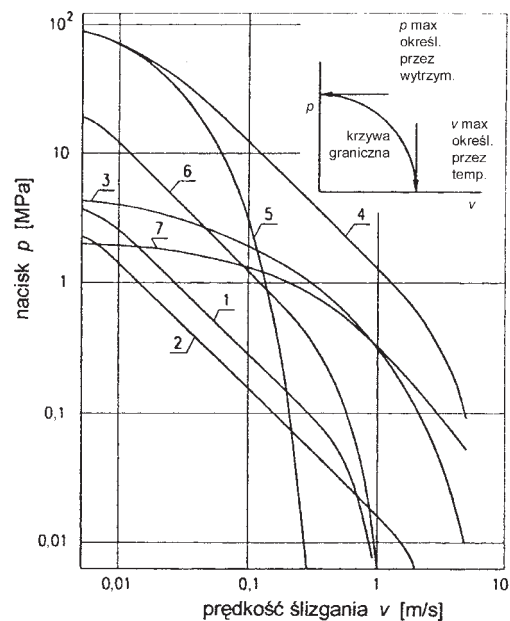
(Według: B. Bhusan, B.K. Gupta: *Handbook of Tribology*, 1997, za zgodą wydawcy Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, USA)

W uzupełnieniu informacji o wypełnianych kompozytach polimerowych – na rysunkach 44 i 45 oraz w tabelach 13 i 14 zamieszczono dodatkowe dane o ich właściwościach tribologicznych.

Na rysunku 44 zwraca uwagę przede wszystkim całkowity brak korelacji między intensywnością zużycia i współczynnikiem tarcia. Korelację taką obserwuje się w procesach tarcia metali: metale (lub ich warstwy wierzchnie) o małej wytrzymałości na



Rys. 44. Intensywność zużywania niektórych typowych kompozytów; warunki badań: tulejki o średnicy 9,5 mm i 16 mm, $p = 0,4$ MPa, $v = 0,5$ m/s [21]
(Według: M. J. Neale, *Tribology Handbook*; za zgodą wyd. Butterworth Heinemann)



Rys. 45. Krzywe graniczne polimerów ślizgowych i ich kompozytów [21]; 1 – termoplasty, 2 – PTFE, 3 – PTFE z wypełniaczami, 4 – brąz porowaty impregnowany PTFE + Pb, 5 – duroplast + tkanina z PTFE, 6 – duroplast + MoS₂, 7 – termoplast + węgiel-grafit + PTFE; krzywe określono na podstawie badań tulejek współpracujących z czopem stalowym o chropowatości powierzchni $Ra = 0,2 \div 0,4$ μm, kryterium graniczne stanowiło zużycie 25 μm/100 h
(Według: M. J. Neale, *Tribology Handbook*; za zgodą wyd. Butterworth Heinemann)

Tabela 13. Niektóre własności i właściwości kompozytów policzterofluoroetyleny (PTFE) [2]

Wypełniacz	15% włókna szklanego (wag.)	12,5% włókna szklanego + 12,5% MoS ₂ (wag.)	15% włókna grafitowego (wag.)	20% włókna węglowego + 5% włókna grafitowego (wag.)	55% proszku brązowego + 5% MoS ₂ (wagowo)	Niewypełniany
Gęstość [g/cm ³]	2,19	2,3	2,12	2,1	3,9	2,2
Twardość Shore'a D	65÷70	65	55	55÷60	60÷70	55
Wytrż. na rozciąganie [MPa]	17,5	13,0	9,5	11,6	13,0	9,0
Wydłużenie [%]	300	230	130	70	90	400
Moduł sprężyst. poprz. [GPa]	1,1	1,1	1,4	1,2	1,5	0,6
Przewodn.cieplna [W/(m·K)]	0,43	0,51	0,45	0,44	0,72	0,25
Wsp.rozsz.cieplnej, ×10 ⁻⁶ [°C]	120	110	125	85	100	130
Zużycie, 10 ⁻⁷ [mm ³ /(N·m)]	1,4	1,2	6,8	1,2	1,0	4000
Współczynnik tarcia po stali przy prędkości 0,01 m/s	0,09	0,09	0,12	0,12	0,13	0,1
<i>p</i> <i>v</i> [Mpa(m/s)] przy: <i>v</i> = 0,05/5,0 m/s	0,33/0,50	0,50/0,62	0,35/0,95	0,53/0,42	0,44/0,44	0,04/0,06

Tabela 14. Właściwości tribologiczne niektórych kompozytów polimerowych określone na podstawie badań tarcia w ruchu posuwisto-zwrotnym [2]^{*)}

Materiał sworznia	Współczynnik tarcia		Intensywn. zużycia $\times 10^{-6} \text{mm}^3 / (\text{N}\cdot\text{m})$	Wygląd powierzchni po badaniach
	statyczny	kinetyczny		
PTFE + włókna szklane oraz inne wypełniacze, cięty poprzecznie do pow. tarcia (Rulon LD, Dixon)	0,31	0,30	0,40	Jednolity film polimeru na płycie, dość gładka powłoka sworznia
PTFE + włókna szklane oraz inne wypełniacze, cięty równolegle do pow. tarcia (Rulon LD)	0,28	0,31	0,52	Cienka powłoka na płycie, z przerwami
PTFE + 15% wagowo włókien grafitowych (Dixon)	0,23	0,33	0,81	B. cienka jednolita powłoka na płycie, sworzeń zdeformowany
PTFE + 55% proszku brązu + 5% MoS ₂ (wagowo)	0,24	0,30	0,17	Cienka jednolita powłoka na płycie, widoczne cz. brązu
Poliimid + 15% wagowo proszku grafitu (SP-21, Du Pont)	0,47	zmienny	0,38	Gruba nieciągła powłoka na płycie, sworzeń gładki
Poliimid + 15% wagowo proszku grafitu (Envex 1315, Rogers)	0,49	0,53 zmienny	105,61	–
Poliamidoimid + 3% PTFE + 20% proszku grafitu (wagowo) (Torlon 4275, Amoco)	0,34	0,34	0,42	Bardzo cienki, lecz jednolity film, nieliczne rysy na sworzniu
Poliamidoimid + 3% PTFE + 12% proszku grafitu (wag) (Torlon 4301)	0,39	0,39	25,60	Brak ciągłego filmu na płycie, rysy na sworzniu
Poliimid + 50% obj. przestrzennej tkaniny grafitowej (FMI)	0,54	0,49 zmienny	0,49	Rysy na płycie, brak filmu polimerowego, widoczne włókna na sworzniu
Grafit + 50% obj. przestrzennej tkaniny grafitowej (FMI), dla porównania	0,21	0,22	0,33	Prążkowana czarna powłoka na płycie, liczne pęknięcia na sworzniu

^{*)} Warunki badań: sworzeń po płycie, średnia prędkość ślizgania 1,6 m/s (1200 suwów/min), długość drogi tarcia 40 mm, nacisk 0,7 MPa, test 100 h, w otoczeniu azotu, w temperaturze pokojowej, płyta stalowa o twardości 62 HRC, chropowatość powierzchni $R_a = 0,05 \mu\text{m}$.

ścinanie, a więc o małych oporach tarcia suchego, cechują się zazwyczaj dużą intensywnością zużywania. W wypadku polimerów i ich kompozytów w grę wchodzi prawdopodobnie zmiany strukturalne w warstwie wierzchniej, istotne dla procesów tarcia i zużywania. Chodzi o stosunki faz: krystalicznej i bezpostaciowej, o czym wspomniano wcześniej. Określoną rolę w tym przedmiocie grają zapewne wypełniacze, ich rodzaj i ilość, a także technologia wytwarzania kompozytu.

Duża odporność spiekane poliamidu nasyconego olejem potwierdza wspomniane wcześniej zalety takiego kompozytu. Zastanowienie może budzić duże zużycie kompozytów żywicy epoksydowej z grafitem i MoS_2 .

Jak widać, najmniejsze dopuszczalne wartości parametrów ruchowych p i v mają czyste polimery, co oczywiście potwierdza wyższość ich kompozytów pod względem obciążalności. Największą obciążalność osiągnął kompozyt typu M-N, brąz porowaty nasycony PTFE z dodatkiem proszku ołowiu, co jest uzasadnione wytrzymałością brązowej matrycy i ślizgowymi właściwościami PTFE i ołowiu. Granice obciążalności innych kompozytów mieszczą się między granicami wymienionych materiałów.

Komentując wykresy $p-v$ pokazane na rysunku 45 warto zwrócić uwagę na to, że krzywe graniczne – opatrzone danymi co do warunków badań – są bardziej miarodajne niż używane czasami wartości iloczynu $p v$. Łatwo bowiem można sobie wyobrazić, jak będzie rosła wartość jednego z czynników tego iloczynu (przy $p v = \text{const}$), gdy wartość drugiego będzie dążyła do zera! Dlatego, jeśli już korzystamy z tego iloczynu, to konieczne jest określenie granicznych wartości jego czynników (por. np. ostatni wiersz tab. 13).

Dane zawarte w tabeli 13 dobitnie pokazują jak istotnie polepszają się własności mechaniczne i właściwości tribologiczne kompozytów polimerowych w porównaniu z tymi cechami czystych polimerów. Na przykład wydłużenie kompozytów PTFE może się zmniejszyć – w niektórych wypadkach – nawet ponad pięciokrotnie, intensywność zużywania zmniejsza się prawie 4000 razy, a obciążalność kompozytów PTFE, określana iloczynem $p v$, zwiększa się o jeden rząd wielkości – w porównaniu z wartościami dla niewypełnianego PTFE.

Odnosząc się do danych zawartych w tabeli 14 warto zwrócić uwagę na fakt, że większość tam wymienionych kompozytów wykazuje mniejsze wartości współczynnika tarcia statycznego niż wartości współczynnika tarcia kinetycznego. Uzasadnia to brak samowzbudnych drgań tarciovych typu *stick-slip* w układach tribomechanicznych, w których zastosowano polimery lub ich kompozyty. Ponadto zwraca uwagę dość duża rozbieżność wartości intensywności zużywania poszczególnych kompozytów, szczególnie zaś dziwna jest ogromna różnica tych wartości dla identycznych (recepturowo) kompozytów poliimidowych, wytwarzanych przez dwie różne firmy. Niestety, w materiale źródłowym [2] nie wyjaśniono tej różnicy. Być może wynika ona ze wspomnianej wcześniej istotnej roli technologii.

I na zakończenie tego punktu dodamy jeszcze kilka uwag (wg [2]):

Stwierdzono, że wartość współczynnika tarcia kompozytów PTFE po stali nie zależy zasadniczo od iloczynu $p v$ w zakresie od 0,2 do 2,2 MPa(m/s).

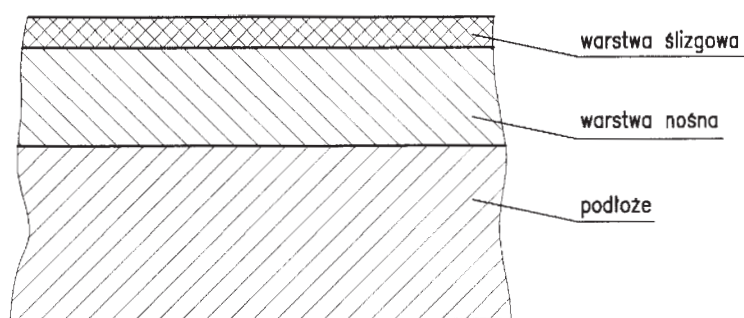
Intensywność zużycia takich kompozytów w temperaturze otoczenia $52\text{ }^{\circ}\text{C} \div 78\text{ }^{\circ}\text{C}$ jest dwa do czterech razy większa niż w temperaturze pokojowej ($\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Kompozyty PTFE z wypełniaczami węglowymi pracujące w otoczeniu tlenu i pary wodnej intensywniej się zużywają.

Istotne znaczenie dla utworzenia się i utrzymywania na powierzchni metalu warstewki współpracującego z nim polimeru ma chropowatość tej powierzchni. Większa chropowatość sprzyja co prawda tworzeniu się grubszej warstewki polimeru, jednak może ona powodować nadmierne jego zużycie. Istnieje więc pewne optimum chropowatości przeciwpowierzchni metalowej.

3.4.6. KOMPOZYTY WIELOWARSTWOWE WYPEŁNIANE

Ten rodzaj kompozytów łączy cechy obydwóch wcześniej omawianych rodzajów materiałów. Na rysunku 46 pokazano schemat struktury tych kompozytów.



Rys. 46. Schemat struktury kompozytów wielowarstwowych wypełnianych

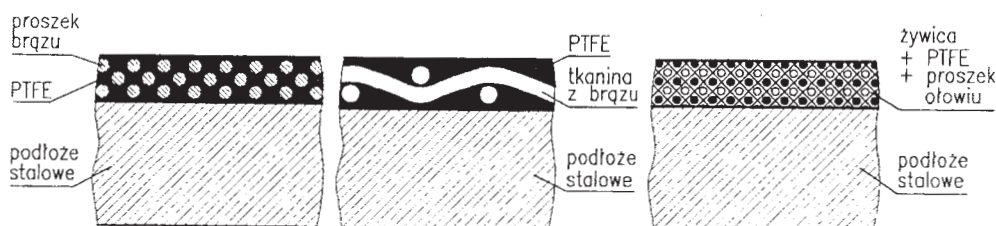
Ideą tego rodzaju kompozytów jest wytworzenie warstwy wierzchniej ze ślizgowego kompozytu wypełnianego – na twardym podłożu, zazwyczaj stalowym. Wywodzi się więc ona z metalowych wielowarstwowych materiałów łożyskowych, w których warstwę wierzchnią stanowią stopy łożyskowe. Z tym, że materiały te są stosowane w budowie łożysk ślizgowych smarowanych konwencjonalnie, kompozyty zaś wielowarstwowe wypełniane stosuje się zazwyczaj w łożyskach niesmarowanych, bezobsługowych.

Kompozyty z wypełnianą ślizgową warstwą wierzchnią spełniają też postulat *Bowdena, Tabora*, mówiący o tym, że minimalizację tarcia suchego można osiągnąć wtedy, gdy warstwa wierzchnia trącego się materiału ma małą wytrzymałość na ścinanie i jest umieszczona na twardym podłożu.

W praktyce stosuje się dwa rodzaje tych kompozytów: z wypełnianą warstwą ślizgową nakładaną bezpośrednio na podłoże (zazwyczaj stalowe) oraz z pośrednią warstwą nośną (z brązu porowatego) umieszczoną na stalowym podłożu, nasyconą smarem stałym, pokrytą dodatkowo powierzchniową warstwą z tego smaru.

Na warstwy ślizgowe stosuje się opisane wcześniej polimery ślizgowe, najczęściej policzterofluoroetylen PTFE, poliamidy PA i poliacetal POM. Jako wypełniacze stosuje się również PTFE, a także proszki metali o małej wytrzymałości na ścinanie, jak np. ołowiu, cyny itp. Proszki te, polepszając ślizgowość kompozytu, zarazem polepszają jego przewodność cieplną.

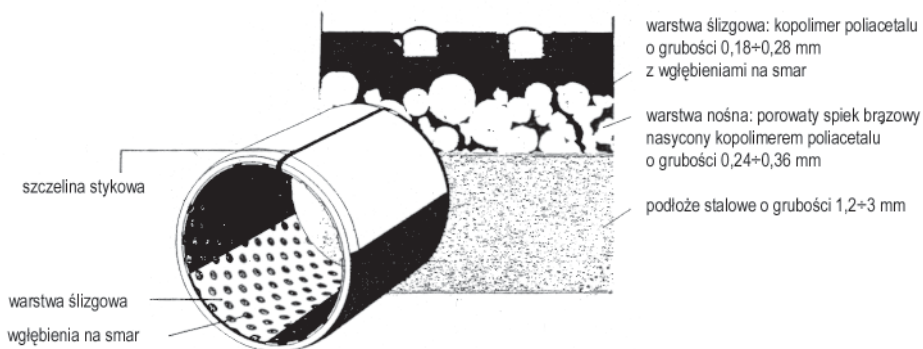
Na rysunku 47 pokazano przykłady kompozytów pierwszego rodzaju.



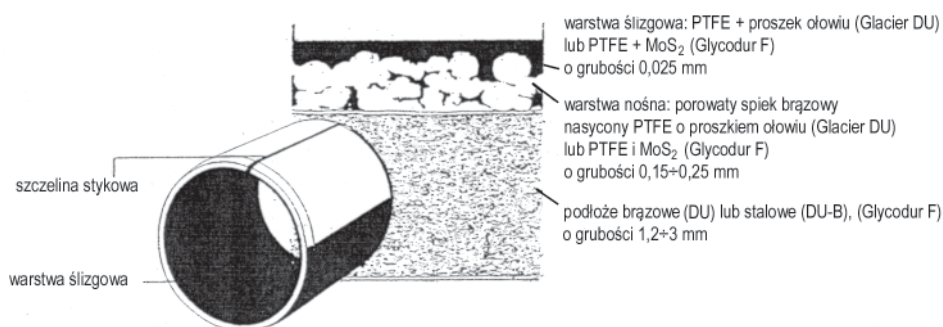
Rys. 47. Przykłady kompozytów z warstwą ślizgową nałożoną bezpośrednio na podłoże

Na kolejnych rysunkach, 48 i 49, przedstawiono szeroko rozpowszechnione, klasyczne już, łożyska drugiego rodzaju, wprowadzone przez angielską firmę *Glacier*. Istotą tych łożysk jest nośna warstwa z brązu spiekane, nasycona polimerem ślizgowym, z dodatkiem lub bez dodatku innego smaru stałego (PTFE, MoS_2 i in.). Ta warstwa nośna pokryta jest warstwą ślizgową z tego samego polimeru. Całość, tj. warstwa nośna z warstwą ślizgową, umieszczona jest na podłożu stalowym lub brązowym.

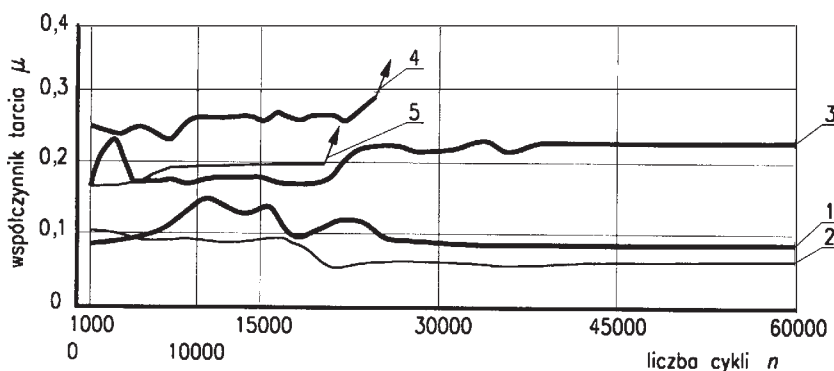
Jak widać, zarówno te łożyska, jak i opisane dalej inne łożyska firmy *Glacier*, wykonywane są przez zwijanie taśmy-prefabrykatu. Pokazany na rysunku 48 kompozyt *Glacier DX* nie jest w pełni samosmarowny: wgłębienia na smar sugerują ich smarowanie. Zazwyczaj jednak jest to smarowanie jednorazowe, podczas montażu. Skuteczność takiego jednorazowego smarowania potwierdziły badania przeprowadzone przez autora (por. rys. 50).



Rys. 48. Przykład kompozytu typu M-M-N (*Glacier DX*) [9]



Rys. 49. Przykład kompozytu wielowarstwowego wypełnianego typu M-M-N-M (*Glacier DU*) [9]



Rys. 50. Wyniki badań tarcia kompozytów *Glacier* oraz niektórych materiałów metalowych (warunki badań podano w tekście); 1 – *Glacier DU* (bez smarowania), 2 – *Glacier DX*, 3 – brąz B101, 4 – stal 45, 5 – żeliwo Z1300; łożyska 2–5 ze smarowaniem początkowym

Według danych firmy *Glacier* [9] łożyska *DX* mogą pracować w zakresie temperatur od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (krótkotrwale do $130\text{ }^{\circ}\text{C}$), przy maksymalnej prędkości ślizgania $2,5\text{ m/s}$ oraz przy maksymalnym natężeniu pracy, wyrażonym iloczynem $pv = 0,7\text{ MPa(m/s)}$. Najmniejsza uzyskiwana wartość współczynnika tarcia wynosi $\mu = 0,015$. Na rysunku 6 można znaleźć informacje dotyczące trwałości takich łożysk w zależności od wartości iloczynu pv oraz warunków smarowania.

Kompozyt *Glacier DU* jest zalecany jako w pełni samosmarowny. Tę samosmarowność zapewnia warstwa ślizgowa z PTFE, a w wypadku jej zużycia – ten sam polimer znajdujący się w porach porometu brązowego, stanowiącego warstwę nośną (oczywiście kosztem pewnego zużycia tego porometu). Podobny kompozyt, stosowany przez firmę SKF na przeguby samosmarowne, lecz wypełniony nie proszkiem ołowiu lecz MoS_2 – nosi nazwę *Glycodur F*. Można też spotkać podobne kompozyty o innych nazwach firmowych, np. *Permaglide* [1] i inne. Polska Wytwórnia Łożysk Ślizgowych *BIMET* w Gdańsku wytwarza taki kompozyt jako BS a taśmy bimetale do produkcji tych łożysk oznaczone są symbolem MB60 [8].

Według danych firmowych [9] łożyska z tego kompozytu mogą pracować w zakresie temperatur od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $280\text{ }^{\circ}\text{C}$. Maksymalny dopuszczalny nacisk statyczny wynosi 280 MPa , a dopuszczalny iloczyn $pv = 1,8/3,6\text{ MPa(m/s)}$, odpowiednio: dla pracy ciągłej i pracy przerywanej. Przy tym prędkość ślizgania nie powinna być większa niż 2 m/s . Wartości współczynnika tarcia wynoszą przykładowo: $\mu = 0,08$ przy $p = 30\text{ MPa}$ i $v = 0,01\text{ m/s}$ oraz $\mu = 0,2$ przy $p = 0,3\text{ MPa}$ i $v = 0,01\text{ m/s}$.

Na rysunku 50 pokazano wyniki badań autora nad kompozytami samosmarnymi typu *Glacier*. Badania przeprowadzono na łożysku o ruchu wahadłowym czopa, o średnicy 40 mm i takiej samej długości. Czop był wykonany ze stali 45, hartowanej do twardości ok. 50 HRC , a jego powierzchnia miała chropowatość $R_a = 0,32\text{ }\mu\text{m}$. Luz łożyskowy wynosił $1,25\%$. Badania prowadzono według następującego programu:

- docieranie wstępne łożyska przy nacisku 12 MPa w czasie 1000 wahnięć, dosmarowywanie po każdym 100 wahnięciach,
- docieranie łożyska przy nacisku 20 MPa w czasie 10000 wahnięć, dosmarowywanie po każdym 1000 wahnięć,
- ruch awaryjny (próba zatarcia) przy nacisku 20 MPa , bez dosmarowywania; badanie kończono po 60000 wahnięć (jeśli wcześniej nie nastąpiło zatarcie).

Średnia prędkość ruchu czopa wynosiła $v = 0,01\text{ m/s}$. Łożyska smarowano smarem maszynowym 2.

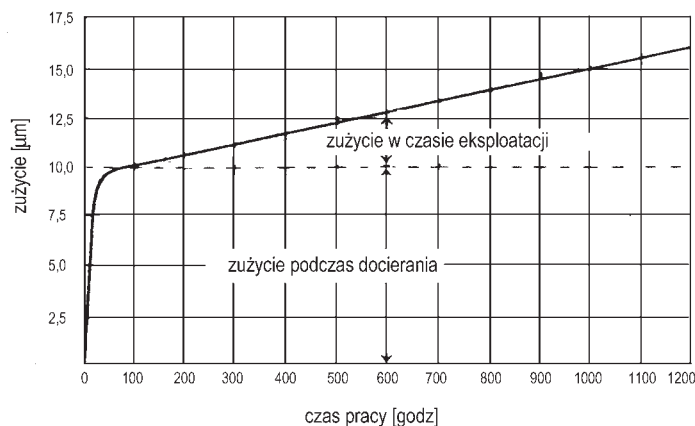
Oprócz dwóch kompozytów: *Glacier DX* i *Glacier DU* zbadano również – dla porównania – łożyska z brązu B101 oraz ze stali 45 i żeliwa Z1300.

Jak widać z wykresu, obydwa kompozyty wykazywały – po wstępnym dotarciu – najmniejsze, stabilne wartości współczynnika tarcia. Także stabilnie tarciowo zachowywał się brąz cynowy, lecz współczynnik tarcia w tym wypadku był ponad dwukrotnie większy od współczynnika tarcia kompozytów *Glacier*. Obydwa metale żelazne: stal 45 i żeliwo Z1300 nie wytrzymały próby zatarcia, co uwidoczniło na wykresach stromą strzałką. Wartość zużycia wyraźnie różnicowała badane materiały. Duże, patologiczne, zużycie wykazała stal, małe – co oczywiste – żeliwo (ok. $3\text{ }\mu\text{m}$) i brąz ($15\text{ }\mu\text{m}$). Stosunkowo duże zużycie wykazał kompozyt *Glacier DU* ($60\text{ }\mu\text{m}$): zużyta została cała warstwa ślizgowa i niewielka część brązowej warstwy nośnej. Natomiast kompozyt *Glacier DX* z początkowym smarowaniem nie wykazał mierzalnego zużycia.

Te dobre właściwości tribologiczne kompozytu *Glacier DX* wstępnie posmarowanego (małe tarcie i zużycie) czynią ten materiał godnym uwagi i stosowania wszędzie tam, gdzie dopuszczalne jest użycie smaru plastycznego i możliwa jest okresowa obsługa smarownicza (ewentualne dosmarowywanie).

Dane firmowe [8], [9] określają intensywność zużywania kompozytu *DU* na nie więcej niż $50\text{ }\mu\text{m}/1000\text{ h}$. W opisanych wyżej badaniach była ona znacznie większa prawdopodobnie ze względu na niekorzystne warunki tarcia, jakie panują w ruchu wahadłowym. W ruchu takim trudno o utworzenie ciągłej ślizgowej warstewki PTFE na czopie, w przeciwieństwie do ruchu obrotowego. Najlepsze pod tym względem warunki panują podczas tarcia płaskich powierzchni, np. pierścieni oporowych, prowadnic itp.

Na rysunku 51 pokazano krzywą zużywania tego kompozytu podawaną przez jego wytwórcę – firmę *Glacier*.

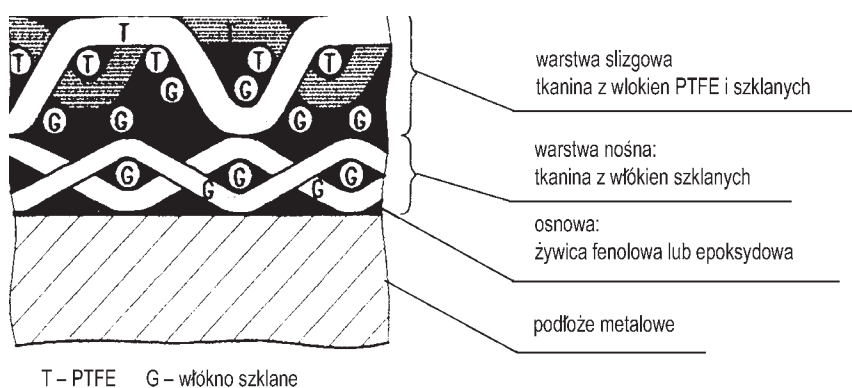


Rys. 51. Krzywa zużywania kompozytu *Glacier DU* [9]

Warte podkreślenia są dobre właściwości tribologiczne kompozytu *DX*, wstępnie posmarowanego. Zarówno małe tarcie jak i minimalne zużycie czynią ten materiał obiecującym dla wielu zastosowań.

Na rysunku 52 przedstawiono kompozyt typu M-N-N. Na podłożu metalowym umieszczona jest warstwa nośna z tkaniny szklanej, a warstwę ślizgową stanowi tkanina złożona z włókien PTFE i szklanych, przy czym zewnętrzną warstewkę stanowią tylko włókna PTFE. Całość wtopiona jest w żywicy fenolowej lub epoksydowej.

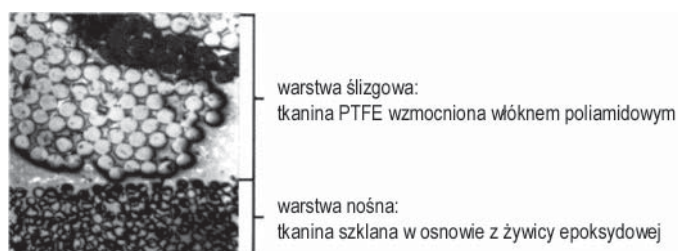
Kompozyt ten cechuje się dużą nośnością (wytrzymała warstwa nośna z tkaniny szklanej) i małym tarcieniem dzięki wierzchniej warstewce PTFE. Tworzywo to przenosi się podczas wstępnego docierania na przeciwpowierzchnię, dzięki czemu występuje



Rys. 52. Przykład kompozytu typu M-N-N [1]

małe tarcie PTFE po PTFE. Nie zaleca się smarowania łożysk z tego kompozytu, bowiem warstewka smaru utrudnia tworzenie się adhezyjnej warstewki PTFE na czopie. Kompozyty tego rodzaju stosuje m. in. SKF do samosmarownych przegubów [1].

W zakończeniu tego punktu, na rysunku 53 pokazano interesujący kompozyt – jeden z licznych produktów firmy *Glacier* – materiał o nazwie *GAR-MAX*. Jest to kompozyt typu N-N-N, bez podłoża metalowego, z warstwą nośną z włókna szklanego w osnowie z żywicy epoksydowej, warstwę zaś ślizgową stanowi tkanina PTFE wzmocniona włóknem poliamidowym.



Rys. 53. Kompozyt typu N-N-N, *GAR-MAX* firmy *Glacier* [9]

Kompozyt ten przeznaczony jest do łożysk bezobsługowych pracujących w zakresie temperatur od $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dopuszczalny nacisk statyczny wynosi 200 MPa , a dopuszczalne wartości parametrów ruchowych są następujące: iloczyn $p v = 0,9\text{ MPa(m/s)}$, prędkość ślizgania $v_{\max} = 0,13\text{ m/s}$.

3.5. KONSTRUKCJA WĘZŁÓW ŁOŻYSKOWYCH

Własności fizyczne i mechaniczne polimerów wymagają stosowania specyficznych reguł konstruowania węzłów łożyskowych, w których panwie będą wykonane z tych tworzyw lub ich kompozytów. Chodzi o takie własności polimerów, różniące je od metali, jak duża wrażliwość tych tworzyw na ciepło i związane z nią: duża rozszerzalność cieplna (kilka a nawet kilkanaście razy większa od rozszerzalności cieplnej metali) i mała odporność cieplna. Wyjątek w tym ostatnim względzie stanowią poliiimidy i PTFE. Mała przewodność cieplna polimerów (mniejsza kilkadziesiąt a nawet kilkaset razy od przewodności cieplnej metali) powoduje trudności z odprowadzaniem ciepła tarcia, które kumulując się w polimerze może wywołać jego destrukcję.

Polimery pęcznieją nie tylko pod wpływem ciepła, lecz także nasycając się cieczami, szczególnie wodą, także wilgocią z otoczenia. Ciepło i wodochłonność powodują zmiany wymiarów panewki, co musi znaleźć odzwierciedlenie w doborze luzu łożyskowego: musi być on większy od luzu w łożyskach z panwiami metalowymi w tych samych warunkach nominalnych.

Powyższe uwagi dotyczą przede wszystkim łożysk z grubościennymi panwiami monolitycznymi, wykonanymi z polimerów niewypełnianych. Wypełnienie tych tworzyw proszkami i włóknami zmniejsza, jak wcześniej wspomniano, niektóre z tych wad. Wady te są zredukowane do minimum w powłokach przeciwciernych oraz w kompozytach wielowarstwowych i wielowarstwowych wypełnianych, bowiem potrzeba polepszenia przewodności cieplnej i zmniejszenia skutków pęcznienia leżała u podstaw tworzenia tych materiałów.

Postacie konstrukcyjne łożysk z tworzyw sztucznych można zaliczyć do jednej z dwóch następujących grup:

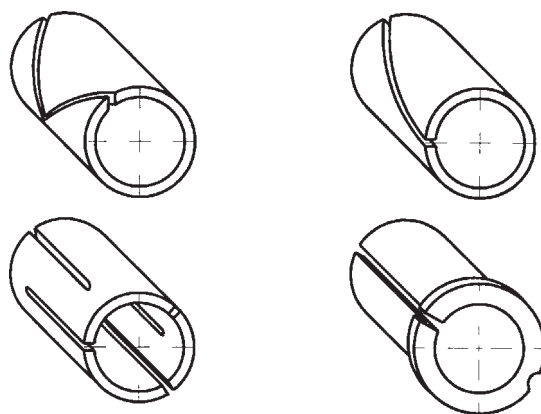
- łożyska z warstwą ślizgową z polimerów lub ich kompozytów trwale (dzięki adhezji) złączoną z podłożem, należą tu powłoki przeciwcierne oraz kompozyty wielowarstwowe wypełniane,
- łożyska z wkładami polimerowymi, mocowanymi w obudowie przez połączenie tarciove lub kształtowe.

Łożyska pierwszej grupy wytwarzane są zazwyczaj jako tulejki lub półpanwie związane z taśmą-prefabrykatu. Ich rodzaje, wymiary, tolerancje oraz sposoby montażu podają katalogi wytwórni, np. [8], [9]. Omówiono je w poprzednim punkcie.

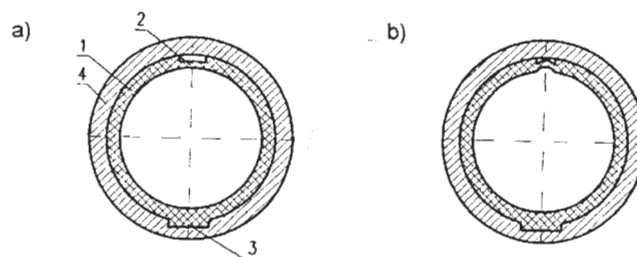
Łożyska grupy drugiej wykonywane są jako tulejki wciskane w obudowy metalowe. Ze względu na małą wytrzymałość polimerów, do takiego montażu przygotowuje się tulejki o kilkumilimetrowej grubości ścianki, a po wciśnięciu toczy się otwór na odpowiedni wymiar, zmniejszając tę grubość do około 5% średnicy otworu łożyska [28].

Dla skompensowania pęcznienia grubościennych tulejek stosuje się szczeliny dylatacyjne. Przykłady takich tulejek pokazano na rysunku 54.

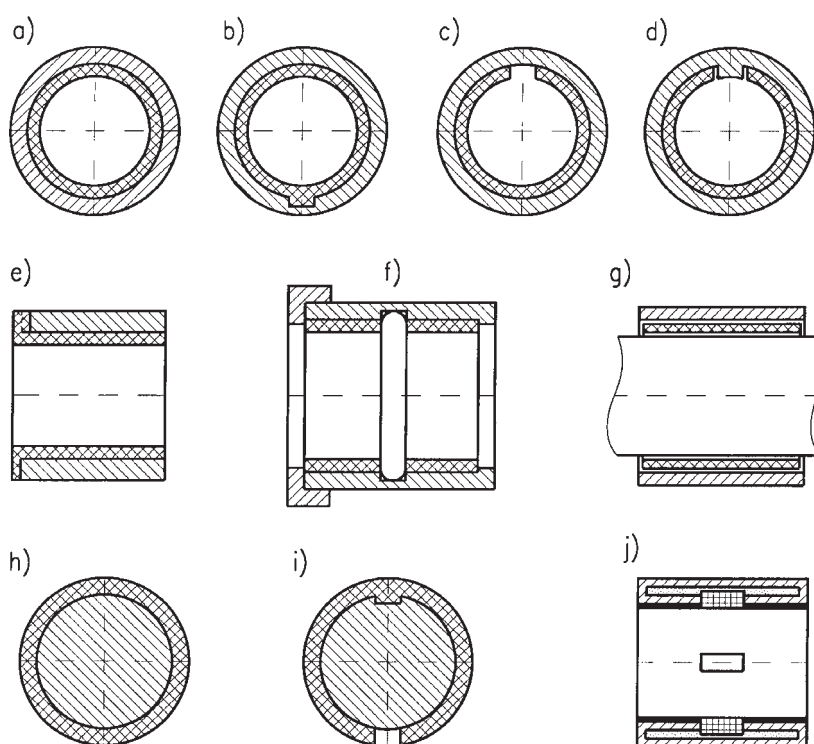
Zamiast szczelin dylatacyjnych stosuje się czasami przewężenie ścianki tulejki, które odkształcając się pozwala jej swobodnie rozszerzyć się obwodowo. Na rysunku 55 pokazano przykład takiej tulejki. W tym wypadku nie można stosować wcisku, lecz jedynie zabezpieczenie kształtowe za pomocą wypustu.



Rys. 54. Przykłady tulejek polimerowych ze szczelinami dylatacyjnymi [27]



Rys. 55. Działanie przewężenia dylatacyjnego w tulejce polimerowej; a – tulejka przed rozszerzeniem, b – tulejka po rozszerzeniu; 1 – tulejka, 2 – przewężenie, 3 – wypust mocujący, 4 – obudowa



Rys. 56. Postacie konstrukcyjne łożysk z tulejkami z polimerów termoplastycznych [28]; objaśnienia w tekście

Na rysunku 56 podano przykłady najczęściej spotykanych wykonań łożysk z polimerów termoplastycznych.

Rysunek 56a pokazuje tulejkę mocowaną w obudowie za pomocą wcisku. Wskutek relaksacji odkształceń wcisk ten może się jednak z upływem czasu zmniejszyć, a nawet

zupełnie zaniknąć. Dlatego często stosuje się dodatkowe zabezpieczenie kształtowe w postaci wypustu (rys. 55b).

Pokazane na rysunku 56c rozwiązanie jest przykładem tulejki ze szczeliną dylatacyjną, opisaną wcześniej. Mocowanie tarciove takich tulejek sprawia trudności, dlatego też zazwyczaj stosuje się mocowanie kształtowe za pomocą wypustu w obudowie (rys. 55d). Wadą takiego rozwiązania jest możliwość gromadzenia się zanieczyszczeń (m. in. produktów zużycia) w szczelinie między wycięciem tulejki a wypustem, co może uniemożliwić swobodne rozszerzanie się obwodowe tulejki. Z tego względu korzystniejsze jest rozwiązanie z wypustem na zewnętrznej powierzchni tulejki, jak na rysunku 54.

Stosowanie wypustu na zewnętrznej powierzchni tulejki może być czasem kłopotliwe, szczególnie przy małych grubościach ścianki tulejki, bowiem pod wpływem ciepła może wystąpić zniekształcenie otworu łożyska. Dlatego korzystniejsze jest stosowanie wypustu na kołnierzu tulejki. Pokazano to na rysunku 56e.

Przy zastosowaniu dwóch wąskich tulejek w łożysku można je mocować czołowo za pomocą środkowej sprężyny. Pokazano to na rysunku 56f. Sprężyna taka umożliwia też rozszerzanie się wzdłużne tulejek.

Na rysunku 56g pokazano przykład luźnej tulejki polimerowej. Układ ten przypomina smarowane łożysko ślizgowe z tzw. pływającą panwią. Luz zarówno pomiędzy tulejką a czopem, jak i pomiędzy tulejką a obudową powoduje tarcie tulejki o czop i o obudowę. Powinno to – według autorów pomysłu – zmniejszyć tarcie w łożysku. Nie ma jednak danych eksploatacyjnych takiego łożyska. Należy pamiętać, że łożysko takie wymaga zwiększonego sumarycznego luzu [28].

Ze względu na lepsze odprowadzenie ciepła tarcia czasami stosuje się układ pary odwróconej (por. punkt 3.4.2). Na rysunku 56h oraz 56i pokazano czopy do takiego układu. W pierwszym wypadku tulejka polimerowa osadzona jest na czopie wciskowo, w drugim zaś mocowana jest kształtowo, za pomocą wypustu.

Na rysunku 56j pokazano jeszcze układ łożyska smarowanego, w którym skojarzono polimerową tulejkę z pormetem, zasilającym szczelinę smarową olejem znajdującym się w przestrzeni pomiędzy tulejką a obudową.

Wymiary związane łożysk z tworzyw sztucznych: długość w stosunku do średnicy – nie odbiegają od wartości stosowanych dla łożysk metalowych. Stosunek ten wynosi $l/d = 0,8 \div 1$.

Luz łożyskowy w łożyskach polimerowych, jak już wspomniano, powinien być większy niż dla łożysk metalowych ze względu na pęcznienie tych tworzyw wskutek ciepła i wilgoci. Orientacyjne dane na ten temat przytoczono w tabeli 1. Dotyczą one jednak panewek grubościennych. W wypadku cienkich tulejek z kompensacją luzu, powłok lub tulejek wielowarstwowych wypełnianych o bardzo cienkich ślizgowych warstwach polimerowych – luz ten można zmniejszyć nawet do połowy wykazanych wartości. W wątpliwych wypadkach trzeba dokonać dokładniejszych obliczeń, uwzględniających zmniejszenie luzu wskutek rozszerzania cieplnego i pęcznienia pod wpływem wilgoci

$$L_m = L_{\min} + L_T + L_w, \quad (4)$$

gdzie: L_m – luz montażowy, L_{\min} – wymagany luz minimalny, L_T – zmniejszenie luzu wskutek rozszerzenia cieplnego, L_w – zmniejszenie luzu wskutek pochłaniania wilgoci. Szczegółowe dane do tych obliczeń można znaleźć w [28]. Luz ten można też w przybliżeniu określić za pomocą wzoru empirycznego [27]

$$L_m = (0,004)d + 6g (\varepsilon + \alpha \Delta T), \quad (5)$$

w którym: g – grubość ścianki tulejki, ε – współczynnik zmiany wymiarów liniowych tulejki wskutek pochłaniania wody (np. dla poliamidów nie stykających się z wodą wynosi on 0,003), α – współczynnik cieplnej rozszerzalności liniowej polimeru, ΔT – przyrost temperatury łożyska.

Średnicę wewnętrzną tulejki łożyskowej po jej wciśnięciu w obudowę – jak już wspomniano – można regulować podczas obróbki wykończającej. Jeśli jednak otwór tulejki nie ma być obrabiany po wciśnięciu, to trzeba uwzględnić zmniejszenie jej średnicy wskutek wcisku. Zmniejszenie to można obliczyć z wzoru

$$\Delta_d = W \frac{D}{d}, \quad (6)$$

w którym: W – wcisk, D – średnica gniazda w obudowie, d – średnica łożyska po wciśnięciu tulejki (tj. potrzebna średnica).

Średnice tulejki przed wciśnięciem będą wynosiły:

$$\text{– zewnętrzna} \quad d_z = D + W, \quad (7)$$

$$\text{– wewnętrzna} \quad d_w = d + \Delta d. \quad (8)$$

Zazwyczaj stosuje się pasowania lekko wtlaczane lub wtlaczane zwykłe. Zalecane jest stosowanie trzpienia montażowego, podobnie jak przy montażu tulejek z pometów (p. pkt. 2.4).

Jak już wielokrotnie wspomniano, polimery są bardzo wrażliwe na ciepło. Dlatego istotne jest określenie temperatury łożyska. Według [28] przyrost temperatury warstwy wierzchniej tulejki polimerowej można określić z wzoru wynikającego z bilansu cieplnego łożyska

$$\Delta T = 9,8 \frac{\mu p v d l}{\kappa}, \quad (9)$$

gdzie: ΔT [°C], μ – współczynnik tarcia, p [MPa] – nacisk powierzchniowy, v [m/s] – prędkość ślizgania, d [cm] – średnica łożyska, l [cm] – długość łożyska, κ [W/°C]

– współczynnik odprowadzania ciepła z łożyska; współczynnik ten ma dwie składowe: κ_k – współczynnik odprowadzania ciepła przez korpus (obudowę łożyska) oraz κ_w – współczynnik odprowadzania ciepła przez wał, przeciętne wartości tych współczynników zawierają się w granicach: $\kappa_k = 0,2 \div 1,2$ (zależnie od postaci konstrukcyjnej łożyska, grubości ścianki tulejki i przewodności cieplnej polimeru), $\kappa_w = 0,2 \div 1,6$ (zależnie od wymiarów wału).

Szczegółowe informacje co do tych współczynników oraz wykresy pozwalające obliczyć ich wartości można znaleźć w pracy [28].

Przekształcając wzór (9) można określić dopuszczalny iloczyn pv

$$(pv)_{\text{dop}} = \frac{\kappa \Delta T}{(9,8)\mu dl}, \quad (10)$$

gdzie: pv w MPa (m/s), a ΔT jest dopuszczalnym przyrostem temperatury łożyska polimerowego, wynoszącym $60 \div 70$ °C.

Optymalna **chropowatość** powierzchni wału zapewniająca możliwie najmniejsze zużycie polimeru, jednocześnie ułatwiająca tworzenie adhezyjnej warstewki ślizgowej na nim, wynosi $R_a = 0,16 \div 0,32$ μm .

3.6. PODSUMOWANIE WIADOMOŚCI O ŁOŻYSKACH Z TWORZYW SZTUCZNYCH

Jak Czytelnik zapewne zauważył, rozdział poświęcony łożyskom z tworzyw sztucznych jest stosunkowo obszerny. Jest to odzwierciedleniem obecnego stanu, a także tendencji rozwojowych łożysk bezobsługowych. Tworzywa te, a szczególnie ich kompozyty, dają bowiem duże możliwości wyboru i doboru do określonych warunków pracy łożysk ślizgowych.

Rekapitulując ten rozdział warto podkreślić następujące aspekty stosowania tworzyw sztucznych i ich kompozytów jako materiałów ślizgowych:

Tak jak wszystkie materiały omawiane w tej książce – polimery i ich kompozyty nadają się szczególnie na łożyska ślizgowe, które z jakichś względów nie mogą być smarowane konwencjonalnie lub też takie smarowanie nie jest opłacalne. „Bezsmarowość” łożysk jest ich niezaprzeczalnym atutem. Mogą one być także stosowane w łożyskach smarowanych konwencjonalnie. Wtedy są one zabezpieczeniem łożyska przed zatarciem w wypadku przerw w smarowaniu. Należy jednak pamiętać, że smarowanie utrudnia adhezyjne przenoszenie się polimeru na przeciwpowierzchnię i tworzenie na niej ciągłej warstewki ślizgowej.

Ze względu na małą przewodność cieplną oraz pęcznienie polimerów pod wpływem ciepła i wilgoci, przy dużym natężeniu pracy łożyska (duże wartości $p v$) należy stosować kompozyty z cienką warstewką ślizgową polimeru lub jego kompozytu.

Zalecenia **eksploatacyjne** można pokrótce streścić następująco:

- Nie wolno przekraczać dopuszczalnych wartości iloczynu $p v$. W razie wątpliwości należy sprawdzić temperaturę jaka może powstać w łożysku.
- Mimo dobrych właściwości tribologicznych (małego tarcia o stal i małej intensywności zużywania) polimery i ich kompozyty zużywają się. Trwałość łożysk z tych materiałów można określić orientacyjnie według danych o intensywności ich zużywania.

4. ŁOŻYSKA Z KOMPOZYTÓW METALOWYCH TYPU METAL-NIEMETAL (M-N)

Ten rodzaj kompozytów wydzielono z poprzedniego rozdziału (p. pkt 3.4.4) ze względu na „nieobecność” w nich polimerów. Ponadto ich własności i właściwości istotnie odbiegają od kompozytów polimerowych, szczególnie jeśli chodzi o wytrzymałość, przewodność, rozszerzalność i odporność cieplną oraz niektóre właściwości tribologiczne.

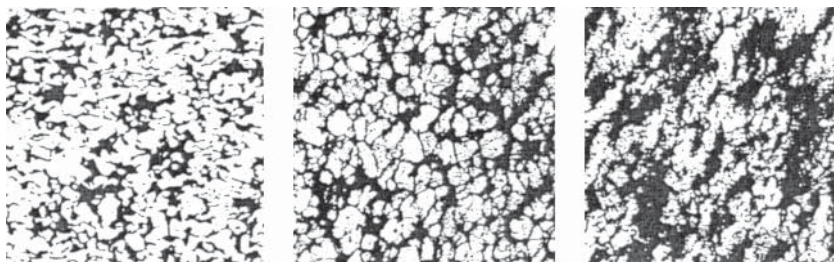
Typowym przykładem takich materiałów są kompozyty pod nazwą *DEVA-Metall* wytwarzane przez firmę *Glacier*. Poniższy opis oparty jest na danych katalogowych tej firmy [9].

Kompozyty *DEVA-Metall* są spiekami metalowymi, w których zawarte są smary stałe: najczęściej grafit (6÷12% wagowo), ponadto dwusiarczek molibdenu MoS_2 (1÷3% wagowo), a w niektórych szczególnych wersjach dwusiarczek wolframu WS_2 (25% wagowo), bez grafitu, lecz z niewielkim dodatkiem MoS_2 (1÷2% wagowo).

Stosuje się spieki: brązowe (brąz cynowy i ołowiowy), stopów żelaza (Fe-Ni-Cu oraz Fe-Cu), a także z czystego żelaza oraz stopów niklu (Ni-Cu oraz Ni-Fe), a także z czystego niklu. Wszystkie wymienione kompozyty są oczywiście samosmarowne. Najszersze zastosowanie znajdują kompozyty na bazie brązów, ze względu na dobre właściwości tribologiczne nie tylko zawartych w nich smarów stałych, lecz także samej osnowy brązowej. Ponadto mogą one być stosowane w łożyskach smarowanych wodą.

Na rysunku 57 pokazano struktury wymienionych kompozytów.

W tabeli 15 podano własności fizyczne i mechaniczne, a w tabeli 16 właściwości tribologiczne omawianych kompozytów.



Rys. 57. Fotografie mikrostruktur kompozytów *DEVA-Metall*; a – spiek brązowy, b – spiek żelazny, c – spiek niklowy [9]

Tabela 15. Własności fizyczne i mechaniczne wybranych kompozytów *DEVA-Metall* [9]

Własność	BrązCuSn13 + 1% obj. MoS ₂ Cu + 8÷12% wag. grafitu	Brąz Sn13Pb1÷3 + 6÷8% wag. grafitu	Stopy żelaza FeNi(10÷23)Cu (4÷6), FeCu4, żelazo, + 2÷3% obj. MoS ₂ + 8÷10% wag. grafitu	Stopy niklu NiCu28Fe5, NiFe33Cu5, nikiel Ni, + 2% obj. MoS ₂ 8÷10% wag. grafitu
Gęstość [g/cm ³]	6,1÷7,6	5,8÷7,2	5,7÷6,7	5,8÷6,4
Twardość (min.) [HB]	40÷65	50÷65	50÷140	40÷55
Rozszerzalność cieplna ×10 ⁻⁶ [1/K]	18	18	12÷16	12,5÷16
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	20÷85	30÷85	45÷100	50÷70
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	180÷340	220÷380	180÷550	240÷400
Moduł sprężystości <i>E</i> [GPa]	24÷53	26÷57	–	–

Tabela 16. Właściwości tribologiczne wybranych kompozytów *DEVA-Metall* [9]

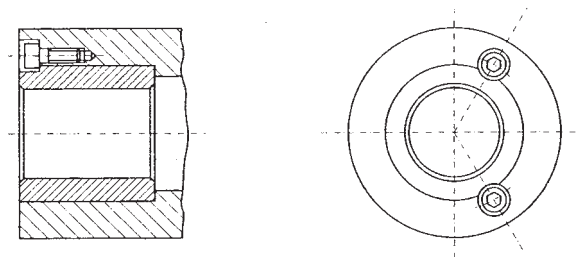
Własność	BrązCuSn13 + 1% obj. MoS ₂ Cu + 8÷12% wag. grafitu	Brąz Sn13Pb1÷3 + 6÷8% wag. grafitu	Stopy żelaza FeNi(10÷23) Cu (4÷6), FeCu4, żelazo, + 2÷3% obj. MoS ₂ + 8÷10% wag. grafitu	Stopy niklu NiCu28Fe5, NiFe33Cu5, nikiel Ni, + 2% obj. MoS ₂ 8÷10% wag. grafitu
Maksymalny nacisk statyczny $p_{st\ max}$ [MPa]	140÷230	150÷260	70÷150 ^{*)}	100÷150 ^{*)}
Maksymalny nacisk dynamiczny $p_{max\ dyn}$ [MPa]	70÷115	75÷130	30÷60 ^{*)}	50÷70 ^{*)}
Maksymalna prędkość (na sucho) v_{max} [m/s]	0,2÷0,4	0,3	0,2	0,2
Maksymalna wartość iloczynu $p\ v$ [Mpa (m/s)]	1,5	1,5	1,0	0,5÷0,8
Temperatura maksymalna T_{max} [°C]	150÷240	150	450÷600	200÷650
Temperatura minimalna T_{min} [°C]	-50÷-100	-50	0	-100÷-200
Współczynnik tarcia (na sucho)	0,13÷0,22	0,13÷0,22	0,30÷0,45 ^{**)}	0,30÷0,49 ^{**)}
Minimalna twardość czopa [HB/HRC]	185 HB÷45 HRC	180 HB÷ ÷45 HRC	45 HRC	45 HRC
Chropowatość czopa R_a [μm]	0,2÷0,8	0,2÷0,8	0,2÷0,8	0,2÷0,8

^{*)} przy minimalnej dopuszczalnej temperaturze

^{**)} w temperaturze pracy współczynnik tarcia będzie mniejszy

- Z powyższych tabel wyraźnie wynikają zalety kompozytów *DEVA-Metall*, typu M-N:
- duża wytrzymałość,
 - duże wartości nacisków dopuszczalnych, a przede wszystkim
 - duża odporność cieplna.

Wartości współczynnika tarcia dla kompozytów brązowych są porównywalne z wartościami tego współczynnika dla najlepszych ślizgowych kompozytów polimerowych. Nieco gorzej pod tym względem zachowują się kompozyty żelazne i niklowe. Za to materiały te cechują się bardzo dużą odpornością cieplną.



Rys. 58. Przykład zabezpieczenia kształtowego tulejki [9]

Tulejki *DEVA-Metall* są wykonywane bądź jako półwytwory z przeznaczeniem do obróbki końcowej po wprasowaniu w obudowę, bądź też jako elementy gotowe, nie wymagające takiej obróbki.

Zaleca się następujące pasowania tulejek w obudowie: H7/r6 przy naciskach do 50 MPa i H7/s6 przy wyższych naciskach. Jeśli łożysko będzie pracowało ciągle w temperaturze powyżej 150 °C lub gdy mogą wystąpić znaczne siły poosiowe, zaleca się stosować dodatkowe zabezpieczenie kształtowe, takie jak np. pokazane na rysunku 58.

Grubość ścianki tulejki zależy od nacisku powierzchniowego w łożysku. W tabeli 17 podano najmniejsze dopuszczalne wartości tej grubości.

Tabela 17. Grubość ścianki tulejki z kompozytu *DEVA-Metall* [9]

Nacisk powierzchniowy [MPa]	Najmniejsza grubość ścianki
< 10	$\sqrt{0,5d}$ *)
10÷25	$\sqrt{0,6d}$
25÷50	$\sqrt{0,8d}$
> 50	\sqrt{d}

*) d jest średnicą otworu tulejki

Luz łożyskowy dla łożysk z tego kompozytu, przy tarciu suchym, powinien być nieco większy niż w metalowych łożyskach smarowanych dodatkowym środkiem smarowym (olejem, wodą, smarem plastycznym itp.). Tulejki są na ogół dostarczane w postaci gotowej do montażu, to znaczy ich średnica wewnętrzna jest taka, że po wtłoczeniu do

gniazda obudowy możliwe jest zachowanie właściwego luzu. W innych wypadkach należy pamiętać, że po wtłoczeniu tulejki do gniazda jej średnica wewnętrzna zmniejsza się do około 75÷95% średnicy w jej stanie swobodnym. Także wskutek ciepła tarcia luz łożyskowy się zmniejsza. Przewidując wysokie temperatury, należy odpowiednio zwiększyć luz montażowy (patrz dalej).

Zalecane tolerancje dla łożysk z kompozytu *DEVA-Metall* podano w tabeli 18. Wiążą się one z tolerancjami: średnicy otworu w obudowie – H7 oraz średnicy zewnętrznej tulejki – r6.

Tabela 18. Zalecane tolerancje dla łożysk z kompozytu *DEVA-Metall* [9]

Zastosowanie	Warunki ruchu	Tolerancja wałka	Tolerancja otworu tulejki przed montażem	Tolerancja otworu tulejki po montażu
Urządzenia mechaniczne	normalny, $T < 80\text{ °C}$	h7	C7	D8
	$80\text{ °C} < T < 100\text{ °C}$	h8	C7	D8
	$100\text{ °C} < T < 130\text{ °C}$	h8	B7	C9
	duże naciski jednostk.	h8	B7	C9
	małe luzy	h6	D7	E8
Stalownie	normalny	h8	B7	C9

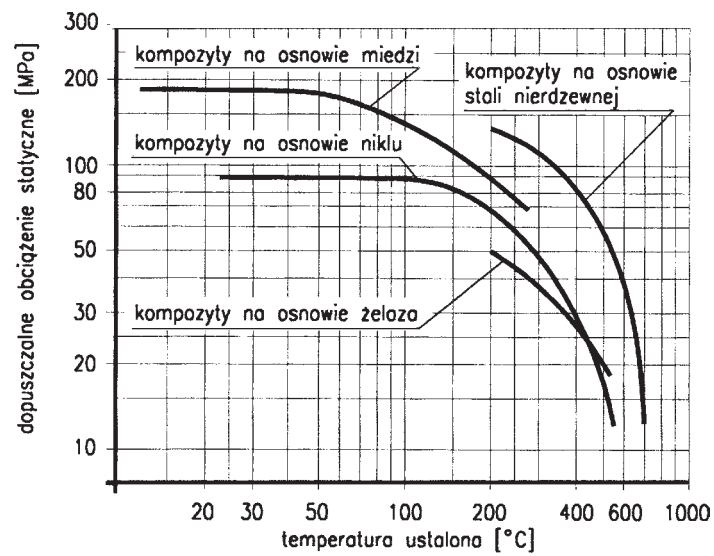
Łożyska wymagające bardzo dokładnych wymiarów (w klasie dokładności IT7 lub IT6) muszą być dodatkowo obrabiane po montażu. W tym wypadku należy przewidzieć naddatek obróbczy od 0,15 do 0,20 mm.

Stosuje się gabaryty łożysk takie jak w łożyskach smarowanych, tj. stosunek długości łożyska do jego średnicy wynosi $l/d = 0,5\div 1,0$.

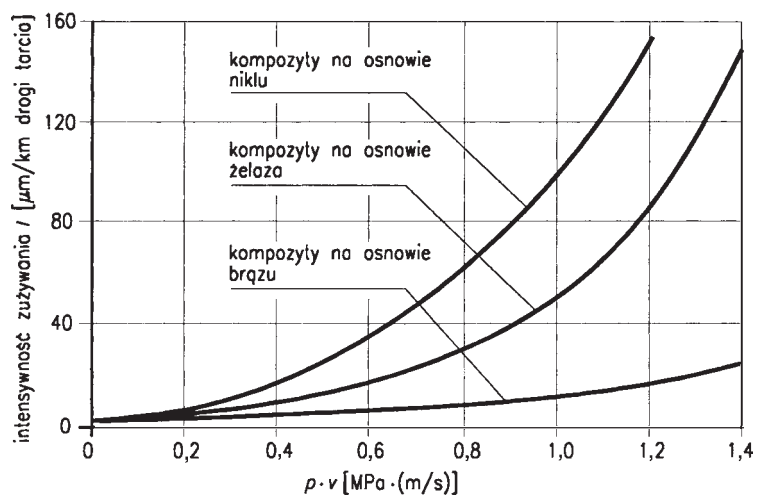
Obciążalność łożysk z kompozytów *DEVA-Metall* zależy w dużym stopniu – oprócz rodzaju materiału – od temperatury pracy. Informacje na ten temat zawiera rysunek 59. Jak widać, w wysokich temperaturach wyraźnie spada obciążalność tych łożysk, co wiąże się ze spadkiem wytrzymałości spieków oraz z możliwością utleniania się dwusiarczku molibdenu (powyżej 400 °C).

Podobnie od temperatury zależy **intensywność zużycia łożysk** z tego materiału: w temperaturze 300 °C może ona wzrosnąć w stosunku do intensywności zużycia w temperaturze pokojowej ok. 40% dla brązów, ok. 25% dla stopów niklu i ok. 15% dla stopów żelaza. W temperaturze 500 °C ten wzrost wynosi: ok. 40% dla stopów niklu i ok. 25% dla stopów żelaza. Oczywiście w znaczącym stopniu intensywność zużycia zależy od parametrów ruchowych: nacisku powierzchniowego i prędkości ślizgania. Na rysunku 60 pokazano tę zależność.

Podczas pracy łożyska na sucho produkty zużycia utrzymując się w szczelinie łożyskowej mogą znacznie pogarszać pracę łożyska. Dlatego celowe jest wykonanie na powierzchni nośnej tulejki łożyskowej rowków odprowadzających na zewnątrz te produkty oraz ewentualne inne zanieczyszczenia. Przykład takich rowków śrubowo ułożonych na powierzchni roboczej tulejki pokazano na rysunku 61.

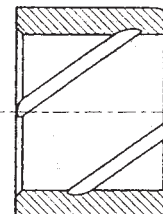


Rys. 59. Obciążalność kompozytów *DEVA-Metall* w zależności od temperatury [9]



Rys. 60. Intensywność zużycia kompozytów *DEVA-Metall* w zależności od natężenia pracy łożyska $p \cdot v$ [9]

Rys. 61. Śrubowo ułożone rowki do odprowadzania produktów zużycia i zanieczyszczeń ze szczeliny łożyskowej [9]



Oprócz nośności (obciążalności) łożyska o tarczu suchym istotna jest jego **trwałość**. Określa ją iloraz dopuszczalnego zużycia i intensywności zużywania. Stosuje się przy tym współczynniki korekcyjne, uwzględniające wpływ różnych czynników na tę wielkość. Według [9] trwałość łożyska z kompozytów *DEVA-Metall* można określić za pomocą następujących wzorów:

– dla łożyska o ruchu obrotowym

$$A_{\text{obr}} = (5,3) \cdot 10^6 a \frac{Z_{\text{dop}}}{I} \frac{1}{dn} \quad [\text{h}], \quad (11)$$

– dla łożyska o ruchu wahadłowym

$$A_{\text{wah}} = (4,8) \cdot 10^8 a \frac{Z_{\text{dop}}}{I} \frac{1}{dn\phi} \quad [\text{h}], \quad (12)$$

gdzie:

A – trwałość w godzinach,

a – iloczyn współczynników korekcyjnych:

- obciążenia (statyczne 1, dynamiczne 0,7),
- rodzaju ruchu (para prosta 1, para odwrócona 0,8),
- materiału czopa (stal hartowana 0,75÷1, pokrycia chromowe 0,4, pokrycia niklowe 0,3),
- temperatury (0,5÷1 dla brązu i niklu, 0,7÷1 dla żelaza),
- chropowatości wału (1 dla $R_a = 0,2 \div 0,6 \mu\text{m}$, 0,7÷1 dla $R_a = 1,8 \div 0,6 \mu\text{m}$),
- zukosowania wału (0,5÷1),

Z_{dop} [mm] – dopuszczalne zużycie,

I [$\mu\text{m}/\text{km}$ drogi tarcia] – intensywność zużywania,

d [mm] – średnica łożyska,

n [min^{-1}] – prędkość obrotowa lub liczba wahaniec,

ϕ – kąt wychylenia przy ruchu wahadłowym (od pozycji środkowej).

Podano [9] przykład wykorzystania tego wzoru dla: łożyska o wymiarach $d = 50$ mm, obciążenia 30000 N, liczby wahaniec czopa 20 min^{-1} , kąta wychylenia czopa 30° ; łożysko ma pracować przy obciążeniu dynamicznym w ciągu 8 godzin dziennie. Założono dopuszczalne zużycie łożyska 2 mm. Sumaryczny współczynnik korekcyjny wyniósł 0,49, a przewidywana trwałość 5226 godzin, tj. 633 ośmiogodzinnych dni pracy łożyska.

Jak wspomniano wcześniej, wysoka temperatura łożyska lub jego otoczenia może spowodować znaczne zmiany luzu łożyskowego. Wymaga to uwzględnienia rozszerzalności cieplnej elementów łożyska. Typowym przykładem takiej sytuacji są np. urządzenia stalowni. Należy więc uwzględnić:

- rozszerzalność cieplną wału,
- rozszerzalność cieplną kompozytu oraz
- rozszerzalność cieplną obudowy.

W takich wypadkach luz montażowy oblicza się z wzoru [9]

$$L_m = L_r + [d\Delta T (\alpha_w + \alpha_k - \alpha_o)], \quad (13)$$

w którym:

L_m – luz montażowy,

L_r – luz roboczy (żądany),

d – średnica wału,

ΔT – przyrost temperatury łożyska,

α_w – współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej materiału wału,

α_k – współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej kompozytu,

α_o – współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej materiału obudowy.

Zobaczmy jakiego rzędu jest taka zmiana. Weźmy pod uwagę łożysko o średnicy nominalnej $D = 40$ mm, dla którego luz roboczy ma wynosić $L_r = 0,12$ mm (por. zalecenia w tab. 18). Załóżmy przyrost temperatury łożyska $\Delta T = 150$ °C. Wał będzie wykonany ze stali, zastosujemy tulejkę brązową, a obudowa łożyska będzie wykonana z żeliwa. Po podstawieniu odpowiednich wartości uzyskamy wynik: $L_m = 0,21$ mm. Oznacza to prawie dwukrotne zmniejszenie luzu początkowego i potwierdza konieczność uwzględniania wpływu ciepła na tę wielkość konstrukcyjną.

Rekapitulując treść tego rozdziału warto podkreślić pewne istotne cechy omawianych w nim tworzyw, szczególnie zaś te, które wyróżniają je spośród innych tworzyw samosmarownych, stosowanych na łożyska bezobsługowe.

Materiały *DEVA-Metall* są kompozytami typu metal-niemetal, wytwarzanymi jako monolityczne spieki brązowe, żelazne i niklowe, zawierającymi w swej strukturze smary stałe: grafit, dwusiarczek molibdenu lub dwusiarczek wolframu.

Cechują się one dużą wytrzymałością mechaniczną i cieplną, co wyraźnie odróżnia je od polimerów. Dopuszczalne natężenie pracy (p_v) jest porównywalne z najlepszymi kompozytami wielowarstwowymi wypełnianymi i o wiele wyższe niż dla polimerów.

Cenną zaletą tych kompozytów jest ich bardzo dobra przewodność cieplna, co ułatwia odprowadzanie ciepła z łożyska i umożliwia stosowanie grubościennych tulejek. Upraszcza to konstrukcję łożyska i jego montaż.

Łożyska z tych materiałów mogą być stosowane, podobnie jak inne łożyska wykonane z większości wcześniej omawianych tworzyw, także przy smarowaniu olejami lub smarami plastycznymi. Ich samosmarowność jest wtedy, jak zwykle, zabezpieczeniem na wypadek awarii systemu smarowniczego. Od łożysk polimerowych różni je jednak to, że smarowanie nie wpływa na mechanizm samosmarowania i stan kompozytu. Przypomnijmy sobie bowiem, że istotą mechanizmu smarowania w układzie polimer–stal jest nanoszenie cienkiej warstewki polimeru na powierzchnię stalową; małe tarcie zawdzięcza taki układ właśnie współpracy dwóch powierzchni polimerowych. Tymczasem smarowanie dodatkowe (płynnymi lub plastycznymi środkami smarnymi) utrudnia tworzenie warstewki polimeru na powierzchni przeciwelementu stalowego. Ponadto omawiany kompozyt nie pęcznieje pod wpływem wilgoci, co występuje w polimerach, a grafit zawarty w tych materiałach przejawia swe dobre właściwości smarne właśnie w otoczeniu wilgoci.

Tulejki *DEVA-Metall* są dostarczane, podobnie jak pormety, gotowe do montażu.

5. ŁOŻYSKA WĘGLOWO-GRAFITOWE

5.1. WPROWADZENIE

Materiały węglowo-grafitowe, zwane też skrótowo węglografitami, są stosunkowo „młodymi” materiałami łożyskowymi. Na szerszą skalę znalazły one zastosowanie w drugiej połowie ubiegłego wieku, a obszar ich zastosowań stale rośnie. Spowodowane to jest nie tylko dobrymi własnościami termicznymi i właściwościami tribologicznymi podstawowych składników tych *kompozytów*: węgla i grafitu, lecz także wielkimi możliwościami wpływania na nie przez odpowiedni dobór dodatków oraz sposobu wytwarzania.

Węglografity wyróżniają się wśród materiałów łożyskowych: chemiczną stabilnością, dobrą przewodnością cieplną, małym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej (średnio 4 razy mniejszym niż stali), dobrą wytrzymałością zmęczeniową, bardzo dobrą odpornością cieplną (także przy gwałtownych zmianach temperatury i uderzeniach cieplnych), dobrymi właściwościami ślizgowymi. Ponadto są niepalne i są przyjazne środowisku.

Materiały te wytwarzane są metodami metalurgii proszków. Jak każdy spiek są one kruche. Tę właściwość – obok wymienionych wyżej zalet węglografitów – należy mieć również na uwadze.

Węglografity znajdują zastosowanie w przemyśle: lotniczym, chemicznym i petrochemicznym, spożywczym, farmaceutycznym, kosmetycznym oraz w urządzeniach o niskich i wysokich temperaturach, w technice próżniowej, w reaktorach oraz w technice medycznej.

Wspomniane wyżej możliwości wytwarzania tych materiałów o żądanych właściwościach i właściwościach rozszerzają stale obszar ich zastosowań.

5.2. WYTWARZANIE ŁOŻYSK WĘGLOWO-GRAFITOWYCH

Wytwarza się i stosuje trzy rodzaje materiałów węglowo-grafitowych na łożyska ślizgowe [1]:

- węglografity,
- grafit wypełniany węglikiem krzemu,
- węglografity wiązane żywicami.

5.2.1. WĘGLOGRAFITY

Jako materiałów wyjściowych używa się proszków węglowych o określonej granulacji oraz środków wiążących w postaci paku z węgla kamiennego lub naftowego oraz żywic. Dla uzyskania określonych własności i właściwości wprowadza się odpowiednie dodatki oraz impregnaty.

W tabeli 19 podano informacje o materiałach wyjściowych.

Tabela 19. Materiały wyjściowe do wytwarzania węglografitów [1]

1. Materiał bazowy	2. Lepiszczka	3. Dodatki	4. Impregnaty
Koksy: – z węgla kamiennego – z ropy naftowej	Paki: – z węgla kamiennego – z ropy naftowej	Materiały mineralne	Żywice
Sadze: – płomieniowa – acetylenowa – etylenowa			
Grafity: – elektrografit – grafit naturalny			

Koksy zawierają najczęściej 99% węgla, 0,5% substancji popiołotwórczych oraz 0,5% substancji lotnych [1]. Mają one strukturę krystaliczną uszkodzonej sieci grafitu. Nie przejawiają tak dobrych właściwości ślizgowych jak czysty grafit. W węglografitach koksy stanowią szkielet nośny, a ponadto są źródłem grafitu przy dodatkowej grafityzacji.

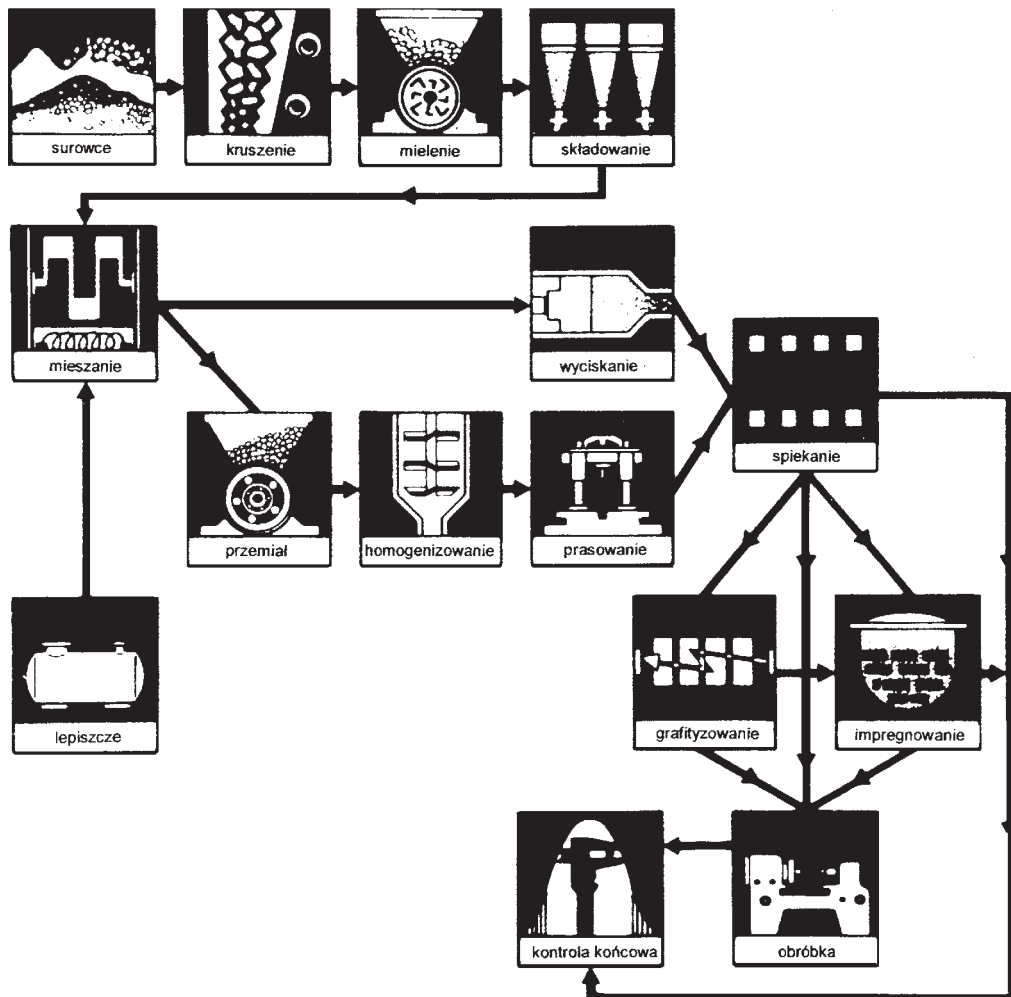
Sadze są bardzo drobnymi cząstkami węgla charakteryzującymi się niezwykle dużą powierzchnią. Mają one sieć krystaliczną taką jak grafit, lecz jej pierścienie są nieregularnie poprzecinane względem siebie. Sadze nadają węglografitom twardość i wytrzymałość.

Grafity, o których była już mowa (por. punkt 3.4.2), odznaczają się bardzo dobrymi właściwościami ślizgowymi dzięki regularnej strukturze heksagonalnej i istnieniu płaszczyzn łatwego poślizgu. Stanowią one smar stały, decydujący o samosmarowności węglografitów.

Paki stosowane jako środki wiążące (lepiszcza) podczas spiekania w procesie produkcyjnym podlegają pirolizie, przekształcając się w koks, który wiąże cząstki węglowych materiałów bazowych.

Na rysunku 62 pokazano przebieg procesu wytwarzania węglografitów.

Przygotowane materiały bazowe oraz materiały wiążące (lepiszcza) o odpowiedniej granulacji są mieszane w odpowiedniej temperaturze. Większość wsadu (ok. 85%) ma



Rys. 62. Ilustracja procesu wytwarzania węgligrafitów [1]

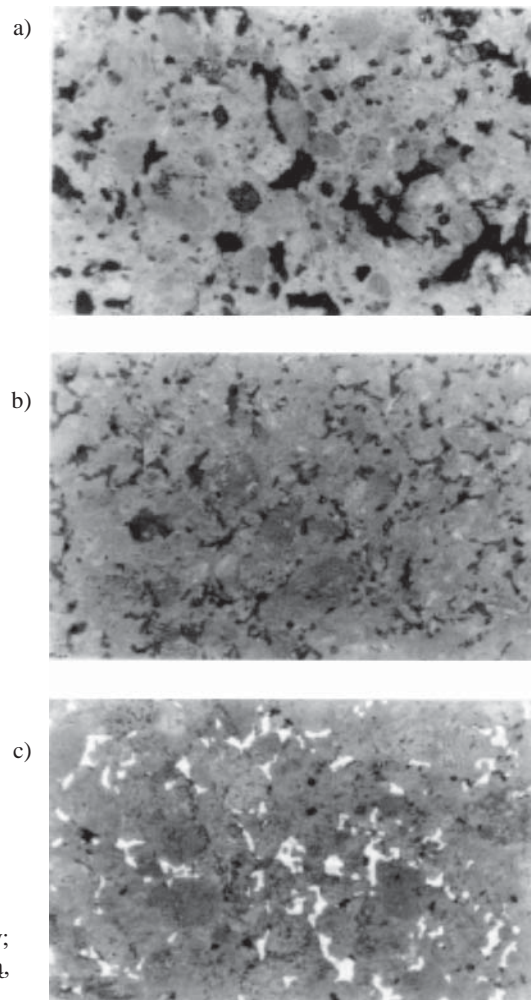
granulację poniżej $40\ \mu\text{m}$. Otrzymany w ten sposób zhomogenizowany materiał chłodzi się, rozkrusza i następnie poddaje mieleniu na odpowiedni rozmiar cząstek. Następnym etapem jest wytwarzanie kształtek, w wypadku łożysk – tulejek lub prętów do ich wykonywania. Stosuje się bądź wyciskanie, bądź też prasowanie, pod ciśnieniem od 80 do 200 MPa [1].

Dalszym etapem produkcyjnym jest spiekanie kształtek w temperaturze $1100\ ^\circ\text{C}$, bez dostępu powietrza. Podczas tego zabiegu lepiszcze zamienia się w koks, przy czym występuje skurcz kształtki. Tak wytworzony materiał nazywany jest twardym spiekami węglowym (niem. Hartbrandkohle [1]). Wykazuje od dobre własności mechaniczne i może być w tej postaci używany do różnych zastosowań mechanicznych. Jednak dobre

właściwości tribologiczne tego materiału nie są jednoznacznie określone; zależą one bowiem od zawartości grafitu.

Odpowiednią zawartość grafitu można albo dozować w pierwszej fazie produkcji, albo też w drugiej fazie, po spiekaniu, poddać kształtki grafityzacji. Proces ten przebiega w temperaturze 3000 °C, a w jego wyniku tworzy się w materiale elektrografit. Wskutek grafityzacji powstaje w kształtce dalszy skurcz. Mimo skurczu zarówno twardy spiek węglowy, jak i elektrografit są porowate. Zależnie od gatunku materiału porowatość wynosi od 6 do 25% [1].

Porowatość tę wykorzystuje się do nasycania (impregnowania) węglografitów celem przystosowania ich do określonych warunków pracy. Jako impregnaty stosuje się żywice, sole nieorganiczne oraz metale względnie ich stopy. Na rysunku 63 pokazano mikrostruktury niektórych impregnowanych węglografitów.



Rys. 63. Mikrostruktury niektórych węglografitów;
a – nieimpregnowany, b – impregnowany żywicą,
c – impregnowany antymonem [1]

Proces wytwarzania węglografitów kończy się na półwytworach. Ostateczny kształt nadaje się im za pomocą obróbki wiórowej przez: toczenie, frezowanie, wiercenie i rozwiercanie, szlifowanie, a także polerowanie i docieranie. Obróbkę wiórową wykonuje się narzędziami ze spieków lub diamentu. Stosuje się tolerancje IT7 dla średnic wewnętrznych i IT6 dla średnic zewnętrznych. Twarde spieki węglowe oraz węglografity impregnowane metalami obrabia się wyłącznie narzędziami diamentowymi.

Drobne elementy o nieskomplikowanych kształtach i o dużych tolerancjach można też wykonywać na gotowo w procesie formowania i spiekania. Muszą jednak być przy tym zachowane szczególne warunki spiekania, aby zminimalizować skurcz.

Jeśli węglografity mają pracować jako łożyska smarowane jakimś medium, to konieczne jest uprzednie oczyszczenie ich za pomocą ultradźwięków po to, aby pył węglowy, mieszając się ze środkiem smarnym, nie utrudniał procesu smarowania.

5.2.2. GRAFIT WYPEŁNIANY WĘGLIKIEM KRZEMU

Kompozyt ten stosuje się przede wszystkim na wysokoobciążone łożyska ślizgowe oraz jako materiał na elementy pracujące w wysokich temperaturach. Charakteryzuje się on dużą twardością, gęstością, odpornością na zużywanie, odpornością na uderzenie cieplne i chemiczną obojętnością. Grafit, który jest w tym kompozycie materiałem bazowym zapewnia mu bardzo dobre właściwości ślizgowe w wypadku przerw w smarowaniu.

Materiał ten wytwarza się przez impregnowanie porowatego elektrografitu ciekłym krzemem z następującą przemianą krzemu w węglík krzemu. Towarzyszy temu zwiększenie objętości kształtki, co może wywołać duże naprężenia w kształtce i jej pękanie. Fakt ten musi być brany pod uwagę przy doborze cech geometrycznych kształtki. Po wytrawieniu krzemowanych elementów naprężenia ustępują.

Mikrostruktura tego kompozytu składa się z wzajemnie przenikających się faz węglíka krzemu i grafitu, skład chemiczny zawiera wagowo około 35% grafitu, 60% węglíka krzemu oraz 5% elementarnego krzemu [1]. Ten wolny krzem jest otoczony skupiskami grafitu i węglíka krzemu i nie wiąże się z innymi składnikami kompozytu.

Odporność chemiczna tego materiału wiąże się z odpornością chemiczną jego składników, tj. węglíka krzemu i grafitu. Jest on więc odporny na:

- wszystkie substancje nieorganiczne,
- silne kwasy i
- wszystkie wodne roztwory soli [1].

Podobnie jest z odpornością na współpracę z metalami: kompozyt ten może współpracować tylko z tymi metalami, które nie wchodzą w reakcję z jego składnikami. Z tego powodu niewskazana jest współpraca tego materiału z niklem i kobaltem oraz ich stopami (tworzą związki z węglíkiem krzemu). Natomiast współpraca z aluminium, mimo reagowania tego materiału z grafitem, nie jest szkodliwa, ponieważ nie występuje reakcja z węglíkiem krzemu.

Ze względu na koszty wytwarzania grafitu wypełnianego węglikiem krzemu stosuje się ten kompozyt – mimo jego wielu wymienionych zalet – tylko w uzasadnionych wypadkach, np. w pompach reaktorów atomowych, w urządzeniach platform wiertniczych, w urządzeniach transportu cieczy agresywnych i zanieczyszczonych itp.

5.2.3. WĘGLOGRAFITY WIĄZANE ŻYWICAMI

Ten rodzaj węglografitów, stanowiących kompozyt typu N-N, ma coraz większe zastosowanie ze względu na łatwość formowania kształtek za pomocą prasowania na gorąco, wtryskiwania oraz odlewania wtryskowego. Jako lepiszcze stosuje się zazwyczaj żywice fenolowe (duroplasty).

Mieszanka przeznaczona do wytwarzania tych kompozytów składa się z drobno zmielonej żywicy oraz wypełniaczy o odpowiedniej granulacji: koksu, grafitu, sadzy i specjalnych dodatków.

Ścianki wytwarzanych elementów nie mogą być grubsze niż 10÷15 mm, ponieważ produkty rozkładu żywicy wydobywające się ze ścianki podczas utwardzania mogą ją uszkodzić.

Istotną zaletą – oprócz wymienionej łatwości wytwarzania nawet skomplikowanych kształtek – jest możliwość uzyskania gotowych wytworów, w klasie dokładności IT9.

Do wytwarzania samosmarownych łożysk ślizgowych używa się mas o małej zawartości żywicy a dużej grafitu, co zapewnia kompozytom dobre właściwości ślizgowe. Dzięki stosowaniu zróżnicowanych składników omawianych kompozytów można w dużym zakresie regulować ich własności fizyczne.

Odporność chemiczna i cieplna węglografitów zależą od własności lepiszcza – żywicy fenolowej, o czym wspomniano już w punkcie 3.4.2.

5.3. WŁASNOŚCI CHEMICZNE I FIZYCZNE

Zarówno twardy spiek węglowy, jak elektrografit oraz kompozyt grafitowo-krzemowy odznaczają się nadzwyczajną odpornością chemiczną na kwasy, zasady i praktycznie na wszystkie substancje organiczne, z wyjątkiem silnie utleniających mediów [1]. W wypadku kompozytów grafitowo-żywiczych o odporności chemicznej decydują własności żywicy.

W tabeli 20 podano informacje o własnościach fizycznych wybranych gatunków omawianych materiałów.

Nieimpregnowany węglografit cechuje się dobrymi własnościami mechanicznymi. Ma on dość dużą porowatość (do 15%). W wielu zastosowaniach ta porowatość nie jest szkodliwa, a czasami jest wręcz korzystna, np. w łożyskach gazowych. Jednakże w wy-

Tabela 20. Własności fizyczne niektórych materiałów węglowo-grafitowych [1]

Rodzaj materiału	Gęstość [g/cm ³]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Moduł sprężystości podłużnej [kN/mm ²]	Odporność cieplna w atm. utlen. w atm. nieutl. [°C]	Współcz. rozszerzalności cieplnej w 17–217 °C w 217–27 °C [×10 ⁻⁶ K ⁻¹]	Przewodność cieplna w 17 °C [W/K·m]
Węglografit nieimpregnowany	1,60	50	150	16	350 1200	2,4 4,4	8,5
Węglografit zagęszczony	1,65	45	130	14	350 1200	2,6 4,6	17
Węglografit nasycony żywicą	1,65	55	210	17	200 200	2,7 5,0	13
Węglografit nasycony antymonem	1,70	80	250	17	350 600	2,7	8,5
Węglografit nasycony ołowiem	2,20	80	240	24	230 230	3,7 5,5	20
Węglografit wiązany żywicą	1,65	60	170	20	180 180	16	5
Elektrografit zagęszczony	2,80	35	100	22	500 2500	4,2	17
Elektrografit nasycony solami	2,40	45	110	16	650 2500	4,5 5,5	65
Elektrografit nasycony antymonem	1,7	65	170	12	500 600	2,8 4,0	65
Kompozyt węglík krzemu-grafit	2,65	140	700	140	500 2500	3,0 4,0	125

padku smarowania hydrodynamicznego jest ona wadą, ponieważ połączenie szczeliny smarowej z otoczeniem poprzez pory zmniejsza wypór hydrodynamiczny.

Jeśli wymagany jest materiał z możliwie małą porowatością, to stosuje się jego „uszczelnienie” za pomocą impregnowania i następnie termoutwardzania impregnatu. Zabieg ten polepsza równocześnie własności wytrzymałościowe wytworu. O takim zagęszczonym materiale informują dane w drugim wierszu tabeli.

Impregnowanie za pomocą żywicy lub metalu usuwa porowatość prawie całkowicie. Dane na ten temat zawarte są w następnych trzech wierszach tabeli 20.

Także materiały grafitowe można zagęszczać w podobny sposób jak opisany wyżej. Można je także, oczywiście, impregnować żywicą i metalami. Dane o takich materiałach zawarto w następnych wierszach tabeli.

W związku ze wspomnianą na wstępie kruchością materiałów węglowo-grafitowych, będących spiekami, na ogół nie określa się ich wytrzymałości na rozciąganie ani wydłużenia względnego. Zazwyczaj są one charakteryzowane za pomocą wytrzymałości na zginanie i na ściskanie oraz przez moduł sprężystości.

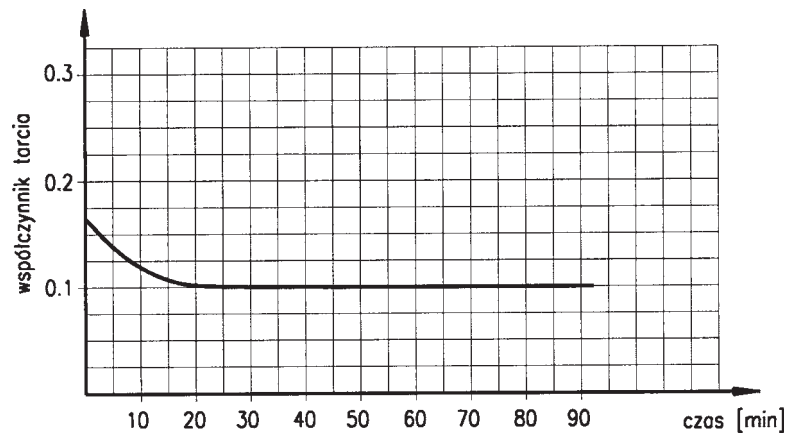
Ponieważ węglografity mają małą wytrzymałość na rozciąganie, więc wytwory z nich należy tak kształtować, aby do maksimum wykorzystać dużą ich wytrzymałość na ściskanie. Węglografity mają przewagę nad metalami dzięki małej rozszerzalności cieplnej, a przez to stabilności kształtu i wymiarów.

5.4. WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE

Dzięki szczególnym własnościom grafitu, który znajduje się w każdym z wymienionych wcześniej rodzajów tworzyw węglowo-grafitowych, tworzywa te charakteryzują się małym tarcieniem na sucho i dobrą odpornością na zużycie.

Wartość **współczynnika tarcia** zależy oczywiście od wielu czynników, m.in. od materiału elementu współpracującego, stanu jego powierzchni, warunków ruchu i innych. Ogólnie, przy tarceniu o stal i żeliwo i gładkie powierzchnie tych metali, notuje się wartości tego współczynnika od 0,1 do 0,2. Jeśli łożysko pracuje w otoczeniu wilgoci, to wartość ta może być nawet mniejsza od 0,1.

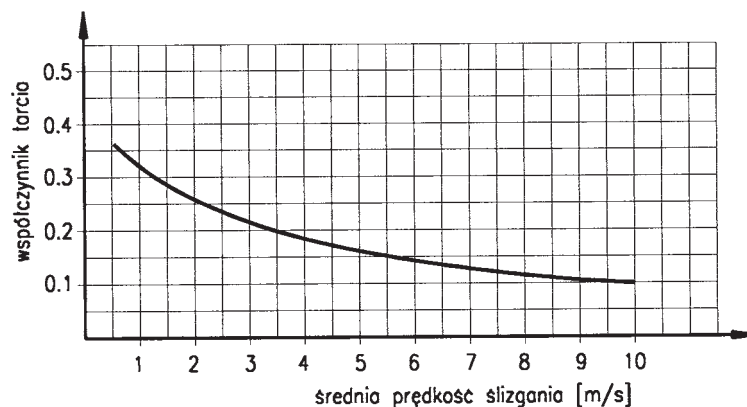
Na kolejnych rysunkach przedstawiono przykładowe przebiegi wartości współczynnika tarcia: podczas docierania, w zależności od prędkości ślizgania oraz w zależności od nacisku powierzchniowego. Są to wyniki badań nad węglografitem zagęszczonym, zastosowanym w łożysku wzdłużnym o średnicy 80,5/57,5 mm (o powierzchni 25 cm²), współpracującym z elementem żeliwnym o powierzchni dokładnie obrobionej, przy temperaturze łożyska 100 °C.



Rys. 64. Przebieg wartości współczynnika tarcia podczas docierania łożyska z węglografitu zagęszczonego; nacisk powierzchniowy 1 MPa, średnia prędkość ślizgania 0,8 m/s [1] (pozostałe informacje w tekście)

Jak widać z tego wykresu (rys. 64), okres wstępnego docierania trwa bardzo krótko (około 20 minut), po czym następuje stabilizacja wartości współczynnika tarcia. Jest to dowodem na szybkie wytworzenie się warstewki grafitu na powierzchni czopa (w tym wypadku tarczy łożyska wzdłużnego) i tarcia pomiędzy warstwami tego materiału. Pod względem docieralności, mierzonej zazwyczaj okresem docierania oraz ustabilizowaną wartością współczynnika tarcia, materiały węglowo-grafitowe znacznie przewyższają inne materiały łożyskowe. Nawet te najbardziej podatne materiały, jakimi są babbity.

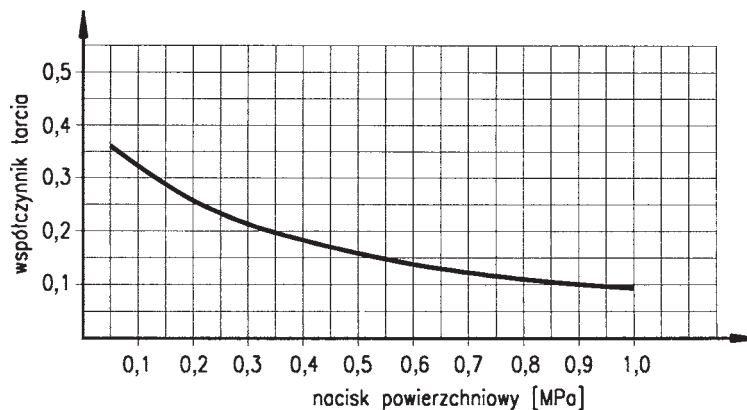
Obok docieralności, właściwości ślizgowe są charakteryzowane zależnościami współczynnika tarcia od prędkości ślizgania i nacisku powierzchniowego. Zależności takie podano przykładowo na kolejnych rysunkach.



Rys. 65. Zależność współczynnika tarcia węglografitu zagęszczonego od prędkości ślizgania przy stałym nacisku powierzchniowym 0,1 MPa [1] (dane w tekście)

Z wykresu widać wyraźnie (rys. 65), że w miarę zwiększania prędkości ślizgania wartość współczynnika tarcia maleje, osiągając pod koniec badań typową dla tarcia suchego grafitu po metalach, wartość $\mu = 0,1$.

Jeśli spojrzymy na następny wykres, podany na rysunku 66, to zobaczymy, że także ze zwiększaniem nacisku powierzchniowego tarcie w opisywanym łożysku maleje.

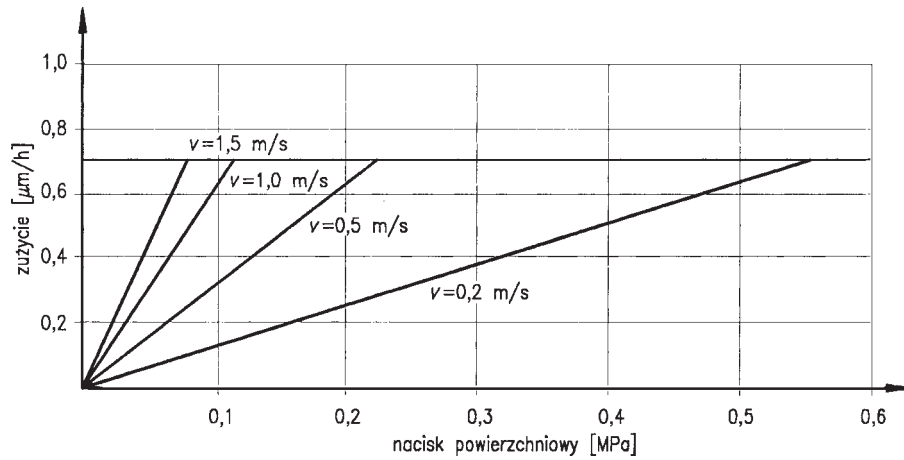


Rys. 66. Zależność współczynnika tarcia węglografitu zagęszczonego od nacisku powierzchniowego przy stałej prędkości ślizgania 0,8 m/s [1] (dane w tekście)

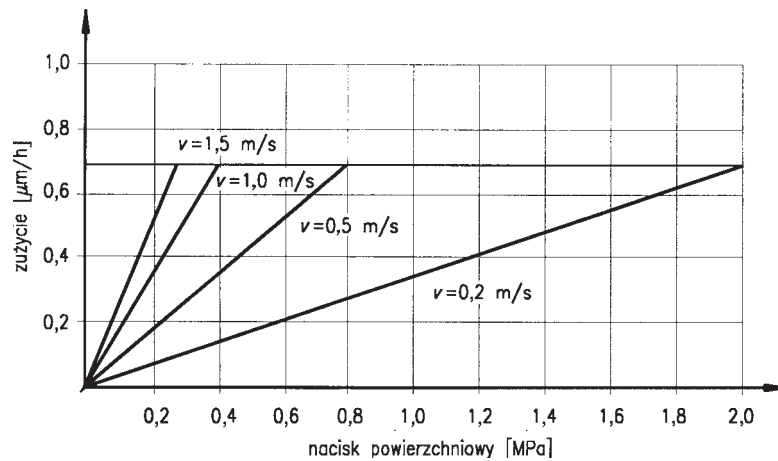
Zwróćmy jednak uwagę na to, że w pierwszym wypadku badano wpływ prędkości ślizgania na tarcie przy bardzo małym nacisku, w drugim zaś wypadku badano wpływ nacisku powierzchniowego na tarcie przy bardzo małej prędkości. Świadczy to o tym, że w trakcie obydwóch badań formowały się dopiero ślizgowe warstewki grafitu pod wpływem zwiększających się wartości parametrów ruchowych v i p . Można więc powiedzieć, że zarówno prędkość ślizgania, jak i nacisk powierzchniowy, w izotermicznym przebiegu procesu tarcia (utrzymywano stałą temperaturę łożyska $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), wpływają na ten proces podobnie jak czas przy docieraniu. Niestety w materiale źródłowym [1] nie podano informacji ani o dalszym przebiegu współczynnika tarcia w obydwóch opisywanych badaniach, ani też o wpływie ciepła na tarcie (podczas zmiany temperatury łożyska).

Trwałość łożysk z panwiami wykonanymi z węglografitów zależy od **intensywności zużycia** tego materiału. Na rysunkach 67 i 68 pokazano przykładowo zależność intensywności zużycia dwóch rodzajów węglografitów, w zależności od nacisku powierzchniowego i prędkości ślizgania.

Porównanie tych wykresów umożliwia przekonanie się o istotnej różnicy między węglografitem nieimpregnowanym a węglografitem zagęszczonym pod względem intensywności zużycia, a co za tym idzie – także pod względem obciążalności (o czym dalej).



Rys. 67. Intensywność zużywania węglografitu nieimpregnowanego w zależności od nacisku powierzchniowego, przy stałej prędkości ślizgania; badania prowadzono na łożysku poprzecznym $\varnothing 12/18 \times 10$ mm z czopem ze stali nierdzewnej o chropowatości powierzchni $R_z = 0,7 \mu\text{m}$ [1]

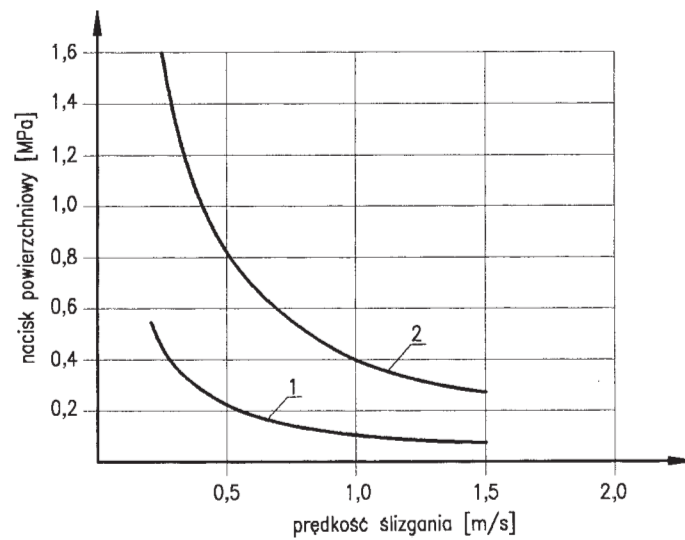


Rys. 68. Intensywność zużywania elektrografitu zagęszczonego w zależności od nacisku powierzchniowego, przy stałej prędkości ślizgania; badania prowadzono na łożysku o danych jak na rys. 67 [1]

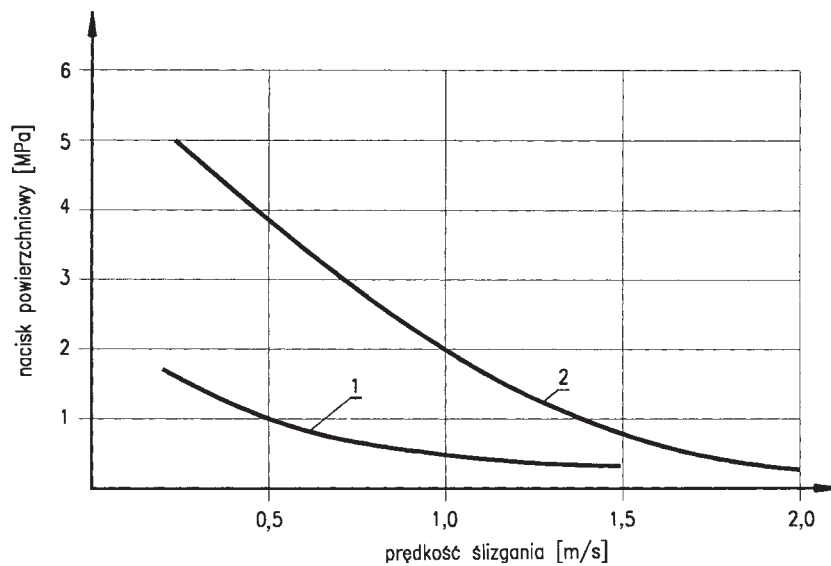
Na podstawie danych z praktyki ustalono graniczną wartość intensywności zużywania na $0,7 \mu\text{m}/\text{h}$ [1]. Wartość tę oznaczono na wykresach podanych na rysunkach 67 i 68, odcinając poszczególne linie $v = \text{const}$ na tym poziomie.

Korzystając z powyższych wykresów i wspomnianego ograniczenia można było sporządzić wykresy krzywych granicznych $p-v$. Pokazano je na rysunkach 69 i 70.

W podobny sposób jak na rysunku 69 sporządzono krzywe graniczne dla dwóch innych tworzyw węglowo-grafitowych (rys.70).



Rys. 69. Krzywe graniczne dla tworzyw węglowo-grafitowych, według kryterium granicznej intensywności zużycia $0,7 \mu\text{m/h}$; 1 – węglografit nieimpregnowany, 2 – elektrografit zagęszczony [1]



Rys. 70. Krzywe graniczne dla tworzyw węglowo-grafitowych – porównanie obciążalności dwóch tworzyw impregnowanych; 1 – węglografit impregnowany żywicą, 2 – węglografit impregnowany oliwą [1]

Z tych i podobnych wykresów (nie zamieszczonych tu) można odczytać następujące wartości iloczynu $(pv)_{\max}$ określającego maksymalne natężenie pracy łożyska z danego tworzywa [1]:

– węlografity nieimpregnowane	$pv = 0,11 \text{ MPa(m/s)}$,
– węlografity zagęszczony	$pv = 0,30 \text{ MPa(m/s)}$,
– elektrografity zagęszczony	$pv = 0,40 \text{ MPa(m/s)}$,
– elektrografity impregnowane solami	$pv = 1,90 \text{ MPa(m/s)}$.

Jak widać, obciążalność tworzyw węglowo-grafitowych wyraźnie rośnie wraz z uszlachetnianiem tych materiałów. Krzywe graniczne mogą oczywiście być przesuwane, zależnie od tego jaką inną wartość intensywności zużycia przyjmiemy za graniczną (tj. odcniemy wykresy na odpowiedniej rzędnej intensywności zużycia). Tym samym zwiększą się lub zmniejszą odpowiednio wartości dopuszczalne iloczynu pv .

Warto w tym miejscu przypomnieć, że popularny dla określania obciążalności łożysk samosmarownych iloczyn pv ma ograniczenia: konieczne jest podanie granicznych wartości jego czynników: p lub v . W omawianym wypadku krzywe graniczne są ważne dla zakresu prędkości obwodowych v od 0,2 do 1,5 m/s. Dla prędkości $v < 0,2$ m/s nie należy zbyt przekraczać wartości p ważnych dla $v = 0,2$ m/s. Przy prędkościach powyżej 1,5 m/s, przy założeniu $pv = \text{const}$ należy się liczyć ze zwiększonym zużyciem.

Łożyska węglowo-grafitowe mogą oczywiście pracować także przy smarowaniu. Ich własności fizyczne, szczególnie termiczne, pozwalają na stosowanie w temperaturach wyższych niż dopuszczalne dla konwencjonalnych materiałów łożyskowych, a ich właściwości tribologiczne są dobrym zabezpieczeniem w wypadku awarii układu smarowniczego. Jako środka smarnego używa się często wody, co sprzyja – jak już wcześniej wspomniano – (por. punkt 3.4.2) polepszeniu właściwości ślizgowych grafitu.

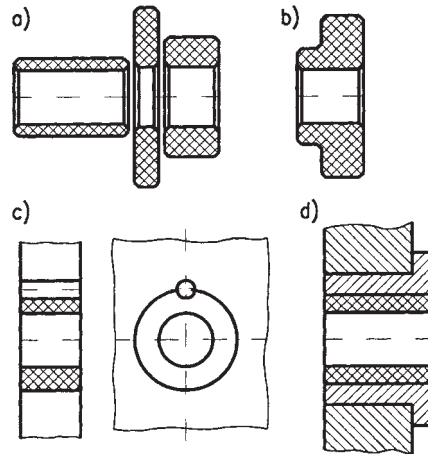
Badania poprzecznych łożysk ślizgowych z różnych rodzajów grafitu [1] wykazały, że obciążalność łożysk smarowanych wodą, mierzona według kryterium maksymalnej intensywności zużycia, zwiększyła się kilkakrotnie w stosunku do obciążalności podczas tarcia suchego. Trzeba jednak mieć na uwadze pewne niedostatki takiego układu. Przede wszystkim konieczne jest stosowanie na czopy stali nierdzewnej. Ponadto w miarę zużycia się panwi z węlografitu zmienia się kształt szczeliny smarowej, co pogarsza proces smarowania hydrodynamicznego, a co za tym idzie zwiększa się udział tarcia suchego oraz intensywność zużycia panwi.

5.5. KONSTRUKCJA I MONTAŻ ŁOŻYSK WĘGLOWO-GRAFITOWYCH

Łożyska z węlografitów wymagają przestrzegania pewnych ograniczeń i zaleceń, wynikających z własności tych materiałów, szczególnie zaś ze względu na ich kruchość. Należy unikać gwałtownych zmian przekrojów i ostrych krawędzi, tj. miejsc, w których

mogą wystąpić spiętrzenia naprężeń. Zarówno przejścia przekrojów, jak i krawędzie należy wykonywać możliwie dużymi łukami, a wejścia otworów fazować.

Na rysunku 71 pokazano przykłady rozwiązań łożysk węglorafitowych.



Rys. 71. Przykłady łożysk węglorafitowych; a – składane łożysko poprzeczno-wzdłużne, b – proste łożysko poprzeczno-wzdłużne z zaokrąglonymi krawędziami, c – zabezpieczenie za pomocą kołka walcowego, d – tulejka węglorafitowa w obudowie metalowej [25]

Jeśli łożysko ma być wykonane jako poprzeczno-wzdłużne, to najlepiej obie te części łożyska rozdzielić tak jak pokazano to na rysunku 71a lub wykonać je w możliwie prostej postaci, tak jak np. na rysunku 71b.

Zazwyczaj mocuje się tulejki węglorafitowe w obudowie na wcisk (patrz niżej). Jeśli z jakiegoś powodu konieczne jest dodatkowe zabezpieczenie kształtowe, to nie wolno stosować wkrętów, wpustów, klinów itp., które mogą spowodować pęknięcia tulejki. Dopuszcza się jedynie stosowanie gładkich kołków walcowych (rys. 71c). Można też, zamiast wcisku, stosować wklejanie tulejek w obudowę za pomocą odpowiednich klejów.

Na rysunku 71d pokazano łożysko z tulejką węglorafitową mocowaną w obudowie. Takie rozwiązanie stosuje się m.in. w zespołach o utrudnionym montażu tulejki w korpusie.

Wymiary tulejek węglorafitowych, tj. stosunek długości łożyska do jego średnicy l/d , przyjmuje się w granicach od 0,8 do 1,2. Zalecane jest stosowanie mniejszych wartości tego stosunku ze względu na naciski krawędziowe, jakie mogą wystąpić w wyniku ugięć wału. Z tego samego powodu należy stosować wahlne podparcia łożysk w wypadku końcowego łożyskowania wałów i elastyczne mocowanie (np. w obudowie gumowej) tulejek w łożyskach środkowych. Ze względu na naprężenia występujące podczas montażu stosunkowo kruchych tulejek stosuje się odpowiednie grubości ich ścianek. Zalecane wartości tych grubości podane są w tabeli 21.

Tabela 21. Grubości ścianek tulejek węglografitowych [25]

Średnica łożyska [mm]	Grubość ścianki [mm]
< 10	≥ 3
10÷25	3÷5
25÷50	5÷8
50÷75	8÷10
75÷100	10÷12
100÷150	12÷18
150÷200	18÷25
> 200	25÷50

Zaleca się stosować **luzy** łożyskowe nieco większe niż dla łożysk metalowych: 0,3 do 0,5% średnicy wału (luzy średnicowe) w wypadku łożysk o tarczu suchym oraz 0,1 do 0,3% średnicy wału w wypadku łożysk smarowanych. Dotyczy to luzów ruchowych, tj. w temperaturze pracy łożyska [1]. Dodatkowo, w tabeli 22 podano za [25] wartości zalecanych luzów promieniowych.

Tabela 22. Zalecane luzy dla łożysk węglografitowych [25]

Średnica łożyska [mm]	Luz promieniowy [mm]
< 10	0,005÷0,015
10	0,01÷0,03
25	0,03÷0,05
40	0,04÷0,07
80	0,06÷0,08
100	0,10÷0,20
150	0,20÷0,30

Jak już wspomniano, najczęściej stosuje się montaż tulejek węglografitowych w obudowie przez wcisk. Zaleca się następujące tolerancje przed wciskaniem na zimno [1]:

- średnica wewnętrzna tulejki F7,
- średnica zewnętrzna tulejki s6,
- średnica otworu w obudowie H7.

Wtedy po wciśnięciu średnica wewnętrzna tulejki będzie miała tolerancje od H7 do H8.

Do montażu tulejek węglografitowych używa się trzpieni montażowych, podobnie jak do montażu tulejek z pometów (por. punkt 2.4). Średnica tego trzpienia powinna być tolerowana około 3 pola tolerancyjne poniżej tolerancji otworu tulejki w stanie, w jakim jest ona dostarczana [1]. Kołnierz trzpienia powinien pokrywać całą powierzchnię czołową tulejki.

Należy brać pod uwagę mniejszą rozszerzalność cieplną węglografitów niż metali, a tym bardziej tworzyw sztucznych. Podane wyżej pasowanie H7/s6 może być stosowane do temperatury łożyska 150 °C, jeśli tulejki mocowane są w obudowie stalowej. Przy obudowach lub obejmach o większej rozszerzalności cieplnej dopuszczalna temperatura łożyska z tak pasowaną tulejką jest niższa.

Po wciśnięciu zmniejsza się średnica wewnętrzna tulejki. Zależnie od rodzaju węglografitu, grubości ścianki tulejki i pasowania, zmniejszenie to wynosi od 70 do 85% wartości wcisku.

Jeśli temperatura łożyska będzie wyższa niż 150 °C, to zaleca się mocować tulejki w obudowie lub w obejmie skurczowo. Stosuje się następujące tolerancje przed montażem skurczowym [1]:

- średnica wewnętrzna tulejki D8,
- średnica zewnętrzna tulejki x8 do z8,
- średnica otworu w obudowie H7.

Temperatura montażu wynosi od 300 do 350 °C.

Po zaciśnięciu otwór tulejki będzie miał tolerancję H9. Zaleca się jednak po montażu rozwiercać otwór na wymiar ostateczny. Ocenia się, że przy wymienionych wyżej tolerancjach, otwór tulejki może się zmniejszyć – zależnie od średnicy, grubości ścianki i zastosowanego pasowania – od 80 do 100% wartości skurczu. Przy stosowaniu cienkościennych obejm stalowych ich średnica zewnętrzna po zaciśnięciu tulejki może się zwiększyć. Mocowanie skurczowe tulejek węglografitowych w obejmach stalowych dokonuje się zwykle w wytwórniach. Zespół taki jest dostarczany jako gotowy do montażu w obudowie.

Istotne jest stosowanie odpowiednich materiałów na **wał** oraz stan powierzchni czopów współpracujących z łożyskami węglografitowymi. Zaleca się stosować stal chromową z zawartością od 13 do 17% chromu, stal nierdzewną bez niklu, a w wypadku stosowania stali niestopowej – chromowanie lub azotowanie czopów. Stosowanie twardych stali na czopy uzasadnione jest tym, że ze zwiększającą się twardością warstwy wierzchniej czopa łatwiej tworzy się na nim warstewka ślizgowa grafitu ([1] wg Clarka i Lancastera, 1963 oraz Giltrowa i Lancastera 1970, oraz [17]).

Czopy powinny być szlifowane i dogładzane. Szlifowane czopy mogą być stosowane tylko do łożysk słabo obciążonych. Chropowatość ich powierzchni nie powinna przekraczać $R_z = 1 \mu\text{m}$.

5.6. PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ (wg [1])

Na wstępie tego rozdziału wspomniano ogólnie o obszarach zastosowań łożysk węglowo-grafitowych. W tym punkcie informacje te zostaną poszerzone o przykłady zrealizowanych łożyskowań z tych materiałów.

Powszechnie stosuje się łożyska z węglografitów, jako łożyska tarcia suchego, we wszelkiego rodzaju suszarniach, w temperaturach od 150 do 300 °C, przy prędkościach od 0,05 do 0,2 m/s i obciążeniach od 0,35 do 0,50 MPa. Łożyska te pracują bez przerwy kilka lat. W podobnych warunkach pracują łożyska łańcuchów przenośników przy wielkich piecach oraz łożyska przenośników w urządzeniach chłodniczych w walcowniach.

W turbosprężarkach stosuje się węglografity do łożyskowania łopatek kierownicy. Łożyska te pracują na sucho przy ruchu wahadłowym (kąt obrotu od 10 do 60°) ze średnią prędkością 10 mm/min i przy obciążeniu 2,5 do 5 MPa. Temperatura otoczenia wynosi zazwyczaj od 120 do 150 °C, ale zdarzają się także urządzenia, w których wynosi ona od 250 do 500 °C. Praktyka wykazała, że łożyska węglografitowe wytrzymują w tych urządzeniach 10, a nawet więcej lat.

Obok dużej odporności na ciepło, i oczywiście samosmarowności, często wykorzystuje się także dużą odporność chemiczną węglografitów. Najczęściej używa się tych materiałów na łożyska pomp, zarówno przy tarcu suchym, jak i przy smarowaniu np. pompowanymi cieczami, także chemicznie agresywnymi. Stosuje się te materiały na przykład do łożyskowania pomp chemicznych, w których prędkość czopa wynosi 2900 obr/min, co przy jego średnicy od 30 do 50 mm daje prędkość ślizgania od 4,5 do 8 m/s. Obciążenie tych łożysk jest niewielkie.

Stosunkowo duże obciążenia przenoszą natomiast łożyska stosowane w pompach zębatych. Wynoszą one od 4 do 5 MPa, a prędkości obwodowe czopa dochodzą do 4 m/s. W wielu wypadkach, jak np. w pompach do transportu ciekłej masy poliestrowej, temperatura łożyska może dochodzić do 350 °C.

W reaktorach atomowych, w pompach pierwszego obiegu stosuje się łożyska węglografitowe, w których przy średnicy czopa od 220 do 340 mm prędkość ślizgania wynosi od 17 do 26 m/s. Obciążenie tych łożysk jest stosunkowo niskie, wynosi ono 0,15 MPa, temperatura ich pracy wynosi zaś od 60 do 100 °C. Łożyska te muszą być jednak przewidziane do pracy w wypadkach awaryjnych nawet w temperaturze 290 °C.

Wspomina się o stosowaniu łożysk z omawianych materiałów także w pompach wodnych, paliwowych, w pompach na skroplone gazy, do produktów spożywczych, a także do cieczy radioaktywnych.

Szerokie zastosowanie znalazły łożyska węglografitowe w pompach centralnego smarowania. Pracują one przy prędkościach ślizgania od 1,1 do 2,4 m/s i przy małych obciążeniach, ok. 0,02 do 0,03 MPa. Zazwyczaj są one smarowane niezbyt czystą wodą, a temperatura łożyska dochodzi do 115 °C. Łożyska wzdłużne pracują w cięższych warunkach: przy średnich prędkościach ślizgania od 3 do 7 m/s i obciążeniu od 0,2 do 0,3 MPa.

Również na szeroką skalę stosuje się łożyska z tych materiałów we wszelkiego rodzaju licznikach: gorącej wody, dystrybutorach benzynowych itp.

Na zakończenie warto jeszcze wspomnieć o zakresie wielkości wytwarzanych tulejek węglografitowych: od $\varnothing 0,5/1,8 \times 1$ mm do $\varnothing 340/390 \times 480$ mm.

5.7. PODSUMOWANIE WIADOMOŚCI O ŁOŻYSKACH WĘGLOWO-GRAFITOWYCH

Łożyska węglowo-grafitowe są specyficznym kompozytem opartym na węglu oraz jego odmianach i charakteryzującym się bardzo dużą odpornością cieplną, bardzo dobrą odpornością chemiczną i dobrymi właściwościami tribologicznymi podczas tarcia suchego.

Te własności i właściwości węglografitów określają obszary ich zastosowań. Tak więc stosuje się je:

- na łożyska pracujące na sucho w wysokich lub niskich temperaturach,
- na łożyska pracujące na sucho, w urządzeniach, w których niedopuszczalne jest użycie konwencjonalnego smarowania smarami ciekłymi lub plastycznymi,
- na łożyska pracujące w otoczeniu agresywnych chemicznie płynów,
- na łożyska smarowane cieczami zanieczyszczonymi lub pozbawionymi właściwościami smarnych (np. wodą, roztworami wodnymi, benzyną i innymi cieczami ropopochodnymi oraz skroplonymi gazami).

Należy jednak wspomnieć także o wadach takich łożysk. Są to:

- jak każdy spiek, węglografity są kruche; dlatego konstrukcja łożysk węglografitowych powinna zapewniać naprężenia ściskające w tulejkach z tych materiałów,
- jakkolwiek odporność cieplna tych kompozytów jest stosunkowo wysoka (do 600 °C w otoczeniu utleniającym), to jednak w wypadku kompozytów wypełnianych żywicami dopuszczalna temperatura jest niższa i zależy od temperatury destrukcji żywicy,
- węglografity nie są odporne na silnie utleniające kwasy,
- w łożyskach smarowanych olejem, przy jego niedostatku może powstać „pasta” z pyłu węglowego i oleju, która może zaburzyć działanie łożyska przez zwiększenie tarcia i zużycie czopa.

Intensywny rozwój i wdrożenia łożysk węglowo-grafitowych w ciągu minionych 60 lat potwierdziły ich zalety ale, oczywiście, także wyłoniły ich wady. Te ostatnie stały się w pewnym sensie motorem dalszego ich rozwoju, tworzenie kompozytów umożliwia bowiem usunięcie niedostatków i spotęgowanie zalet tych materiałów. Dalszy rozwój węglografitów w dużej mierze będzie się koncentrował na polepszaniu ich własności termicznych i wytrzymałościowych, z zachowaniem dobrych właściwości tribologicznych, dzięki zastosowaniu nowych wypełniaczy, między innymi ceramicznych, takich jak np. węglik krzemu.

6. ZAKOŃCZENIE

6.1. UWAGI OGÓLNE

Bezobsługowe łożyska ślizgowe charakteryzują się tym, że nie wymagają obsługi smarowniczej. Ich cechą szczególną jest samosmarowność materiałów panwi, a w niektórych wypadkach samosmarowność powłok nałożonych na czop.

O obszarach zastosowań tych łożysk była mowa w punkcie 1.3. Ogólnie rzecz biorąc, stosuje się je wszędzie tam, gdzie smarowanie tradycyjne (płynnymi lub plastycznymi środkami smarnymi) jest niemożliwe, niedopuszczalne lub nieopłacalne. W poszczególnych rozdziałach tej książki podano też przykłady konkretnych zastosowań łożysk bezobsługowych z określonych materiałów samosmarownych.

Jeśli wziąć pod uwagę warunki ruchowe, przede wszystkim obciążenia i prędkości ślizgania, to samosmarowne łożyska bezobsługowe wypełniają początkową część obszaru $p-v$, w którym łożyska smarowane hydrodynamicznie są nieefektywne (por. rys. 4). Chodzi o duże naciski przy bardzo małych i małych prędkościach ślizgania. Również warunki cieplne (wysokie lub niskie temperatury łożyska) mogą decydować o wyborze materiału na ten rodzaj łożysk.

Podane w książce charakterystyki materiałów samosmarownych mogą ułatwić decyzję co do wyboru materiału na omawiane łożyska.

Materiały samosmarowne mogą być także stosowane na łożyska smarowane hydrodynamicznie lub hydrostatycznie, pod warunkiem nieprzekraczania dopuszczalnych dla danego materiału obciążeń i temperatury. Są one wtedy zabezpieczeniem łożyska na wypadek awarii układu smarowniczego.

Jednakże nie zawsze korzystne jest stosowanie materiałów samosmarownych w łożyskach smarowanych olejem lub smarem plastycznym. Odnosi się to przede wszystkim do tworzyw sztucznych, a szczególnie do polichloroetylenu. Jak już wspomniano o tym w rozdziale 3, istotą małego tarcia metali po polimerach jest tworzenie się adhezyjnej warstewki polimeru na powierzchni przeciwelementu metalowego, dzięki czemu ślizganie odbywa się pomiędzy warstewkami polimeru i jest małe. Środek smarny zaburza tworzenie się takiej adhezyjnej warstewki polimeru, a zatem zaburza proces samosmarowania.

Konstrukcja łożysk z panwiami z materiałów samosmarownych zawiera pewne ograniczenia wynikające z własności tych materiałów. Zarówno uwagi dotyczące konstrukcji i montażu takich łożysk, jak i uwagi dotyczące ich eksploatacji podane będą w następujących punktach.

6.2. UWAGI DOTYCZĄCE KONSTRUKCJI I MONTAŻU ŁOŻYSK BEZOBSŁUGOWYCH

6.2.1. DOBÓR MATERIAŁU

Dobór cech materiałowych w procesie konstruowania jest podstawowym czynnikiem tego procesu. Materiały na elementy, które będą poddane obciążeniom (rozciągającym, ściskającym, gnącym, skręcającym) są dobierane przede wszystkim ze względów wytrzymałościowych. Materiały na panwie łożysk ślizgowych muszą dodatkowo mieć możliwie dobre właściwości ślizgowe i przeciwwzrostowe, a materiały na panwie łożysk bezobsługowych muszą jeszcze cechować się samosmarownością.

Wszystkie omówione w tej książce materiały są samosmarowne. Różnicują je: dopuszczalny nacisk, dopuszczalna prędkość ślizgania i temperatura, wartość współczynnika tarcia oraz intensywność zużywania, stanowiące główne kryteria ich doboru. Dodatkowymi kryteriami doboru materiałów na łożyska bezobsługowe mogą być: przewodność i rozszerzalność cieplna, gęstość, normalizacja oraz unifikacja kształtów i wymiarów, cena i inne.

Pormety nasycone olejem wykazują mały, a nawet bardzo mały współczynnik tarcia dzięki występowaniu w łożysku tarcia mieszanego, a nawet płynnego. Mogą one pracować w zakresie średnich obciążeń i prędkości ślizgania.^{*)} Obciążalność pormetów ogranicza ich wytrzymałość. Ze względu na swoją kruchość nie nadają się one do obciążeń dynamicznych, szczególnie udarowych. Natomiast prędkość ślizgania jest ograniczona ciepłem tarcia. Zbyt wysoka temperatura może spowodować nadmierny wypływ oleju z porów, który wycieknie z łożyska i będzie stracony dla smarowania.

Oczywistym ograniczeniem stosowania pormetów nasyconych olejem jest olej zawarty w ich porach. Nie mogą one być stosowane tam, gdzie może on uszkodzić wytwór maszyny lub zakłócić jej działanie.

Ze względu na mechanizm samosmarowania (krążenie oleju w obszarze: ścianka porowata – szczelina smarowa – ścianka porowata) stosuje się wyłącznie panewki tulejowe.

^{*)} W tym rozdziale nie będą powtarzane wartości liczbowe omawianych wielkości. Czytelnik zechce, w razie potrzeby, wrócić do rozdziałów, w których zostały omówione wspomniane materiały.

Wymiary tulejek są znormalizowane, a wytwórnice dostarczają je na ogół w postaci gotowej do montażu, tj. nasycone olejem i kalibrowane (jedno- lub dwustronnie). Montuje się je na wcisk, z użyciem trzpienia montażowego. Należy pamiętać, że po wciśnięciu zmniejsza się średnica otworu łożyska.

Największe możliwości wyboru materiałów na łożyska bezobsługowe dają **tworzywa sztuczne i ich kompozyty**. Świadczy o tym obszerność rozdziału trzeciego, poświęconego tym materiałom.

Ze względu na różnorodność polimerów i ich kompozytów, nie sposób tu szczegółowo omówić wytyczne ich doboru na bezobsługowe łożyska ślizgowe.

Podane więc będą ogólne własności i właściwości tych materiałów, a Czytelnika proszę – w razie potrzeby – o powrót do rozdziału trzeciego.

Podstawową zaletą określonych materiałów tej grupy jest, oczywiście, samosmarowność. Uzyskuje się ją (przy współpracy ze stalowym czopem) dzięki adhezyjnej warstewce polimeru i tarcia pomiędzy warstewkami tego tworzywa. Najmniejszym tarcie po stali cechuje się policzterofluoroetylen (PTFE) i jego kompozyty. Ponadto w samosmarownych łożyskach ślizgowych stosuje się poliacetale (polioksymetyleny, POM), poliamidy (PA), poliimidy (PI), żywice fenolowe i epoksydowe i inne. Wartości współczynnika tarcia tych materiałów po stali podane są we wspomnianym rozdziale 3.

Wybierając materiały na łożyska bezobsługowe należy mieć na uwadze, obok ich niewątpliwych zalet, jakimi są samosmarowność i łatwość wytwarzania, także ich wady: małą odporność cieplną (z wyjątkiem policzterofluoroetyleny a także poliimidów), dużą rozszerzalność cieplną, małą przewodność cieplną oraz pęcznienie wskutek nasiąkliwości cieczami. Wady te są usuwane w kompozytach, szczególnie w kompozytach wielowarstwowych i wielowarstwowych wypełnianych. Natomiast w wypadku stosowania tulejek z „czystych” polimerów lub z kompozytów wypełnianych – trzeba je brać pod uwagę.

Ogólnie można rozróżnić dwie grupy bezobsługowych, samosmarownych łożysk ślizgowych z tworzyw sztucznych:

- z panwiami monolitycznymi, zazwyczaj tulejowymi, wykonanymi bądź z czystych polimerów (rzadziej), bądź też jako kompozyty wypełniane,
- z panwiami wykonanymi jako kompozyty wielowarstwowe lub wielowarstwowe wypełniane; wykonuje się z nich zarówno tuleje jak i półpanwie, zazwyczaj przez związanie z taśmą stanowiącej półwytwór.

Łożyska pierwszej grupy stosuje się tylko do lekkich warunków pracy, tj. małych obciążeń i prędkości, ze względu na wspomniane powyżej wady. Zaletą tego rozwiązania jest możliwość doboru dowolnych wymiarów tulejek, dostosowanych do potrzeb danego łożyskowania i wykonywanie ich prostym zabiegiem toczenia. Tulejki są mocowane w obudowie na wcisk lub przylgowo z zastosowaniem kleju. Nie zaleca się stosowania zabezpieczeń kształtowych: wkrętów, kołków, klinów itp., ponieważ mogą one zniekształcić otwór łożyska.

Łożyska drugiej grupy znajdują coraz szersze zastosowanie, bo łączą dobre właściwości tribologiczne z dobrymi własnościami wytrzymałościowymi i termicznymi. Wykonywane są one zazwyczaj w postaci cienkowarstwowych kompozytów jako cienkościenne (na cienkim podkładzie metalowym, przeważnie stalowym) tulejki lub półpanewki. Specjalistyczne wytwórnie (na katalogi niektórych z nich powoływano się w rozdziale trzecim) oferują dziś szeroki asortyment zarówno rodzajów takich łożysk, tj. kompozytów samosmarownych, jak też ich rozmiarów. Łożyska te montuje się również na wcisk, z zastosowaniem trzpienia montażowego. Szczegółowe wytyczne dotyczące montażu tych łożysk podają katalogi i instrukcje fabryczne.

Specyficznym kompozytem, wyróżnionym oddzielnym rozdziałem, jest spiekany kompozyt metal-niemetal, wytwarzany jako **DEVA-Metall**. Jest to kompozyt metalu (brązu, stopów żelaza lub stopów niklu) wypełnianego smarami stałymi: grafitem, dwusiarczkiem molibdenu lub dwusiarczkiem wolframu. Ta najnowsza generacja łożysk samosmarownych cechuje się nie tylko dobrymi właściwościami tribologicznymi, lecz także dobrymi własnościami wytrzymałościowymi i bardzo dobrą odpornością cieplną.

Wytwarza się zarówno gotowe do montażu tulejki, jak i półwytwory w postaci prętów, z których można wykonać tulejki o potrzebnych wymiarach [9].

Węglografity dobiera się na samosmarowne panwie łożysk pracujących w wysokich lub niskich temperaturach oraz narażonych na działanie ośrodków chemicznie agresywnych. Mogą one być także stosowane do łożysk smarowanych cieczami, także zanieczyszczonymi, oraz cieczami pozbawionymi właściwości smarnych. Te spiekane kompozyty węgla, grafitu i różnych wypełniaczy mogą mieć zróżnicowane własności i właściwości, zależnie od zawartości składników i warunków wytwarzania. Dzięki temu można odpowiednio materiały dobierać z oferty produkcyjnej wytwórni, bądź też projektować nowe kompozyty według potrzeb. Podobnie jak omówione wyżej kompozyty typu metal-smar stały, tak i tulejki węglografitowe mogą być dostarczane w postaci gotowej do montażu lub w postaci półwytworów (tulejek surowych lub prętów) do obróbki na gotowo u użytkownika.

Na **czopy** współpracujące z opisanymi materiałami samosmarownymi stosuje się na ogół stal węglową wyższej jakości. Ich warstwa wierzchnia powinna być utwardzana do 50÷60 HRC. Bardziej szczegółowe informacje na ten temat można znaleźć w rozdziałach, w których omówione są poszczególne materiały.

6.2.2. DOBÓR CECH GEOMETRYCZNO-WYMIAROWYCH

Jak już wspomniano, bezobsługowe samosmarowne łożyska ślizgowe kształtuje się zazwyczaj w postaci **tulejek** wciskanych bezpośrednio w obudowę, bądź też z zastosowaniem obejm metalowych, które następnie są montowane w obudowie. Postać tulejki jest zazwyczaj wymuszona względami wytrzymałościowymi (spieki), a w wypadku porowatych spieków nasyconych olejem – także względami smarowniczymi (krążenie

oleju pomiędzy ścianką porowatą i szczelina smarową). Jedynie cienkościennie łożyska wielowarstwowe, wytwarzane przez zwijanie z taśmy wykonuje się także jako **półpanwie**.

Długość względną łożyska dobiera się podobnie jak dla innych łożysk ślizgowych, tj. $l/d = 0,8 \div 1,2$, najczęściej stosując wartość średnią $l/d = 1$.

Również – podobnie jak w łożyskach smarowanych konwencjonalnie – należy mieć na uwadze ugięcia wałów, w związku z czym, szczególnie przy dużych przewidywanych ugięciach, stosować wahliwe łożyskowanie łożysk końcowych i krótkie łożyska środkowe z wyokrąglonymi krawędziami tulejek, bądź umieszczenie tych tulejek w obejmie elastycznej.

Grubość ścianek tulejek i półpanwi zależy od rodzaju materiału, jego wytrzymałości i funkcji dodatkowych (np. magazynowanie oleju smarnego). W wypadku tworzyw o małej przewodności cieplnej grubość ta wpływa na bilans cieplny łożyska. Szczegółowe informacje o tej wielkości zawarte są w odpowiednich rozdziałach książki.

Luz łożyskowy dla większości materiałów samosmarownych dobiera się większy niż dla „klasycznych” metalowych materiałów łożyskowych. Wynika to najczęściej z dużej rozszerzalności cieplnej wielu materiałów samosmarownych, szczególnie opartych na polimerach. Dane dotyczące wartości tych luzów, jak też ich związków ze stosowanymi wciskami można znaleźć w rozdziałach traktujących o danych materiałach. Orientacyjne wartości umieszczono także w porównawczej tabeli 1.

Chropowatość powierzchni czopów współpracujących z omówionymi materiałami samosmarownymi powinna być mała ($R_z = 1 \div 3 \mu\text{m}$), uzyskiwana przez szlifowanie, a nawet dogładzanie.

6.2.3. ALGORYTM KONSTRUOWANIA ŁOŻYSK BEZOBSŁUGOWYCH

W procesie konstruowania łożysk bezobsługowych można wyróżnić trzy etapy:

– etap I – określenie warunków pracy łożyska (p , v , T , otoczenie) i wybór materiału samosmarownego według głównych kryteriów podanych w punkcie 6.2.1 oraz ewentualnych kryteriów dodatkowych,

– etap II – dobór cech geometryczno-wymiarowych łożyska, określenie stanu warstwy wierzchniej i powierzchni czopa oraz decyzja co do wytworzenia lub zastosowania fabrycznie gotowego łożyska,

– etap III – sprawdzenie wartości parametrów ruchowych, szczególnie zaś temperatury łożyska i trwałości oraz dokonanie ewentualnych zmian cech materiałowych i geometryczno-wymiarowych ze względu na te wielkości.

W **etapie I** pomocą we wstępnym doborze materiału są krzywe graniczne $p-v$, określające obszar dopuszczalnych wartości tych parametrów ruchowych. Można też korzystać z podawanych w literaturze wartości iloczynu $p v$, pod warunkiem, że podane są wartości skrajne (p_{max} i v_{max}). Korzystając z wykresów $p-v$ lub iloczynu $p v$ trzeba

zwracać uwagę na kryteria, według których określone są wartości graniczne. Najczęściej są to: dopuszczalna temperatura lub dopuszczalna intensywność zużywania.

Dodatkowymi kryteriami wyboru materiału mogą być: praca łożyska w środowisku chemicznie agresywnym, zanieczyszczonym, w niskich lub wysokich temperaturach i inne. Zagadnienie temperatury wiąże się z dwoma źródłami ciepła: z ciepłem tarcia i ciepłem zewnętrznym. Temperaturę łożyska wynikającą z tarcia szacuje się wstępnie według wartości parametrów ruchowych: przy dużych wartościach p i małych wartościach v temperatura łożyska jest na ogół niska, przy większych wartościach v należy się liczyć z istotnym podwyższeniem temperatury łożyska. Dodatkowo pomocą w tych szacunkach mogą być dane z praktyki, z literatury od producentów łożysk itp. W wątpliwych wypadkach sprawdza się bilans cieplny łożyska (zazwyczaj w końcowym etapie konstruowania). Stosunkowo łatwe jest określenie temperatury otoczenia łożyska, np. okolic wszelkiego rodzaju pieców, suszarni itp. Temperatura ta, przy małej wartości iloczynu pv , może być decydująca w wyborze materiału na łożysko bezobsługowe.

W **etapie II** dokonuje się właściwej konstrukcji łożyska, tj. dobiera jego cechy konstrukcyjne, o których była mowa w poprzednim punkcie. Pomocą są tu dane zawarte w literaturze, m. in. w tej książce. Podejmuje się też decyzję, czy wytworzyć we własnym zakresie łożysko (panewkę), czy też skorzystać z oferty wyspecjalizowanej firmy, wytwarzającej samosmarowne panewki. Wytwarzanie we własnym zakresie, polegające zazwyczaj na wykonaniu tulejki z półwytworu (preta, tulejki-surowca), stosuje się na ogół wtedy, gdy nie można znaleźć tulejek gotowych odpowiednich wymiarów, w produkcji jednostkowej, remontowej itp.

W **etapie III** sprawdza się – jeśli zachodzi taka potrzeba – temperaturę łożyska za pomocą bilansu cieplnego. Jeśli okaże się ona za wysoka dla obranego materiału łożyskowego, dokonuje się jego zmiany. Czasem zachodzi też potrzeba zmiany cech geometryczno-wymiarowych, np. długości łożyska, grubości jego ścianki, luzu łożyskowego i innych. Ostatecznej weryfikacji podlega także trwałość łożyska. Oblicza się ją jako stosunek dopuszczalnego zużycia do intensywności zużywania, przy zastosowaniu odpowiednich współczynników (por. wzory (11) i (12) w rozdziale 4, dotyczącym kompozytów typu metal-smar stały; oczywiście wartości współczynników korekcyjnych dla innych materiałów mogą być inne).

6.3. SŁOWO KOŃCOWE

Bezobsługowe łożyska ślizgowe, oparte na materiałach samosmarownych, stanowią specyficzną klasę łożysk. Ich zastosowanie można ogólnie określić według zasady *suum cuique* (każdemu swoje), co oznacza, że mają one swoje miejsce w grupie łożysk ślizgowych. Nie są one konkurencyjne dla łożysk smarowanych konwencjonalnie (hydrodynamicznie, hydrostatycznie), lecz stanowią doskonale ich uzupełnienie w początko-

wych obszarach $p-v$, szczególnie tam, gdzie normalne smarowanie jest niemożliwe, utrudnione lub nieopłacalne.

Samosmarowne łożyska bezobsługowe z definicji nie wymagają zabiegów eksploatacyjnych. Tylko nieliczne z nich i tylko dla zwiększenia trwałości mogą potrzebować zabiegów smarowniczych. Należą do nich pormety nasycane olejem i łożyska *Glacier DX*. Pormety dosyca się okresowo olejem, łożyska *Glacier DX* zaś dosmarowuje się smarem plastycznym.

Inne samosmarowne materiały, prawidłowo dobrane, mogą pracować na sucho wiele godzin, miesięcy a nawet lat, co pokazano na przykładzie kompozytów typu metal-smar stały w rozdziale 4.

Zdarzają się oczywiście też awarie takich łożysk. Zarówno z literatury, jak i na podstawie własnych doświadczeń autora można przyczynę tych awarii prawie zawsze umieścić w sferze konstrukcji, tj. wykazać, że przyczyną tą jest niewłaściwy dobór materiału, przecenianie możliwości materiału lub wręcz brak rozeznania konstruktora co do własności i właściwości materiału. Na przykład zastosowanie pormetów do łożyskowania wałka rozrządu silnika spalinowego musiało skończyć się niepowodzeniem; pormety nie wytrzymują obciążeń dynamicznych. Podobnie niepowodzeniem skończyło się zastosowanie pormetów do łożyskowania przegubu chwytaka dźwigowego: obciążenia przekroczyły wytrzymałość materiału, nastąpiło zatarcie, odkształcenie plastyczne i dekohezja materiału.

Dość dużo niepowodzeń zanotowano w stosowaniu tworzyw sztucznych i ich kompozytów, szczególnie w początkowym okresie używania tych materiałów. Przyczyną awarii była bezkrytyczna zamiana metali łożyskowych przez tworzywa sztuczne, bez uwzględnienia ich małej przewodności cieplnej i stosunkowo małej odporności cieplnej. Tulejki z tworzyw termoplastycznych po prostu miękły i odkształcały się, a tulejki z tworzyw termoutwardzalnych ulegały degradacji termicznej. Zanotowano także dość bez troskie zastosowanie zwykłej rury tekstolitowej jako tulejki łożyskowej do pracy na sucho w przegubie wysięgnika maszyny budowlanej, co skończyło się prawie natychmiastowym zatarciem.

Zdarzają się oczywiście także awarie spowodowane nieprzewidzianymi przeciążeniami łożyska, zanieczyszczeniem otoczenia itp. Podobne awarie występują także w łożyskach smarowanych konwencjonalnie. W odróżnieniu od nich jednak w bezobsługowych łożyskach samosmarownych nie występują awarie wywołane brakiem smarowania. Co jest, rzecz jasna, ich zaletą.

Jak już niejednokrotnie wspomiano w tej książce, samosmarowne łożyska bezobsługowe znajdują coraz większe zastosowanie. Dzieje się tak dlatego, ponieważ z jednej strony rośnie zapotrzebowanie na tego rodzaju łożyskowanie, z drugiej zaś wytwarza się coraz efektywniejsze (pod względem obciążalności, odporności cieplnej, małego tarcia) materiały, przede wszystkim kompozyty.

W tym kontekście autor ma nadzieję, że podane w tej książce informacje mogą się przyczynić do racjonalnego stosowania łożysk bezobsługowych i właściwego doboru materiałów samosmarownych.

LITERATURA

- [1] BARTZ W. J. i in., *Selbstschmierende und wartungsfreie Gleitlager. Ehningen*, Expert Verlag, 1993. *)
- [2] BHUSAN B., GUPTA B.K., *Handbook of tribology*. Malabar, Florida, Krieger Publishing Company, 1997. •
- [3] BRÄUER V., *Beispiele erfolgreich eingesetzter wartungsfreier Kohlenlager*. Schmierungstechnik, nr 5, 1974, s. 4–8.
- [4] CEGIELSKI W., RUTKOWSKI W., *Łożyska spiekane*. Warszawa, PWT, 1960.
- [5] ZICHOS H., HABIG K. H., *Tribologie Handbuch*, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1992.
- [6] FLEISCHER G., *Grundauführungen wartungsfreier Gleitlager*. Maschinenbautechnik, nr 12, 1964, s. 673–677.
- [7] GITTER J., *Wartungsfreie Gleitlager*. Schmierungstechnik, nr 1, 1972, s. 10–17, nr 2, 1972, s. 42–47, nr 3, 1972, s. 81–87, nr 4, 1972, s. 117–122, nr 5, 1972, s. 147–152, nr 6, 1972, s. 181–185.
- [8] Katalog Wytwórni Łożysk Ślizgowych BIMET, Gdańsk.
- [9] Katalogi firmy GLACIER INDUSTRIAL BEARINGS, Wielka Brytania.
- [10] Katalog Fabryki Drutu i Wyróbów z Drutu, Gliwice.
- [11] Katalog firmy GKN BOUND BROOK LTD. Wielka Brytania.
- [12] Katalog Zakładów Metalurgicznych „TRZEBINIA”, Trzebinia.
- [13] *Kompozycyjne materiały w maszynostroenii*. Kiev, Technika, 1990.
- [14] KONIUCHOV, I. Je., *Čugunopoliamidnye podšipniki skolženia*. Plastmassy w maszynostroenii, w: Mašinostroitel, nr 6, 1967.
- [15] KRZEMIŃSKI K., *Zastosowanie i dobór samosmarujących łożysk porowatych*. Przegląd Mechaniczny, nr 5–6, 1981, s. 5–7.
- [16] LANCASTER J. K., *Polymer-based bearing materials*. Tribology, December 1972, s. 249–256.
- [17] LANCASTER J. K., *Dry bearings: a survey of materials and factors affecting their performance*. Tribology, nr 6, 1973, s. 219–251.
- [18] LAWROWSKI Z., *Wpływ porowatości panewki na własności ruchowe łożyska*. Rozprawa doktorska, Wrocław, 1961 (niepublikowana).
- [19] LAWROWSKI Z., *Badania ruchowe pometów żelaznych*. Przegląd Mechaniczny, nr 5, 1962, s. 136–142.
- [20] LAWROWSKI Z., *Łożysko porowate jako specjalny system smarowania*. Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej, Mechanika XV, nr 109, 1965, s. 43–65.
- [21] NEALE M. J. (wyd.), *Tribology handbook*. Butterworths, Londyn, 1973.
- [22] RUSS A., *Anwendungsbezogene Kriterien für die Auswahl wartungsfreier Gleitlager*. Maschinenmarkt, nr 71, 1977, s. 1370–1373.
- [23] SAECHTLING, *Tworzywa sztuczne. Poradnik*. WNT, Warszawa, 2000.
- [24] *Tribology*, 2, 2, May 1969. **)
- [25] VORONKOV B. D., *Podšipniki suchogo trenia*. Mašinostroenie, Leningrad, 1979.
- [26] WIELEBA W., CAPANIDIS D., ZIEMIAŃSKI K., *Polimerowe łożyska ślizgowe z tworzyw termoplastycznych*. Poradnik tribologii i tribotechniki nr 23 i 24 w Tribologia nr 6/1995 oraz nr 1/1996.

- [27] ZIEMIAŃSKI K., *Zastosowanie tworzyw sztucznych w budowie maszyn. Wybrane zagadnienia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1995.
- [28] ZINOVIEV Je., V., LEVIN A. L., BORODULIN M. M., ČIČINADZE A., V., *Polimery v uzlach trenia mašin i priborov*. Mašinstroenie, Moskva, 1980. ***)
- [29] ŻUCHOWSKA D., *Struktura i właściwości polimerów jako materiałów konstrukcyjnych*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1986. *****)

* W tabelach rozdziału 3 wykorzystano dane z tabel: 5.2, 5.7, 5.13, 5.14, 5.15, 5.18 i 5.20 zawartych w książce B. Bhusan, B.K. Gupta, *Handbook of Tribology*, 1997, za zgodą wydawcy Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, USA.

Podziękowania

*) Składam podziękowanie wydawnictwu Expert Verlag, Ehningen, RFN, za zgodę na wykorzystanie materiałów zawartych w książce W. J. Bartz i 18 współautorów: *Selbstschmierende und wartungsfreie Gleitlager*, 1993.

**) Rysunki 16 i 17 zaczerpnięto z publikacji: V.T. Morgan: *Porous metal bearings*, zawartej w *Tribology* 2, May 1969, s. 112 (Fig.11 i 12) za uprzejmą zgodą wydawcy – Elsevier Science. Dziękuję.

***) Składam podziękowanie wydawnictwu MAŠINOSTROENIE, Moskva, za zgodę na wykorzystanie materiałów zawartych w tej książce.

****) Dziękuję Pani Profesor Danucie Żuchowskiej za zgodę na wykorzystanie materiałów zawartych w tym podręczniku.

WYKAZ POLSKICH NORM dotyczących samosmarownych łożysk ślizgowych

PN-H/ 97044-1996	Wyroby proszkowe. ŁOŻYSKA ŚLIZGOWE. Tuleje spiekane samosmarujące brązowe dla przemysłu motory zacyjnego.
PN-89/M-87050	ŁOŻYSKA ŚLIZGOWE. Konstrukcja, materiały łożyskowe i ich właściwości. Terminologia.
PN-90/M-87051	Łożyska ślizgowe. SMAROWANIE. Terminologia.
PN-91/M-87052	Łożyska ślizgowe. TARCIE I ZUŻYCIE. Terminologia i klasyfikacja.
PN-68/M-87200	Łożyska ślizgowe. TULEJE SAMOSMARUJĄCE SPIEKANE Z PROSZKU ŻELAZA. Wymagania i badania.
PN-92/M-87201	Łożyska ślizgowe. TULEJE SAMOSMARUJĄCE SPIEKANE. Wymiary.
PN-82/M-87250	Łożyska ślizgowe. TULEJE Z TWORZYW TERMOUTWARDZALNYCH. Wymiary.
PN-82/M-87251	Łożyska ślizgowe. PANWIE Z TWORZYW TERMOUTWARDZALNYCH. Wymiary.

SPIS RZECZY

1. WPROWADZENIE.....	3
1.1. Definicje	3
1.2. Geneza	5
1.3. Obszary zastosowań łożysk bezobsługowych oraz przegląd materiałów samosmarownych	5
2. POROWATE ŁOŻYSKA SPIEKANE (PORMETY).....	10
2.1. Rozwój (wg [4])	10
2.2. Budowa i działanie pormetów	11
2.3. Właściwości ruchowe	13
2.3.1. Nośność	13
2.3.2. Trwałość	17
2.3.3. Tarcie	18
2.4. Konstrukcja węzłów łożyskowych	20
2.5. Eksploatacja.....	24
2.6. Podsumowanie wiadomości na temat łożysk porowatych	25
3. ŁOŻYSKA Z TWORZYW SZTUCZNYCH	27
3.1. Wstęp.....	27
3.2. Podział i ogólna charakterystyka polimerów	27
3.2.1. Podział.....	27
3.2.2. Struktura polimerów.....	28
3.2.3. Ogólna charakterystyka polimerów.....	30
3.3. Przegląd polimerów ślizgowych.....	32
3.3.1. Fluoroplasty	32
3.3.2. Poliacetale	34
3.3.3. Poliamidy	35
3.3.4. Polietyleny	37
3.3.5. Poliwęglany.....	38
3.3.6. Żywice epoksydowe.....	39
3.3.7. Poliimidy.....	40
3.4. Kompozyty polimerowe	43
3.4.1. Ogólna charakterystyka i podział kompozytów.....	43
3.4.2. Powłoki przeciwcierne	44
3.4.3. Laminaty niemetalowe	53
3.4.4. Kompozyty wypełniane typu metal-niemetal	54
3.4.5. Kompozyty wypełniane typu niemetal-niemetal i (lub) metal	55
3.4.6. Kompozyty wielowarstwowe wypełniane.....	65

3.5. Konstrukcja węzłów łożyskowych	70
3.6. Podsumowanie wiadomości o łożyskach z tworzyw sztucznych.....	75
4. ŁOŻYSKA Z KOMPOZYTÓW METALOWYCH TYPU METAL-NIEMETAL (M-N)	77
5. ŁOŻYSKA WĘGLOWO-GRAFITOWE	84
5.1. Wprowadzenie.....	84
5.2. Wytwarzanie łożysk węglowo-grafitowych.....	84
5.2.1. Węglografity	85
5.2.2. Grafit wypełniany węglikiem krzemu	88
5.2.3. Węglografity wiązane żywicami	89
5.3. Własności chemiczne i fizyczne	89
5.4. Właściwości tribologiczne.....	91
5.5. Konstrukcja i montaż łożysk węglowo-grafitowych	96
5.6. Przykłady zastosowań (wg [1]).....	99
5.7. Podsumowanie wiadomości o łożyskach węglowo-grafitowych	101
6. ZAKOŃCZENIE	102
6.1. Uwagi ogólne.....	102
6.2. Uwagi dotyczące konstrukcji i montażu łożysk bezobsługowych	103
6.2.1. Dobór materiału	103
6.2.2. Dobór cech geometryczno-wymiarowych.....	105
6.2.3. Algorytm konstruowania łożysk bezobsługowych	106
6.3. Słowo końcowe	107
LITERATURA	109
WYKAZ POLSKICH NORM dotyczących samosmarownych łożysk ślizgowych	111