

Jan MONIETA*

**BADANIE SIŁY TARCIA IGLICY W KORPUSIE
ROZPYLACZA WTRYSKIWACZY SILNIKÓW
OKRĘTOWYCH PRZY OBECNOŚCI ŚRODKÓW
SMARUJĄCYCH Z UWZGLĘDNIENIEM
ZMIAN POŁOŻENIA**

**RESEARCH ON THE FRICTION FORCE OF THE NEEDLE
IN THE NOZZLE BODY OF MARINE DIESEL ENGINES
IN THE PRESENCE OF A LUBRICATING MEDIUM
THAT ACCOUNT POSITION CHANGES**

Słowa kluczowe:

silniki okrętowe, rozpylacze wtryskiwaczy, siła tarcia

Key-words:

marine diesel engines, injector nozzles, friction force

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań siły tarcia między iglicą a korpusem rozpylaczy silników okrętowych. Badano wykonane ze stali stopowej rozpylacze tłokowych silników spalinowych zasilanych olejem napędowym lub pali-

* Akademia Morska, Instytut Eksploatacji Siłowni Okrętowych, ul. Wały Chrobrego 2, 70-500 Szczecin.

wem pozostałościowym. Do badań wybrano rozpylacze spośród eksploatowanych w naturalnych warunkach, w których stwierdzono stan niezdatności lub wymieniono je profilaktycznie. Badano rozpylacze przy obecności paliwa lub oleju o zbliżonych własnościach, jak również wykonano pomiary czasów wysuwania się iglic z korpusów rozpylaczy dla stopniowanych ich położeń w płaszczyznach względem osi podłużnej w korpusie rozpylacza.

Wykonano pomiary geometryczne par precyzyjnych i badano wpływ wymiarów oraz błędów kształtu i położenia części prowadzących na wartości sił tarcia. Badano wpływ położenia kąтового iglicy względem korpusu rozpylacza i mierzono również luz średnicowy między korpusem a iglicą rozpylacza oraz badano jego wpływ na wartość maksymalnej siły tarcia.

Badania siły tarcia przeprowadzono na dwóch stanowiskach, w zależności od jej wartości. Pierwsze z nich wykonane było we własnym zakresie do wyznaczania maksymalnej siły tarcia z wykorzystaniem obciążania siłami ciężkości, a drugie stanowisko przeznaczone było do badań wytrzymałości próbek na rozciąganie.

Na wartość maksymalnej siły tarcia między korpusem i iglicą rozpylacza ma wpływ stan współpracujących powierzchni oraz ich wzajemne usytuowanie, zanieczyszczenia itp.

Przeprowadzone badania miały na celu wyznaczenie składowej siły tarcia i/lub czasu wysuwania się iglicy w zależności od kąta obrotu iglicy w korpusie rozpylacza, od luzu, rodzaju zastosowanych środków smarowych oraz masy iglicy.

WSTĘP

Rozpylacze wtryskiwaczy okrętowych silników spalinowych są eksploatowane w bardzo niesprzyjających warunkach przy oddziaływaniach wysokich ciśnień paliwa oraz poddane są obciążeniom cieplnym, mechanicznym i chemicznym [L. 3, 5, 6]. W wyniku tych wymuszeń, przy oddziaływaniu różnych czynników zewnętrznych, dochodzi do intensywnego tarcia, zużycia i uszkodzeń, zmian parametrów konstrukcyjnych rozpylaczy oraz przejścia ze stanu zdatności do stanu dopuszczalnego lub stanu niezdatności [L. 2, 11]. Stan techniczny rozpylaczy zdeterminowany jest wartościami cech, takich jak [L. 1-4, 9, 17]: wymiary geometryczne, wzajemne luzy elementów współpracujących, stan powierzchni w węzłach tribologicznych itd.

Badania tribologiczne, teoretyczne i eksperymentalne mogą dotyczyć procesów i zjawisk występujących podczas tarcia, zużycia i smarowania. W rozpylaczach wtryskiwaczy występuje również tarcie mieszane, a na wartość siły tarcia ma wpływ stan współpracujących powierzchni oraz rodzaj i jakość sto-

sowanych paliw. Czynniki te mają istotny wpływ na trwałość i niezawodność rozpylaczy.

Utrata stanu zdatności węzła tarcia może nastąpić na skutek zmian własności fizycznych warstwy wierzchniej spowodowanych tarciami i prowadzących do wzrostu oporów ruchu w stopniu przekraczającym poziom dopuszczalny [L. 2, 5, 8].

W parze iglica korpus – rozpylacza obciążenie działa głównie wzdłuż osi iglicy. Naciski boczne mogą wystąpić wskutek błędów kształtu i położenia, sprężystych odkształceń oraz obciążeń działaniem ciśnienia paliwa na powierzchnie w szczelinach między korpusem a iglicą rozpylacza [L. 7, 14, 16].

W parze iglica–korpus rozpylacza obciążenie działa głównie wzdłuż osi iglicy. Naciski boczne mogą wystąpić wskutek błędów kształtu i położenia, obciążenia montażowego i odkształceń oraz sił powstałych w wyniku przebiegu ciśnienia paliwa w szczelinie między korpusem i iglicą rozpylacza [L. 7, 14, 16]. Powierzchnie tarcia smarowane są paliwem zasadniczo wskutek przecieków. Występuje tam siła tarcia uzależniona od własności paliwa, prędkości poślizgu, a przy tarcu mieszanym od nacisków i współczynnika tarcia [L. 17]:

$$T = f(P, u, X_{ch}) \quad (1)$$

gdzie:

P – obciążenie,

u – prędkość ślizgania,

X_{ch} – właściwości tribologiczne czynnika.

Jeżeli elementy rozpylacza nie zmieniają względem siebie położenia, to występuje między nimi tarcie spoczynkowe, a tarcie ruchowe, gdy znajdują w ruchu względnym [L. 13]. W przypadku unieruchomienia iglicy rozpylacze tracą szczelność i do cylindra przedostaje się dodatkowa ilość paliwa, którego spalanie następuje bez dostatecznej ilości tlenu. Wówczas na powierzchniach rozpylacza powstają osady. Zawieszaniu iglic sprzyja obecność niektórych składników w paliwie (np. wody, zanieczyszczeń, siarki) i osadów wewnątrz rozpylacza. Jeżeli iglica ulegnie częściowemu zakleszczeniu, to jej wznios następuje przy wyższym ciśnieniu paliwa i z inną prędkością.

Zmniejszenie szczelności przylegania stożków uszczelniających iglicy i korpusu rozpylacza powoduje przedostawanie się gorących gazów z komory spalania do wewnątrz rozpylacza. W wyniku tego powierzchnie rozpylacza nagrzewają się i następuje zacieranie się iglicy, będące skutkiem utraty smarowania, wzrostu temperatury, odkształceń i występowania osadów. Zatarcie jest definiowane jako zahamowanie ruchu względnego elementów pary trącej [L. 15]. Zatarcie jest utożsamiane również z unieruchomieniem węzła na skutek zespawania powierzchni styku trących się ciał [L. 13, 16].

Do unieruchomienia iglicy rozpylacza dochodzi wówczas, gdy siła tarcia między korpusem i iglicą rozpylacza jest większa od siły wywołującej jej przesunięcie F_p (napięcia sprężyny lub hydrodynamicznej ciśnienia paliwa, działającej na powierzchnię iglicy):

$$T \geq F_p \quad (2)$$

Miarą tarcia jest opór równoważony wypadkową siłą styczną podczas przemieszczania jednego ciała względem drugiego.

METODY BADAŃ TARCIA I ZUŻYCIA ROZPYLACZY

Jedną ze stosowanych metod mierzenia składowej siły tarcia jest sposób polegający na wprawieniu w ruch nieruchomej próbki pod działaniem siły ciężkości. Można tam także mierzyć czas, w którym próbka się przemieściła pod wpływem ciężaru potrzebnego do wprawienia próbki w ruch. Dzięki temu można obliczyć maksymalną siłę tarcia spoczynkowego.

Metody badań siły tarcia w rozpylaczach nie należą do często podejmowanych [L. 8, 11, 18], a niektóre z nich opisano w pracy [L. 8].

METODY BADAŃ ZASTOSOWANE W PRACY

Badania tribologiczne przeprowadzono w laboratoriach Akademii Morskiej w Szczecinie na dwóch stanowiskach badawczych w warunkach odniesienia, dla których wielkości wpływające były zgodne z wymaganiami normy PN-EN 60051-1:2000. Rozpylacze wtryskiwaczy zostały wymontowane z okrętowych silników w czasie obsługi planowych i nieplanowych. Rozpylacze poddano pomiarom geometrycznym i przepływowym, w celu sprawdzenia, czy cechy konstrukcyjne mieszczą się w polach tolerancji podanych przez producenta. Przyjęto założenie, że stan zdatności występuje wówczas, gdy wszystkie cechy stanu znajdują się w polach tolerancji stanu zdatności, co jest trudne do spełnienia, nawet dla rozpylaczy nowych [L. 12]. Do powierzchni tarcia był doprowadzany środek smarujący [L. 11] (olej wazelinowy, olej Calibration Shell lub paliwo) za pomocą strzykawki i rozprowadzany przez wzajemne ruchy posuwiste i obrotowe iglicy i korpusu rozpylacza. Rozpylacze do badań przechowywano w zamkniętych pojemnikach, zakonserwowano je olejem wazelinowym (zgodnie z zaleceniami producenta) i oczekiwały na badania do kilku lat, aby zgromadzić reprezentatywną próbę oraz zakupić aparaturę badawczą.

Celem badań było określenie wielkości niezbędnych do wyznaczenia składowych siły tarcia, przeciwdziałających wysunięciu iglic z korpusów rozpylaczy, dla różnych środków smarowych i dla różnych kątów ustawienia iglicy

w korpusie rozpylacza z zastosowaniem obciążenia siłą ciężkości, a także uzyskanie pomiarów średnic części prowadzących korpusu i iglicy, dzięki czemu można było wyznaczyć luz średni w trzech płaszczyznach prostopadłych do osi podłużnej, a następnie wyznaczyć średni luz średnicowy i jego wpływ na wartość siły tarcia. Praca dotyczy dalszych badań innych próbek niż praca [L. 8] i z udziałem środków smarowych, przy zwiększeniu liczby płaszczyzn pomiaru siły tarcia oraz z pomiarem czasu wysuwania iglicy z korpusu rozpylacza. W pracy [L. 11] badano wpływ rodzaju, ilości i dodania środka smarowego.

Rysunek 1 przedstawia rozkład sił działających na iglicę podczas próby wysuwania jej z korpusu rozpylacza. Na podstawie **Rys. 1** można napisać wzór na siły działające na iglicę rozpylacza:

$$Q_d + G_T - T = 0 \quad (3)$$

Przekształcając tę zależność wraz z podstawieniem masy dodatkowej m_d , powodującej wprawienie iglicy w ruch, wyznaczona zostaje maksymalna siła tarcia:

$$T_{max} = \max(T) = \max(F + G_T) [N] \quad (4)$$

przy czym:

$$F = Q_d = m_d \cdot g \left[kg \cdot \frac{m}{s^2} = N \right] \quad (5)$$

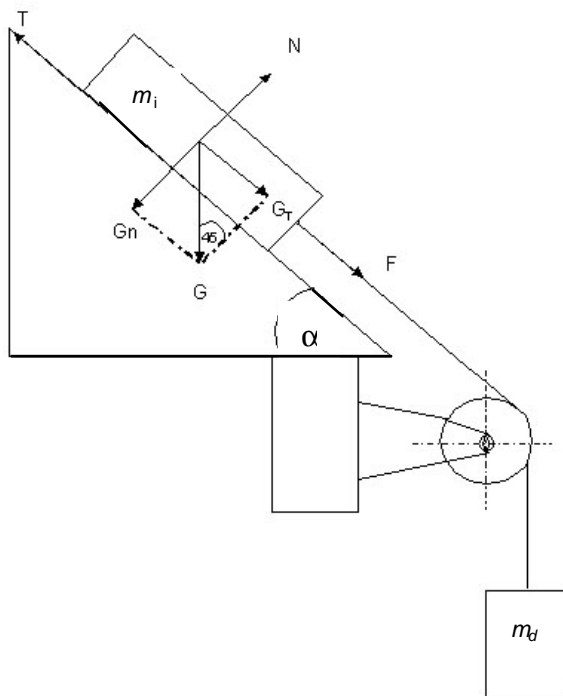
$$G_T = G \cdot \sin \alpha \quad (6)$$

gdzie:

- T – siła tarcia [N],
- m_d – masa dodatkowa przyłożona do iglicy rozpylacza [kg],
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],
- G – siła ciężkości [N],
- α – kąt nachylenia równi pochyłej [$^\circ$].

$$G = m_i \cdot g \left[kg \cdot \frac{m}{s^2} = N \right] \quad (7)$$

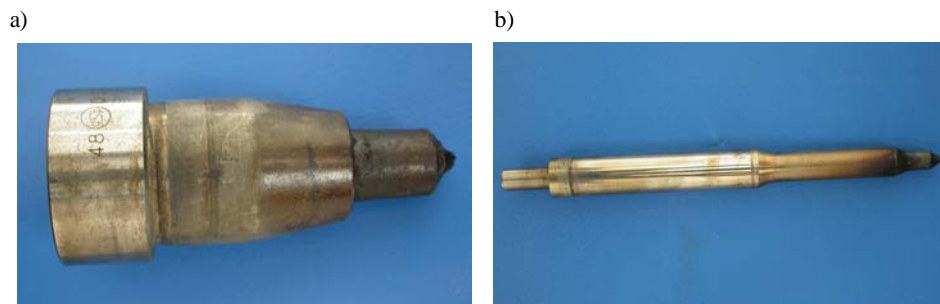
Przy bardzo dużych masach dodatkowych (powyżej 100 kg) potrzebnych do wysunięcia iglicy z korpusu rozpylacza użyto stanowiska do badań wytrzymałości próbek na rozciąganie [L. 8].



Rys. 1. Rozkład sił działających na iglicę rozpylacza w chwili wysuwania z korpusu rozpylacza: m_i – masa iglicy rozpylacza, m_d – masa dodatkowa, T – siła tarcia, F – siła potrzebna do wysunięcia iglicy z korpusu rozpylacza, N – siła nacisku, G – siła ciężkości, G_T – składowa równoległa do równi pochyłej, G_n – składowa prostopadła do równi pochyłej

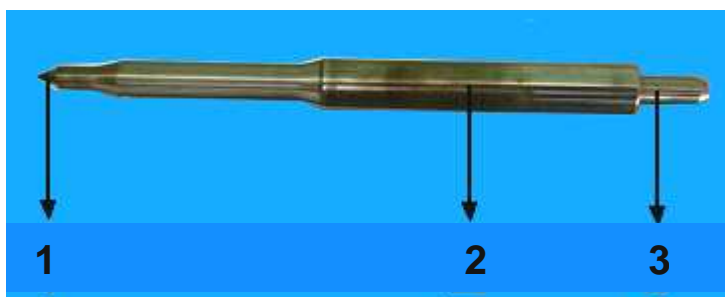
Fig. 1. Distribution of forces acting on the nozzle needle at the line feed instant of from the nozzle body: m_i – mass of the nozzle needle, m_d – extra weight, T – friction force, F – the needed force to eject the needle from the nozzle body, N – thrust force, G – force of gravity, G_T – the component parallel to the inclined plane, G_n – the component perpendicular to the inclined plane

Badane rozpylacze pochodziły ze średnioobrotowych silników okrętowych eksploatowanych w naturalnych warunkach oraz składały się z korpusów i iglic. Wybór rozpylaczy zastosowanych do badań był losowy. Podczas eksploatacji część z nich była zasilana paliwem pozostałościowym, a część paliwem destylacyjnym. W przypadku zasilania silnika paliwami pozostałościowymi zaleca się, aby rozruch oraz zatrzymanie dobywały się przy zasilaniu paliwami destylacyjnymi. Rozpylacze te pochodziły z masowców floty armatora krajowego. Na **Rys. 2** został przedstawiony eksploatowany rozpylacz do wtrysku oleju napędowego, który był poddany badaniom.



Rys. 2. Widok korpusu rozpylacza (a) i iglicy (b) okrętowego silnika spalinowego typu A20
 Fig. 2. View of the nozzle body (a) and needle (b) of the marine diesel engine type A20

Z **Rys. 2** wynika, że zarówno korpusy, jak i iglice badanych rozpylaczy były pokryte osadami oraz zużyte. Korpusy rozpylaczy wykonane są ze stali ulepszonej cieplnie oraz azotowane, a iglice ze stali szybko tnącej. Istotne węzły tribologiczne badanych iglic pokazano na **Rys. 3**.



Rys. 3. Widok badanej iglicy: 1 – stożek uszczelniający iglicy, 2 – część prowadząca iglicy, 3 – czop iglicy

Fig. 3. View of the investigated needle: 1 – needle sealing cone, 2 – needle guide part, 3 – needle shaft

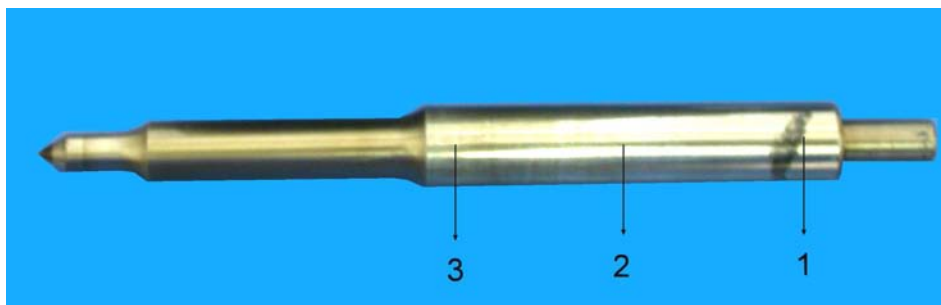
O wielkości siły tarcia decyduje stan techniczny części prowadzącej iglicy. Na **Rys. 4** pokazano fotografię części prowadzącej badanej iglicy rozpylacza, na której można zauważyć zużycie ściernie, korozyjne i utlenianie, osady paliwa itp. Identyfikację rodzajów zużycia występujących w rozpylaczach opisano w publikacji [L. 9]. Przy identyfikacji rodzajów zużycia decyzja była podejmowana przez człowieka. Jedynie badanie intensywności wybranych rodzajów zużycia rozpylaczy wykonano automatycznie z zastosowaniem analizy obrazów [L. 10].



Rys. 4. Przykładowy widok części prowadzącej badanej iglicy
Fig. 4. Example view of guide part of the investigated needle

POMIARY GEOMETRYCZNE ŚREDNIC CZĘŚCI PROWADZĄCYCH KORPUSÓW I IGLIC ROZPYLACZY

Przed dokonaniem pomiarów geometrycznych wszystkie badane rozpylacze zostały umyte w benzynie ekstrakcyjnej, a następnie osuszono je sprężonym powietrzem. Na stanowisku wyposażonym w pryzmę i mikrometr cyfrowy, umożliwiający odczyt z rozdzielczością 0,0005 mm, wykonano pomiary średnic w części prowadzącej iglic [L. 12]. Średnica części prowadzącej iglicy została zmierzona w trzech płaszczyznach prostopadłych do osi wzdłużnej (Rys. 5) i w czterech płaszczyznach prostopadłych do osi wzdłużnej dla każdej z nich. Każdy z przekrojów przechodził przez oś wzdłużną co 45°.



Rys. 5. Widok badanej iglicy: 1 – pierwsza płaszczyzna pomiarowa, 2 – druga płaszczyzna pomiarowa, 3 – trzecia płaszczyzna pomiarowa

Fig. 5. View of the test needle: 1 – the first measurement plane, 2 – the second measurement plane, 3 – third measurement plane

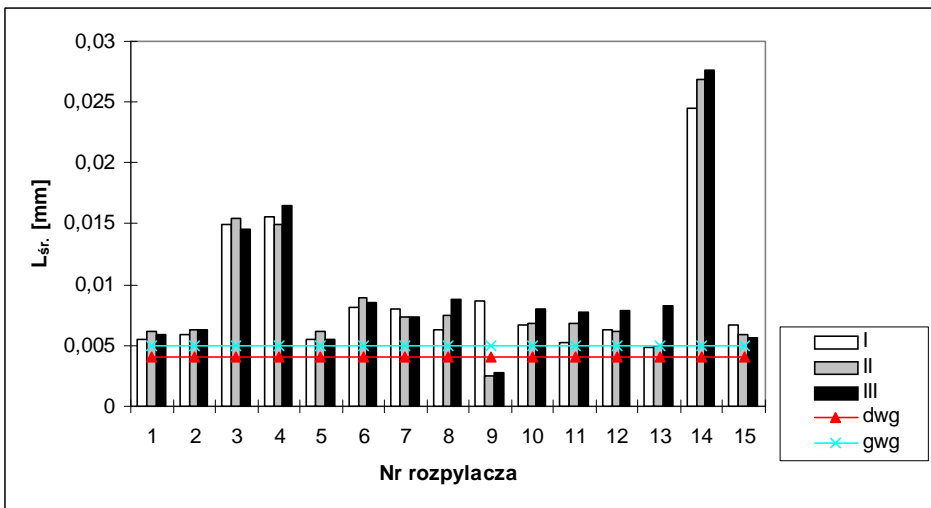
Do pomiaru wewnętrznej średnicy części prowadzącej korpusu rozpylacza użyto samocentrującej cyfrowej średnicówki czujnikowej z końcówką rozprężną. Średnicówkę zamocowano w statywie pomiarowym wyposażonym w uchwyt pływający z regulowaną wysokością podnoszenia [L. 12].

Rys. 6 przedstawia przykładowe wartości luzu średniego L_{sr} dla poszczególnych szesnastu rozpylaczy z partii poddanych pomiarom w trzech płaszczyznach części prowadzących iglic i korpusów. Z **Rys. 6** wynika, że wartości luzu średniego w poszczególnych płaszczyznach są zbliżone do siebie. Można

stwierdzić, że luz średni jest największy w płaszczyźnie 3, a najmniejszy w płaszczyźnie 1, co świadczy o błędach walcowości części prowadzących. Im bliżej ku komorze spalania, gdzie występują większe wartości temperatur, tym bardziej intensywne jest zużycie i większy luz.

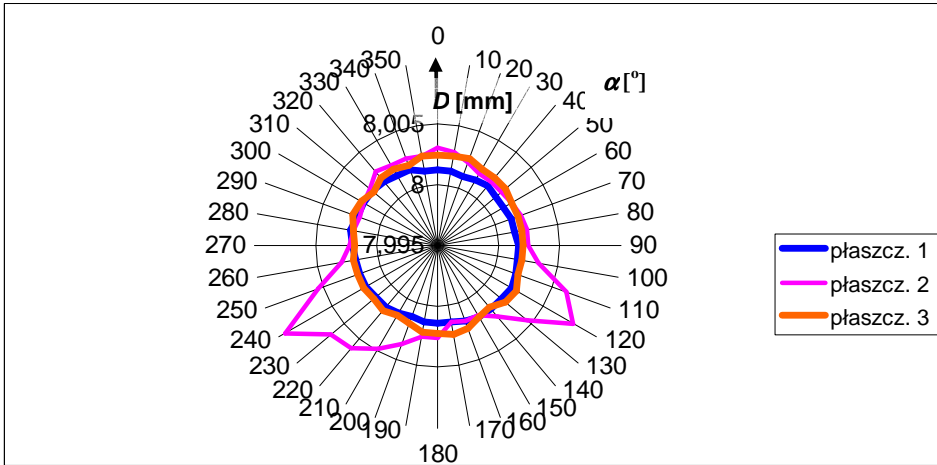
Rys. 7 przedstawia wartości średnic korpusów rozpylaczy w trzech płaszczyznach części prowadzących dla poszczególnych położań iglicy względem korpusu rozpylacza α , co 10° . Z rysunku wynika, że w badanej iglicy występują zarówno błędy kołowości, jak i walcowości.

Na podstawie **Rys. 7** można zauważyć, że wartości średnicy wewnętrznej w korpusie rozpylacza najbardziej są zróżnicowane w płaszczyźnie 2, natomiast wartości średnicy wewnętrznej korpusu rozpylacza w płaszczyznach 1 i 3 są zbliżone do wartości nominalnej. Należy wziąć pod uwagę fakt, że jest to przykładowy stan jednego rozpylacza.



Rys. 6. Przykładowe wartości średniego luzu średniego L_{sr} dla poszczególnych rozpylaczy: d_{wg} – dolna wartość graniczna, g_{wg} – górna wartość graniczna

Fig. 6. The exemplary values of average diameter clearance L_{sr} for individual injector nozzles: d_{wg} – lower boundary value, g_{wg} – upper boundary value



Rys. 7. Wartości średnicy przykładowego korpusu rozpylacza D_k w różnych płaszczyznach α
 Fig. 7. The values of D_k diameter of exemplary nozzle body in different planes α

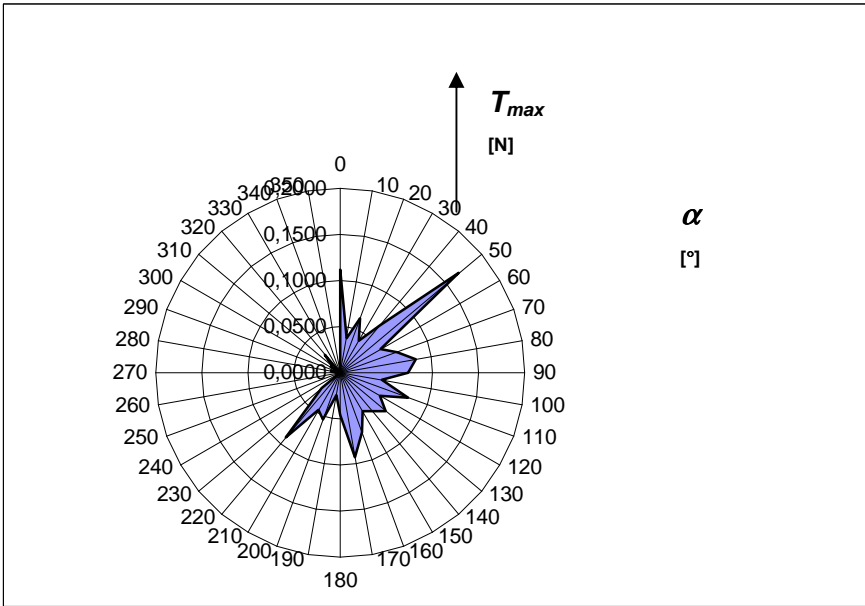
WYNIKI POMIARÓW MAKSYMALNEJ SIŁY TARCIA

Wyniki pomiarów masy dodatkowej m_d i masy iglic m_i notowano w tabelach roboczych oraz określono pochodzenie rozpylaczy i rodzaj smarowania par precyzyjnych. Wartości pomiarów następnie wprowadzono do arkusza kalkulacyjnego programu Excel służącego do dokonywania obliczeń i sporządzania wykresów. Środkami smarnymi podczas badań były: olej wazelinowy, paliwo destylacyjne oraz olej Calibration Shell. Wyniki wpływu rodzaju i ilości zastosowanych środków smarowych na wartości maksymalnej siły tarcia przedstawiono w pracy [L. 11].

Pomiar siły tarcia wykonano w ponad 100 rozpylaczach wybranych losowo, które zostały wymontowane z silników spalinowych w czasie planowych i nieplanowych obsługa. W miarę rozwoju metod badawczych oraz zakupu środków do badań, poszczególne partie rozpylaczy badano w coraz bardziej zaawansowany sposób, a w tej pracy badania dotyczyły 62 rozpylaczy. Na podstawie zebranych wyników obliczono, z zastosowaniem programu komputerowego Microsoft Excel, maksymalną siłę tarcia T_{max} . Uzyskane wartości umożliwiły wykonanie wykresów wartości maksymalnych sił tarcia dla kolejnych ponumerowanych egzemplarzy rozpylaczy przy różnych rodzajach smarowania.

Rys. 8 przedstawia wartości maksymalnej siły tarcia T_{max} dla różnych położeń iglicy α . Podczas przeprowadzonych badań niektóre rozpylacze zostały poddane pomiarom wysuwania iglicy z korpusu rozpylacza dla różnych położeń kątowych, co 10° od 0° do 360° , w wyniku czego dokonano 36 pomiarów. Kąt obrotu iglicy względem korpusu rozpylacza określano w ten sposób, że na po-

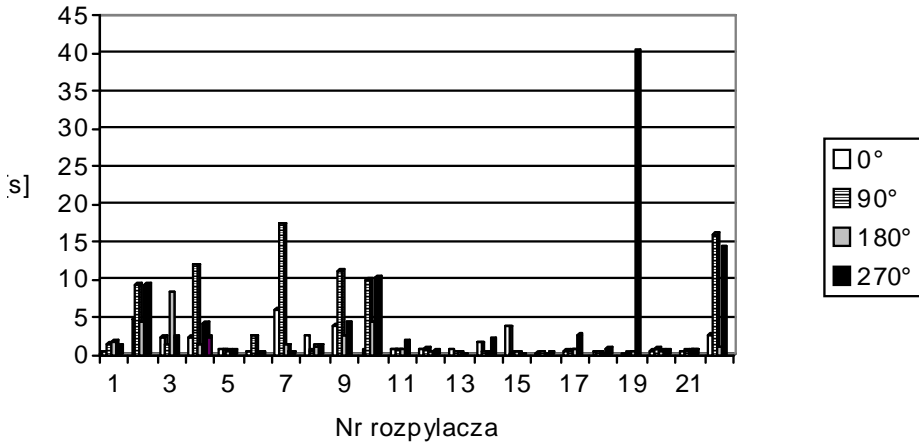
wierzchni czołowej czopa iglicy narysowano linię przechodzącą przez średnicę, a na korpus rozpylacza nakładano szablon z podziałką kątową. Z **Rys. 8** wynika zróżnicowanie maksymalnej siły tarcia dla poszczególnych płaszczyzn pomiarowych.



Rys. 8. Wartości maksymalnej siły tarcia T_{max} dla różnych położeń iglicy α
 Fig. 8. The maximum value T_{max} of friction force for different needle positions α

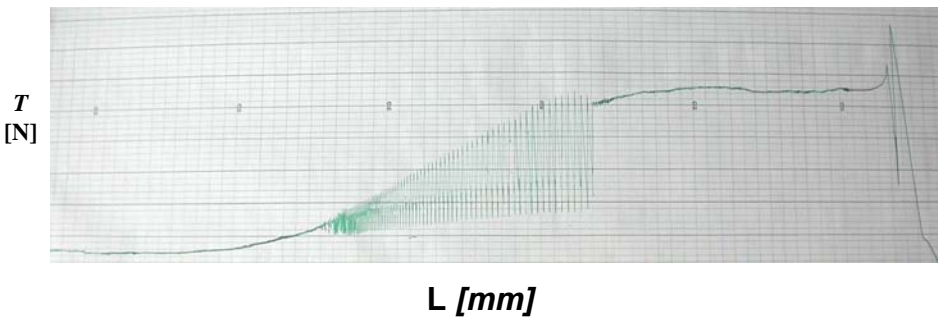
Badania wykazały, że nie tylko jest istotna wartość maksymalnej siły tarcia, lecz również dynamika ruchu iglicy. Niektóre iglice wysunęły się pod działaniem składowej siły ciężkości, lecz po długim czasie, co skłoniło do pomiaru czasu wysuwania się iglic. Powolne wysuwanie się iglic z korpusów rozpylaczy można było również stwierdzić po przyłożeniu dodatkowych sił składowych pochodzących od niewielkich mas. Na **Rys. 9** przedstawiono wartości czasów wysuwania iglic z korpusów partii rozpylaczy w czterech płaszczyznach co 90° .

Na podstawie **Rys. 9** można dostrzec, że większość czasów wysuwania się iglic nie przekraczała wartości 5 s. Wartość siły tarcia zmieniała się również wzdłuż drogi przemieszczania się iglicy względem korpusu rozpylacza, co przedstawiono przykładowo na **Rys. 10** podczas testów na stanowisku do badań wytrzymałości próbek na rozciąganie.



Rys. 9. Przykładowe wartości czasów t wysuwania się iglic z korpusu rozpylacza dla czterech płaszczyzn umieszczenia iglicy względem korpusu rozpylacza

Fig. 9. Exemplary time values t eject the needles from the nozzle body for four plains of putting the needle with regard to the nozzle body

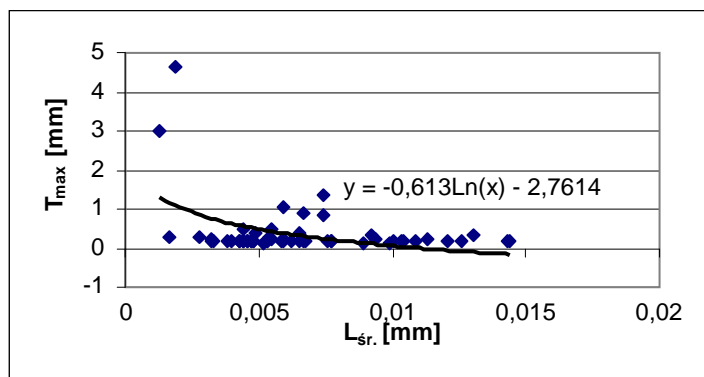


Rys. 10. Przebieg zmian siły tarcia T w zależności od położenia iglicy w korpusie rozpylacza L

Fig. 10. Course of changes the friction force T depending on site of injector needle in body L

Rys. 11 przedstawia wartości maksymalnych sił tarcia T_{max} dla luzów średnich L_{sr} , z pominięciem 2 rozpylaczy o bardzo dużych siłach tarcia niewynikających z luzu. Ponieważ o maksymalnej sile tarcia decyduje najmniejszy luz średnicowy, zatem do wykresu wstawiano wartości najmniejsze z trzech płaszczyzn.

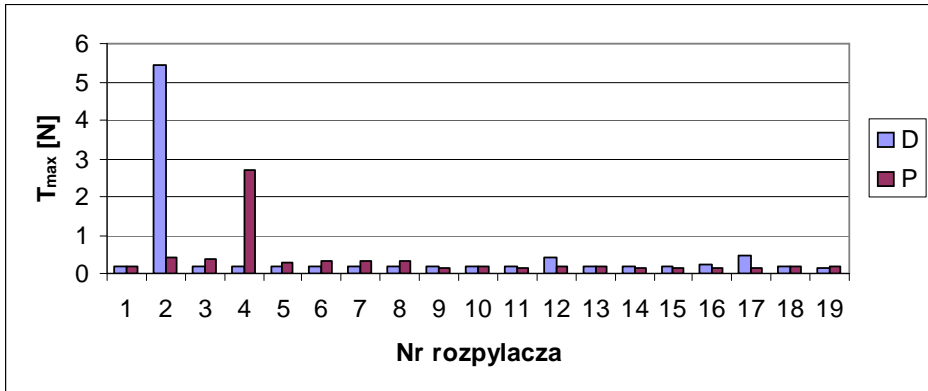
Badano także wpływ rodzaju paliwa na wartość maksymalnej siły tarcia badanych rozpylaczy, co dla przykładowych rozpylaczy przedstawiono na **Rys. 12**. Z **Rys. 12** wynika, że większe wartości maksymalnej siły tarcia wystąpiły w przeważającej liczbie przypadków dla rozpylaczy przeznaczonych do wtrysku oleju napędowego, który ma gorsze własności smarne niż paliwa pozostałościowe. Gorsze własności smarne i większa skłonność do zacierania w środowisku paliw destylacyjnych wynika z ich mniejszej lepkości i mniejszej zawartości siarki oraz mniejszego zanieczyszczenia [**L. 16, 17**]. Tylko w przypadku rozpylaczy do wtrysku oleju napędowego zachodziła konieczność wykorzystania stanowiska do badań wytrzymałości na rozciąganie.



Rys. 11. Wpływ średniego luzu średnicowego na wartości maksymalnej siły tarcia między korpusami i iglicami badanych rozpylaczy wtryskiwaczy

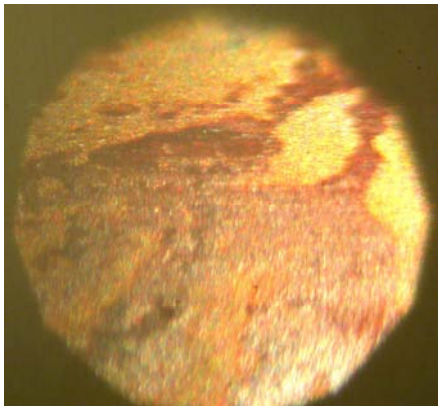
Fig. 11. Influence of average diameter clearance on the maxim friction force between bodies and nozzle needles of investigated injector nozzles

Przykładowe zdjęcia mikroskopowe dwóch powierzchni iglic, dla których wystąpiły znaczne wartości maksymalnej siły tarcia, przedstawiono na **Rys. 13** i **14**. Zdjęcia wykonano przy połączeniu mikroskopu o powiększeniu 50x i aparatu cyfrowego Nikon Coolpix. Wśród przyczyn zmian powierzchni wpływających na zwiększoną wartość siły tarcia dominowały osady z paliwa oraz korozja i utlenianie (**Rys. 13**). Na **Rys. 14** przedstawiono fotografię powierzchni zużytej ściernie i odkształconej plastycznie.



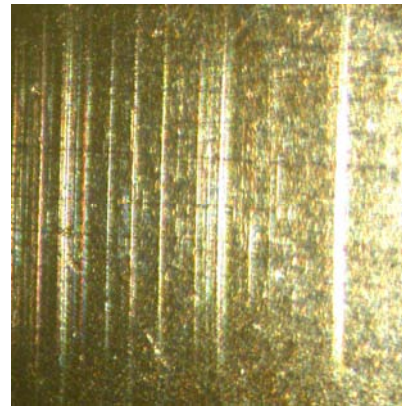
Rys. 12. Wpływ rodzaju paliwa wtryskiwanego przez badane rozpylacze na wartości maksymalnej siły tarcia: *D* – paliwo destylacyjne, *P* – paliwo pozostałościowe

Fig. 12. Influence of type fuel injected by investigated injector nozzles on values of friction force: *D* – diesel fuel, *P* – residual fuel



Rys. 13. Zdjęcie fragmentu powierzchni iglicy rozpylacza pokrytej plamami utleniania

Fig. 13. Photograph of part of the surface of nozzle needle covered oxidation stains



Rys. 14. Zdjęcie mikroskopowe fragmentu iglicy rozpylacza ze śladami zużycia ściernego i odkształceń

Fig. 14. Microscopic photo the fragment of the nozzle needle with signs of the abrasive wear and deformations

OBLICZENIA BŁĘDU BEZWZGLĘDNEGO I WZGLĘDNEGO POMIARU MAKSYMALNEJ SIŁY TARCIA

Wartość błędu bezwzględne $\sigma(T)$ siły tarcia obliczono, wykorzystując zależność:

$$T = m_d \cdot g + G \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

Błąd bezwzględny średni kwadratowy siły tarcia $\sigma(T)$ obliczono różniczkując po poszczególnych zmiennych występujących we wzorze (8) według zależności:

$$\sigma(T) = \sqrt{\left[\frac{\partial T}{\partial m_d} \sigma(m_d)\right]^2 + \left[\frac{\partial T}{\partial G} \sigma(G)\right]^2 + \left[\frac{\partial T}{\partial \alpha} \sigma(\alpha)\right]^2} \quad (9)$$

gdzie: $\sigma(T)$ – błąd bezwzględny siły tarcia [N].

Błąd względny siły tarcia $\bar{\sigma}(T)$ obliczyć można z zależności:

$$\bar{\sigma}(T) = \frac{\sigma(T)}{T} \cdot 100\% \quad (10)$$

Wartości błędu względnego maksymalnej siły tarcia zależą od błędu bezwzględnego średniego kwadratowego i wartości mierzonej siły tarcia, a dla tych wyników 0,1%.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań tribologicznych można sformułować następujące wnioski:

- przedstawione wyniki wskazują, że w eksploatacji wtryskiwaczy silników okrętowych, uszkodzonych lub wymienionych profilaktycznie, mogą wystąpić zróżnicowane oraz znaczące siły tarcia między częściami prowadzącymi korpusu i iglicy rozpylaczy, zakłócające istotnie ich funkcjonowanie;
- przy obrocie iglicy w korpusie rozpylacza zmienia się wartość maksymalnej siły tarcia w wyniku znacznych błędów okrągłości i walcowości oraz zanieczyszczeń, co utrudnia powtarzalność pomiarów;
- zmienne wartości maksymalnej siły tarcia T_{max} przy różnych kątach położenia iglicy w korpusie rozpylaczy świadczą o błędach kształtu części prowadzącej iglicy i korpusu rozpylacza;
- największe zmiany średnic w części prowadzącej korpusu stwierdzono w środkowej części prowadzącej korpusu;
- przeważają małe wartości czasu (kilka sekund) wysuwania się iglicy z korpusu rozpylacza;
- najczęstszymi przyczynami zwiększonego oporu iglic w korpusach rozpylaczy są: występowanie osadów oraz korozji i utleniania;
- maksymalne siły tarcia maleją przy zwiększaniu luzów średnich w wyniku zużycia ubytkowego, a gdy luzy średnie maleją w wyniku osadów i zmian geometrii powierzchni, to rosną maksymalne wartości sił tarcia.

LITERATURA

1. Benajes J., Pastor J. V., Payri R., Plazas A. H.: Analysis of the influence of diesel nozzle geometry in the injection rate characteristic. *Trans. ASME J. Fluids Eng.* 126 № 1, s. 63–71.
2. Daimler C., Güttler J., Hora P.: Einspritzdüse für ein Einspritzsystem sowie ein Verfahren zur Herstellung einer Einspritzdüse eines Einspritzsystem eines Kraftfahrzeuges. *Das Patent Deutschland* 2004, Nr 10256590.
3. Drozdowski J.: Studium obciążeń cieplnych, kawitacji i niezawodności rozpylaczy silników okrętowych. *Wyd. Wyższej Szkoły Morskiej, Szczecin* 1998.
4. Enthoven J., Spikes H.A.: Infrared and visual study of the mechanism of scuffing. *Tribology Trans.* 1996, t. 39, s. 441–447.
5. Gąsowski W.: Zawieszanie się iglic rozpylaczy silników wysokoprężnych. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 1979 nr 2, s. 245–250.
6. Hebda M., Wachal A.: *Tribologia*, WNT, Warszawa 1980.
7. Idzior M.: Studium optymalizacji parametrów rozpylaczy silników o zapłonie samoczynnym w aspekcie kształtowania ich własności użytkowych. *Rozprawy. Politechnika Poznańska, Poznań* 2004, nr 384.
8. Monieta J., Badanie siły tarcia spoczynkowego w rozpylaczach wtryskiwaczy silników okrętowych z unieruchomionymi iglicami. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* nr 4, s. 63–77, Radom 2007.
9. Monieta J.: Identyfikacja rodzajów zużycia rozpylaczy wtryskiwaczy okrętowych silników spalinowych. *Combustion Engines* 2009-SC1, s. 157–163.
10. Monieta J., Kusiak P.: Badanie zużycia przez utlenianie i korozję powierzchni rozpylaczy wtryskiwaczy silników okrętowych. *Problemy Eksploatacji* 2008 nr 1, s. 113–120.
11. Monieta J., Lorek Ł.: Researches of friction force of injector nozzles in injector bodies of marine diesel engines in the presence of lubricating compound. *Journal of Polish CIMAC* 2008, Vol. 3, No. 1, s. 111–121.
12. Monieta J., Łukomski M.: Metody i środki oceny stanu technicznego rozpylaczy wtryskiwaczy silników okrętowych typu AL20/24. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej*, 2005 nr 5, s. 383–391.
13. PN-91/M-0430. *Tribologia. Terminologia podstawowa*.
14. Stoeckli M., Affolter P., Otto H.: Durability and long-term stability of electronic fuel injection systems for Diesel, HFO and gas engines. *CIMAC* 2007, Wiena 2007 paper 23, s. 1–9.
15. Szczerek M., Tuszyński W.: *Badania tribologiczne. Zacieranie*. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2000.
16. Włodarski J.K.: *Tłokowe silniki spalinowe – procesy trybologiczne*. WKiŁ, Warszawa 1982.
17. Włodarski J.K.: *Stany eksploatacyjne okrętowych silników spalinowych*. Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Morskiej, Gdynia 2001, s. 175.
18. Yasunori K.: Fuel injection nozzle with a member to reduce the frictional force developed between parts during the clamping. *Patent USA* 2002, № 20020109021.

Summary

This article presents the results of the friction force between the needle and the nozzle body of marine diesel engines. Injectors made of the alloy steel of piston internal combustion engines fed with diesel oil or residual fuel were investigated. Injector nozzles from among the jets operated in natural conditions in which was found the state of unfitness or replaced preventively are investigated. Nozzles were tested in the presence of fuel oil or oil with similar properties, as well as measurements of ejection time choking the nozzle at different angles of the rotation respect to the longitudinal axis of the nozzle needle in the body.

Geometrical measurements were made of precision pairs to investigate the effect of the dimensions and shape and location errors on the values of friction forces. The influence of the angular position of the needle tip relative to the body are investigated, and precise measurements of the diameter clearance between the frictional couple were taken to study its effect on the value of the maximum friction force.

The research of the frictional forces was carried at two test stands, depending on its value. The first test stand was designed by the author for appointing the maximum using gravitational loading, and the second stand was intended to research the durability of samples to stretching.

The value of the maximum force of friction between the body and the needle tip is influenced by the condition of mating surfaces and their mutual positioning, pollution, etc.

The research aimed to determine the component of friction force and/or the time of the withdraw of the needle depending on the angle of the turnover of the needle in the nozzle body, clearance, kind, applied medium and masses of the needle.

