

Karol Grudziński, Wiesław Jaroszewicz, Jędrzej Ratajczak, Stanisław Orzechowski
Marine Service Jaroszewicz S.C., Szczecin

40 LAT STOSOWANIA TWORZYW W POSADAWIANIU MASZYN I NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH NA FUNDAMENTACH

40 YEARS APPLICATION OF RESINS IN THE SEATING OF ELECTRIC MACHINES AND ELECTRODRIVES ON FOUNDATIONS

Streszczenie: W pracy przedstawiono efekty wieloletniej działalności jej autorów w zakresie posadawiania maszyn i napędów elektrycznych na fundamentach z użyciem tworzyw, w szczególności tworzywa EPY. Omówiono techniczne, ekonomiczne i eksploatacyjne aspekty stosowania podkładek fundamentowych w posadawianiu maszyn i urządzeń. Na podstawie badań porównawczych wyjaśniono, dlaczego podkładki fundamentowe odlewane z tworzywa w posadowieniach maszyn, lepiej spełniają swoje zadania techniczne niż tradycyjnie stosowane do tego celu podkładki stalowe.

Abstract: The paper presents the results of long-term activity of the authors in the modern mounting technology of electric machines and devices on foundations with use of Polish resins compounds intended for foundation chocks. The technical, economic and operational aspects of the use of foundation chocks in the machinery seating are discussed. Based on comparative studies it has been explained of why foundation chocks cast of resin in machinery seating on the foundations, better fulfill their technical tasks than the traditionally used for this purpose steel chocks.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, podkładki z tworzywa, tworzywo EPY

Keywords: electrical machines, resin chocks, EPY resin

1. Wstęp

Jakość pracy, niezawodność i trwałość maszyn i urządzeń zależą nie tylko od ich konstrukcji i jakości wykonania, ale także - w dużym stopniu - od rodzaju i jakości wykonania ich posadowień na fundamencie w miejscu eksploatacji. Posadawianie maszyn dokonywane jest zwykle nie bezpośrednio na powierzchniach oporowych fundamentów, lecz przy zastosowaniu pewnej liczby odpowiednio dopasowanych fundamentowych podkładek wyrównawczych, wykonywanych z materiału o dużej sztywności. W posadowieniach tradycyjnych, podkładki fundamentowe wykonywane były zwykle z metalu (najczęściej stali). Obecnie są one coraz częściej odlewane (na gotowo) w miejscu ich zastosowania, ze specjalnie do tego celu opracowanych tworzyw polimerowych.

Przemysł okrętowy, jako pierwszy w Polsce, dostrzegając znaczne korzyści z zastosowania nowej metody posadawiania maszyn i chcąc uniezależnić się od kosztownego (dewizowego wówczas) importu w tym zakresie, wystąpił w 1969 roku do Politechniki Szczecińskiej z inicjatywą podjęcia prac badawczych nad opracowaniem własnych (polskich) kompozycji na podkładki fundamentowe oraz technologii

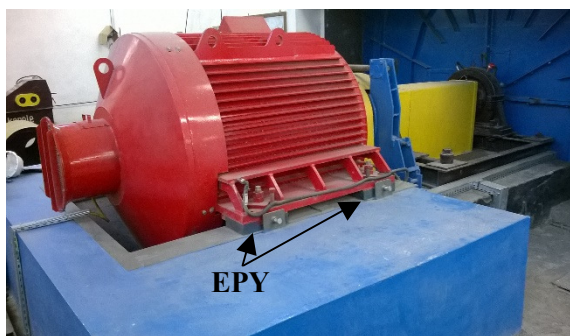
posadawiania maszyn i urządzeń okrętowych z ich użyciem. Pierwsze zastosowanie praktyczne polskiego tworzywa na statku morskim (m/s „Kapitan Ledóchowski”) miało miejsce w 1974 roku. Od tamtego czasu prowadzone były dalsze systematyczne prace badawcze, realizowane w ścisłym powiązaniu z działalnością praktyczną. Dotyczyły one doskonalenia technologicznych i termomechanicznych właściwości tworzywa oraz badań ściśle związanych z jego zastosowaniem praktycznym w różnych warunkach. Efekty tych prac zdobyły szerokie uznanie w kraju i na świecie. Technologia została zaadoptowana i z powodzeniem wdrożona do posadowień maszyn i obiektów lądowych. Pierwsze posadowienia maszyn elektrycznych z zastosowaniem podkładek fundamentowych odlewanych z tworzywa wykonano w 1977 roku.

Warto tutaj zaznaczyć, iż Polska jest aktualnie jednym z niewielu krajów na świecie, w których produkowane jest tego rodzaju tworzywo, mające wszystkie certyfikaty, niezbędne do jego szerokiego stosowania w posadawianiu wszelkiego rodzaju maszyn i urządzeń, eksploatowanych na statkach morskich i na lądzie.

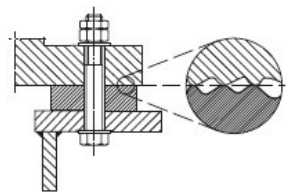
2. Charakterystyka posadowień tradycyjnych i nowoczesnych

Posadowienia ciężkich maszyn i urządzeń na fundamentach, wykonywane w sposób tradycyjny na metalowych podkładkach wyrównawczych, stwarzają wiele problemów ich wykonawcom, a później użytkownikom posadowionych w ten sposób obiektów. Dotyczy to maszyn i urządzeń generujących duże siły dynamiczne i drgania. W szczególności zaś zagadnienie to jest w obecnym czasie bardzo aktualne w odniesieniu do maszyn elektrycznych /silniki, prądnice/, eksploatowanych w przemyśle okrętowym, wydobywczym, hutniczym i innych. Z licznych publikacji i własnych badań [1] wynika, że fundamentowe złącza śrubowe, z tradycyjnie stosowanymi podkładkami metalowymi, stanowią często najsłabsze ogniwo całego układu mechanicznego, w którym one występują. W szczególności zaś, jest ono w obecnym czasie bardzo aktualne w odniesieniu do maszyn elektrycznych /silniki, prądnice/, eksploatowanych w przemyśle okrętowym, wydobywczym, hutniczym i innych.

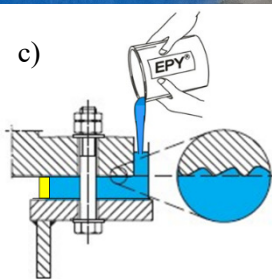
a)



b)



c)



Rys. 1. Schemat posadowienia silnika elektrycznego (a) napędu wentylatora w KWK Makoszowy, przy zastosowaniu podkładek fundamentowych wykonywanych dotychczas ze stali (b) lub odlanych obecnie z tworzywa EPY (a, c)

Wymagania dotyczące posadowienia tego typu obiektów są bardzo wysokie i ściśle określone w instrukcji producentów oraz przepisach in-

stytucji nadzorujących ich montaż i eksploatację. Według aktualnie obowiązujących w tym zakresie przepisów, montaż sztywny, może być wykonany w sposób tradycyjny - na podkładkach stalowych - albo też w sposób nowoczesny - na podkładkach odlewanych z tworzywa, przeznaczonego do tego celu.

Tradycyjny montaż najbardziej odpowiedzialnych maszyn, przy stosowaniu do tego celu podkładek stalowych (rys. 1b), jest zadaniem bardzo trudnym, uciążliwym, pracochłonnym i kosztownym. Oprócz dużych trudności i kosztów wykonawczych, posadowienia na tradycyjnych podkładkach stalowych charakteryzuje ogólnie niska jakość techniczna i duża zawodność w eksploatacji. Dotyczy to nie tylko maszyn i urządzeń okrętowych, ale także - w większym lub mniejszym stopniu - wielu różnych maszyn i urządzeń technicznych eksploatowanych na lądzie, w tym maszyn i napędów elektrycznych.

Nowoczesna technologia posadawiania maszyn z użyciem tworzywa, polega na odpowiednim ustawieniu montowanego obiektu na fundamencie w pozycji roboczej, przy użyciu specjalnych śrub ustawczych lub klinów. Następnie wykonuje się z pianki poliuretanowej oraz cienkiej blachy formy odlewniczej, w miejscach występowania podkładek fundamentowych i zalewa je ciekłą kompozycją (rys. 1c), wymieszaną przed tym z utwardzaczem. Dzięki zastosowaniu odpowiedniego nadlewka, tworzywo bardzo dobrze wypełnia całą przestrzeń zalewową i samoczynnie dopasowuje się do wszystkich makro- i mikronierówności powierzchni oporowych fundamentu i podstawy maszyny. Po utwardzeniu się tworzywa uzyskuje się bardzo dobrze dopasowane podkładki fundamentowej, spełniające wysokie wymagania montażowe stawiane posadowieniom silników napędu głównego statków morskich i zapewniające im odpowiednią stabilność i trwałość w eksploatacji.

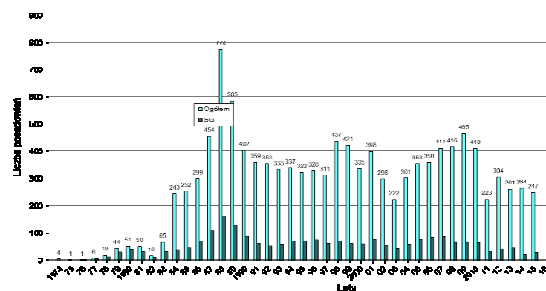
Dzięki licznym zaletom, opracowane na podkładki fundamentowe tworzywa stosowane są obecnie także coraz częściej i szerzej w posadawianiu wielu różnych ciężkich maszyn i urządzeń lądowych. W szczególności zaś dotyczy to posadawiania nowych oraz modernizacji posadowień eksploatowanych już od dłuższego czasu silników elektrycznych, wentylatorów i pomp o dużych wydajnościach, maszyn wyciągowych, etc.

3. Tworzywo EPY stosowane na podkładki fundamentowe w posadawianiu maszyn i urządzeń

Polskie tworzywo EPY i nowoczesna metoda posadawiania maszyn z jego użyciem, są efektem wieloletnich prac badawczo-rozwojowych, prowadzonych systematycznie od 1969 roku w Katedrze Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Szczecińskiej. Badania te prowadzone były w ścisłym powiązaniu z pracami wdrożeniowymi, realizowanymi w remoncie i budowie statków morskich. W miarę rozwoju badań i prac wdrożeniowych stosowano różne, udoskonalane stopniowo, wersje tworzywa. Doskonalono termomechaniczne właściwości tworzywa oraz dopracowywano technologię montażu z jego użyciem, przy uwzględnieniu różnych warunków wykonawczych, występujących w praktyce. Oprócz badań laboratoryjnych, przeprowadzono też wieloletnie badania doświadczalne posadowień. Na podstawie zebranych doświadczeń badawczych i wdrożeniowych, w 1991 roku powstała specjalistyczna firma „Marine Service Jaroszewicz” w Szczecinie, która w sposób profesjonalny zajmuje się wytwarzaniem udoskalonej wersji tworzywa na podkładki fundamentowe (o nazwie EPY®) oraz realizacją prac posadowieniowych.

Tworzywo to oraz technologia montażu maszyn z jego użyciem mają wszystkie certyfikaty (łącznie 35), niezbędne do szerokiego ich stosowania w montażu maszyn i urządzeń na statkach i platformach morskich oraz w energetyce, górnictwie, hutnictwie, etc.

W 2016 roku minęło ponad 40 lat praktycznego stosowania polskich tworzyw w posadawianiu maszyn i urządzeń. W tym czasie (tj. od 1974 do końca 2015 r.), z użyciem różnych odmian polskiego tworzywa posadowionych zostało łącznie 11732 różnych obiektów, w tym 10328 maszyn i urządzeń okrętowych (2263 silników napędu głównego) oraz 1404 maszyn i urządzeń lądowych, w tym 441 maszyn i napędów elektrycznych. Szczegółowe dane ilościowe, dotyczące wykonanych posadowień w poszczególnych latach przedstawiono na rys. 2, a dotyczące rodzaju posadowionych obiektów podano w tabelicy 1.



Rys. 2. Zestawienie ilościowe posadowień wykonanych w latach 1974 – 2015

Tablica 1. Rodzaje maszyn i urządzeń posadowionych w latach 1974 - 2015

Maszyny i urządzenia okrętowe	Liczba	Maszyny i urządzenia lądowe	Liczba
Silniki główne	2263	Silniki	28
Przekładnie główne	843	Przekładnie	58
Łożyska linii wałów	977	Obrabiarki	47
Maszynki sterowe	332	Łożyska	354
Pochwy i tuleje wałów śrubowych	946	Sprężarki i motosprężarki	55
Tuleje linii steru	779	Tory	84
Windy /kotw., hol., cum., trałowe/	1183	Prasy	89
Agregaty prądotwórcze	216	Turbiny	37
Pompy	759	Wentylatory	59
Zbiorniki	103	Maszyny wyciągowe	7
Inne maszyny i urządzenia	1927	Inne maszyny i urządzenia	586
Razem	10328	Razem	1404
Łącznie okrętowe i lądowe	11732	W tym maszyny i napędy elektr.	441

Tworzywa chemoutwardzalne, o ściśle określonych właściwościach technologicznych i termomechanicznych (po ich utwardzeniu), okazały się materiałem wręcz idealnym w zastosowaniu na podkładki fundamentowe maszyn, a także w montażu wielu różnych elementów konstrukcyjnych. O ich praktycznym zastosowaniu zdecydowały przede wszystkim takie czynniki, jak:

- możliwość wymieszania kompozycji i łatwego odlewania (na gotowo) podkładek fundamentowych o dowolnych wymiarach i kształtach w miejscu ich zastosowania,
- bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe utwardzonego tworzywa, przy długotrwałych obciążeniach statycznych i dynamicznych,
- mały skurcz, duża odporność na pęcznienie i działanie czynników atmosferycznych oraz środków agresywnych,
- bardzo dobre samoczynne dopasowanie zalewanego tworzywa na dużej powierzchni styku podkładki z fundamentem i podstawą maszyny,
- duża wartość współczynnika tarcia (rzędu 0,8), zapewniająca dobre przenoszenie sił stycznych bez występowania mikropoślizgów, frettingu i innych form zużycia powierzchni kontaktowych,
- znaczne uproszczenie i ułatwienie prac montażowych oraz skrócenie czasu i obniżenie kosztu posadowienia maszyn i urządzeń na fundamencie,
- większe w porównaniu ze stalą tłumienie drgań mechanicznych i lepsza izolacja dźwięków materiałowych.

Podkładki z tworzywa są wygodne w zastosowaniu do montażu nowych urządzeń, jak również w pracach remontowych, wykonywanych z dala od warsztatu naprawczego. Oprócz zgrubnego mechanicznego oczyszczenia i odłuszczenia powierzchni fundamentu nie jest wymagane żadne specjalne jej przygotowanie. Występowanie nierówności, wżerów korozyjnych i nierównoległości powierzchni, utrudniające lub wręcz uniemożliwiające stosowanie tradycyjnych podkładek metalowych, w przypadku odlewania podkładek z tworzywa nie stanowi żadnej przeszkody w posadawianiu na nich maszyn i urządzeń.

Dzięki licznym zaletom metoda posadawiania maszyn i urządzeń z użyciem tworzywa polimerowego, stosowana jest dzisiaj praktycznie nie tylko w budownictwie okrętowym, gdzie stała się ono już standardem w odniesieniu do wielu różnych maszyn i urządzeń, ale także coraz sze-

rzej w wielu innych dziedzinach techniki i gospodarki, takich jak: przemysł maszynowy, energetyka, budownictwo przemysłowe, górnictwo głębinowe i odkrywkowe, budowa dróg i mostów itp.

4. Badania porównawcze

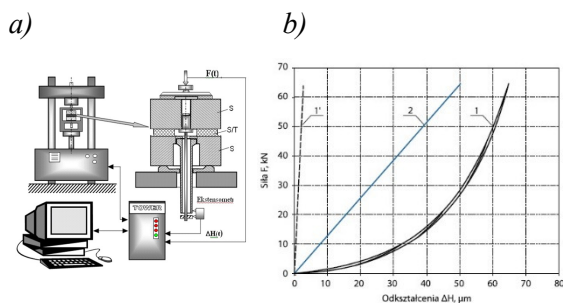
Pierwotnym celem poszukiwania nowych, lepszych rozwiązań, dotyczących posadowień, było uproszczenie prac montażowych i skrócenie czasu ich trwania, przy założeniu, że nie spowoduje to pogorszenia ich jakości technicznej. Zastosowanie podkładek fundamentowych z tworzywa, dało w efekcie znacznie więcej niż oczekiwano na początku. Poprawiło ono też znacznie techniczną jakość posadowienia, gwarantującą lepszą pracę, większą niezawodność i trwałość posadowionym obiektom, a także odczuwalne w praktyce obniżenie poziomu drgań mechanicznych i hałasu. W związku z tym nasuwa się tutaj istotne pytanie, dlaczego podkładki fundamentowe odlewane z tworzywa w tzw. sztywnych posadowieniach maszyn, lepiej spełniają swoje zadania techniczne, niż stosowane tradycyjnie do tego celu podkładki stalowe, pomimo tego, że wytrzymałość i sztywność tworzywa jest mniejsza niż stali?

W celu uzyskania odpowiedzi na to pytanie, mające istotne znaczenie poznawcze i praktyczne, przeprowadzono specjalne badania doświadczalne i analizy porównawcze dla fundamentowych złączy śrubowych z podkładką stalową i odlaną z tworzywa. Poniżej przedstawiono tylko niektóre wyniki tych badań, dające odpowiedź na postawione wyżej pytanie.

Na rysunku 3 przedstawiono schemat stanowiska badawczego oraz porównanie wyznaczonych doświadczalnie charakterystyk odkształceń normalnych dla modeli podkładek fundamentowych, wykonanych w sposób tradycyjny ze stali (krzywa 1) i odlanej z tworzywa EPY (prosta 2). Na rysunku tym pokazano też charakterystykę odkształceń podkładki stalowej, wyznaczoną z klasycznego wzoru Hooke'a (prosta 1'). Widoczna jest duża rozbieżność wyników.

Otrzymane wyniki badań pokazują, że odkształcenia normalne w tego rodzaju „sztywnych” posadowieniach, nie są takie małe, jak to wynika z prostych obliczeń teoretycznych dla podkładki stalowej (rys. 3b, prosta 1'). Występujące tutaj rzeczywiste odkształcenia, w zakresie obciążeń istotnych dla fundamentowych złączy śrubowych maszyn, są znaczne (rys. 3b,

1 i 2). Charakterystyki te obrazują wstępujące w nich zjawiska fizyczne, które odgrywają istotną rolę w tych złączach śrubowych i decydują o ich jakości technicznej.

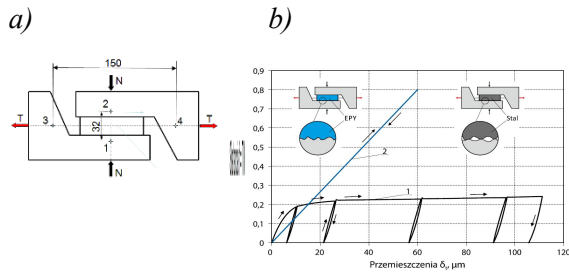


Rys. 3. Badania odkształceń modeli podkładek fundamentowych przy obciążeniach normalnych: a) schemat stanowiska badawczego, b) porównanie charakterystyk odkształceń wyznaczonych dla badanych modeli podkładek wykonanych ze stali (1 i 1') oraz tworzywa (2)

W badanym układzie z podkładką stalową decydującą rolę odgrywają odkształcenia kontaktowe oddziałujących na siebie powierzchni. Ze względu na chropowatość, falistość i błędy kształtu, rzeczywista powierzchnia styku w takich połączeniach stanowi tylko bardzo mały procent ich nominalnej powierzchni styku (rys. 1b). Występują tutaj bardzo duże zróżnicowania i spiętrzenia naprężeń w skali mikroskopowej. Wierzchołki nierówności ulegają znacznym odkształceniom, a ich liczba i charakter odkształceń (sprężysty lub plastyczny) zależą od rodzaju materiału i wartości obciążenia normalnego. Ustabilizowane odkształcenia kontaktowe mają charakter nieliniowo-sprężysty, a ich wartości są wielokrotnie większe od odkształceń materiału tej podkładki, przy założeniu, że występujące w badanym układzie powierzchnie kontaktowe są idealnie płaskie (rys. 3b, krzywe 1 i 1'). Ma to istotny wpływ na zachowanie się fundamentowych złączy śrubowych podczas montażu i obciążeń roboczych. W mikroobszarach styku występują duże zmiany naprężeń, które powodują często tzw. wybijanie i osiadanie oddziałujących na siebie powierzchni, prowadzące do luzowania się nakrętek, wzrostu drgań, urywania śrub i sytuacji awaryjnych. Podkładka odlana z tworzywa przylega ściśle do wszystkich nierówności powierzchni metalowych (rys. 1c). Zapewnia to dobry ciągły kontakt. Nie występują tutaj lokalne spiętrzenia naprężeń i odkształcenia kontaktowe (wierzchołków nierówności), charakterystyczne dla

styku dwóch powierzchni obrobionych mechanicznie. Obciążenie rozkłada się w sposób ciągły na całą nominalną powierzchnię styku, a występujące przy tym naprężenia (naciski powierzchniowe) są dużo mniejsze nie tylko od granicy sprężystości stali, ale także tworzywa. Mierzone dla tego układu efektywne wartości odkształceń ΔH podkładki, są w całości efektem odkształceń jej materiału. Mają charakter liniowo-sprężysty, a ich wartości dobrze pokrywają się z wartościami odkształceń, obliczonymi według wzoru Hooke'a. Zapewnia to dobrą i trwałą współpracę łączonym elementem.

Na rysunku 4a przedstawiono model fundamentowego złącza śrubowego do badań przy stałym obciążeniu normalnym N i zmiennym odciążeniu stycznym T do powierzchni kontaktowych. Rysunek 4b przedstawia wyznaczone doświadczalnie charakterystyki, obrazujące współzależność bezwymiarowego oporu tarcia (określonego stosunkiem $f = T/N$) i względnych przemieszczeń stycznych elementów łączonych, dla badanych modeli fundamentowych złączy śrubowych z podkładką stalową (krzywa 1) i odlaną z tworzywa (prosta 2). Przemieszczenia względne elementów łączonych mierzone były w punktach 1 i 2, pokazanych na rys. 4a. Już na pierwszy rzut oka widoczne są tutaj istotne różnice jakościowe i ilościowe otrzymanych wyników. Charakterystyka tarcia dla złącza z podkładką stalową (rys. 4b, krzywa 1), od samego początku ma przebieg nieliniowy. Oporom tarcia (równoważącym obciążenie zewnętrzne T), towarzyszą znaczne przemieszczenia łączonych ze sobą elementów. Mają one charakter sprężysto-plastyczny, przy czym udział przemieszczeń plastycznych (trwałych) zwiększa się znacznie w miarę wzrostu obciążenia stycznego. Przemieszczenia te są w głównej mierze efektem mikroślizgów, występujących w kontakcie oddziałujących na siebie nierówności powierzchni. Mogą one osiągać znaczne wartości przed zerwaniem styku i wystąpieniem makroślizgu (tarcia kinetycznego). Wpływ odkształceń sprężystych na te przemieszczenia jest bardzo mały. Odkształcenia sprężyste, występujące w materiale i kontakcie elementów łączonych mają przebiegi liniowe. Obrazują je charakterystyki wyznaczone podczas odciążania i ponownego obciążania badanego złącza (rys. 4b, krzywa 1).



Rys. 4. Schemat i wyniki badań przemieszczeń stycznych i tarcia w modelach fundamentowych złączy śrubowych maszyn z podkładką stalową i odlaną z tworzywa EPY, przy stałym obciążeniu normalnym i zmiennym obciążeniu stycznym

Charakterystyka tarcia dla złącza z podkładką z tworzywa ma przebieg liniowy (rys. 4b, prosta 2). Występujące w tym wypadku opory tarcia są proporcjonalne do względnych przemieszczeń stycznych łączonych elementów. Przesunięcia te są w całości efektem odkształceń sprężystych materiału łączonych elementów, a w głównej mierze podkładki z tworzywa. W tym wypadku oddziałujące na siebie powierzchnie podkładki i elementów łączonych przylegają ściśle do siebie. Nie występują tutaj kontaktowe odkształcenia styczne ani też mikropoślizgi, nawet wtedy, gdy siła obciążająca T jest ponad 3-krotnie większa od maksymalnej siły obciążającej złącze z podkładką stalową.

Maksymalna wyznaczona wartość współczynnika tarcia dla podkładki stalowej $\mu_s = 0,24$, a dla podkładki z tworzywa $\mu_t = 0,8$. Jest ona 3,3 razy większa od wartości współczynnika tarcia w złączu z podkładką stalową, przy czym nie jest to maksymalna graniczna wartość tego współczynnika, przy której występuje zerwanie styku ciernego. Ze względu na obawę uszkodzenia ekstensometrów, zaniechano w badaniach dalszego zwiększania siły obciążającej T . Należy tutaj zaznaczyć, że podkładki z tworzywa nie były przyklejone do powierzchni metalowych. W celu umożliwienia łatwego demontażu powierzchnie elementów łączonych napryskane zostały cienką warstwą środka antyadhezyjnego (ACMOS 70 2406), stosowanego w praktyce.

5. Podsumowanie i wnioski

Podsumowując wyniki badań można stwierdzić, iż w fundamentowych złączach śrubowych z podkładką stalową decydującą rolę odgrywają zjawiska kontaktowe, występujące w połącze-

niach stykowych podkładki z fundamentem i podstawą maszyny.

W złączach śrubowych z podkładką z tworzywa, wykonanych odpowiednio, nie ma mechanizmów powodujących degradację połączeń stykowych ani też materiału podkładki i elementów łączonych, nawet przy obciążeniach dużo (3-krotnie) większych, niż obciążenia graniczne dla złączy z podkładką stalową. Są one też odporne na korozję i działanie czynników atmosferycznych oraz substancji chemicznych. Ma to duże znaczenie praktyczne. Zapewniają one dobrą stabilną pracę, dużą niezawodność i trwałość posadowionym obiektom, bez potrzeby stosowania ciągłego i uciążliwego ich nadzoru. Złącza te mają liniowo-sprężyste charakterystyki odkształceń i tłumienie wiskotyczne, dzięki czemu są one łatwe do modelowania i analizy teoretycznej. Dużą praktyczną zaletą stosowania podkładek z tworzywa jest łatwość ich wykonania.

6. Literatura

- [1]. Grudziński K., Jaroszewicz W., Ratajczak J., Urbaniak M., Grudziński P.: "Montaż maszyn i urządzeń z użyciem tworzywa EPY", . PPH ZAPOL, Dmochowski, Sobczyk, Spółka jawna, Szczecin 2014.