



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
Машиностроителен Факултет
Катедра Машинни Елементи и Неметални Конструкции

маг. инж. Кирил Емилов Николов

**ГОЛЯМОГАБАРИТНИ ПЛЪЗГАЩИ ЛАГЕРИ ОТ
ПОЛИМЕРНИ КОМПОЗИТИ С ВЪГЛЕРОДНИ
НАНОСТРУКТУРИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1 Машинно Инженерство

Научна специалност: Машинознание и Машинни Елементи

Научни ръководители: проф. д-р инж. Любомир Димитров
доц. д-р инж. Мартин Раденков

СОФИЯ, 2020 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „МЕНК“ към **Машиностроителен Факултет** на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 18.02.2020 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 16.09.2020 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № **ОЖ-5.1-30** от дата: **18.05.2020** на Ректора на ТУ-София в състав:

- 1. проф. д-р инж. Любомир Ванков Димитров – председател**
- 2. доц. д-р инж. Александър Евгениев Янков – научен секретар**
- 3. проф. д-р инж. Иван Люцканов Балашев**
- 4. доц. д-р инж. Маргарита Милчева Натова**
- 5. доц. д-р инж. Мариел Христов Пенев**

Рецензенти:

- 1. доц.д-р инж. Александър Евгениев Янков**
- 2. доц.д-р инж. Маргарита Милчева Натова**

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на **Машиностроителен Факултет** на ТУ-София, блок №4, кабинет № 3242.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „МЕНК“ на **Машиностроителен Факултет**. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Кирил Николов

Заглавие: Голямогабаритни плъзгащи лагери от полимерни композити с въглеродни наноструктури

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Актуалността на темата се състои в разработването на подобрени материали за голямогабаритни плъзгащи лагери (ГПЛ), изработени от влакнестонапълнени композити с термореактивна матрица. Тя се заключава в стремежа да се намери нов, по-перспективен материал с по-добри физико-механични свойства и метод за формуването на монолитен лагер в един технологичен процес. Старият материално-технологичен вариант за изработване на корабни ГПЛ е достатъчно добър, но консервативен подход.

Механичните пресмятания показват, че якостта на новосъздадените композити е достатъчна за приложението му в ГПЛ в същите размерности като влакнестореактивни аналози. Така определящо се явява компетентното конструиране.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Разработване и изследване на композитни материали на основата на СВМПЕ с въглеродни наноструктури, с цел използването им за изработване на голямогабаритни плъзгащи лагери.

1. Да се изработят заготовки от СВМПЕ с различно процентно съдържание на ВНТ, както и образци за изпитване.
2. За различните композити да се измерят следните характеристики:
 - 2.1. якост на натиск;
 - 2.2. топлоустойчивост;
 - 2.3. износоустойчивост;
 - 2.4. микротвърдост;
3. Да се сравнят получените резултати с тези на материала Tufnol;
4. Да се предложат практически възможности за използване на получения композит в реални машинни елементи;

Научна новост:

Научната новост се състои в предложените нови материали на базата на СВМПЕ с въглеродни наноструктури плюс такива с никелирани въглеродни тръбички и тяхното използване като материал за голямогабаритни плъзгащи лагери. Модификацията с въглеродни нанотръбички цели подобряване на някои свойства: якост, топлопроводност, коефициент на триене и др., особено важни за конкретното приложение. От литературния обзор се вижда, че такава модификация е подходяща за легиране на термопластични материали. Интересно беше да се проучат нейните възможности и при СВМПЕ. Физикохимичните съображения са в полза на подобни изследвания.

От експерименталните данни ясно се вижда, че внасянето на минимални количества въглеродни наноструктури има изразен легиращ ефект, а при същите дози никелирани такива, той е още по-съществен. Тези

результати показват, че между повърхностите на въглеродните структури и СВМПЕ в процеса на термичното формуване на изделията протича физикохимично взаимодействие, което се отразява на цялата маса на полимерната матрица. Между двете субстанции възниква адхезионна „симбиоза”. Тя влияе благоприятно върху формуването на надмолекулните структури на полиолефиновата матрица, която възпроизвежда насцентната структура на СВМПЕ. Проява на тази структурна модификация е синергичният ефект, изразяващ се в подобряване на физикомеханичните свойства на полимерния нанокомпозит.

Практическа приложимост

Основанията за избора на даден материал са много. Те са качествени (нисък коефициент на триене, минимален ефект на студено течене при експлоатационни въздействия, износоустойчивост, абразивна устойчивост, химична устойчивост, удароустойчивост, задоволителна механична якост и др.), технологични (използване на рационални методи за изработка), икономически (ниска цена на материала и на себестойността на изработката на изделието). За сравнение българският СВМПЕ е $15 \div 20$ пъти по-евтин от конкурентните влакнестореактивни аналози (текстолитовите - „Туфнол”).

На този етап в дисертацията е доказана възможността за използване на СВМПЕ, модифициран с чисти и никелирани ВНТ, за изработване на ГГПЛ. Изследванията на самите лагери ще се осъществят на следващ етап, когато ще бъдат изработени самите изделия. Очевидно е, че това е продължение на настоящата работа, което изисква допълнително време, материали и финансови средства.

Апробация

Резултатите от дисертацията са докладвани на международни научни конференции и списания: Младежка Научна Конференция „Машини, Иновации, Технологии“, Българско списание за инженерно проектиране, Journal of the Balkan Tribological Association, Oxidation Communications, International Conference on Tribology SERBIATRIB, както и залегнал като проблем за решаване по проект DA-Space - отворени иновации за повишаване на предприемаческите умения и публично-частното партньорство в региона на река Дунав. Работата е докладвана няколко пъти в катедра МЕНК.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 6 научни статии, от които 1 самостоятелна в: In Proceedings of the 5-th International Conference on Power Transmission, October 05-08, 2016, pp. 23-30, Ohrid, Macedonia, ISSN: 978-608-4624-25-7, ВІСНИК ЖДТУ 2016 №3 (78), pp. 42-48, Ukraine, ISSN: 1728-4260, Българско списание за инженерно проектиране, брой 37, месец октомври, 2018 г., стр. 49-57, ISSN: 1313-7530, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol. 26, No 2, 253 –

268 (2020), ISSN:1310-4772, Scopus SJR: 0.212, Scopus SJR: 0.212, Oxidation Communications 42, No 1, 63–73 (2019), ISSN 0209-4541, Scopus SJR: 0.213, In Proceedings of 16-th International Conference on Tribology SERBIATRIB'19, ISSN: 2620-2832, pp.77-83

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от (76) страници, като включва увод, (2) глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо (95) литературни източници, като (79) са на латиница и (2) на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо (76) фигури и (23) таблици и (3) приложения от 20 страници. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

Голямогабаритни плъзгащи лагери

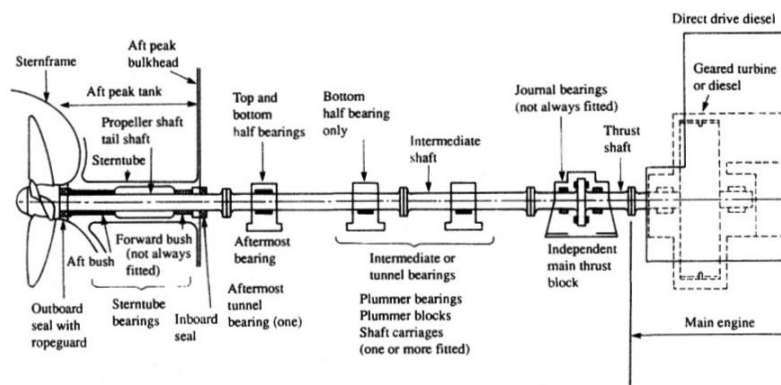
В техническата литературата има много малко информация относно голямогабаритните плъзгащи лагери (ГГПЛ) и няма консенсус относно какви са техните размери, затова се приема, че за голямогабаритни лагери [93,95,88] се считат:

- Радиални лагери: 320÷1000 mm и над 1000 mm;
 - Аксиални лагери: 220÷360 mm и над 360 mm;
- Голямогабаритните плъзгащи лагери намират приложения в [14]:
- Морско и офшорно оборудване (напр. кранове, валолинии на кораби, кули за нефтодобив и други);
 - Стъгаеми мостове;
 - Водоснабдяване: Водоелектрически централи;
 - Куполни кули в стоманодобивната промишленост;
 - Минно дело и преработка: Трошачки, мелници, конвейери;
 - Строителство

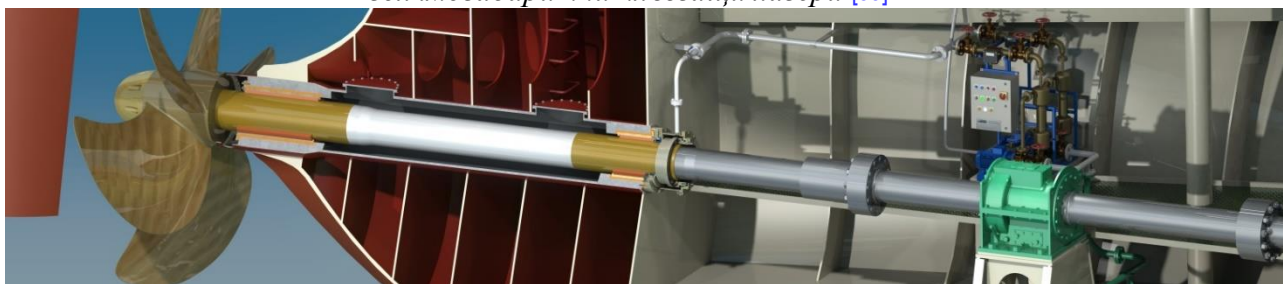
Настоящата разработка е насочена най-вече към ГГПЛ от валолиниите на кораби.

Голямогабаритни плъзгащи лагери на валолинии

Валолинията на корабните задвижвания се състои от няколко вала, които се поддържат от определен брой голямогабаритни плъзгащи лагери. Пример за такава валолиния е показана на **Фиг. I-1**. Последният участък на валолинията включва вала на витлото [83,85].



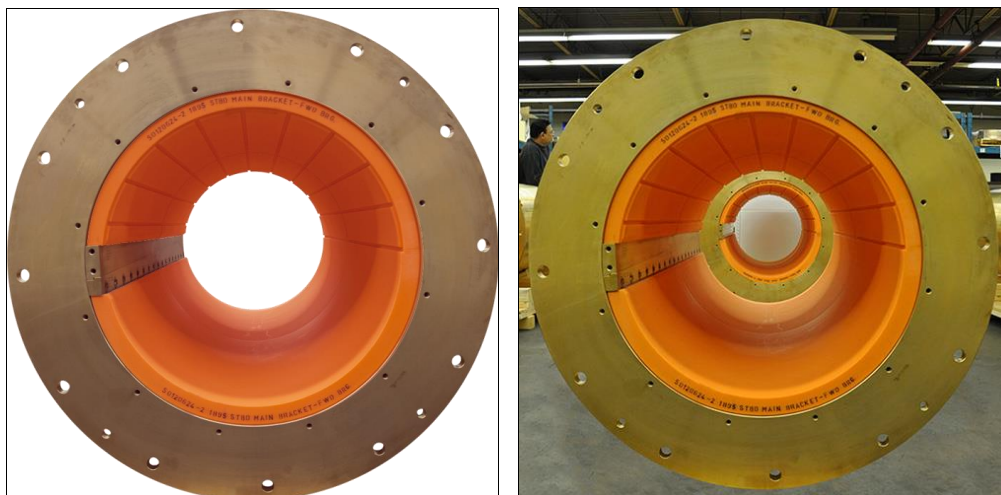
Фиг. I-1 Валовиния на ледоразбивач – междинен и заден вал лагерувани с голямогабаритни плъзгащи лагери [83]



Фиг. I-2 Валовиния с два голямогабаритни плъзгащи полимерни лагери **COMPAS** [88]

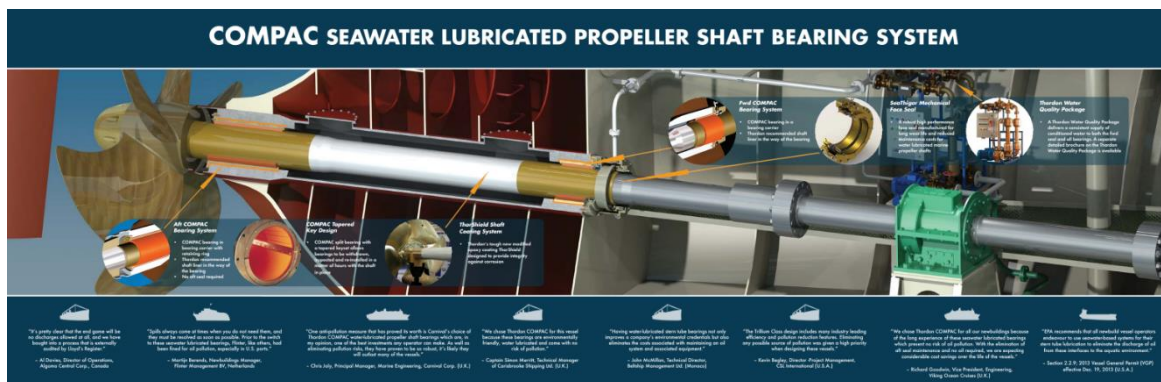
Плъзгащите лагери от валовинията се смазват с масло или морска вода. В настоящата дисертация вниманието е насочено към лагерите, където работният флуид е морска вода.

Една от фирмите, предлагащи голямогабаритни плъзгащи лагери за валовинни е **COMPAS** [88]. Тази фирма предлага ламели от материал **COMPAS**. Това е неметална еластомерна полимерна сплав, като в състава ѝ са включени специални смазочни материали за намаляване на триенето при старт-стоп режима и има сравнително нисък коефициент на триене. За да се насърчи ранното образуване на хидродинамичен филм между вала и лагера, долната (натоварена) част на лагера е без канали, докато горната половина на лагера включва аксиални канали за усилен поток на водата (**Фиг. I-4**).



Фиг. I-4 Голямогабаритен плъзгащ лагер от неметална еластомерна полимерна сплав [88]

Един от предлаганите варианти за охлаждане/смазване, които предлага фирмата е с морска вода – **Фиг. I-5а, Фиг. I-5б**.



Фиг.І-5 а) Система на смазвана с морска вода лагерна система за витлови валове на канадската фирма Thordon [88]



Фиг.І-5 б) Смазвана с морска вода лагерна система за кърмови тръби COMPAC на канадската фирма Thordon [88]

Подобни са голямогабаритните плъзгащи лагери на фирмата Tufnol Composites Ltd. [95], Фиг.І-6.



Фиг.І-6 Плъзгащ лагер с ламели от Tufnol [95]

Необходимо е антифрикционните материали за изработване на ГГПЛ да отговарят на следните основни изисквания:

- да имат нисък коефициент на триене (в съчетание със стоманения вал);
- да имат висока изнosoустойчивост;

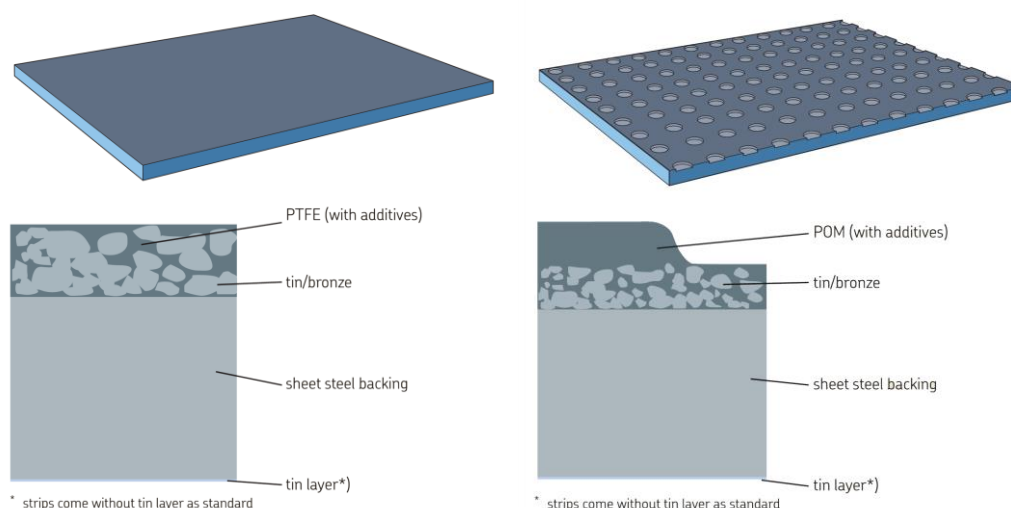
- с достатъчна механична якост;
- лесно да се обработват и сработват в началния период на работа;
- да имат висока топлопроводимост;
- да не са дефицитни и скъпи.

Материали за плъзгащи лагери

От неметалните материали за лагерни втулки се използват главно пластмаси – термореактивни (*текстолит, бакелит, дърволит*) и термопластични (*полиамиди, поликарбонат и др.*). Също така широко приложение намира и материалът марка “*Tufnol*” [95,64], който представлява ламинирана пластмаса, направена от слоеве от хартия или плат, подсилени с фенолна смола и “*Thordon*” [88]. Пластмасите имат добри антифрикционни свойства, голяма износоустойчивост, корозионна и химическа устойчивост, могат да се смазват с вода (за помпи, гребни винтове), но имат лоша топлопроводимост и стареят. Науката постоянно разработва нови, все по-модерни композитни материали, които да имат още по-висока износоустойчивост, по-нисък коефициент на триене и по-дълъг живот, като например материали на базата на СВМПЕ (*Свърхвисокомолекулен Полиетилен*) с различно процентно съдържание на Въглеродни Нанотръби (чисти и с никелово покритие) и други добавки [40,34,11,53,52,81,29,55,59,74,66,54,37,48,41,30,24,73,17,12,3,32,7,27,49]. Композитните плъзгащи лагери се използват предимно за лагери, при които трябва да се поддържат тежки товари и където въртящите или осцилиращите движения са относително бавни.[87]

PTFE композитен материал

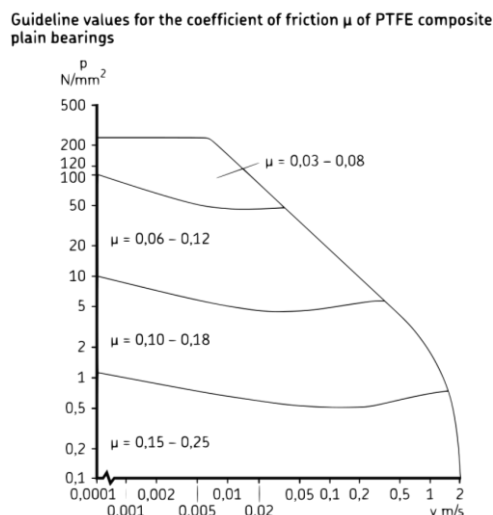
PTFE композитните лагери се състоят от ламаринена стоманена основа, върху която е синтерован порест слой от калай/бронз в интервала $0,2 \div 0,4$ mm (**Фиг. I-7**). PTFE композитните плъзгащи лагери имат добри сухи плъзгащи характеристики и не изискват смазване. Използването на други смазочни материали, които обикновено не са свързани с лагерите като вода, керосин или парафин, мога да бъдат използвани.



Фиг. I-7 PTFE (ляво) и POM (дясно) композитен материал за плъзгащи лагери [87]

РОМ композитен материал

Подобно на лагерите на основа на PTFE композитните лагери от РОМ също имат основа от листов стомана, покрита със слой синтерован калай/бронз с дебелина в интервала $0,2 \div 0,4$ mm (Фиг. I-7). Основната характеристика на тези лагери е относително дебелият (0,3 mm) слой ацетална смола (РОМ - полиоксиметилен), който е здраво прикрепен към синтерования калай/бронзов слой. За композитните PTFE лагери коефициентът на триене μ е между $0,03 \div 0,25$ в зависимост от условията на работа. Подобни стойности се намират за композитния материал на основата на РОМ, но наличието или постоянното снабдяване на смазочни течности служи за намаляване на триенето.



Фиг. I-8 Насочващи стойности за коефициента на триене μ на PTFE композитни плъзгащи лагери [87]

Фенолформалдехидни смоли

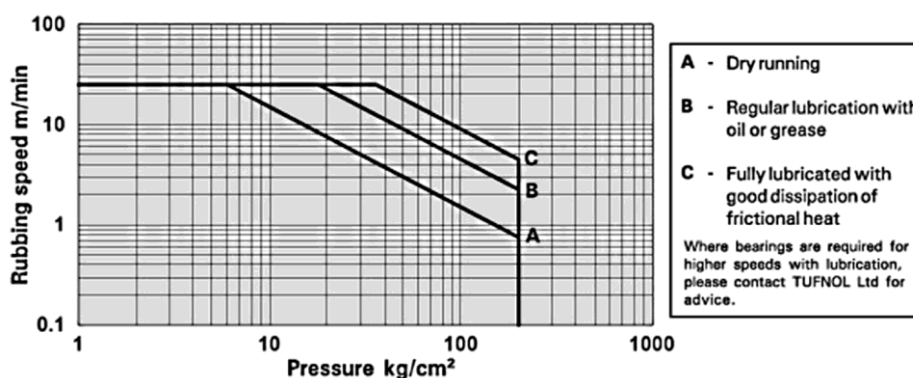
Фенолформалдехидните смоли (*Phenol formaldehyde resins*) – или по-общо фенолни смоли – са синтетични полимери, получени чрез реакцията на фенол или заместен фенол с формалдехид. Тези смоли влизат в състава на

безброй индустриални продукти и са познати чрез различни търговски наименования:

- Бакелитът е на основата на фенолна смола и дървесно брашно;
- „Novotext” е фенол, изотропно усилен с памучни влакна;
- „Oazis” е марка фенолна пяна с отворени клетки, която лесно абсорбира вода и се използва като основа за цветни аранжировки [89];
- „Maritex Aquarius” е висококачествен носещ материал, получен с помощта на новолачна смола, армировка от влакна и добавени смазочни материали за моментни сухи условия на работа. Също така се използва за лагери при ниски скорости и високи налягания;
- „Paxolin” е хартиен продукт, облицован със смола, използван дълго време като основен материал за печатни платки;
- „Tufnol” е ламинирана пластмаса, направена от слоеве от хартия или плат, импрегнирани с фенолна смола. Неговата висока устойчивост към масла и разтворители го е направила подходящ за много инженерни приложения. [23]

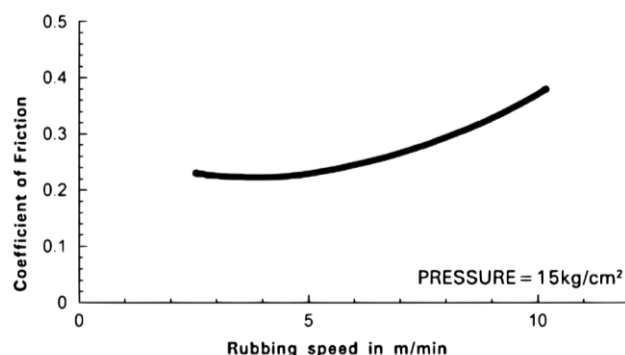
TUFNOL CBM 2008

TUFNOL CBM 2008 е здрав материал за плъзгащи лагери, но с не добра износоустойчивост.[94] Може да се използва при разнообразни въртящи се или възвратно-постъпателни лагери. Подходящ е за много приложения с или без допълнително смазване, въпреки че в повечето случаи работата на лагерите би била значително подобрена чрез използването на подходящо смазващо вещество. Препоръчителните PV граници за TUFNOL CBM 2008 са показани на **Фиг. I-9**.



Фиг. I-9 PV граници за материал TUFNOL CBM 2008 [94]

TUFNOL CBM 2008 е самосмазващ се при леко натоварени приложения. Триенето се понижава при използване на подходящо смазващо вещество. В различни приложения смазването варира от леко нанасяне на смазката при сглобяване до напълно проектирани циркулационни системи с обилни количества филтрирани смазочни материали, изпомпвани под налягане. Най-често срещаните смазочни масла и гresi са подходящи за употреба с TUFNOL.



Фиг. I-10 Изменение на коефициента на триене със скоростта (без смазка)^[94]

Свърхвисокомолекулен полиетилен (СВМПЕ)

Свърхвисокомолекулярният полиетилен (СВМПЕ) има изключително дълги вериги, с молекулна маса обикновено между 3,5 и 7,5 милиона аму (масови атомни единици или далтони) ^[33]. По-дългата верига допринася за по-ефективно разпределение на натоварването по полимерния „гръбнак“ чрез укрепване на междумолекулните взаимодействия. Резултатът е много здрав материал, който се отличава с най-високата якост на удар в сравнение с предшестващите го термопласти. ^[63] Неговите свойства са показани в Табл. I-1.

Табл. I-1 Свойства на СВМПЕ ^[26]

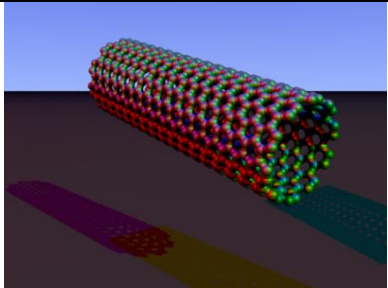
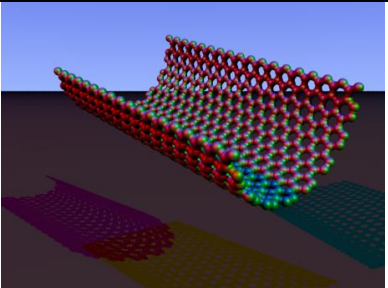
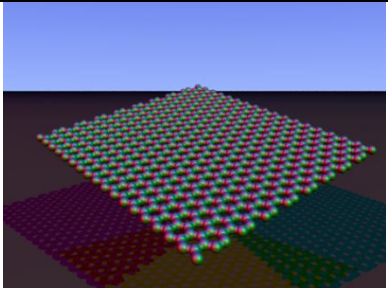
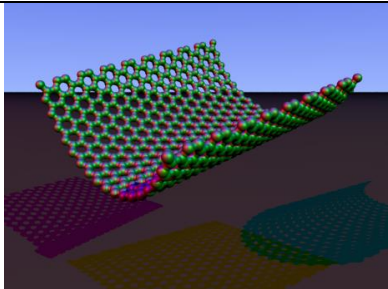
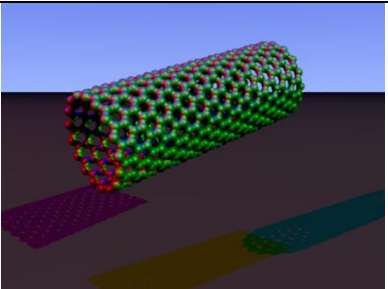
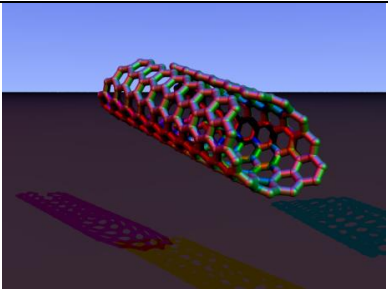
Оптимална работна температура	°C	55	Повърхностна твърдост (Рокуел)	–	RR50
Водна абсорбация	%	0,01	Линейно разширение	–	13
Якост на опън	MPa	35	Запалимост UL 94	–	HB
Модул на огъване	GPa	0,5	Кислороден индекс	%	17
Удължаване при счупване	%	500	Обемно съпротивление	-	18
Опънови напрежения в точката на провлачване	%	25	Диапазон на температура на топене	°C	N/A
Якост на удар	kJ/m	1,06+	Диапазон на температура на матрицата	°C	N/A
Изсушаване на материала	°C	N/A	Свиване на матрицата	%	N/A

Въглеродни нанотръби

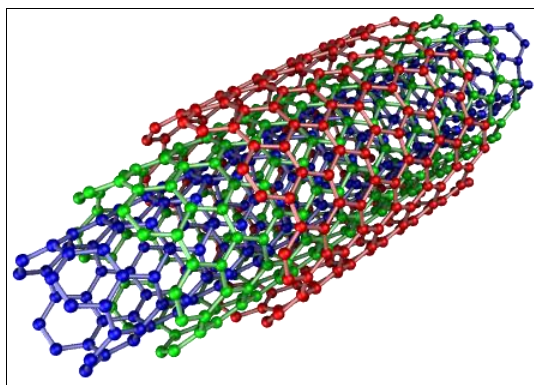
Въглеродните нанотръби са широко проучвани повече от две десетилетия като усиливаща и функционална фаза поради уникалната им структура и комбинация от забележителни механични, електрически, оптични и термични свойства. Формирането на композитни материали с полимери също хвърля обилна светлина върху използването на ВНТ. Те се отличават с висока механична якост, електропроводимост и термична стабилност, докато полимерите могат лесно да бъдат преработвани чрез разтваряне или топене с управляеми структури и ниски разходи. Ето защо много усилия са положени за опознаването на ВНТ/полимерни композитни материали както в научните среди, така и в промишлеността. ВНТ/полимерният материал може би е най-проучваният композитен

материал съгласно броя статии, които наброяват около 30 000 според ISI „Web of Knowledge” на Thomson Reuters.[65]

Табл. I-2 Концепция за ВНТ [4]

		
Дъговидна (Armchair) ВНТ (n, n) т.е. $m = n$	Векторът за трансляция е огънат, докато хиралният вектор остава прав	Графенова нанолента
		
Хиралният вектор е огънат, докато векторът за трансляция остава прав	Зигзагообразна (Zigzag) ВНТ $(n, 0)$	Хирална ВНТ (n, m)

Повечето едностенни нанотръби (ЕВНТ) имат диаметър около 1 нанометър и могат да бъдат милиони пъти по-дълги. Структурата на ЕВНТ може да се концептуализира чрез обвиване на един слой от графит с дебелина 1 атом, наречен *графен*, в непрекъснат цилиндър. Начинът, по който графеновият лист е обвит, се описва от двойка индекси. Числата n и m обозначават броя на единичните вектори по две направления в кристалната решетка на графена, която е с формата на пчелна пита. Ако $m = 0$, нанотръбите се наричат **зигзагообразни**, а ако $n = m$, нанотръбите се наричат **дъговидни** нанотръби. В останалите случаи те се наричат **хирални**. Многостенните нанотръби (МВНТ) се състоят от множество навити слоеве (концентрични тръби) графен.



Фиг. I-14 Тростенна дъговидна въглеродна нанотръба [71]

Табл.І-3 Сравнение на механичните свойства на ВНТ, стомана и кевлар [28,9,43,61]

Материал	Модул на еластичност (ТПа)	Якост на опън (GPa)	Удължение при скъсване (%)
ЕВНТ ^Е	1÷5	13÷53	16
Дъговидни ЕВНТ ^Т	0,94	126,2	23,1
Зигзагообразни ЕВНТ ^Т	0,94	94,5	15,6÷17,5
Хирални ЕВНТ	0,92	—	—
МВНТ ^Е	0,2÷0,95	11÷150	—
Неръждаема Стомана ^Е	0,186÷0,214	0,38÷1,55	15÷50
Кевлар – 29 и 149 ^Е	0,06÷0,18	3,6÷3,8	~2

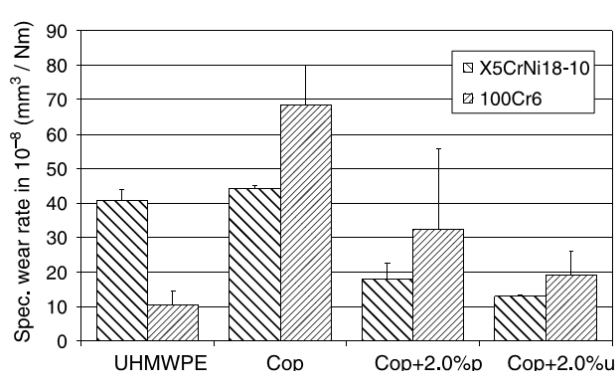
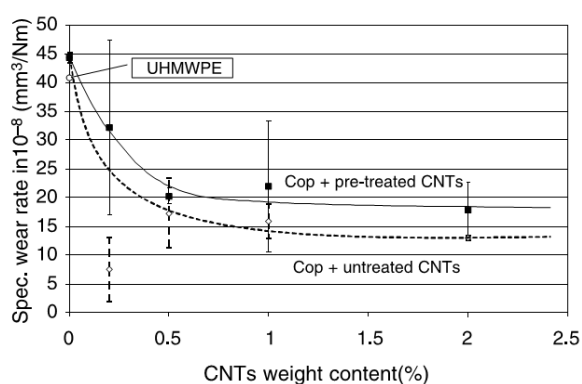
^Е Експериментално наблюдение; ^Т Теоретично предвиждане

Някои изследвания на композити с ВНТ

Ксуе, Ву, Якобс и Шедел [74] разглеждат износването и устойчивостта на пълзене на композитен материал, състоящ се от СВМПЕ и полиетилен висока плътност (ПЕВП), подсилен с многостенни въглеродни нанотръби (МВНТ). Съдържанието на ВНТ варира между 0,2 и 2,0 тегл.%, за да се намери оптималното съдържание на пълнител. Резултатите показват, че въглеродните нанотръби могат да подобрят характеристиките на износване на СВМПЕ/ПЕВП композити. Специфичната степен на износване на композитите намалява с увеличаване на съдържанието на ВНТ.

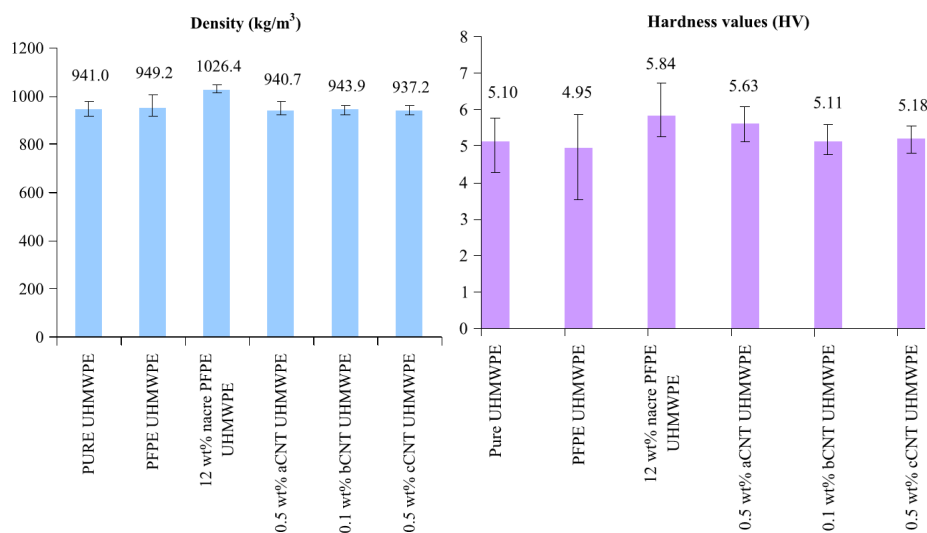
Табл.І-4 Състав на всички изследвани проби

Designation	Composition	Yield stress [MPa]	Tensile strength [MPa]	Strain at break [%]	Young's modulus [MPa]
UHMWPE	100% GUR 2122	25.0	24.7	109	1187
Cop	80% UHMWPE + 20% HDPE	28.4	27.8	26	1493
Cop+0.2%p	Cop+0.2% MWCNT (pre-treated)	29.6	29.7	34	1578
Cop+0.5%p	Cop+0.5% MWCNT (pre-treated)	27.6	26.2	31	1610
Cop+1.0%p	Cop+1.0% MWCNT (pre-treated)	28.8	25.5	32	1603
Cop+2.0%p	Cop+2.0% MWCNT (pre-treated)	30.8	28.7	29	1613
Cop+0.2%u	Cop+0.2% MWCNT (untreated)	27.3	27.9	31	1508
Cop+0.5%u	Cop+0.5% MWCNT (untreated)	26.2	24.7	30	1576
Cop+1.0%u	Cop+1.0% MWCNT (untreated)	29.9	29.0	28	1594
Cop+2.0%u	Cop+2.0% MWCNT (untreated)	29.9	28.0	30	1495



Фиг.І-24 (а) Стабилно състояние на износване на всички материали, тествани срещу X5CrNi18-10; (б) Специфична степен на износване на четири проби срещу стомана X5CrNi18-10 и 100Cr6

Според Лиу и Синха [37] износването на СВМПЕ играе важна роля в определянето на продължителността на живота на всички импланти на тазобедрените и коленните стави. В това изследване три вида въглеродни нанотръби (ВНТ) са добавени в насипен СВМПЕ, а композитите са покрити с перфлуорополиетер (PFPE), за да се изследват ефектите върху износването на СВМПЕ.



Фиг. I-29 (а) Вариация на плътността за различните композитни материали; **(б)** Вариацията на твърдостта по Vickers за различните композити, произведени в това изследване

Морланес, Кастел, Ноге, Мартинез, Алонсо и Пуертолас включват чисти многостенни въглеродни нанотръби (МВНТ) в СВМПЕ в различни концентрации (1, 3 и 5 тегл.%), използвайки процес на мелене с топка [41].

Табл. I-5 Механични свойства на не-облъчени СВМПЕ, гама-облъчени СВМПЕ и гама-облъчени нанокompозити

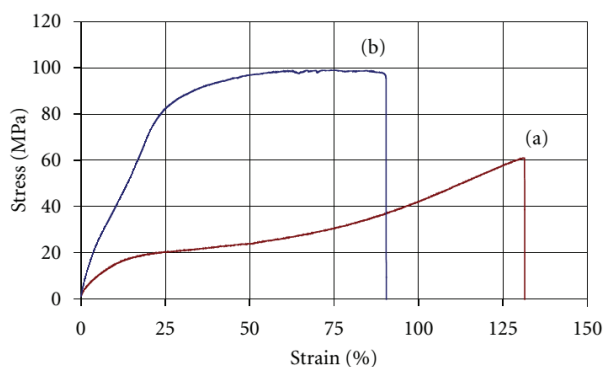
Sample	Young's modulus (MPa)	Yield stress (MPa)	Fracture stress (MPa)	Fracture strain (MPa)	Work to fracture (MPa)
PE	248 ± 15	19.9 ± 0.3	26.7 ± 0.9	571 ± 75	121 ± 11
PEI	333 ± 7.0	21.9 ± 0.7	27.8 ± 1.3	316 ± 21	75.0 ± 5.0
(PE-CNT (1%))-I	424 ± 11	22.7 ± 1.1	34.2 ± 1.5	456 ± 16	111 ± 6.0
(PE-CNT (3%))-I	404 ± 34	24.0 ± 0.7	30.9 ± 1.8	477 ± 18	115 ± 8.0
(PE-CNT (5%))-I	408 ± 25	23.8 ± 1.3	30.9 ± 3.0	442 ± 48	109 ± 16

±: Standard deviations.

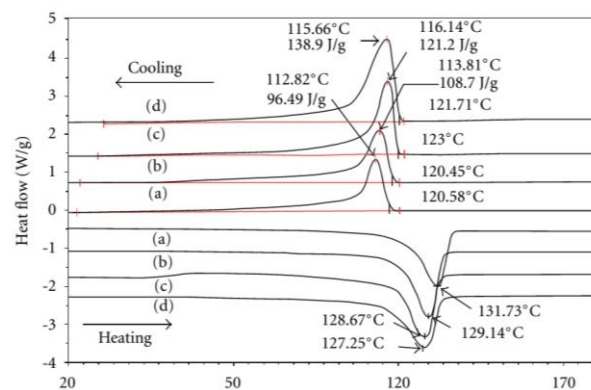
Резултатите от изследванията на влиянието на добавянето на ВНТ към СВМПЕ, които играят важна роля за изучаването на механичните характеристики на композитни материали на основата на СВМПЕ, на Махфуз и др. [39] са показни по-долу:

Табл. I-6 Резултати от изпитванията на натиск

Type	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Modulus (MPa)	Fracture Strain (%)
Neat UHMWPE	20 ± 5	61 ± 6	238 ± 17	131 ± 19
UHMWPE-MWCNT	80 ± 10	99 ± 11	510 ± 28	90 ± 10



Фиг. I-43 Крива опън-натиск за (а) чист СВМПЕ (б) композитен материал СВМПЕ+МВНТ



Фиг. I-44 Криви на загряване и охлаждане на (а) чист СВМПЕ, (б) опънат образец от СВМПЕ, (в) СВМПЕ+МВНТ, (г) опънат образец СВМПЕ+МВНТ

Изводи от литературния анализ

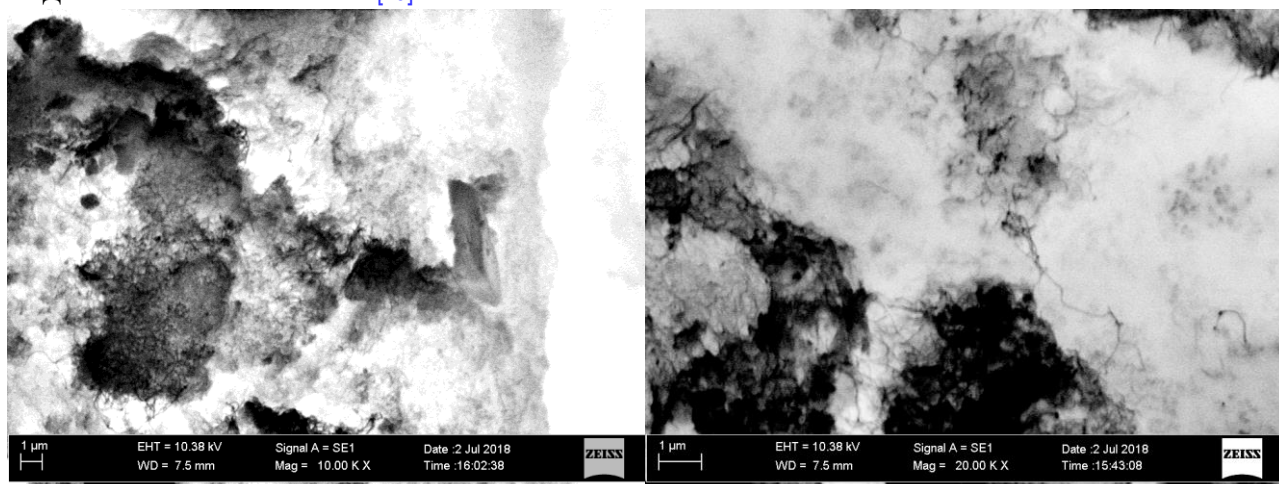
- Композитите на база СВМПЕ с въгледодни наноструктури са перспективно направление в съвременните машинни елементи, които са подложени на интензивно триене и износване.
- Необходими са допълнителни изследвания за внедряването на тези композити в практиката, като се обърне внимание на:
 - Структурата на композита: състав на композита (процентното съдържание на въглеродните наноструктури в него и др.), вида на надоструктурите (нишки, тръбички, тяхното ориентиране или не ориентиране и др.);
 - Технологията на изработване на композитния материал;
 - Условиата на работа на триещия възел: вид на мазилното вещество, натоварване, температура, скорост на плъзгане и др.

ГЛАВА 2. ПРОВЕЖДАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТИТЕ

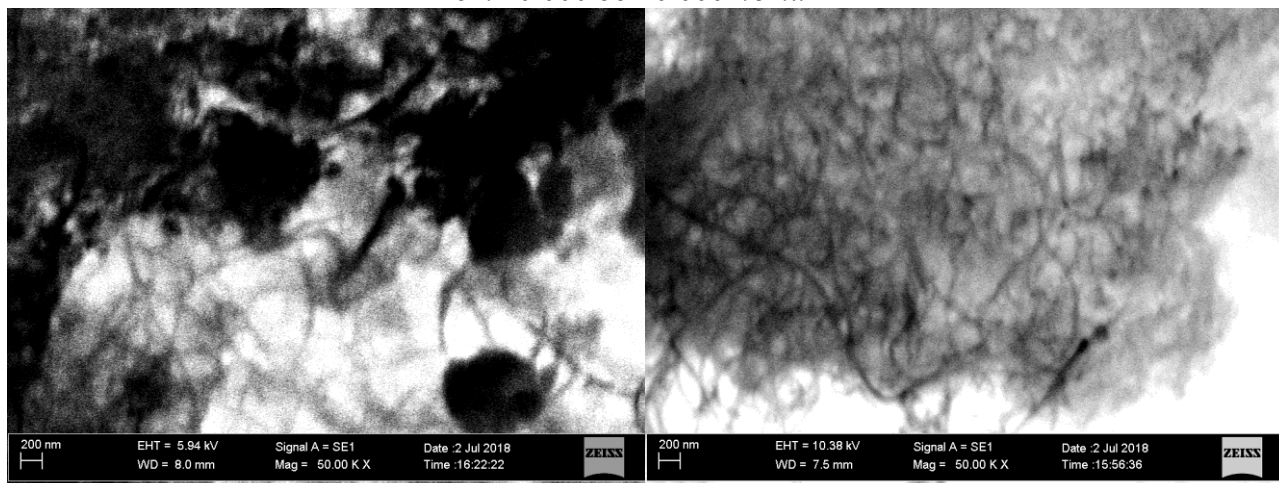
Химично (безтоково) никелиране на въглеродни нанотръби за създаване на композитен материал с полимерна матрица

Безтоковото (химично) метализиране на уякчаващата фаза (микро-въглеродни нишки/въглеродни нанотръбички) към композитните материали с метална и полимерна матрица е един от приложимите и ефективни начини за нанасяне на плътно и равномерно метално покритие върху неметални материали. В настоящата дисертация е използван процеса на безтоково никелиране, за създаване на покритие върху нанотръби, позволяващо тяхното използване за създаване на композити. Процесът на безтоково метализиране е описан в [19]. Покритите въглеродни нанотръбички могат да се използват за да подсилят СВМПЕ. На фигури **Фиг. II-1, II-2** е показана морфологията на образуванията от никелирани въглеродни влакна след препариране. При увеличения от 10 000 пъти те представляват “облакообразни” структури, при

които едва при увеличения от 30 000÷50 000 започват да се отличават отделните нановлакна. [19]

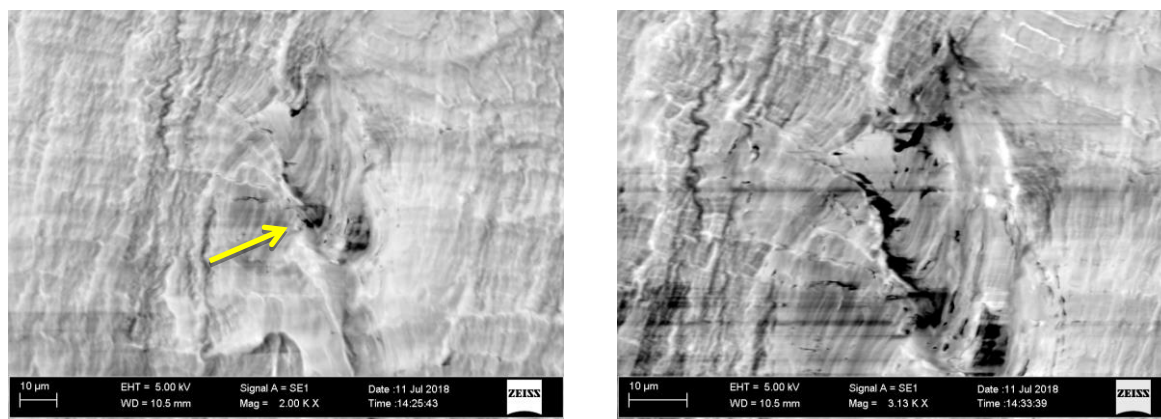


Фиг. II-1 Сканираща електронна микроскопия на никелирани нановлакна при увеличения от 10 000 до 20 000 пъти



Фиг. II-2 Сканираща електронна микроскопия на никелирани нановлакна при увеличения от 50 000 пъти

На **Фиг. II-3** се наблюдават резултатите от сканираща електронна микроскопия с EDX при сравнително по-малки увеличения и при ниски напрежения (5 kV) на изрязан участък от композитен материал с полимерната матрица с участък от никелирани въглеродни нановлакна. [19]



Фиг. II-3 Сканираща електронна микроскопия на композитен материал с полимерна матрица с 1,5% никелирани нановъглеродни влакна при увеличения от 2 000 до 3 130 пъти

Изработване на образци на базата на СВМПЕ, модифициран с CNTs и Ni-CNTs

За изпитване са изработени образци от 8 (осем) композита. Образците бяха горещо пресовани при температура 185°C, налягане 200 bar за 30 min. Те се различават само по химичен състав както следва: %CNTs и %Ni-CNTs. Изработените образци са показани в **Приложение 1**.

Табл. II-1 – Спецификация за изработването на полимерни композитни материали

Композитен материал	%CNTs	%Ni-CNTs
СВМПЕ-0CNTs	0,0	0,0
СВМПЕ-0,5CNTs	0,5	0,0
СВМПЕ-0,75CNTs	0,75	0,0
СВМПЕ-1,0CNTs	1,0	0,0
СВМПЕ-1,5CNTs	1,5	0,0
СВМПЕ-0,5Ni-CNTs	0,0	0,5
СВМПЕ-1,0Ni-CNTs	0,0	1,0
СВМПЕ-1,5Ni-CNTs	0,0	1,5

Тук е уместно да се отбележи, че съображенията за внасяне на метализирани въглеродни частици в СВМПЕ са по-скоро с оглед на подобряването на други работни характеристики на самите плъзгащи лагери, при които тези композити ще бъдат използвани. Заякчаването не би и могло да бъде самоцелен приоритет. Също така той се отличава и със самозмазващата си способност и ниска деформируемост. Коефициентът на топлоотдаване на СВМПЕ е нисък и при триене контактните повърхности се загряват. Въглеродните структури и металите от своя страна имат висока топлопроводимост и могат да бъдат полезни в това си качество за конкретното приложение. Отново конструктивни съображения са водещи и за никелирането на въглеродните наноструктури. Подобно на СВМПЕ и за тях е характерна лоша адхезия към почти всички материали. Внасянето в системата на устойчиво метализирани частици, локализиращи в повърхностния слой, подобрява съвместимостта на композита с металната основа на конструкцията (подложката на плъзгащите лагери, втулки, челни уплътнения и пр.). Създават се предпоставки за по-добър контакт между тях, при което евентуално може да отпадне или поне да се ограничи необходимостта от допълнително механично закрепване чрез разпробиване или преструговане на лагерите, което по принцип е нежелателно. Това се благоприятства и от избрания технологичен подход, при който се получават градиентно напълнени композити, като въглеродните частици се разпределят плътно в зоната на съответната работна повърхност.

Изследване на якостта на натиск на образците

Изпитването позволява да се определи якостта на натиск и аналитично да се пресметне модулът на еластичност E като функция на зависимостта напрежение – еластична деформация. Всички образци са изпитани в

стандартни условия на универсален стенд Instron 1185. Експериментите са проведени при следните условия:

- Натоварване на всички образци: $P=20 \text{ kN}$;
- Скорост на прилагане на натоварването: 5 mm/min ;
- Деформация (ϵ): $100/5 \text{ mm}$ ($20/1 \text{ mm}$);
- Температура на околната среда: 20°C ;
- Размери на образците: $12,7 \times 12,7 \times 25,4 \text{ mm}$;

В Табл. II-2 са представени експерименталните резултати от измерванията.

Табл. II-2 Резултати от изследванията на якост на натиск

Образец	Якост на натиск [MPa]	Модул на еластичност E [MPa]
TUFNOL	75,30	1969,75
СВМПЕ-0CNTs	38,80	484,2
СВМПЕ-0,5CNTs	34,40	1303,2
СВМПЕ-0,75CNTs	36,80	1314,14
СВМПЕ-1,0CNTs	37,60	1258,36
СВМПЕ-1,5CNTs	35,20	2442,02
СВМПЕ-0,5Ni-CNTs	36,10	1269,26
СВМПЕ-1,0Ni-CNTs	37,60	2409,98
СВМПЕ-1,5Ni-CNTs	38,30	2483,26

Изследване на топлоустойчивостта на образците

Топлоустойчивостта е максималната температура до която може да се нагрее едно изделие без да загуби свойствата си. Това е температурата до която могат да се експлоатират полимерните детайли без да променят своята геометрия. Голям интерес за практиката представлява подобряването с ВНТ и как това ще се отрази на топлоустойчивостта, защото например стъклените, керамичните и арамидните пълнители са лоши проводници на топлината, докато ВНТ са много добри проводници на топлината. Температура на размекване (VST) по Vicat (стандарты ASTM D 1525 [90], ISO 306:2004 [92], БДС 10234 [91]) е температурата, при която полимерът започва рязко да омеква. Резултатите от експериментите на топлоустойчивост са показани в Табл. III-3.

Табл. II-3 – Резултати от експериментите на топлоустойчивост

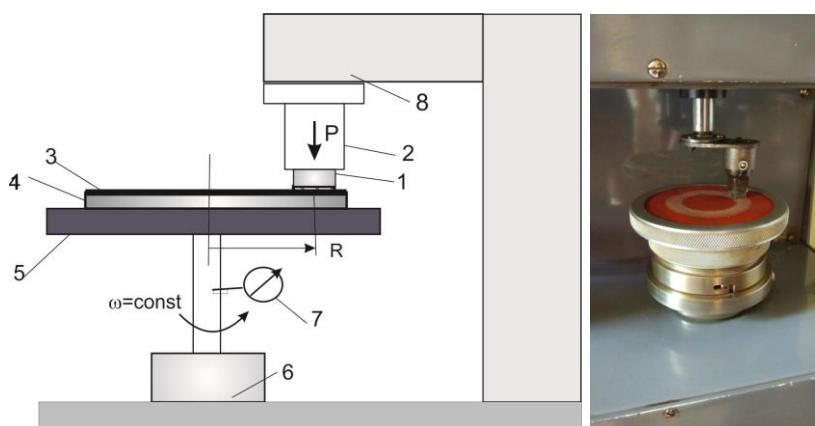
Образец	Топлоустойчивост °C
Tufnol	107,00
0.0CNTs	95,00
0.5CNTs	103,45
0.75CNTs	110,70
1.0CNTs	114,25
1.5CNTs	113,95
0.5Ni-CNTs	122,75
1.0Ni-CNTs	130,65
1.5Ni-CNTs	141,75

Трибологично изследване на СВМПЕ, модифициран с въглеродни нанотръби

В настоящата подточка се представят резултати от изследване на някои трибологични параметри на образци от СВМПЕ, съдържащи различна концентрация на добавка от въглеродни нанотръби (CNTs) – 0,5%, 0,75%, 1,0% и 1,5%, както и на никелирани такива, при няколко случая на контактно взаимодействие с контра-тялото. Целта на изследването е да се установи влиянието на процентния състав на ВНТ върху параметрите на износването, изнosoустойчивостта и кинетичния коефициент на триене. По-конкретно се изследват:

- Абразивно износване при контактно взаимодействие с повърхнина с твърдо закрепени абразивни частици: без смазочен материал (сухо триене) и гранично триене при смазване с морска вода;
- Износване при гранично смазване с корабно масло;
- Кинетичен коефициент на триене в условия на триене без смазочен материал.

Абразивното износване при сухо триене и триене при смазване с морска вода се изследва с лабораторно устройство по кинематична схема „Палец-диск“ при равнинен контакт. Функционалната схема на устройството е представена на Фиг. II-6. [31,20]



Фиг. II-6 Схема на устройство за изследване на износването при триене по повърхнина със закрепен абразив по схемата «Палец-диск»

Абразивно износване при триене без смазочен материал

Експерименталното изследване е проведено при условия, представени в Табл. II-4.

Табл. II-4 Параметри на експеримента

№	Параметър	Стойност
1	Натоварване	$P = 4.53 \text{ N}$
2	Номинална контактна площ	$A_a = 144 \text{ mm}^2$
3	Номинално контактно налягане	$p_a = 3.14 \text{ N/cm}^2$
4	Честота на въртене	$n = 200 \text{ min}^{-1}$
5	Разстояние между оста на въртене и центъра на контакта	$R = 32 \text{ mm}$
6	Скорост на плъзгане на центъра на контакта	$V_c = 0.7 \text{ m/s}$
7	Абразивна повърхност	Корунд Р320
8	Температура на околната среда	$T = 23^\circ\text{C}$

Избраната скорост на плъзгане е съобразена със скоростите на плъзгане в голямогабаритните корабни плъзгащи лагери (във валолиниите):

- обороти на валолинията в минута: $\max = 175$; $\min = 100$;
- линейна скорост на плъзгане в контакта: $\max = 0,58$; $\min = 0,33$ метра в секунда.

В таблица II-5 са представени експерименталните резултати за масовото износване (mg) за няколко броя цикли $N=100, 200, 300$ и 400 .

Табл. II-5 Масово износване на образците при различен път на триене (брой цикли)

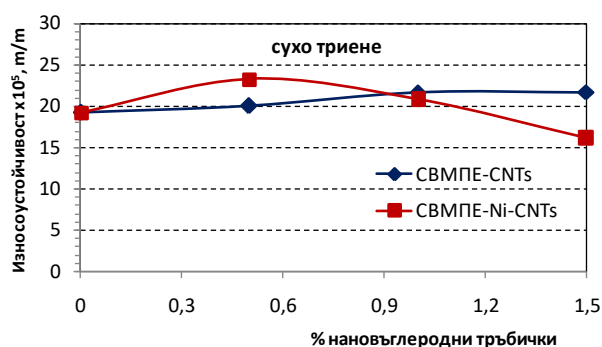
№	МАТЕРИАЛИ	Брой цикли (N)			
		100	200	300	400
		Път на триене S (m)			
		20.1	40.2	60.3	80.4
		Масово износване (mg)			
1A	TUFNOL	20.2	35.7	55.8	71.1
2A	СВМПЕ-0CNTs	1.7	3.5	4.7	5.6
3A	СВМПЕ-0CNTs*	1.3	2.9	4.4	5.7
4A	СВМПЕ-0.5CNTs	1.8	3.1	4.5	5.4
5A	СВМПЕ-0.75CNTs	1.7	3.2	4.1	5.4
6A	СВМПЕ-1.0CNTs	1.3	3.7	4.3	5.0
7A	СВМПЕ-1.5CNTs	1.9	2.9	4.1	5.0
8A	СВМПЕ-0.5Ni-CNTs	2.1	3.0	4.0	4.7
9A	СВМПЕ-1.0Ni-CNTs	2.0	3.0	4.2	5.2
10A	СВМПЕ-1.5Ni-CNTs	2.3	5.0	6.0	6.7

В таблица II-6 са представени резултатите за абсолютната износоустойчивост на изпитваните образци.

Табл. II-6 Износоустойчивост на образците при различен път на триене (брой цикли)

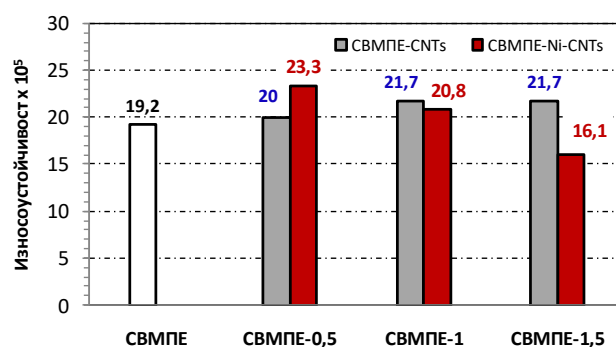
№	МАТЕРИАЛИ	Брой цикли (N)			
		100	200	300	400
		Път на триене S (m)			
		20.1	40.2	60.3	80.4
		Износоустойчивост (m/m)			
1A	TUFNOL	2.0 x 10 ⁵	2.3 x 10 ⁵	2.2 x 10 ⁵	2.3 x 10 ⁵
2A	СВМПЕ-0CNTs	15.9 x 10 ⁵	15.6 x 10 ⁵	17.2 x 10 ⁵	19.6 x 10 ⁵
3A	СВМПЕ-0CNTs*	20.8 x 10 ⁵	18.9 x 10 ⁵	18.5 x 10 ⁵	19.2 x 10 ⁵
4A	СВМПЕ-0.5CNTs	15.1 x 10 ⁵	17.5 x 10 ⁵	18.1 x 10 ⁵	20.0 x 10 ⁵
5A	СВМПЕ-0.75CNTs	15.9 x 10 ⁵	16.9 x 10 ⁵	20.0 x 10 ⁵	20.0 x 10 ⁵
6A	СВМПЕ-1.0CNTs	20.8 x 10 ⁵	14.7 x 10 ⁵	18.9 x 10 ⁵	21.7 x 10 ⁵
7A	СВМПЕ-1.5CNTs	14.2 x 10 ⁵	18.9 x 10 ⁵	20.0 x 10 ⁵	21.7 x 10 ⁵
8A	СВМПЕ-0.5Ni-CNTs	13.0 x 10 ⁵	18.2 x 10 ⁵	20.4 x 10 ⁵	23.3 x 10 ⁵

9A	СВМПЕ-1.0Ni-CNTs	13.5×10^5	18.2×10^5	19.2×10^5	20.8×10^5
10A	СВМПЕ-1.5Ni-CNTs	11.8×10^5	10.9×10^5	13.5×10^5	16.1×10^5



Фиг. II-9 Зависимост на

износоустойчивостта от процентното съдържание на нановъглеродни тръбички за материали СВМПЕ без и с никелово покритие



Фиг. II-10 Диаграма на

износоустойчивостта на материали СВМПЕ с нановъглеродни тръбички без и с никелово покритие при $N=400$

Абразивно износване при смазване с морска вода

Абразивното износване се изследва с устройството, схематично представено на **Фиг. II-6**. Контактната система «Образец-въртящ се диск» е поставена във вана с морска вода с ниво на водата около $3 \div 5$ mm над нивото на водоустойчивата абразивна повърхнина. Параметрите на експеримента, еднакви за всички изпитвани образци са представени в **Табл. II-7**.

Табл. II-7 Параметри на експеримента

№	Параметър	Стойност
1	Натоварване	$P = 60$ N
2	Номинална контактна площ	$A_a = 144$ mm ²
3	Номинално контактно налягане	$p_a = 4.17$ N/cm ²
4	Честота на въртене	$n = 94$ min ⁻¹
5	Разстояние между оста на въртене и центъра на контакта	$R_c = 85$ mm
6	Скорост на плъзгане на центъра на контакта	$V_c = 0.9$ m/s
7	Водоустойчива абразивна повърхност	Корунд P120
8	Температура на околната среда	$T = 23^\circ\text{C}$

С описаните методика и устройство са проведени изследвания на всички изпитвани материали при еднакви режими на триене с параметрите, представени в **Табл. II-7**. В таблица **II-9** са представени резултати за масовото износване на всички изпитвани образци при различен брой цикли (път на триене) – $N_1 = 940$, $N_2 = 1880$, $N_3 = 2820$, съответно път на триене $S_1 = 470$, $S_2 = 940$ и $S_3 = 1410$ m. В таблица **II-10** са показани резултати за абсолютната износоустойчивост на образците за съответните брой цикли (път на триене).

Таблица II-9 Масово износване на образците при различен път на триене (брой цикли)

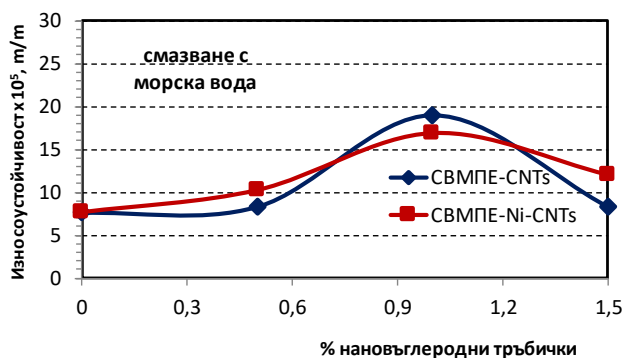
№ на образеца	Материали	Време на триене, min/брой цикли		
		10/ $N_1=940$	20/ $N_2=1880$	30/ $N_3=2820$
		Път на триене, m		
		470	940	1410
		Масово износване, mg		
1Б	TUFNOL	289.6	341.7	428.4

2Б	СВМПЕ	150.3	216.8	288.5
3Б	СВМПЕ *	203.6	230.4	243.0
4Б	СВМПЕ-0.5CNTs	156.5	179.2	223.8
5Б	СВМПЕ-0.75CNTs	81.3	108.6	155.4
6Б	СВМПЕ-1.0CNTs	68.4	92.5	100.5
7Б	СВМПЕ-1.5CNTs	209.4	216.2	222.0
8Б	СВМПЕ-0.5NiCNTs	79.5	184.7	186.9
9Б	СВМПЕ-1.0NiCNTs	85.7	99.4	113.1
10Б	СВМПЕ-1.5NiCNTs	28.3	39.6	158.6

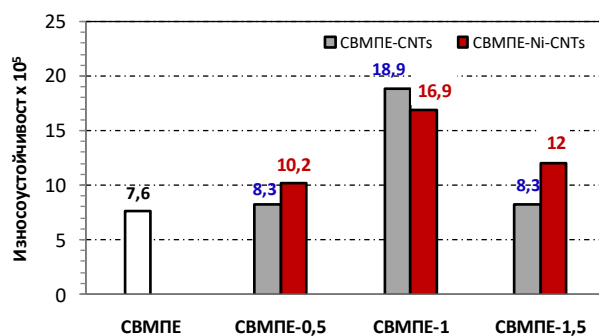
Таблица II-10 Износоустойчивост на образците при различен път на триене (брой цикли)

№ на образца	Материали	Време на триене, min/брой цикли		
		10/N ₁ =940	20/N ₂ =1880	30/N ₃ =2820
		Път на триене, m		
		470	940	1410
		Износоустойчивост, m/m		
1Б	TUFNOL	3.2×10^5	5.6×10^5	6.6×10^5
2Б	СВМПЕ	4.2×10^5	5.8×10^5	6.7×10^5
3Б	СВМПЕ *	3.1×10^5	5.5×10^5	7.6×10^5
4Б	СВМПЕ-0.5CNTs	4.1×10^5	7.1×10^5	8.3×10^5
5Б	СВМПЕ-0.75CNTs	7.7×10^5	11.8×10^5	12.3×10^5
6Б	СВМПЕ-1.0CNTs	9.3×10^5	13.6×10^5	18.9×10^5
7Б	СВМПЕ-1.5CNTs	3.0×10^5	5.9×10^5	8.3×10^5
8Б	СВМПЕ-0.5NiCNTs	8.3×10^5	6.9×10^5	10.2×10^5
9Б	СВМПЕ-1.0NiCNTs	7.4×10^5	12.8×10^5	16.9×10^5
10Б	СВМПЕ-1.5NiCNTs	22.2×10^5	32.2×10^5	12.0×10^5

На фигура II-14 са представени диаграмите на абсолютната износоустойчивост на всички изпитвани образци. Ясно се вижда, че най-голяма износоустойчивост има образец (СВМПЕ-1.0CNTs) с 1% наночастици без никелово покритие – $I=18.9 \times 10^5$, което е с 2.3×10^5 по-голяма от тази на образци със същия процент наночастици, но с никелово покритие (СВМПЕ-1.0Ni-CNTs) - $I=16.9 \times 10^5$.



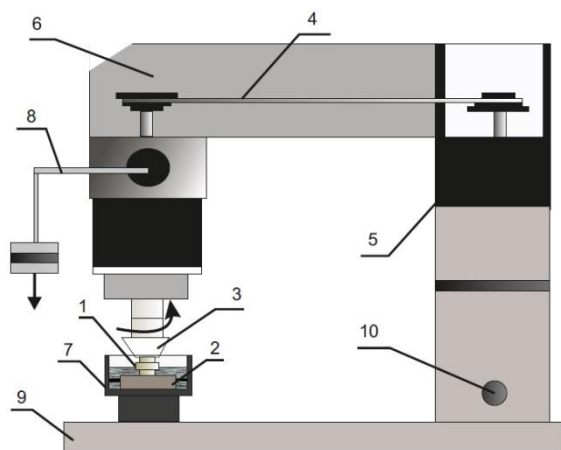
Фиг. II-13 Зависимост на износоустойчивостта от процентното съдържание на въглеродни нанотръбички на материали СВМПЕ с нановъглеродни тръбички без и с никелово покритие при $N_3=2820$ (път на триене 1410 m)



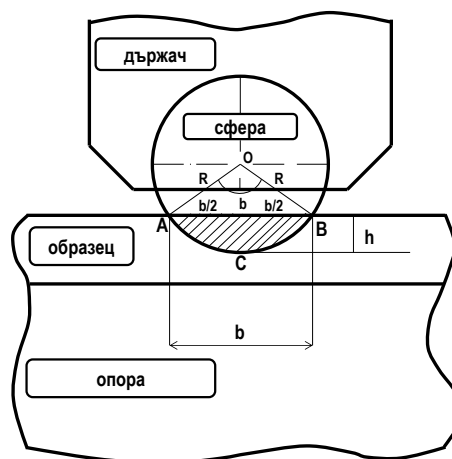
Фиг. II-14 Диаграма на износоустойчивостта на материали СВМПЕ с нановъглеродни тръбички без и с никелово покритие при $N_3=2820$

Износване при гранично триене с корабно масло

Триенето и износването в присъствие на смазочна среда са комплексни процеси, които чувствително зависят от физико-химични и механични контактни взаимодействия между смазочната среда и повърхностните слоеве на контактуващите тела, както и от режимите на експлоатация – натоварване, скорости, наличие на динамични смущения (вибрации). В машините контактните съединения работят в различни режими на триене – течно, смесено, гранично и сухо триене. Нито един от тях не се среща в чист вид. Във времето и в пространственото разпределение на процесите в трибосистемите най-често се среща смесеното триене – наличие на участъци с дискретно допиране на микрограпавините, участъци с наличие на смазочен слой и участъци, в които допирането се осъществява по тънки смазочни слоеве и филми. Граничното триене е най-тежкият режим на триене, който е неизбежен почти във всички контактни съединения в машините. Устройството за изследване на износването при гранично триене в смазочна среда е разработено в лабораторията по трибология. Функционалната схема на устройството е представена на **Фиг. II-15**: 1-сферичен индентор; 2-образец; 3-държач на индентора; 4-ремъчна предавка; 5-електродвигател; 6-корпус; 7-вана; 8-лостова система за натоварване; 9-основа на корпуса; 10-бутон за включване на електродвигателя. Трибологичният контакт е точков и се осъществява между изпитваният образец 2 и сферичен индентор (противотяло) 1 с диаметър 5 mm, закрепен неподвижно в държача 3. Инденторът 1 се върти около вертикалната си ос с постоянна ъглова скорост.



Фиг. II-15 Схема на устройство за изследване на износване при гранично триене в смазочна среда



Фиг. II-16 Схема за определяне на обемно износване на образец

В настоящото изследване се използва корабно масло с аббревиатура M1. Изследването е проведено при условия на експеримента, представени в **Табл. II-11**.

Табл.П-11 Параметри на експеримента

№	Параметър	Стойност
1	Натоварване	P = 20 N
2	Номинална контактна площ	A _a = 144 mm ²
3	Номинално контактно налягане	p _a = 13,89 N/cm ²
4	Честота на въртене	n = 750 min ⁻¹
5	Време на триене	t = 20 min
6	Температура на околната среда	T = 23°C
7	Начална температура на маслото	T _M = 23°C

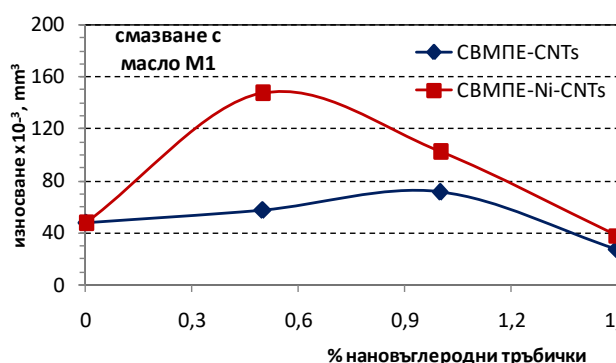
В таблици П-18, П-19 и П-20 са представени резултати за линейното и обемно износване, и абсолютната износоустойчивост на изпитваните материали при смазване с масло M1, определени по описаната методика.

Табл.П-12 Линейно и обемно износване при смазване с масло M1

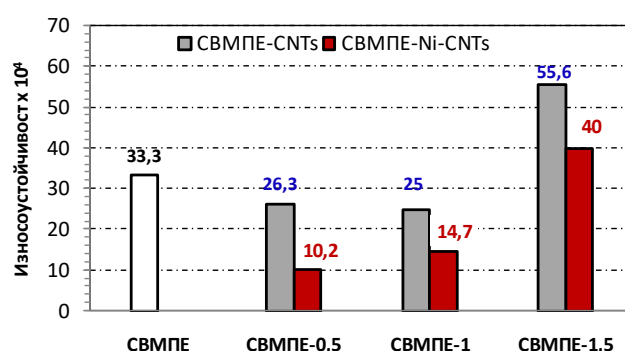
№	МАТЕРИАЛИ	Линейно износване, μm						Обемно износване, mm ³
		h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h	
1C	TUFNOL	152	160	158	150	165	157	190 x 10 ⁻³
2C	СВМПЕ-0CNTs	110	115	118	120	122	117	105 x 10 ⁻³
3C	СВМПЕ-0CNTs*	75	80	82	70	84	78.2	47 x 10 ⁻³
4C	СВМПЕ-0.5CNTs	80	85	90	92	87	86.2	57 x 10 ⁻³
5C	СВМПЕ-0.75CNTs	102	95	110	98	105	102	81 x 10 ⁻³
6C	СВМПЕ-1.0CNTs	105	100	92	95	90	96.4	71 x 10 ⁻³
7C	СВМПЕ-1.5CNTs	54	50	65	58	70	59.4	27 x 10 ⁻³
8C	СВМПЕ-0.5Ni-CNTs	135	140	142	145	130	138.4	147 x 10 ⁻³
9C	СВМПЕ-1.0Ni-CNTs	110	115	105	120	125	115	102 x 10 ⁻³
10C	СВМПЕ-1.5Ni-CNTs	65	70	72	68	75	70	38 x 10 ⁻³

Табл.П-13 Износоустойчивост при смазване с масло M1

№	МАТЕРИАЛИ	Износоустойчивост, цикли/mm ³
1C	TUFNOL	7.9 x 10 ⁴
2C	СВМПЕ-0CNTs	14.3 x 10 ⁴
3C	СВМПЕ-0CNTs*	33.3 x 10 ⁴
4C	СВМПЕ-0.5CNTs	26.3 x 10 ⁴
5C	СВМПЕ-0.75CNTs	20 x 10 ⁴
6C	СВМПЕ-1.0CNTs	25 x 10 ⁴
7C	СВМПЕ-1.5CNTs	55.6 x 10 ⁴
8C	СВМПЕ-0.5Ni-CNTs	10.2 x 10 ⁴
9C	СВМПЕ-1.0Ni-CNTs	14.7 x 10 ⁴
10C	СВМПЕ-1.5Ni-CNTs	40 x 10 ⁴



Фиг.П-17 Зависимост на обемното



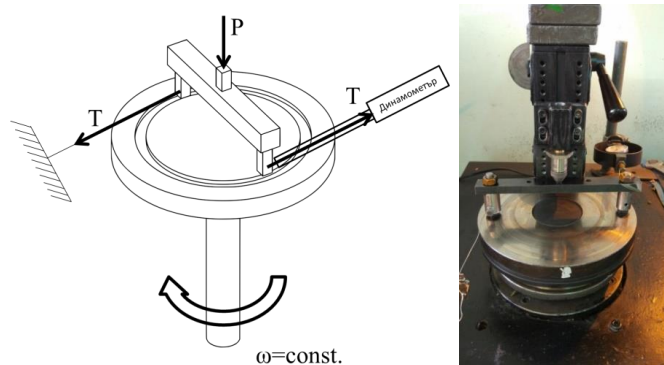
Фиг.П-18 Диаграма на

износване на образците от процентното съдържание на нановъглеродни тръбички без и с никелово покритие при смазване с масло M1

износоустойчивостта на материали СВМПЕ с нановъглеродни тръбички без и с никелово покритие при смазване с масло M1

Коефициент на триене

Определянето на кинетичния коефициент на триене при плъзгане се осъществява с устройството „палец-диск“ (Фиг. II-30).



Фиг. II-19 Устройство тип „палец-диск“ за определяне на кинетичния коефициент на триене при плъзгане

Палецът представлява изпитвания образец, а въртящия се диск е плоча от високолегирана стомана с твърдост HRC=56,9 и грапавост $Ra=2.35 \mu m$. Силата на триене T се измерва с динамометър, закрепен към държача на образца и разположен по тангентата на следата на триене в посока, обратна на движението на диска. Силата на триене T се измерва с точност 0,1 N при зададено нормално натоварване P и едно и също време на триене (път на триене). Силата на триене за всички образци се определя при едни и същи режими на триене – скорост на плъзгане, натоварване, температура на околната среда.

Коефициент на триене при плъзгане по повърхнина без смазочен материал (сухо триене)

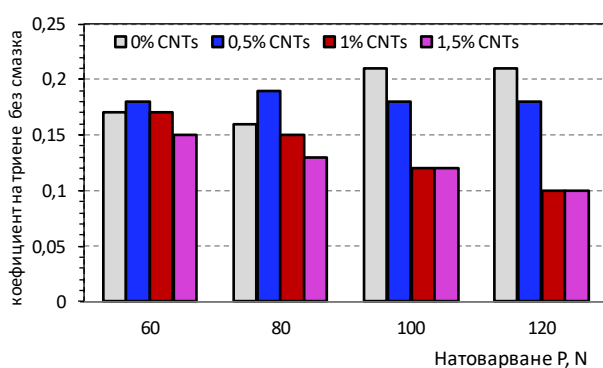
С описаните методика и устройство (Фиг. II-19) са измерени кинетичните сили на триене за изпитваните 10 вида образци при натоварване $P_1=60 \text{ N}$; $P_2=80 \text{ N}$; $P_3=100 \text{ N}$; $P_4=120 \text{ N}$, честота на въртене $n=0.94 \text{ min}^{-1}$ и температура на околната среда 24°C и са изчислени коефициентите на триене по формула (II.17). Резултатите са представени в Таблица II-14.

Таблица II-14 Сила на триене и коефициент на триене при различно нормално натоварване

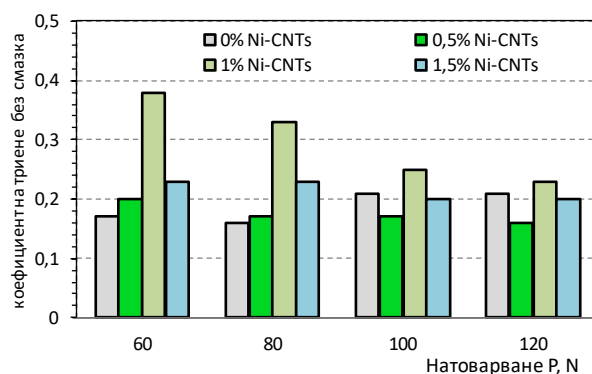
№	МАТЕРИАЛИ	НАТОВАРВАНЕ, P [N]							
		P ₁ = 60		P ₂ = 80		P ₃ = 100		P ₄ = 120	
		T ₁ , [N]	μ	T ₂ , [N]	μ	T ₃ , [N]	μ	T ₄ , [N]	μ
1	TUFNOL	14	0.23	17	0.21	21	0.21	25	0.21
2	СВМПЕ-0CNTs	10	0.17	11	0.13	14	0.14	19	0.16
3	СВМПЕ-0CNTs*	10	0.17	13	0.16	21	0.21	25	0.21
4	СВМПЕ-0.5CNTs	11	0.18	15	0.19	18	0.18	21	0.18

5	СВМПЕ-0.75CNTs	14	0.23	15	0.19	17	0.17	20	0.17
6	СВМПЕ-1.0CNTs	10	0.17	12	0.15	12	0.12	12	0.10
7	СВМПЕ-1.5CNTs	9	0.15	11	0.13	12	0.12	12.5	0.10
8	СВМПЕ-0.5Ni-CNTs	12	0.20	14	0.17	17	0.17	19	0.16
9	СВМПЕ-1.0Ni-CNTs	23	0.38	26	0.33	25	0.25	27	0.23
10	СВМПЕ-1.5Ni-CNTs	14	0.23	18.5	0.23	20	0.20	24	0.20

На фигури **II-24** и **II-25** са представени диаграми на коефициента на триене за едно и също натоварване P при различно процентно съдържание на въглеродни нанотръбички без и с никелово покритие.



Фиг. II-24 Диаграма на коефициента на триене без смазочен материал за едно и също натоварване P при различно процентно съдържание на въглеродни нанотръбички без никелово покритие



Фиг. II-25 Диаграма на коефициента на триене без смазочен материал за едно и също натоварване P при различно процентно съдържание на въглеродни нанотръбички с никелово покритие

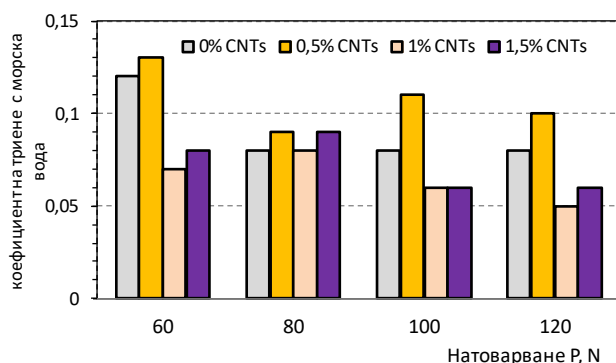
Коефициент на триене при гранично смазване с морска вода

В **Табл. II-15** са представени резултати за силата на триене и коефициента на триене при гранично смазване с морска вода на всички образци при натоварване $P=60, 80, 100$ и 120 N.

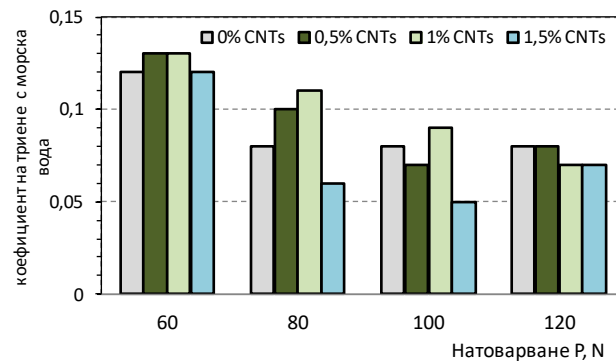
Табл. II-15 Сила и коефициент на триене при гранично смазване с морска вода

№	МАТЕРИАЛИ	НАТОВАРВАНЕ, P [N]							
		P ₁ = 60		P ₂ = 80		P ₃ = 100		P ₄ = 120	
		T ₁ , [N]	μ	T ₂ , [N]	μ	T ₃ , [N]	μ	T ₄ , [N]	μ
1	TUFNOL	6	0.10	7	0.09	8	0.08	9	0.08
2	СВМПЕ	8	0.13	9	0.11	8	0.08	9	0.08
3	СВМПЕ-0 CNTs*	7	0.12	6	0.08	8	0.08	9	0.08
4	СВМПЕ-0.5CNTs	8	0.13	9	0.09	11	0.11	13	0.10
5	СВМПЕ-0.75CNTs	3	0.05	4	0.05	5	0.05	5	0.04
6	СВМПЕ-1.0CNTs	4	0.07	6	0.08	6	0.06	6	0.05
7	СВМПЕ-1.5CNTs	5	0.08	7	0.09	6	0.06	7	0.06
8	СВМПЕ-0.5Ni-CNTs	8	0.13	8	0.10	7	0.07	9	0.08
9	СВМПЕ-1.0Ni-CNTs	8	0.13	9	0.11	9	0.09	8	0.07
10	СВМПЕ-1.5Ni-CNTs	7	0.12	5	0.06	5	0.05	8	0.07

На фигури **Фиг. II-30** и **II-31** представени диаграми на коефициента на триене за едно и също натоварване P при различно процентно съдържание на въглеродни нанотръбички без и с никелово покритие.



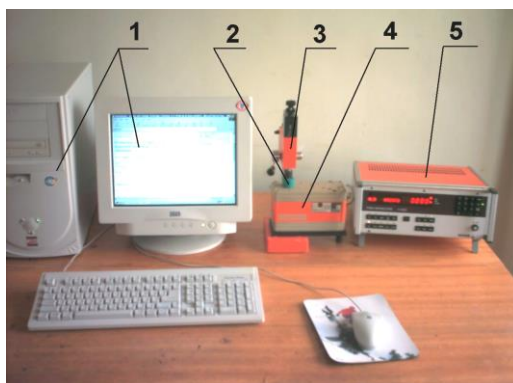
Фиг. II-30 Диаграма на коефициента на триене в режим на гранично смазване с морска за едно и също натоварване P при различно процентно съдържание на нановъглеродни тръбички без никелово покритие



Фиг. II-31 Диаграма на коефициента на триене в режим на гранично смазване с морска за едно и също натоварване P при различно процентно съдържание на нановъглеродни тръбички с никелово покритие

Изследване на микротвърдостта на СВМПЕ, модифициран с въглеродни нанотръби

Микротвърдостта на образците в настоящата работа е измерена по метода на Vickers [81,59,66,54,41,17,32,49]. Измерването на микротвърдостта е извършено с нанотестер с компютърно управление FISCHERScope® H100, показан на **Фиг. II-32** при режим на работа, представен в **Табл. II-16**. Извършени са по 20 измервания на всеки образец.



Фиг. II-32 Общ вид на нанотестер FISCHERScope® H100 (Германия):
1-управляващ компютър; 2-образец; 3-стойка; 4-измерваща глава; 5-изчисляващо устройство

Табл. II-16 Режим на измерване с нанотестер FISCHERScope® H100

FISCHER HARDNESS TESTING H100	TEST CYCLE
Начин на работа:	Натоварване в точка
Индентор:	Викерс
Режим на работа:	Натоварване + разтоварване
Натоварваща сила:	Нарастваща от 0.4 mN до 1000.00 mN
Брой стъпки за 1 цикъл:	60 стъпки
Задържане между две стъпки:	1 s
Общо време на натоварване и разтоварване:	60.00 s
Време на задържане преди старта:	2 s

В таблица **II-17** са показани обобщените данни от измерване на микротвърдостта на образците, а в **Приложение 2** е представено измерването на всеки един образец.

Таблица II-17 Данни от измерванията на микротвърдост

№	Образец	Средна твърдост H_U [MPa]	Средна твърдост H_{plast} [MPa]	Коефициент на Поасон	Приведен модул на еластичност E^* [GPa]	Модул на еластичност E [MPa]
1	TUFNOL	38,68	48,5	0,39	2,50	2119,75
2	CBMPE-0CNTs	54,24	74,3	0,40	0,76	634,20
4	CBMPE-0.5CNTs	53,38	73,2	0,40	1,73	1453,20
5	CBMPE-0.75CNTs	49,74	69,5	0,41	1,76	1464,14
6	CBMPE-1.0CNTs	48,84	68,6	0,42	1,71	1408,36
7	CBMPE-1.5CNTs	44,11	63,9	0,43	3,18	2592,02
8	CBMPE-0.5Ni-CNTs	55,12	75,3	0,44	1,76	1419,26
9	CBMPE-1.0Ni-CNTs	68,16	88,1	0,45	3,21	2559,98
10	CBMPE-1.5Ni-CNTs	77,10	97,6	0,46	3,34	2633,26

ГЛАВА 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ, ДИСКУСИИ И ПРИНОСИ

- В техническата литература голямогабаритните плъзгащи лагери са доста слабо застъпени и няма консенсус относно какви са техните размери, затова се приема, че за голямогабаритни лагери се считат:
 - Радиални лагери: 320÷1000 mm и над 1000 mm;
 - Аксиални лагери: 220÷360 mm и над 360 mm;
- Съвременното развитие на техниката и технологиите позволява за триещите повърхнини на плъзгащите лагери да се използват нови метални и неметални материали, в повечето случаи полимерни композитни материали, чрез които значително да се подобрят техните характеристики и удължаване на експлоатационния им живот;
- Композитните плъзгащи лагери се използват предимно за лагери, при които трябва да се поддържат по-леки товари и където въртящите или осцилиращите движения са относително бавни;
- Към момента за изработване на плъзгащи лагери най-масово се използват два типа композитен материал: на основата на политетрафлуоретилен (PTFE) и на полиоксиметилен (POM). Първите не изискват допълнително смазване, докато вторите се нуждаят от първоначално смазване.
- Плъзгащите лагери от Свърхвисокомолекулен полиетилен (CBMPE), напълнен с дисперсни въглеродни частици, не се нуждаят от допълнително смазване, което мотивира избора им като обект на настоящия дисертационен труд.
- Въглеродните нанотръби (ВНТ) са алотропна форма на въглерода с кристална наноструктура. Тези цилиндрични въглеродни молекули имат необичайни свойства, които са ценни за нанотехнологиите,

електрониката, машинознанието, оптиката и други области на материалознанието и технологиите. Поради своята извънредна топлопроводимост, механични и електрически свойства, въглеродните нанотръби намират приложения като добавки към различни структурни материали – ПОМ, ПEEK, ПА6, СВМПЕ. Използването им в машинните елементи засега е ограничено, но качествата на въглеродните нанотръби ги правят перспективни и в тази сфера – особено за изработване на плъзгащи лагери, втулки, уплътнения и др.

- Проведени са изследвания на композити от СВМПЕ, градиентно напълнен с въглеродни частици, предназначен за изработването на голямогабаритни плъзгащи лагери. В тези изследвания са установени редица предимства на композитни материали с въглеродни нанотръби: по-добра работна повърхност, по-нисък коефициент на триене и по-добра акустика;
- Композитите на база СВМПЕ притежават много добри антифрикционни свойства, близки до тези на най-често използваните материали за машинни елементи на движението;
- Известни са изследвания върху модифициране на полимерни материали с метални прахове, твърди смазки и влакна с цел подобряване на механичните характеристики, топлопроводимостта и изнosoустойчивостта.
- В литературата все по-силно са застъпени изследвания на композитни материала с оглед на използването им в антифрикционни възли като лагери, направляващи и др.
- Машинни елементи от композитни материали се получават главно чрез горещо пресоване или студено пресоване. Изследванията върху режимите на пресоване са ориентирани предимно към подобряване на якостта и плътността на материала, но и към подобряване на антифрикционните му свойства.
- Наред с несъмнените си качества Tufnol има и някои недостатъци. Високата цена и сложната изработка мотивират замяната му с модерен композитен материал. Особено подходящи за целта са антифрикционни полимери и техни композити, съдържащи въглерод. В случая е предпочетен свръхвисокомолекулен полиетилен, напълнен с въглеродни нанотръби.
- Създаден е подробен план за подготовка и изпълнение на процеса на създаване на дискови заготовки на базата на СВМПЕ с различно процентно съдържание на въглеродни нанотръби – включително и такива с никелово покритие. Планът за създаване на новия композитен материал включва:
 - създаване на композитен материал на базата на СВМПЕ с различно процентно съдържание на ВНТ (CNTs) и ВНТ с никелово покритие (Ni-CNTs);
 - проектиране и изработване на подходяща матрица за заготовки;

- хомогенизиране на сместа от полимер и ВНТ чрез миксер и изпичането им под налягане в матрица на преса – процес известен като „горещо пресоване“;
- Изрязване на кубчета с размери 15x15x15 от създадените заготовки от нов композитен материал за изследване на якостта на натиск, изнosoустойчивостта, коефициента на триене и твърдостта и сравнение на резултатите от същите експерименти с материала Tufnol;
- Експериментите на изнosoустойчивост и коефициент на триене са – сухо триене върху шкурка, триене върху шкурка с морска вода и един вид масло и триене върху стомана;
- За формуване на композитните дискови заготовки е специално проектирана и изработена подходяща инструментална екипировка. Други тестови образци са получени с наличната материална база, като някои матрици са специално коригирани за целта.
- Върху част от въглеродните нанотръби е нанесено никелово покритие с цел подобряване на механичните и топлофизичните характеристики на лагерните повърхности, както за и подобряване на адхезията им към металната основа.
- Анализът на резултатите потвърждава предимствата на изследвания композитен материал на базата на СВМПЕ с различно процентно съдържание на въглеродни нанотръби в сравнение с използвания до момента Tufnol за изработване на ламелите на плъзгащи лагери. Коефициентът на триене е по-нисък, а изнosoустойчивостта е по-висока.
- От направените експериментални изследвания се вижда, че новите композитни материали са с много по-ниска якост, отколкото материалът Tufnol, но имат значително по-добри трибологични свойства.
- Като цяло получените резултати показват, че използването на новосъздадения композитен материал за изработката на ламели за плъзгащите лагери е препоръчително.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Изработена е инструментална екипировка за изработка на дискови заготовки (образци) от СВМПЕ с различно процентно съдържание на въглеродни нанотръби, а също така и с никелерани въглеродни нанотръби.

За изработените образци са измерени някои характеристики като: якост на натиск, топлоустойчивост, изнosoустойчивост, коефициент на триене, микротвърдост в условията на сухо абразивно триене, гранично смазване с морска вода и гранично триене с корабно масло.

Установено е, че композитните материали на базата на СВМПЕ с различно процентно съдържание на въглеродни нанотръби, а също така и с никелирани въглеродни нанотръби са с много по-ниска якост отколкото

материалът Tufnol, но имат някои по-добри трибологични свойства и по-добра топлоустойчивост.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. **Nikolov K., Ivanov V., Cankaya O., Dimitrov L. (2016):** "*Use of carbon nanotube composites in gearing*", In Proceedings of the 5-th International Conference on Power Transmission, October 05-08, 2016, pp. 23-30, Ohrid, Macedonia, ISSN: 978-608-4624-25-7

2. **Nikolov K., Ivanov V., Radenkov M., Cankaya O., Dimitrov L. (2016):** "*Materials Selection For Carbon Nanotube Composites In Power Transmission*", ВІСНИК ЖДТУ 2016 №3 (78), pp. 42-48, Ukraine, ISSN: 1728-4260

3. **Николов К. (2018):** "*Изисквания към формата и материалите за голямогабаритни хидродинамични плъзгащи лагери*", Българско списание за инженерно проектиране, брой 37, месец октомври, 2018 г., стр. 49-57, ISSN: 1313-7530

4. **Kandeva M., Kamburov V., Dimitrov L., Nikolov K. (2019):** "*Abrasive Wear of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene (UHMWPE), Modified with Carbon Nanotubes (CNTS)*", Journal of the Balkan Tribological Association, Vol. 26, No 2, 253 – 268 (2020), ISSN:1310-4772, Scopus SJR: 0.212

5. **Kamburov V., Dimitrova R., Nikolov K. (2019):** „*ELECTROLESS NICKEL COATING OF CARBON MICROFIBRES AND NANOTUBES INTENDED FOR A REINFORCING PHASE IN METAL/POLYMER MATRIX COMPOSITES*“, Oxidation Communications 42, No 1, 63–73 (2019), ISSN 0209-4541, Scopus SJR: 0.213

6. **Nikolov K., Kandeva M., Dimitrov L. (2019):** "*Friction of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene, modified with carbon nanotubes*", In Proceedings of 16-th International Conference on Tribology SERBIATRIB'19, ISSN: 2620-2832, pp.77-83

SUMMARY

PhD Thesis Title: Large Sliding Bearings from Composite Materials with Carbon Nanostructures

PhD Thesis Author: Kiril Emilov Nikolov

There is a growing interest in machine elements made of polymeric materials, as they are lightweight, chemically resistant, have good tribotechnical properties, have a number of technological advantages - zero series can be manufactured without further processing (eliminating the need for expensive labor), they allow for great savings of materials, much less energy is expended for their propulsion and others. Polymer machine elements also have some drawbacks that impede their wider application, such as lower mechanical strength, low density, being lightweight, having insufficient strength, insufficient hardness, low thermal conductivity (which in some cases may be advantage, and in the other disadvantage), low heat resistance and thermal stability. Part of these disadvantages of polymer machine elements can be overcome by filling the polymers and metallizing some fillers. Different methods are also used to increase the temperature resistance of plastics. One current problem is the filling of polymers with carbon nanotubes (CNTs). This problem is relatively new and there has not been sufficient research into how these fillers affect the mechanical properties of the material when used specifically for the manufacture of various machine elements. In this dissertation, polymer composites have been created based on UHMWPE, enhanced with varying percentages of pure carbon nanotubes and also of nickel-plated ones. The properties of the obtained polymer composites were investigated and their possible application for making large-sized sliding bearings is proposed.

Instrumental equipment has been developed for the manufacture of disc blanks (specimens) from UHMWPE with different percentages of carbon nanotubes and also with nickel-plated carbon nanotubes.

Some characteristics were measured for the fabricated specimens such as: compressive strength, heat resistance, wear-resistance, coefficient of friction, microhardness in dry abrasive friction, boundary lubrication with seawater and boundary friction with marine oil.

It has been found that composite materials based on UHMWPE with different percentages of carbon nanotubes and also nickel-plated carbon nanotubes have much lower strength than Tufnol, but have some better tribological properties and better heat resistance.