



Analiza krajowych norm dotyczących badania właściwości smarnościowych na aparatach czterokulowych stosowanych w Polsce

ARKADIUSZ CHODKIEWICZ¹, TADEUSZ KAŁDOŃSKI²

¹Wojskowa Akademia Techniczna, Szkoła Doktorska, ul. gen. S. Kaliskiego 2B,
00-908 Warszawa, arkadiusz.chodkiewicz@wat.edu.pl

²Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, tadeusz.kaldonski@wat.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono przegląd historyczny polskich norm dotyczących badania właściwości przeciwzatarciowych i przeciwzużyciowych środków smarowych na aparacie czterokulowym (*four-ball apparatus*), stosowanym powszechnie na świecie do tego typu badań. Omówiono również aktualnie obowiązujące normy zatwierdzone przez PKN do stosowania w Polsce. Porównano normy wycofane oraz ich uaktualnienia, pokazując kierunek rozwoju badań właściwości smarnościowych olejów i smarów plastycznych. W efekcie uporządkowano zakres badawczy właściwości smarnościowych na podstawie obecnie obowiązujących w Polsce norm.

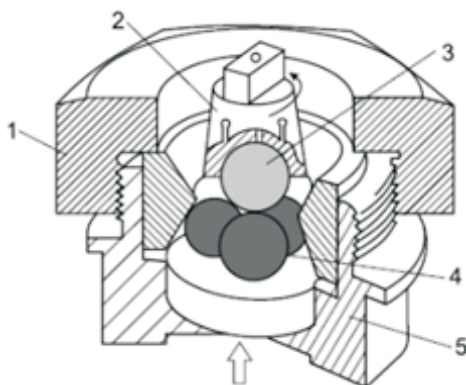
Słowa kluczowe: tribologia, smarność, aparat czterokulowy, normalizacja

DOI: 10.5604/01.3001.0014.2834

1. Wstęp

Smarność jest właściwością zespolową substancji smarującej, która charakteryzuje jej zachowanie w warunkach tarcia granicznego. Określa zdolność do wytworzenia trwałej warstwy granicznej w wyniku adsorpcji (chemisorpcji) na połączeniach smarowanych. Miarą smarności jest trwałość warstwy granicznej. Ocenia się ją najczęściej za pomocą metod niszczących. Najpowszechniej stosowaną maszyną tribologiczną do badań smarności jest aparat czterokulowy, którego węzeł tarcia składa się z czterech oddziałujących na siebie kul, „tworzących” czworościan foremny (trzy dolne kule pozostają nieruchome, a czwartej nadawany jest ruch obrotowy) (rys. 1) [8, 18].

W Polsce istnieją różne normy do oceny właściwości smarnościoowych na aparacie czterokulowym. Do 2012 roku stosowana była norma PN-C-04147:1976 [11]. W 2005 roku, po wejściu Polski do Unii Europejskiej, zaproponowano normę PN-EN ISO 20623:2005 [13], którą następnie przetłumaczono, a w 2018 roku wprowadzono jej drugą, poprawioną wersję — PN-EN ISO 20623:2018-02 [15]. W międzyczasie, w 2017 roku, pojawiła się nowa polska norma — PN-C-04362:2017-03 [12]. Mnożość norm dotyczących tego samego zakresu kazała zastanowić się nad sensem ich stosowania i była inspiracją do przeprowadzenia ich szczegółowej analizy, w celu określenia koniecznego zestawu normatywnych parametrów pozwalających na optymalną ocenę właściwości smarnościoowych olejów i smarów plastycznych [4].



Rys. 1. Skojarzenie trące w aparacie czterokulowym: 1 — pokrywa mocująca kulki dolne, 2 — uchwyt kulki górnej, 3 — kulka górna (obracana), 4 — kulki dolne (nieruchome), 5 — naczynie z badanym olejem/smarem [16]

2. Polskie normy dotyczące badania właściwości smarnościoowych na aparacie czterokulowym

Pierwsza polska norma mówiąca o właściwościach smarnościoowych badanych na aparacie czterokulowym to PN-C-04147:1963 [10]. Wycofana została wraz z ustanowieniem przez Polski Komitet Normalizacji i Miar normy PN-C-04147:1976 [11] jako obowiązującej w zakresie czynności określonych normą z 1 lipca 1977 roku. Norma z 1976 roku miała dwie wersje. Wydanie drugie wprowadziło jednostki Międzynarodowego Układu Miar SI, stosując przeliczenie: $1 \text{ kG} = 0,980\ 665 \text{ daN}$. Ponadto wydanie drugie normy zawiera adnotację, że wydaniem pierwszym nie należy się posługiwać. Zastosowanie nowej jednostki pozostawiło taki sam wzór do obliczeń średnic skaz Hertza (średnic średnic sprężystych odkształceń powierzchni kulek pod obciążeniem statycznym). Jednakowy wzór (1), ale nowa jednostka

spowodowały konieczność sprawdzenia otrzymanych wyników. Porównanie wartości zaokrąglonych do dwóch miejsc znaczących po przecinku przedstawiono w tabeli 1. Wartości równorzędne nie odbiegały znacząco od siebie. Stwierdzone różnice w wartościach zaznaczono pogrubieniem (tab. 1).

$$D_h = 0,0873 \cdot \sqrt[3]{P} \text{ [mm]}, \quad (1)$$

gdzie: P — zastosowane obciążenie, kG (wersja pierwsza normy PN-C-04147:1976),
 P — zastosowane obciążenie, daN (wersja druga normy PN-C-04147:1976).

TABELA 1

Porównanie średnic skaz Hertza

PN-C-04147:1976 (wersja 1)		PN-C-04147:1976 (wersja 2)	
Obciążenie zadane P , kG	Średnia średnica Hertza D_h , mm	Obciążenie zadane P , daN	Średnia średnica Hertza D_h , mm
6	0,16	5,88	0,16
8	0,17	7,85	0,17
10	0,19	9,81	0,19
13	0,21	12,75	0,20
16	0,22	15,69	0,22
20	0,24	19,61	0,24
24	0,25	23,54	0,25
32	0,28	31,33	0,28
40	0,30	39,23	0,30
50	0,32	49,03	0,32
63	0,35	61,78	0,35
80	0,38	78,45	0,37
100	0,41	98,07	0,40
126	0,44	123,56	0,43
160	0,47	156,91	0,47
200	0,51	196,13	0,51
250	0,55	254,17	0,55
315	0,59	308,91	0,59
400	0,64	392,26	0,64
500	0,69	490,33	0,69
620	0,74	608,01	0,74
800	0,81	784,53	0,81

Wydaje się zatem, że pozostawienie bez zmian wzoru 1 w przypadku badań na aparacie czterokulowym można akurat uznać za uprawnione, nie wprowadza to żadnych istotnych różnic w dalszych badaniach.

Zakres normy stanowiło wyznaczenie następujących parametrów:

- wskaźnik zużycia pod obciążeniem (I_h) — wskaźnik, w daN, obliczony na podstawie 10 biegów wykonanych przy kolejnych obciążeniach poprzedzających obciążenie zespawania lub częściowo wykonanych, a częściowo przyjętych;
- obciążenie zespawania (P_z) — najmniejsze obciążenie zadane, w daN, przy którym w warunkach ustalonych nastąpi zespawanie obracającej się kulki z trzema kulkami nieruchomymi, wskazujące na przekroczenie poziomu największego nacisku, jaki jest w stanie przenieść warstwa smarująca;
- obciążenie zacierające (P_t) — najmniejsze obciążenie zadane, w daN, przy którym w warunkach ustalonych nastąpi wyraźny wzrost oporów w węźle tarcia wskazujący na przerwanie warstewki smarującej, charakteryzujący się nagłym wzrostem średnic skaz zużycia;
- największe obciążenie niezacierające (P_n) — największe obciążenie, w daN, przy którym średnia średnica skaz (d) nie przewyższa więcej niż o 5% skompensowanej średnicy skaz (d_s) dla danego obciążenia;
- graniczne obciążenie zużycia (G_{oz}) — obciążenie jednostkowe, w daN/mm², określające naciski w węźle tarcia przy stałym obciążeniu zadany (P), w warunkach ustalonych, obliczone na podstawie średniej średnicy skaz (d) powstałych na kulkach nieruchomych w czasie biegu aparatu pod tym obciążeniem.

Możliwe jest także wyznaczenie charakterystyki $d = f(P)$, czyli zależności średniej średnicy skaz zużycia na dolnych kulach aparatu czterokulowego od obciążenia zadanego (w skali podwójnie logarytmicznej).

Norma dostosowana była do dokumentów normalizacyjnych ogólnie przyjętych za granicą. Wyznaczanie parametrów I_h i P_z było zgodne z amerykańskimi normami ASTM D 2596/69 [1] oraz ASTM D 2783/71 [2]. Parametry G_{oz} i P_t były natomiast zgodne z włoską normą FIAT 50 500 [7].

PN-C-04147:1976 [11] została wycofana bez zastąpienia 26 października 2012 roku. 27 marca 2017 roku Polski Komitet Normalizacyjny opublikował nową normę — PN-C-04362:2017-03 [12]. Oznaczona została jako „PN-C”, czyli Polska Norma własna opracowana na podstawie normy wycofanej [3]. Nie zostało jednak wskazane, jakiej normy wycofanej dotyczy to nowe opracowanie. Dopiero po analizie treści dokumentu z 2017 roku [12] można stwierdzić, że jest to kopia PN-C-04147:1976 [11] z małymi usprawnieniami czy poprawkami. Porównanie obu dokumentów zostanie przedstawione w dalszej analizie.

Polska wraz z przystąpieniem do Unii Europejskiej w 2004 roku dołączyła do Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego CEN. Członkostwo to skutkuje

obowiązkiem wprowadzania do zbioru krajowych norm wszystkich norm europejskich (jako PN-EN) i wycofania norm sprzecznych. Obowiązek ten realizowany jest poprzez wprowadzenie normy w oryginalnej wersji językowej (najczęściej angielskiej) z przetłumaczonym na język polski tytułem i abstraktem [3]. Tak wprowadzona była norma PN-EN ISO 20623:2005 [13] o tytule *Przetwory naftowe i produkty podobne — Oznaczanie właściwości przeciwzatarciowych i przeciwzużyciowych cieczy — Metoda czterokulowa (warunki europejskie)*. Polska wersja językowa normy została zatwierdzona przez prezesa PKN 18 sierpnia 2010 roku, a dwa dni później opublikowana jako PN-EN ISO 20623:2010 [14]. Norma ta jest tłumaczeniem (bez jakichkolwiek zmian) angielskiej wersji normy EN ISO 20623, która stanowi wprowadzenie (bez jakichkolwiek zmian) międzynarodowej normy ISO 20623:2003. Polska wersja normy została opracowana (przetłumaczona) przez KT nr 222 ds. Przetworów Naftowych i Cieczy Eksploatacyjnych.

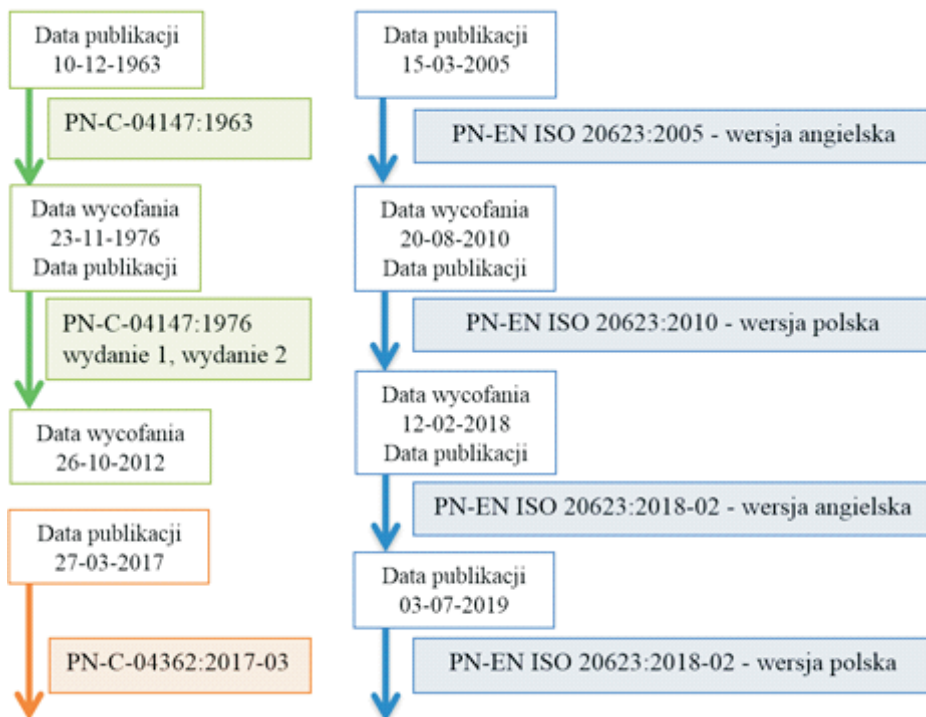
PN-EN ISO 20623:2010 [14] wprowadza następujące parametry charakteryzujące właściwości smarnościowe:

- średnie obciążenie Hertza (ang. *mean Hertz load — MHL*) — pojedyncza wartość charakteryzująca cały wykres zużycie — obciążenie, który pokrywa zakres obciążeń od niezacierających do zespawania;
- obciążenie zespawania (ang. *weld load — WL*);
- najmniejsze obciążenie zacierające (ang. *initial seizure load — ISL*) — najmniejsze obciążenie, przy którym występuje zatarcie;
- parametr chwilowej temperatury (ang. *flash temperature parameter — FTP*) — pojedyncza wartość wyrażająca krytyczną temperaturę chwilową, powyżej której dana ciecz ulegnie zniszczeniu w danych warunkach;
- próba zużycia (ang. *mean wear scar diameter — MSWD*) — średnia średnica śladu zużycia uzyskana w danych warunkach;
- obciążenie zacierające 2,5-sekundowe (ang. *2,5 second seizure delay load — SDL*) — obciążenie, przy którym występuje zatarcie po czasie 2,5 s od rozpoczęcia biegu badawczego;
- wykres krzywej zużycie - obciążenie — wykres w skali logarytmicznej zależności obciążenia od średniej średnicy śladu zużycia.

12 stycznia 2018 roku opublikowana została nowa wersja normy 20623 - PN-EN ISO 20623:2018-02 [15]. 3 lipca 2019 roku uaktualniono ją o polską wersję językową. Wprowadziła ona zmianę nazwy normy: z *Oznaczenie właściwości przeciwzatarciowych i przeciwzużyciowych cieczy...* na *Oznaczenie właściwości przeciwzatarciowych i przeciwzużyciowych środków smarowych...* Ponadto jak informuje dokument, poprawiono błędy oraz usunięto nieścisłości. Analizę obu norm wraz z oceną przeprowadzono w dalszej części artykułu.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat wprowadzania norm do oceny właściwości smarnościowych olejów i smarów na aparacie czterokulowym.

Według [3] stosowanie wielu polskich norm jest dobrowolne. Normy nie są „normami obowiązującymi”, są tylko „normami aktualnymi”. Stąd wniosek, że dokumentów do badania smerności może być kilka, gdyż to użytkownik wybiera, czy chce dane normatywy zastosować. Jednak mnogość norm dotyczących badania na takim samym urządzeniu budzi zastanowienie co do zasadności ich stosowania oraz pytanie, która z norm (polska norma krajowa czy norma europejska) jest lepsza.



Rys. 2. Schemat wprowadzania norm do badań właściwości smarnościowych na aparacie czterokulowym (kolor zielony i pomarańczowy — normy polskie krajowe, kolor niebieski — normy polskie europejskie EN ISO)

3. Krytyczna analiza treści norm dotyczących badania właściwości smarnościowych na aparatach czterokulowych

Pierwszym etapem analizy będzie porównanie aktualnej polskiej normy PN-C-04362:2017-3 [12] z wycofaną normą PN-C-04147:1976 [11], na którą pomimo tego często powołują się różni badacze. Podobieństwo obu tych dokumentów nie budzi żadnych wątpliwości. Następnie w taki sam sposób zostaną potraktowane normy

20623 — porównanie wersji z 2010 roku do obowiązującej „2018-02”. Zwieńczeniem analizy będzie porównanie własnych dokumentów polskich i tych wprowadzających normy EN ISO.

3.1. PN-C-04147:1976 oraz PN-C-04362:2017-03

Różnicą, która od razu rzuca się w oczy przy porównaniu polskich norm własnych, jest ich nazwa. PN-C-04147:1976 to *Przetwory naftowe. Badanie własności smarnych olejów i smarów*. Wersja nowsza zamieniła słowo „własności” na „właściwości”. Własność odnosi się do cech pewnej klasy, zaś właściwość do cech konkretnych przedstawicieli (obiektów) danej klasy [9]. W dziedzinach nauk ścisłych zwraca się uwagę na rozróżnienie tych słów.

Nowa norma PN-C-04362:2017-3 [12] określa metodę badania właściwości smarnych olejów i smarów na aparacie czterokulowym. Stosowana jest do oznaczenia następujących parametrów:

- wskaźnik zużycia pod obciążeniem — I_h i obciążenie zespawania — P_z ;
- średnica skaz w próbie zużycia — D_z ;
- graniczne obciążenie zużycia — G_{oz} .

Dodatkowo wyznaczany jest parametr P_n , czyli największe obciążenie niezacierające.

W porównaniu do wycofanego dokumentu aktualna norma wprowadza parametr D_z . Definiowany jest on jako „średnia średnica skaz na powierzchni kulek nieruchomych pod wybranym stałym obciążeniem, powstałych w biegu testowym o założonym czasie”. Wyrażany jest w mm. Norma informuje, by czas trwania biegu testowego oraz zastosowane obciążenie wybrać zgodnie z właściwymi wymaganiami. Ponadto zawiera informacje o tym, że dla olejów przekładniowych i hydraulicznych najczęściej stosowany jest godzinny bieg testowy pod obciążeniem 39,23 daN. Brakuje informacji, gdzie znaleźć właściwe wymagania dla pozostałych olejów i smarów plastycznych. W dokumencie trudno również doszukać się informacji, dlaczego bieg dla wyżej wymienionych olejów powinien trwać jedną godzinę.

Ponadto w nowej normie nie uwzględniono parametru P_t , czyli obciążenia zacierającego. Nie można powiedzieć, że zastąpiono jeden parametr (P_t) innym (D_z), gdyż P_t charakteryzuje obciążenie zacierające, gdy po określonym czasie zostaje przerwany film smarny, czyli definiuje właściwości przeciwzatarciowe, zaś D_z mówi o właściwościach przeciwzużyciowych. Parametr P_t wyznaczany jest przy prędkości obrotowej równej 500 obr/min, a obciążenie zadawane jest płynnie (zaczynając od 0), aż do uzyskania zatarcia kul. Natomiast właściwości przeciwzużyciowe, poprzez określenie parametru D_z , wyznacza się w godzinnej próbie (lub innej) przy niesprecyzowanej wartości obciążenia zadanego i prędkości obrotowej w zakresie 1450 obr/min ÷ 1500 obr/min. Zatem w normie PN-C-04362:2017-3 [12] do oceny trwałości filmu granicznego pozostaje tylko parametr P_n (największe

obciążenie niezacierające). Jednak parametr ten jest określony jako kryterium zużyciowe (związane z podanym w normie sposobem pomiaru średnic śladów zużycia na nieruchomych kulach), natomiast P_t było kryterium tarciovym (związanym z płynnym przyrostem momentu tarcia), więc oba wskaźniki nie mogą być ze sobą porównywane. Ponadto obciążenie przy oznaczaniu P_t narastało w sposób płynny i ciągły, a w przypadku oznaczania P_n zmieniane jest skokowo (według szeregu podanego w normie).

W obu polskich normach do oceny właściwości przeciwzużyciowych służy parametr G_{oz} , tj. graniczne obciążenie zużycia. Jego wyznaczenie wg PN-C-04147:1976 [11] polega na przeprowadzeniu 60-sekundowego biegu aparatu czterokulowego w obecności środka smarnego pod stałym obciążeniem zadaniem (najczęściej 147,10 daN, tj. 150 kG) oraz przy prędkości obrotowej górnej kulki, która wynosi 500 obr/min. W nowej normie PN-C-04362:2017-03 [12] parametr ten uległ jednak istotnej zmianie. Zmieniono prędkość obrotową, którą nadaje aparat czterokulowy w teście. Teraz wynosi ona tyle co dla pozostałych obciążeń, czyli 1450÷1500 obr/min. Zatem nie jest już konieczne stosowanie dwóch maszyn czterokulowych albo jednej z możliwością zmiany prędkości obrotowej.

Zastanawiające jest, czy ten parametr nie jest wystarczający do oceny zużycia i trzeba wprowadzać aż godzinną próbę zużycia (D_z).

Nowym elementem w PN-C-04362:2017-3 [12] jest dodanie rozdziału o dokładności badań, wzorem norm współczesnych (przy czym w angielskiej wersji występuje słowo *precision*, co w polskiej wersji przetłumaczono na *precyzja*, zamiast na stosowane w metrologii słowo *dokładność*). Norma zawiera informację, że precyzję/dokładność „określono zgodnie z PN-EN ISO 4259 na podstawie analizy statystycznej wyników badań międzylaboratoryjnych macierzy olejów i smarów”. Wyznaczono dwa parametry:

- odtwarzalność, czyli różnicę między dwoma pojedynczymi i niezależnymi wynikami uzyskanymi przez różnych wykonawców pracujących w różnych laboratoriach, na identycznym materiale badawczym i powtarzalności badań - może przekraczać wartości podane w tabeli 2 tylko w jednym przypadku na dwadzieścia;
- powtarzalność, czyli różnicę między dwoma wynikami uzyskanymi przez tego samego wykonawcę, na takim samym sprzęcie, na identycznym materiale badawczym, w stałych warunkach wykonywania badania, w dłuższym okresie stosowania metody, podczas normalnego i prawidłowego prowadzenia badania - może przekraczać wartości z tabeli 2 tylko w jednym przypadku na dwadzieścia.

Dodano także informacje, co powinien zawierać protokół badań:

- powołanie na normę,
- rodzaj oraz pełną identyfikację badanego produktu,
- wyniki badania,

- każde odstępstwo od normy,
- datę wykonania badania.

Oprócz wspomnianych zmian główna treść normy nie zmieniła się. Unowocześnieniu uległa za to szata graficzna — norma została dostosowana do wymagań stylu norm tworzonych przez zagraniczne instytucje normalizacyjne.

TABELA 2

Wartości precyzji (wymagana dokładność) [12]

Symbol parametru	Parametr	Jednostka	Powtarzalność, r	Odtwarzalność, R
P_n	Największe obciążenie niezacierające	daN	6,8	55,8
P_z	Obciążenie zespa- wania	daN	4,9	121,6
I_h	Wskaźnik zużycia pod obciążeniem	daN	9,85	14,6
D_z	Średnica szk w próbie zużycia	mm	0,04	0,21
G_{oz}	Graniczne obciążenie zużycia	daN/mm ²	0,1996 X ^{0,91}	3,5905 X ^{0,91}

3.2. PN-EN ISO 20623:2010 oraz PN-EN ISO 20623:2018-02

Analizę tych dokumentów należy również rozpocząć od zwrócenia uwagi na ich tytuły. PN-EN ISO 20623:2010 [14] nosi nazwę *Przetwory naftowe i produkty podobne. Oznaczenie właściwości przeciwzatarciowych i przeciwzużyciowych cieczy. Metoda czterokulowa (warunki europejskie)*. Aktualna wersja normy zamienia słowo „cieczy” na „środków smarnych”. Spowodowane jest to tym, że zmienia się zakres stosowania normy. Możemy znaleźć informację, że zakres został rozszerzony o wszystkie typy ciekłych środków smarowych (kategorie C, D, F, G, H, M, P ISO 6743-99), smarów (ISO 6743-9, kategoria X) i innych plastycznych środków smarowych, podczas gdy normę z 2010 roku przeznaczono tylko do trudnopalnych cieczy hydraulicznych. Trudno jednak szukać takiej informacji w normie z 2010 roku. Dopiero w kolejnej wersji wytłumaczono, jakiego zakresu dotyczyła poprzednia norma.

Na stronie tytułowej wskazano, która norma jest zastępowana. Jest to PN-EN ISO 20623:2010 [14]. W przedmowie krajowej, dodanej do normy w języku angielskim, jest już napisane, że „niniejsza norma zastępuje PN-EN ISO 20763:2010”. Jednak taka norma nie istnieje. Jest natomiast *PN-EN ISO 20763:2005 Przetwory naftowe i produkty podobne — Oznaczenie właściwości przeciwzużyciowych cieczy hydraulicznych — Metoda pompy łopatkowej*. Norma ta, pomimo innej metody badawczej, dotyczy również określania właściwości EP trudnopalnych cieczy, a to było zakresem normy z 2010 roku. W polskiej wersji normy błąd ten naprawiono.

PN-EN ISO 20623:2018-02 [15] zawiera wprowadzenie, którego w pierwszej wersji dokumentu nie było. Norma informuje, że „aparat czterokulowy jest szeroko rozpowszechniony i powszechnie stosowany do oceny właściwości przeciwzużyciowych wszystkich typów ciekłych środków smarowych, smarów i innych plastycznych środków smarowych”. Następnie norma podaje informację o tym, że „aparat czterokulowy napędzany jest silnikiem elektrycznym, którego prędkość obrotowa zależy od częstotliwości prądu. Tak więc uzyskanych wyników nie można porównywać, gdyż są zależne od warunków w danym kraju, gdzie stosuje się aparaty”.

Kolejnym elementem zawartym we wprowadzeniu tej normy jest informacja o normalizacji w innych krajach. Amerykańska standaryzacja badań z użyciem aparatu czterokulowego to ASTM D2266, ASTM D4172, ASTM D2596 oraz ASTM D2783. Instytut Energii z Wielkiej Brytanii opracował normę IP 239, zaś Niemiecki Instytut Normalizacyjny (DIN) normę DIN 51350, która dzielona jest na pięć części, każda do określania innych właściwościach smarnych i innych parametrów z nimi związanych. DIN, ASTM i Instytut Energii sugerują różne prędkości obrotowe. Poszczególne warunki testowe dla każdego badania przedstawiono w tabeli 3.

TABELA 3

Specyfika testów na aparacie czterokulowym dla poszczególnych standardów [15]

Norma	Środek smarny	Typ testu	Obciążenie (N)	Długość testu	Prędkość obrotowa obr/min	Temperatura, °C
ASTM D2266	Smar	Zużycie	392	60 min	1200	75
ASTM D4172	Olej	Zużycie	147 (A) 392 (B)	60 min	1200	75 75
ASTM D2596	Smar	Przeciwzatarciowy	59...7848	10 s	1770	19...35
ASTM D2783	Olej	Przeciwzatarciowy	59...7848	10 s	1760	18...35
IP 239	Smar — olej	Przeciwzatarciowy + zużycia	60...7940	Zużycie: 60 min EP: 10 s lub 60 s	1450	Brak informacji
DIN 51350-2	Olej	Obciążenie zespawania	2000...12000	60 s	1450	18...40
DIN 51350-3	Olej	Zużycie	150 (A) 300 (B)	60 min	1450	18...40
DIN 51350-4	Plastyczne środki smarowe	Obciążenie zespawania	2000...12000	60 s	1450	18...40
DIN 51350-5	Plastyczne środki smarowe	Zużycie	150 (C) 300 (D) 1000 (E)	60 min 60 min 60 s	1450	18...40

Właściwości środków smarnych, określone przez dane parametry według powyższych norm, są również inne. Parametry przedstawiono w tabeli 4.

TABELA 4

Parametry oceny właściwości smarnościowych różnymi metodami [15]

Norma	Środek smarny
ASTM D2262	MWSD (mm) pod obciążeniem zadany 392 N
ASTM D4172	MWSD (mm) pod obciążeniem zadany 147 N lub 392 N
ASTM D2596	WL (N), LWI (N), LNSL (<i>last non-seizure load</i>) (N)
ASTM D2783	WL (N), LWI (N)
IP 239	WL (N), LWI (10 s lub 60 s), ISL (N), MWSD (mm) (10 s, 60 s lub 60 min)
DIN 51350-2	WL (N)
DIN 51350-3	MWSD (150 N lub 300 N, 60 min)
DIN 51350-4	WL (N)
DIN 51350-5	MWSD (150 N, 300 N lub 1000 N)

Celem dokumentu normatywnego PN-EN ISO 20623:2018-02 [15] jest określenie jednego standardu do oceny właściwości przeciwzatarciowych (EP) i właściwości przeciwzużyciowych (AW) wszystkich rodzajów substancji smarnych na aparacie czterokulowym przy zadanej prędkości obrotowej wrzeczona równej 1450 obr/min — 1500 obr/min.

Właściwości smarnościowe przedstawiane są poprzez następujące parametry:

- najmniejsze obciążenie zacierające (ang. *initial seizure load* — ISL),
- obciążenie zespawania (ang. *weld load* — WL),
- krzywa zużycie-obciążenie,
- wskaźnik zużycia pod obciążeniem (ang. *Load-Wear Index* — LWI),
- charakterystyka przeciwzużyciowa krótkotrwała (ang. *mean wear scar diameter* — MWSD) (10 s lub 60 s) lub długotrwała (60 min).

W porównaniu do pierwszej wersji normy 20623 w normie aktualnej [15] zrezygnowano z parametru chwilowej temperatury (FTP — ang. *flash temperature diameter*) oraz parametru charakteryzującego 2,5-sekundowe obciążenie zacierające (SDL — ang. *2,5 second seizure*). W dalszej części normy znajduje się tylko informacja, że „jeśli wyznaczenie 2,5-sekundowego obciążenia zacierającego jest wymagane, to należy zastosować rejestrator tarcia”. Nie jest to jednak określone jako parametr w opisie terminów i definicji.

Parametr chwilowej temperatury wg PN-EN ISO 20623:2010 [14] to „pojedyncza wartość wyrażająca krytyczną temperaturę chwilową, powyżej której dana ciecz ulegnie zniszczeniu w danych warunkach”. FTP wyznacza się za pomocą wzoru dla każdego biegu sekundowego (10 s lub 60 s). Wątpliwości co do parametru budził

fakt, że w normie znajdowały się dwa różne wzory do obliczeń (wzory 2 i 3). Różnica w wynikach obliczanych za pomocą obu wzorów jest znacząca.

$$FTP = \frac{10m}{d^{1,4}}, \quad (2)$$

gdzie: m — zastosowane obciążenie, N,
 d — średnia średnica śladu zużycia przy obciążeniu 10 m, mm.

$$FTP = \frac{L_a}{d^{1,4}}, \quad (3)$$

gdzie: L_a — rzeczywiste zastosowane obciążenie, N,
 d — średnia średnica śladu zużycia przy odpowiednim obciążeniu, mm.

W normie z 2010 roku znaleźć można jeszcze jeden sposób wyznaczenia parametru FTP. Może być odczytany „bezpośrednio z krzywej zużycie — obciążenie, za pomocą specjalnego kątownika o kącie $35^\circ 32'$ ($\text{ctg}^{-1} = 1,4$)”. Informacja zamieszczona w normie objaśnia, że „FTP oblicza się z najniższego punktu na krzywej, w którym przeciwprostokątna styka się z resztą krzywej leżącej ponad nim”. Za bazę służy linia pozioma. Wszystkie punkty na przeciwprostokątnej mają wartość równą $L_a/d^{1,4}$, więc wartość FTP może być odczytana z punktu przecięcia przeciwprostokątnej z wartością $d = 1$ mm. Norma zaznacza, że parametr chwilowy temperatury oblicza się dla wartości maksymalnej. Brakuje jednak przykładu użycia wspomnianego kątownika (poglądowego rysunku określania FTP).

Obciążenie zacierające 2,5-sekundowe to „obciążenie, przy którym występuje zatarcie po czasie 2,5 sekund od rozpoczęcia biegu badawczego”. Do jego wyznaczenia wymagany jest rejestrator tarcia. W normie próżno szukać jakichkolwiek innych informacji na temat tego parametru.

Zmieniła się także nazwa parametru *MHL* (średnie obciążenie Hertza). W normie z 2018 roku wskaźnik ten to *LWI* (wskaźnik zużycia pod obciążeniem, ang. *Load-Wear Index*). Procedura badania nie uległa zmianie. Podano jednak dwa wzory na wyznaczenie średnic Hertza (wzory 4 i 5).

$$H_N = 4,1 \times 10^{-2} \times L_{aN}^{1/3}, \quad (4)$$

gdzie: L_{aN} — zastosowane obciążenie, N.

$$H_k = 8,73 \times 10^{-2} \times L_{ak}^{1/3}, \quad (5)$$

gdzie: L_{ak} — zastosowane obciążenie, kG.

W normie z 2010 roku nie było podanych wartości średnic skaz Hertza ani wzorów na ich wyznaczenie. Dokument informował tylko o tym, że „rzeczywiste obciążenia i odpowiadające im średnice Hertza są znane”. Dodatkowo można było znaleźć informację, że dwa punkty z linii Hertza na wykresie w skali podwójnie logarytmicznej są średnicami Hertza. Jest to „0,300 mm dla obciążenia 392 N i 0,597 mm dla 3,10 kN”. Linia prosta oraz wartości punktów znajdujących się na niej pozwalają na znalezienie równania prostej. Na potrzeby analizy wyznaczono taki wzór 6, z którego można wyznaczyć wartości średnic Hertza.

$$y = 0,0001093x + 0,2571656 \quad (6)$$

gdzie: x to zadane obciążenie, N.

Wzory podane w normie z 2018 roku są nieporównywalnie lepszym rozwiązaniem niż poszukiwanie wartości średnic Hertza proponowane przez pierwszą wersję normy. Powrócono do sposobu wyznaczania tych wartości proponowanego wcześniej przez polskie normy własne.

W obu dokumentach jest inny zakres szeregu zadawanych obciążeń. W PN-EN ISO 20623:2010 [14] przedstawiano go w jednostkach normatywnych, w niutonach. W drugiej wersji normy przedstawiono zakres w niutonach oraz w kilogramach. Zastosowanie dwóch jednostek siły zdecydowanie ułatwia proces badań. Większość aparatów czterokulowych posiada zestaw obciążeniowy, który składa się z kilogramowych obciążników. Przy ich wykorzystaniu użytkownik i tak przedstawia swoje wyniki w niutonach, wedle przelicznika $1 \text{ kG} = 9,806 \text{ N}$ (w polskich normach krajowych przelicznik wynosił $1 \text{ kG} = 0,980665 \text{ daN}$, więc był dokładniejszy). Niemożliwe było przy stosowaniu kilogramowych obciążeń otrzymanie dokładnie normatywnego obciążenia wg normy z 2010 roku. Porównanie szeregów zadawanych obciążeń przedstawiono w tabeli 5.

TABELA 5

Obciążenia zadane dla norm europejskich [14, 15]

PN-EN ISO 20623:2010	PN EN ISO 20623:2018-2	
Obciążenie zadane, N	Obciążenie zadane, N	Obciążenie zadane, kG
60	58,84	6
70	68,64	7
80	78,45	8
90	88,25	9
100	98,06	10
110	107,87	11
130	127,48	13
140	137,28	14

cd. tab. 5

160	156,90	16
180	176,51	18
200	196,12	20
220	215,73	22
250	235,35	24
280	274,56	28
320	313,80	32
360	353,02	36
400 (bazowe)	392,42	40 (bazowe)
450	410,28	45
500	490,31	50
560	549,12	56
630	617,76	63
710	686,40	70
790	784,84	80
890	882,84	90
1000	980,60	100
1120	1098,24	112
1260	1235,52	126
1410	1372,80	140
1580	1569,68	160
1780	1765,12	180
2000	1961,20	200
2240	2206,40	225
2510	2451,51	250
2820	2746,04	280
3160	3088,56	315
3550	3481,38	355
3980	3922,40	400
4470	4412,71	450
5010	4903,00	500
5620	5492,08	560
6310	6079,72	620
7080	6864,20	700
7940	7844,80	800

Poprawiono także współczynniki obciążenia skorygowanego, czyli iloczyny rzeczywistego obciążenia, oraz obliczonych dla tych obciążeń średnic skaz Hertza. W pierwszej wersji normy oznaczone jako $L_{dH} = L * H$, zaś w drugiej — $L_{aN} * H_N$. W instrukcji do aparatu czterokulowego Stanhope–Seta [17] można znaleźć taki sam szereg wartości współczynników L_{dH} dla obciążeń zadanych przedstawionych w kilogramach jak w wycofanej normie z 2010 roku dla niutonów. Na przykład dla obciążenia zadanego równego 60 N [14] oraz 6 kG [17] parametr L_{dH} równa się 0,954 [14], a z tabeli 5 można odczytać, że 6 kg nie równa się wcale 60 N. Wydaje się, że skopiowano po prostu szereg obciążeń, zamieniając go przy okazji na jednostkę z układu SI — [N], a także skopiowano współczynniki obciążenia skorygowanego L_{dH} . W nowej normie z 2018 roku współczynniki obciążenia skorygowanego zostały poprawione. Odpowiadają zastosowanemu obciążeniu z zakresu normatywnego (czy to w niutonach, czy w kilogramach siły).

W rozdziale *Terminy i definicje* dodano, brakujące w normie z 2010 roku, wytłumaczenie, czym jest *MWSD* (średnia średnica śladu zużycia, ang. *mean wear scar diameter*) — „średnia z sześciu pomiarów średnicy śladu zużycia, dwóch z każdej z nieruchomych kul, wykonana w kierunku tarcia kul i pod kątem prostym do niego”. Parametr ten zapisywany jest przy teście zużycia. W wycofanej normie jedyna wzmianka o nim widnieje w części o wyrażaniu wyników. „Podawać średnią średnicę śladu zużycia zaokrągloną do 0,01 mm z próby zużycia jako *MSWD*...”. Jak widać, błędnie zastosowano skrót parametru *MWSD*. Próba zużycia w aktualnej normie wyszczególniona jest jako test C. Norma pozwala na przeprowadzenie testów krótkotrwałych (10 s lub 60 s) lub długotrwałych (60 minut). Dla testów godzinnych ustala parametry zawarte w tabeli 6. Brakuje w normie informacji, czym są tzw. dane warunki i które obciążenie wybrać do badania. Na pewno podanie informacji w tabeli 6 jest usprawnieniem, gdyż w pierwszej wersji normy była tylko informacja o obciążeniu 150 N dla olejów hydraulicznych. Norma nie zawiera jednak sprecyzowania co do warunków badania. Podane warunki zostały zaczerpnięte z norm niemieckich — DIN 51350-3 [5] oraz DIN 51350-5 [6]. Różnica jest jednak dla obciążenia zadanego równego 1000 N przy badaniu smarów. Norma niemiecka zakłada czas 60 sekund, a w ISO jest to 60 minut. Normy niemieckie również nie zawierają informacji co do wyboru obciążenia do testu. Pozostawiają to do decyzji użytkownika. Taka sama sytuacja pojawia się przy wyborze czasu badania krótko-okresowego. Nie ma zalecenia, który wariant zastosować.

PN-EN ISO 20623:2018-02 [15] przy testach do wyznaczania parametru *LWI* proponuje biegi 10,0 s ± 0,2 s lub 60,0 s ± 0,5 s. Norma nadal oferuje dowolność wyboru użytkownikowi. Może być to problem dla mało doświadczonego badacza.

TABELA 6

Obciążenia zadane dla godzinowego testu zużycia wg [15]

Rodzaj badanej cieczy	Obciążenie zadane, N	Warunek
Ciecz	150	C1
	300	C2
Dyspersje stałe do półstałych (smary plastyczne)	150	C3
	300	C4
	1000	C5

Wyznaczanie parametru MHL (wzór 7) w obu dokumentach jest takie samo. Jest to suma obciążeń skorygowanych dla obciążeń rzeczywistych 3,10 N i mniejszych (A) plus suma obciążeń skorygowanych dla obciążeń rzeczywistych większych niż 3,10 N (B). Zmieniła się za to definicja obu parametrów. MHL to „pojedyncza wartość charakteryzująca cały wykres zużycie — obciążenie, który pokrywa obciążenie od niezacierających do zespawania, a LWI to wskaźnik zdolności środka smarowego do minimalizowania zużycia dla zastosowanego obciążenia (zdolność środka smarowego do przenoszenia obciążeń)”. PN-EN ISO 20623:2010 [14] pozwalała na zastosowanie alternatywy (nazwana MHLA — wzór 8) dla obliczeń w przypadku, gdy niektóre z zastosowanych obciążeń przekraczały 3,10 N. W takim przypadku średnie obciążenie Hertza oblicza się z sumy obciążeń skorygowanych dla obciążeń rzeczywistych 3,10 N i mniejszych (A) i średniej obciążeń skorygowanych dla obciążeń rzeczywistych powyżej 3,10 N (C), podzielonej przez 20. Taki zabieg powodował jedynie zamieszanie w obliczeniach i wydaje się dobrym posunięciem uniemożliwienie stosowania wzoru alternatywnego (wzór 8) w aktualnej normie (PN-EN ISO 20612:2018-02).

$$MHL = \frac{A + B}{20}, \quad (7)$$

$$MHLA = \frac{A + C}{20}, \quad (8)$$

Kolejną różnicą w porównywanych normach europejskich jest dodanie do nich załączników. W aktualnej nie ma załącznika dotyczącego wzorcowania sprężyn rejestratora tarcia. Dodany został natomiast załącznik o specyfikacji kulek testowych.

3.3. PN-C-04362:2017-03 oraz PN-EN ISO 20623:2018-02

Obie normy [12, 15] rozpoczynają się od wyjaśnienia niezbędnych terminów i definicji wymaganych do przeprowadzenia badań. Polska norma własna tłumaczy pojęcie obciążenia zadanego (P), średniej średnicy skaz (d), skompensowanej średnicy

skaz (d_s), średnicy skaz Hertza (D_h), obciążenia zespawania (P_z), obciążenia skorygowanego (P_s), średnicy skaz w próbie zużycia (D_z), granicznego obciążenia zużycia (G_{oz}), linii kompensacyjnej, linii Hertza, wskaźnika zużycia pod obciążeniem (I_h), a także największego obciążenia niezacierającego (P_n). Norma europejska tłumaczy pojęcia zużycia, zatarcia oraz zespawania, a następnie opisuje parametry wyznaczone przez normę: wskaźnik zużycia pod obciążeniem (LWT), krzywą zużycie — obciążenie, najmniejsze obciążenie zacierające (ISL) oraz średnią średnicę śladu zużycia ($MWSD$).

Wątpliwości budzi pojęcie zużycie zawarte w europejskiej normie [15]. Przedstawiona definicja mówi, że jest to „przenoszenie materiału z elementów testowych”. Zużycie jest natomiast skutkiem procesu zużywania wyrażonym w określonych jednostkach. Proponowana przez normę definicja (przenoszenie metalu) to proces, dlatego termin zużycie w normie europejskiej powinien być zastąpiony terminem zużywanie.

Kolejną różnicą są definicje związane z zespawaniem badanych kulek testowych. Polska norma własna PN-C-04362:2017-3 [12] określa obciążenie zespawania jako „najniższe obciążenie zadane, przy którym w warunkach ustalonych w niniejszej normie nastąpi zespawanie obracającej się kulki testowej z trzema nieruchomymi kulkami testowymi”. Ponadto obciążenie zespawania wskazuje na przekroczenie poziomu największego nacisku, jaki jest w stanie przenieść film smarujący. Norma PN-EN ISO 20623:2018-02 [15] inaczej definiuje proces zespawania. Według niej jest to „stopień metalu pomiędzy trącymi powierzchniami wystarczające do połączenia metalu i zespawania kulek w formie piramidy”. Obie definicje w wystarczający sposób opisują zespawanie, jednak tylko polska norma własna [12] definiuje parametr normatywny $P_z(WL)$. Dodatkowo w polskiej normie własnej, już w dalszej jej części, jest informacja, co należy zrobić, gdy zespawanie nie wystąpi (np. podczas badania cieczy o wyjątkowo dobrym przewodnictwie cieplnym). Wówczas przyjmuje się takie obciążenie zadane, przy którym średnia średnica skaz na nieruchomych kulach testowych jest większa od 4 mm. Norma europejska nakazuje, że jeśli zespawanie wystąpi, to należy je potwierdzić dodatkowym biegiem, a jeśli nadal go nie ma, to trzeba przejść na większą wartość z zakresu obciążeń. Brakuje informacji dotyczącej przypadku, gdy zespawanie nie nastąpi dla największego obciążenia zadawanego proponowanego przez normę.

Obie normy zawierają wzory typowych kart badań do zapisu wyników. Znać w nich można odmienne wartości w szeregach obciążeń zadawanych, czyli obciążeniach nadawanych węzłowi tarcia przez układ obciążający tribotestera. Przedstawiono je w tabeli 7. Jak widać, szereg obciążeń zadawanych jest zdecydowanie węższy w polskiej normie własnej. Szereg ten jest tak dobrany, że wartości logarytmów każdego kolejnego obciążenia różnią się od siebie o 0,1. Szereg w normie europejskiej pozwala na dokładniejsze ustalenie wartości parametrów, jednak jego rozszerzenie wpływa na zwiększenie czasu badań. Nie jest także zaznaczone, skąd wynikają poszczególne wartości obciążeń.

TABELA 7

Obciążenia zadane wg PN-C-04362:2017-03 i PN-EN ISO 20623:2018-02 [12, 15]

PN-C-04362:2017-03		PN EN ISO 20623:2018-2	
Obciążenie zadane, daN	Obciążenie zadane, kG	Obciążenie zadane, kG	Obciążenie zadane, N
5,88	6	6	58,84
7,85	8	7	68,64
9,81	10	8	78,45
12,75	13	9	88,25
15,69	16	10	98,06
19,61	20	11	107,87
23,54	24	13	127,48
31,38	32	14	137,28
39,23	40	16	156,90
49,03	50	18	176,51
61,78	63	20	196,12
78,45	80	22	215,73
98,07	100	24	235,35
123,56	126	28	274,56
156,91	160	32	313,80
196,13	200	36	353,02
245,17	250	40 (bazowe)	392,42
308,91	315	45	410,28
392,27	400	50	490,31
490,33	500	56	549,12
608,01	620	63	617,76
784,53	800	70	686,40
		80	784,84
		90	882,84
		100	980,60
		112	1098,24
		126	1235,52
		140	1372,80
		160	1569,68
		180	1765,12
		200	1961,20
		225	2206,40

cd. tab. 7

		250	2451,51
		280	2746,04
		315	3088,56
		355	3481,38
		400	3922,40
		450	4412,71
		500	4903,00
		560	5492,08
		620	6079,72
		700	6864,20
		800	7844,80

W poprzednim podrozdziale wspomniano o sposobie wyznaczania wartości średnic Hertza w normie PN-EN ISO 20623:2018-02 [15]. Norma podaje dwa wzory dla wyznaczenia tych średnic dla obciążenia zadanego w kilogramach (wzór 5) oraz niutonach (wzór 4). W PN-C-04362:2017-3 [12] podano jeden wzór dla obliczeń średnic skaz Hertza (wzór 1). Jest on bardzo podobny do tego zastosowanego w normie europejskiej. Różni się tym, że tam zadawane obciążenie jest w kilogramach, a w polskiej normie własnej w dekaniutonach. Mnogość i różnica w jednostkach dla poszczególnych wzorów mogą wzbudzać konsternację, jednak wszystkie są poprawne i różnica obliczonej wartości średniej średnicy skazy Hertza wynika właśnie z zastosowanej jednostki obciążenia i ich zaokrągleń. W tabeli 8 przedstawiono obliczone wartości średnic Hertza według wszystkich trzech wzorów (wzory 1, 4 i 5). Różniące się od siebie wartości średnic średnic Hertza zaznaczono w tabeli 8 pogrubieniem.

TABELA 8

Porównanie średnic skaz Hertza [12, 15]

PN-C-04362:2017-03		PN-EN ISO 20623:2018-02			
Obciążenie zadanego P , daN	Średnia średnica Hertza D_{H_p} , mm	Obciążenie zadanego P , N	Średnia średnica Hertza H_N , mm	Obciążenie zadanego P , kG	Średnia średnica Hertza H_k , mm
5,88	0,16	58,84	0,16	6	0,16
		68,64	0,17	7	0,17
7,85	0,17	78,45	0,18	8	0,17
		88,25	0,18	9	0,18
9,81	0,19	98,06	0,19	10	0,19
		107,87	0,20	11	0,19
12,75	0,20	127,48	0,21	13	0,21

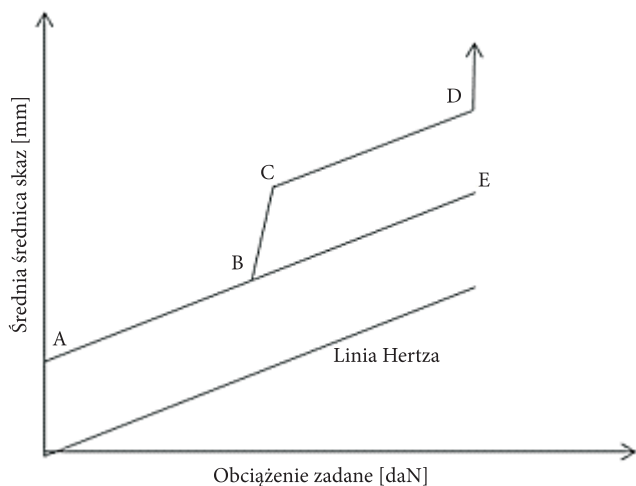
cd. tab. 8

		137,28	0,21	14	0,21
15,69	0,22	156,90	0,22	16	0,22
		176,51	0,23	18	0,23
19,61	0,24	196,12	0,24	20	0,24
		215,73	0,25	22	0,24
23,54	0,25	235,35	0,25	24	0,25
		274,56	0,27	28	0,27
31,38	0,28	313,80	0,28	32	0,28
		353,02	0,29	36	0,29
39,23	0,30	392,42	0,30	40	0,30
		410,28	0,30	45	0,31
49,03	0,32	490,31	0,32	50	0,32
		549,12	0,34	56	0,33
61,78	0,35	617,76	0,35	63	0,35
		686,40	0,36	70	0,36
78,45	0,37	784,84	0,38	80	0,38
		882,84	0,39	90	0,39
98,07	0,40	980,60	0,41	100	0,41
...
123,56	0,43	1235,52	0,44	126	0,44
		1372,80	0,46	140	0,45
156,91	0,47	1569,68	0,48	160	0,47
		1765,12	0,50	180	0,49
196,13	0,51	1961,20	0,51	200	0,51
		2206,40	0,53	225	0,53
245,17	0,55	2451,51	0,55	250	0,55
		2746,04	0,57	280	0,57
308,91	0,59	3088,56	0,60	315	0,59
		3481,38	0,62	355	0,62
392,27	0,64	3922,4	0,65	400	0,64
		4412,71	0,67	450	0,67
490,33	0,69	4903,00	0,70	500	0,69
		5492,08	0,72	560	0,72
608,01	0,74	6079,72	0,75	620	0,74
		6864,20	0,78	700	0,78
784,53	0,81	7844,80	0,81	800	0,81

Według krajowej normy PN-C-04362:2017-03, na podstawie wyników dziesięciu biegów dziesięciosekundowych, poprzedzających obciążenie zespawania, wylicza się wskaźnik zużycia pod obciążeniem I_h . Do wyliczeń stosuje się kolejne biegi przy obciążeniach zadanych mniejszych od obciążenia zespawania lub częściowo się je wykonuje, a częściowo przyjmuje wartości z tablicy zawartej w normie. Wartości tablicowe wybiera się także dla obciążeń niższych od P_n . Norma europejska nie zawiera tego wskaźnika. Podobnie wyznaczane jest jednak tzw. średnie obciążenie Hertza (*LWI*). Wykonuje się dwadzieścia biegów dziesięcio- lub sześćdziesięciosekundowych przy kolejnych obciążeniach mniejszych od zespawania. Dokument wskazuje, że wybór czasu biegu testowego zależy od typu badanego płynu i wymagań specyfikacji. Nie podaje jednak tych wymagań i nie informuje, gdzie ich szukać i jak się na nich opierać. Oba parametry wyznacza się na podstawie wzorów znajdujących się w normach. Dodatkowo, dla ułatwienia, w krajowej normie własnej są podane dwa przykłady obliczania wskaźnika I_h .

W normie europejskiej nie ma, wspomnianego w poprzednim akapicie, największego obciążenia niezacierającego P_n zawartego właśnie w normie krajowej PN-C-04362:2017-3 [12] i w jej starszych wersjach. Jest to największe obciążenie z szeregu obciążeń, po którym przy kolejnym biegu następuje zacieranie. Stosuje się biegi dziesięciosekundowe. Parametr wyznaczany jest przez porównanie średniej średnicy skaz i skompensowanej średnicy skaz. Największe obciążenie niezacierające jest wtedy, gdy średnia średnica skaz nie przewyższa o więcej niż 5% skompensowanej średnicy skaz. W normie europejskiej wyznaczane jest natomiast początkowe obciążenie zacierające (*ISL*). Odczytywane jest z dwulogarytmicznej krzywej zużycie — obciążenie, gdzie biegi wykonuje się dla obciążeń stopniowanych co 100 N do 1000 N, następnie co 250 N do 3000 N i dalej co 500 N do 8000 N, aż do obciążenia zespawania. Dodatkowym biegiem testowym mniejszym od obciążenia zespawania potwierdza się wartość zespawania. Biegi wykonuje się w testach trwających 10 lub 60 sekund. Schematyczny wykres krzywej zużycie — obciążenie przedstawiono na rysunku 3 (podany jest on w polskiej normie krajowej). Parametr P_n charakteryzowany jest na krzywej przez punkt B, zaś parametr *ISL* przez punkt C [12, 15].

Polska norma własna również zaleca, by sporządzić wykres zależności średnicy skaz od obciążenia zadanego (rys. 3). W przypadku tej normy wykorzystuje się pomiary, które służyły do wyznaczania parametru I_h oraz parametru P_z . Norma europejska podaje informację, że „z biegów testowych służących do określenia *LWI* mogą być one użyte do wyznaczania wykresu krzywej zużycie — obciążenie, ale wymagane jest wykonanie dodatkowych biegów w celu ściślejszego określenia kształtu krzywej”. Nie ma informacji, ile dodatkowych biegów testowych powinno się wykonać. Konsekwencją tego jest wykonywanie większej liczby pomiarów niż w normie krajowej.



Rys. 3. Wykres zależności średnicy skaz od obciążenia zadanego: ABE — linia kompensacyjna; A — skompensowana średnica skazy przy obciążeniu początkowym; B — średnica skazy przy największym obciążeniu niezacierającym P_{n1} ; C — średnica skazy przy najniższym obciążeniu zacierającym; ABCD — charakterystyczny przebieg przyrostu średnicy skaz kulek dolnych; D — obciążenie zespawania P_{z1} , punkt, w którym średnica skazy przekracza 4 mm lub następuje zespawanie kulek [12]

Ocenę właściwości przeciuzużyciowych przeprowadza się w obu normach poprzez wykonanie tzw. próby zużycia. PN-EN ISO 20623:2018-02 [15] proponuje biegi krótkookresowe (10 s lub 60 s) lub test godzinny. Obciążenia dla biegów testowych ukazane są w tabeli 6. Polska norma własna [12] wskazuje, by zastosować obciążenie i wybrać czas biegu zgodnie z właściwymi wymaganiami. W uwagach podaje, że dla olejów hydraulicznych i przekładniowych najczęściej stosowany jest bieg godzinny pod obciążeniem 39,23 daN. Oba dokumenty pozostawiają użytkownikowi dowolność w wyborze obciążenia i czasu biegów testowych. Dodatkowo polska norma własna [12] mówi o tym, że za wynik testu zużycia należy przyjąć średnią arytmetyczną z co najmniej dwóch oznaczeń, których wyniki mieszczą się w granicach powtarzalności. Norma europejska [15] nie wspomina o liczbie pomiarów.

W PN-C-04362:2017-3 [12] podano dodatkowy parametr do oceny właściwości przeciuzużyciowych. Wyznaczane jest graniczne obciążenie zużycia (G_{oz}). Oblicza się je ze wzoru 9 na podstawie średniej średnicy skaz powstałych na nieruchomych kulach w czasie biegu aparatu zazwyczaj pod obciążeniem 147,10 daN lub wielokrotnością 49,03 daN, przy prędkości obrotowej w zakresie 1450 ÷ 1500 obr/min. Nie ma dodatkowych informacji, kiedy należy zastosować inne obciążenie niż 147,10 daN. Czas biegu testowego to 60 sekund. Jako wynik oznaczenia przyjmuje się średnią arytmetyczną z co najmniej trzech pomiarów, które nie różnią się od siebie o więcej niż 10%.

$$G_{oz} = 0,52 \times \frac{P}{d^2}, \quad (9)$$

gdzie: P — zastosowane obciążenie, daN,
 d — średnia średnica skaz na powierzchni kulek, mm,
0,52 — współczynnik uwzględniający rozkład sił w węzle tarcia (tworzących czworosćian foremny).

4. Wnioski końcowe

W oparciu o przeprowadzoną analizę sformułowano następujące wnioski końcowe:

1. Efektem przeprowadzonej analizy jest przedstawienie zasadniczych podobieństw norm służących do oceny właściwości smarnościowych olejów i smarów plastycznych i różnic między nimi.
2. Aktualne normy pozwalają na zbadanie parametrów właściwości przeciwzużyciowych, przeciwtarciowych oraz miar trwałości warstwy smarnej.
3. Różne parametry normatywne w analizowanych dokumentach nie pozwalają (w większości) na ich bezpośrednie porównanie. To od użytkownika zależy, na której normie oprze swoje badania.
4. Norma PN-C-04362:2017-03 to uaktualniona kopia wycofanej normy PN-C-04147:1976. Jedyną różnicą między tymi dokumentami jest usunięcie parametru P_t , wprowadzenie parametru D_z oraz zmiana prędkości obrotowej wrzeciona dla parametru G_{oz} (z 500 obr/min na 1450 obr/min — 1500 obr/min).
5. Druga wersja normy europejskiej (PN-EN ISO 20623:2018-02) poprawia w większości błędy poprzedniczki (PN-EN ISO 20623:2010). Nadal jednak w niektórych aspektach pozostawia zbyt dużą dowolność (np. wybór czasu biegu testowego) oraz jest nieprecyzyjna.
6. Analizując normę PN-C-04362:2017-03, można dojść do wniosku, że norma z 1976 roku nie musiała zostać wycofana. Wymagała jedynie udoskonalenia.
7. Norma PN-EN ISO 20623, która została narzucona członkom Unii Europejskiej, powinna przed wprowadzeniem do danego kraju być porównana z istniejącymi dokumentami krajowymi. W ten sposób prawdopodobnie możliwe byłoby stworzenie lepszej normy i uniknięcie chaosu.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 11.02.2020 r. Zatwierdzono do publikacji 17.03.2020 r.

Arkadiusz Chodkiewicz <https://orcid.org/0000-0002-9255-8460>

Tadeusz Kałdoński <https://orcid.org/0000-0001-6483-3739>

LITERATURA

- [1] ASTM D 2596/69 *Standard Test Method for Measurement of Extreme — Pressure Properties of Lubricating Grease (Four-Ball Method)*.
- [2] ASTM D 2783/71 *Standard Test Method for Measurement of Extreme — Pressure Properties of Lubricating Fluids (Four-Ball Method)*.
- [3] BŁASZKIEWICZ Z., MOSKAŁA J., *Normalizacja środków smarowych w Polsce*, Nafta-Gaz 2017, nr 12, s. 980-987.
- [4] CHODKIEWICZ A., *Analiza standardów europejskich oceny właściwości smarnościovych olejów z dodatkami uszlachetniającymi*, (praca magisterska), WAT, Warszawa 2019.
- [5] DIN 51350-3 *Testing of lubricants – Testing in the four-ball tester – Part 3: Determination of wearing characteristics of liquid lubricants*.
- [6] DIN 51350-5 *Testing of lubricants – Testing in the four-ball tester – Part 5: Determination of wearing characteristics for consistent lubricants*.
- [7] Fiat 50500 *Prove Delle Sostanze Lubrificanti Prove di untuosita sulla machine a 4 sfere*.
- [8] KAŁDOŃSKI T., *Podstawowe problemy analizowania procesów tribologicznych*, WAT, Warszawa, 2015.
- [9] NOWICKI W., *O ścisłość pojęć i kulturę słowa w technice*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1978.
- [10] PN-C-04147:1963 *Przetwory naftowe – Badanie własności smarowych olejów i smarów*.
- [11] PN-C-04147:1976 *Przetwory naftowe – Badanie własności smarnych olejów i smarów*.
- [12] PN-C-04362:2017-03 *Przetwory naftowe – Badanie właściwości smarnych olejów i smarów*.
- [13] PN-EN ISO 20623:2005 *Przetwory naftowe i produkty podobne. Oznaczenie właściwości przeciwzatarciowych i przeciwzużyciowych cieczy. Metoda czterokulowa (warunki europejskie)*.
- [14] PN-EN ISO 20623:2010 *Przetwory naftowe i produkty podobne. Oznaczenie właściwości przeciwzatarciowych i przeciwzużyciowych cieczy. Metoda czterokulowa (warunki europejskie)*.
- [15] PN-EN ISO 20623:2018-02 *Przetwory naftowe i produkty podobne. Oznaczenie właściwości przeciwzatarciowych i przeciwzużyciowych środków smarowych. Metoda czterokulowa (warunki europejskie)*.
- [16] *Przemysłowe środki smarne. Poradnik*, TOTAL, Warszawa, 2003, s. 21.
- [17] Seta — *Shell Four Ball EP Lubricant Testing Machine Manual*, Stanhope Seta Ltd, London, 1965.
- [18] STACHOWIAK G., BATCHELOR A., STACHOWIAK G., *Prevailing wear conditions and type of tribometer, Experimental methods in tribology*. Tribology Series, 44 (Ed. Dawson D.), Elsevier 2004.

A. CHODKIEWICZ, T. KAŁDOŃSKI

**Analysis of standards for testing lubricity properties
on a four-ball apparatus used in Poland**

Abstract. The article presents a historical review of the Polish standards for testing anti-seizing and anti-wear properties of lubricants on a four-ball apparatus, commonly used in the world for this type of testing. The current standards, approved by PKN for use in Poland, are also discussed. Withdrawn standards were compared and their updates, showing the direction of development of research into the lubricity properties of oils and greases. As a result, the research scope of lubricity properties was arranged on the basis of the standards currently in force in Poland.

Keywords: tribology, lubricity, four-ball apparatus, standardization

DOI: 10.5604/01.3001.0014.2834