

## Физически предпоставки на вакуумната трибология

Юлика Симеонова

Институт за космически изследвания, БАН

Проблемите на трибологичните процеси (триене, износване и смазване) във вакуум възникнаха по същество при създаване на първите изкуствени спътници на Земята и са свързани с изучаването и използването на космическото пространство. Поради това космическата трибология често е наричана вакуумна трибология.

Една от нейните съществени задачи е да осигури надеждна експлоатация на триещите елементи в среда със силно намалена плътност, обеднена по отношение на кислород и влага [1], където конвекционното охлаждане и традиционното смазване отсъстват [2].

Развитието на прецизните вакуумни технологии и техника разшири областта на приложение на космическата трибология и я направи актуална и в земни условия. Ежедневната практическа дейност на широк кръг специалисти — механици, технолози, конструктори и др., касае нейната специфика. Изхождайки от интереса към тази област, в статията се прави опит да се очертаят някои специфични характеристики на работещата във вакуум трибодвойка и се анализират някои физически предпоставки на вакуумната трибология.

Трибологичните процеси във вакуум са твърде сложни и нееднозначни, с предпоставки, изградени предимно феноменологично. Основните параметри се определят експериментално, а характерните зависимости носят емпиричен характер. Така например според една от най-разпространените и достигнали значително развитие теории — молекулно-механичната, коефициентът на триене  $f$  се определя, като се отчитат деформирането на материала и преодоляването на молекулните връзки в зоната на контакта [3].

$$(1) \quad f = \frac{T}{HB} + b + 0,44 \left( \frac{h}{r} \right)^{\frac{1}{2}},$$

където  $T$  определя силата на адхезионната връзка при срязване на по-мекия материал,  $HB$  е твърдостта на по-мекия материал,  $b$  — коефициентът, отчитащ връзката между адхезията и натоварването в контакта,  $h$  и  $r$  съответно са дълбочината и радиусът на внедряване на микронеровностите.

Тази често използвана формула при триенето във вакуум е неприложима. Тя не отчита изменението на състоянието на триещите повърхности и на работната среда, нарастването на адхезията и на пластичната деформация, както и промените при газовата проводимост на контактната хлабина [4]. Опитът показва, че трибопроцесите във вакуум са много чувствителни към собственото газоотделяне на материалите и сорбционните процеси в контактната зона. Това налага специализиран подход при определяне на трибологичните показатели. Така например коефициентът на триене се определя в условията на висок или свръхвисок вакуум и неговата стойност надвишава тази при триенето на въздух, както показват посочените в табл. 1 стойности на някои използвани в практиката материали [5, 6].

От експериментите следва, че при всяка работеща във вакуум трибодвойка има критично налягане на остатъчния газ в зоната на контакта, при което триенето и износването значително нарастват. То се определя по формулата

$$(2) \quad P_{кр} = P_0 + P_T,$$

където  $P_0$  е налягането на остатъчния газ във вакуумната система,  $P_T$  — налягането в контактната зона в процеса на триене, зависещо от газоотделянето и от проводимостта на контактната хлабина. Зависи още от структурата и от технологията на взаимодействащите материали, от трибологичния режим, от конструкцията на трибовъзела и др. При работа на съчмен лагер във вакуум това налягане например може да се определи с израза [7]

$$(3) \quad P_T = 9,4 \cdot 10^{-11} \frac{z \lambda n (MT)^{1/2} (1 + \zeta)}{\alpha},$$

където  $z$  е броят на съчмите,  $\lambda$  — параметърът, отчитащ реалната гладкост на повърхността на съчмите,  $\zeta$  — ъгълът на контакта на съчмите с канала,  $\alpha$  — коефициентът на акомодация,  $M$  — молекулната маса на газа,  $T$  — температурата на газа в К и  $n$  — скоростта на въртене на вътрешния пръстен (обороти в минута). Зависимостта е емпирична и позволява да се оцени влиянието на работната среда (вакуума) върху работоспособността на лагера и дава известна възможност за конструктивно оптимизиране на трибовъзела, изхождайки от това, че  $P_T < P_{кр}$ . За космическото уредостроене този въпрос е актуален, тъй като използваните съчмени лагери често

Таблица 1

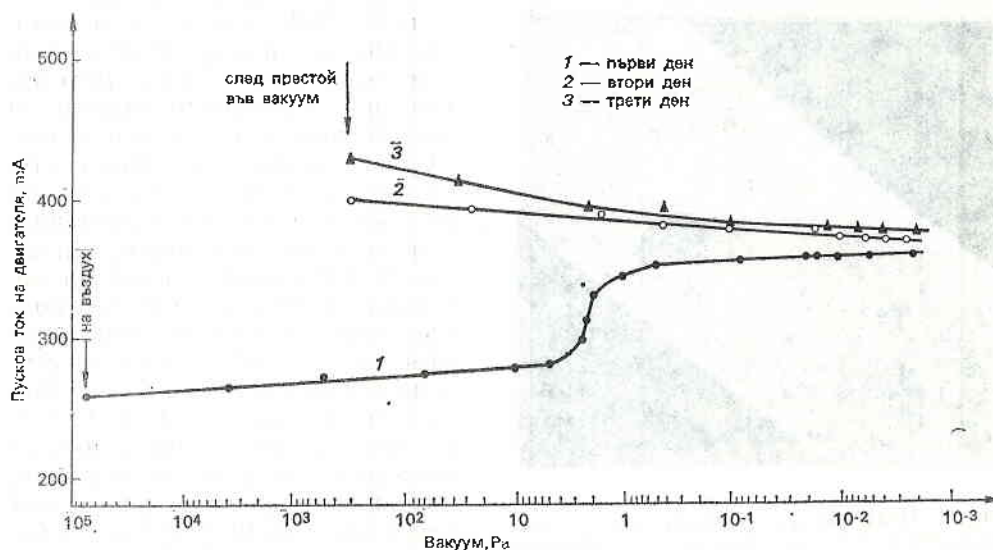
Трибодвойка	Коефициент на триене		Трибодвойка	Коефициент на триене	
	въздух	вакуум		въздух	вакуум
Fe — Fe	0,3	1,9	Ta — Ta	0,2	0,9
Fe — Pb	0,9	0,4	Mo — Mo	1,0	2,5
Стомана — неръждаема стомана	0,5	2,9	Cr — Cr	0,6	3,0
Неръждаема стомана — алуминий	0,4	0,3	W — W	0,2	1,4
Неръждаема стомана — месинг	0,4	0,8	Au — Au	0,6	4,5
Стомана ШХ-15 — мед	0,7	1,0	Sn — Sn	1,0	1,0
Месинг — месинг	0,4	0,7	Pb — Pb	1,0	1,9
Берилиев бронз — берилиев бронз	0,7	1,1	Метал — тсфлон	0,03—0,04	0,04
Al — Al	0,8	1,6—4,2	Метал — полиамид	1,0	1,9
Cu — Cu	0,5—1,0	4,8—21,0	Cu — MoS <sub>2</sub>	0,2	0,07
Cu — Ni	0,6	1,5—2,0	Cu — W	0,3	0,6

са подложени на продължителна работа във вакуум при строгите изисквания за надеждност и дълготрайност.

Износването на триещите повърхности зависи от степента на вакуума [8]. Експериментално са установени три области на влияние. Първата се отнася за т. нар. „област на слабо разреждане“ (до 10 Pa), при която окисните слоеве върху контактуващите повърхности имат решаващо значение. При втората (до 1 Pa) е характерно това, че окисите започват да се разрушават необратимо. При третата настъпва т. нар. „адаптация на триещата двойка“, при която износването слабо се променя. Началото на тази област е спорно поради влиянието на газоотделянето и на състава на остатъчния газ в контактната хлабина, на състоянието на повърхностите, на технологията на взаимодействащите материали и други [2].

Нашият опит показва, че характерът на влияние на степента на вакуума върху коефициента на триене има аналогичен характер. Това се вижда на фиг. 1, където е показана зависимостта на пусковия ток на двигателя, пропорционален на коефициента на триене, от степента на вакуума при сухо триене в трибодвойка от системата „вал—втулка“ при въртливо-възвратно движение със скорост 17,5<sup>o</sup>/s [9]. Валът е направен от алуминиева сплав, а втулката от бронз.

Промените при взаимодействащите повърхности тук започват забележимо след 5 Pa, а адаптацията в трибодвойката след  $5 \cdot 10^{-1}$  Pa. Кривата 1 отразява промените през първия ден от работата на трибодвойката във вакуум — от включването на двигателя и пускането на вакуумната система до получаването на висок вакуум. Тук се регистрират налягането в системата (Pa) и пусковият ток на двигателя в двете крайни положения на реверсиране посоката на движението. Нарастването на тока, характерно за експлоатацията във вакуум, може да бъде отнесено към нарастването на адхезията вследствие износването на окисите и на газовата десорбция от триещите повърхности. По същество характерът на тази крива отразява трите области на влияние на вакуума като работна среда и е специфичен за вакуумната трибология.



Фиг. 1. Зависимост на пусковия ток на двигателя от степента на вакуума в системата



Характерът на тази зависимост през следващите дни на експлоатация във вакуум (кривите 2 и 3) значително се променя. Приработването в контакта продължава и токът на двигателя, респ. коефициентът на трисне, слабо се променя.

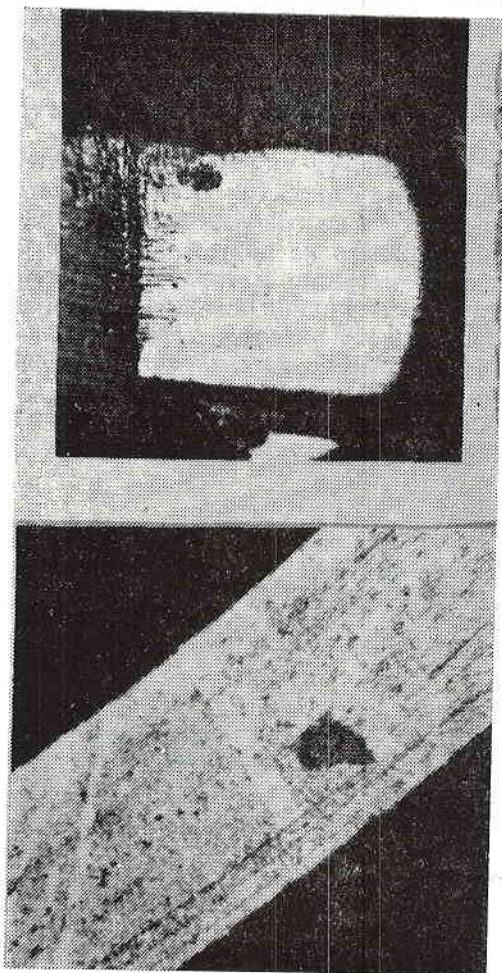
Ефектът на изчистяване на взаимодействащите повърхности, типичен за вакуумната трибология, е добре изразен след прекратяване на движението и престоя на трибодвойката във вакуум. Количествен израз на това е значителното нарастване на стартовата стойност на пусковия ток на двигателя. Продължителността на престоя във вакуум между дните на експлоатация е 12 часа.

Показаната на фиг. 1 зависимост се нарича вакуумна характеристика на трибпроцесите [10] и както показват експериментите, всяка трибодвойка притежава своите специфични особености. Тя се определя експериментално и играе определена роля при окачествяване на взаимодействащите тела като трибовъзел.

Дава възможност за прогнозиране на неговото поведение при продължителна работа в условията на висок вакуум.

Вакуумната трибология като част от съвременната трибологична наука разглежда промените в контакта на взаимодействащите тела като сложна физическо образувание, наричано „трето тяло“, със специфични свойства, произтичащи от самата работна среда. Отсъствието на смазка и на конвекционно охлаждане увеличават температурата в зоната на контакта. Това стимулира пластичната деформация, адхезията, десорбцията и дифузията в приповърхностните слоеве. Вследствие на износването окисите и адсорбционните структури се разрушават необратимо. Третото тяло променя природата си при взаимодействието на изчистените (ювенилните) повърхности, при което се наблюдават пренос на материал, възникване на центрове на задиране, начало на „стик-слип“ ефект и дори образуване на студена заварка и блокиране на движението в контакта [1, 2, 9, 10]. На фиг. 2 като илюстрация са показани центрове на задиране, възникнали при сухо триене във висок вакуум ( $10^{-4}$  Pa) в трибодвойка, описана в [9].

Спецификата на трибпроце-



Фиг. 2. Центрове на задиране върху триещата повърхност на елементи от трибодвойка, работеща във висок вакуум в режим на сухо триене [9].

сите във вакуум, обусловена от физиката на повърхността, от особеностите на средата и закономерностите на взаимодействието поставят пред изследователите сложни проблеми. Например подборът на материалите за трибодвойки за работа във вакуум изисква прецизни изследвания на триещата повърхност със съвременни физически методи за анализ, изучаване на динамиката на газоотделянето в зоната на контакта, съчетани в контрол върху основните трибопоказатели в условията на висок вакуум. Този комплексен подход с наложителен при съставяне на трибовъзли, предназначени за продължителна работа в Космоса.

Натрупаният експериментален опит, включително и от наши изследвания, позволява да се направят някои изводи от по-общ характер.

1. Нетрадиционното протичане на трибопроцесите във вакуум и значителното изменение на трибопоказателите във времето налагат предварително охарактеризиране на материалите в симулирана вакуумна среда, близка до работната.

2. Трибовъзлите за работа във вакуум се нуждаят от експериментално определяне във вакуум на специфичните физико-механични характеристики, отразяващи общите закономерности във вакуумната трибология, а също и на конкретни особености, произтичащи от определени фактори.

3. Трибологичните изследвания във висок вакуум, съчетани с прецизни физически анализи на материалите и на средата, позволяват изучаване на реалната физическа повърхност и на процесите, формиращи третото тяло в екстремални условия.

Изказвам своята благодарност на проф. д.т.н. Нягол Манолов за полезната дискусия в разглежданата област.

## Литература

1. С и л и п, А. А. Трение в космическом вакууме. — Трение и износ, 1, 1980, № 1, с. 168.
2. К а н д е в а, М., Ю. Симеонова, Н. Манолов, В. Пътов. Особенности на трибологичните явления в Космоса. — Аерокосмически изследвания в България, 1991, № 8, с. 33.
3. К р а г е л с к и й, И. В. и др. Трение и износ в вакууме. М., Машиностроение, 1973.
4. М а н о л о в, Н. Т. Пневмо-хидравличен метод в трибологията. Докторска дисертация. София—ВМЕИ „Ленин“, 1984.
5. Трение, изнашивание и смазка. Справочная книга 1. М., Машиностроение, 1978.
6. Трение, изнашивание и смазка. Справочная книга 2. М., Машиностроение, 1979.
7. П о л к о, В. М. Влияние вакуума на работоспособность подшипников качения. — Специформцентр подшип. промыш., 4, 1973.
8. К а н а р ч у к, В. Е. Адаптация материалов к динамическим воздействиям. Киев, Наукова думка, 1986.
9. Симеонова, Ю., Н. Гиздова, А. Шошов, Д. Йорданов. Особенности при използване на алуминиева сплав като елемент от трибодвойка, работеща във вакуум. Национален семинар с международно участие „ТРИБОЛОГИЯ-90“, София, Сборник доклади, т. 1, 1990, с. 130.
10. Н у с и н о в, М. Д. Воздействие и моделирование космического вакуума. М., Машиностроение, 1982.
11. Д р о з д о в, Ю. Н., В. Г. Павлов, В. Н. Пучков. Трение и износ в экстремальных условиях. М., Машиностроение, 1986.
12. F e r r a n t e, J. Applications of surface analysis and surface theory in tribology. — Surface and Interface Analysis, 14, 1989, p. 809.

Постъпила на 18. III. 1991 г.

## Physical prerequisites of vacuum tribology

*Yulika Simeonova*

### (S u m m a r y)

Some specific peculiarities and physical and mechanical characteristics in the field of vacuum tribology are discussed. Experiment is conducted for analysis of some physical prerequisites, concerning objects' interaction contact surface in vacuum as a complex physical formation (third body), determined by the working environment.