

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационния труд на инж. Анелия Николова Маждракова на тема: „Изследване ефектите от еластичните деформации и ненютонов флуид на Рабинович при смазването на плъзгащи лагери“ за придобиване на образователна и научна степен „доктор“ по научно направление 5.1 Машинно инженерство , Научна специалност Приложна механика

Рецензент : доц. д-р Александър Евгениев Янков , кат.”Машинни елементи и неметални конструкции” при ТУ- София

1.Кратки биографични данни и характеристика на научните интереси на кандидата.

Анелия Маждракова е родена през 1961 година. Завършва ВХТИ през 1988г. като магистър, инженер-химик, специалност „Технология на силикатите”. От 1982г. работи във ВХТИ като заема различни организационни длъжности. От 2012г. е назначена за асистент в кат.”Приложна механика”. Владее английски и руски езици на ниво B1. Ползва AutoCad, CorelDraw, Grapher, Digital Array Viewer и др. софтуерни продукти.

Научните интереси на докторантката Маждракова са ориентирани в областта на хидродинамиката и по-специално в един неин съвременен аспект – еластохидродинамика на плъзгащи лагери. Това от своя страна изисква сериозни познания в областта на механиката на флуидите, математиката, машинните елементи, теорията на смазките, програмното осигуряване и др.

2. Преглед на дисертационния труд и анализ на резултатите.

Дисертационният труд е изготвен в обем от 141 стр. с 95 фигури и 10таблици. Библиографията съдържа 159 източника, предимно на английски.

Изследването на режимите на триене в лагерите е интердисциплинна област от трибологията. В нея работят и специалисти по механика, машинни елементи, химмотология и др. Може да се смята за общоприето, че болшинството съвременни изследвания имат интердисциплинен характер. Времето на монодисциплинно, едностранчиво разглеждане, особено на проблемите на триене, износване и смазване, вече е отминало.

От тази гледна точка въвеждането и развитието на тематиката „Еластохидродинамика на плъзгащи лагери” в кат. „Приложна механика” на ХТМУ от доц. д-р Ю. Яворова, под чието ръководство е изготвена и настоящата дисертация, прави много добро впечатление.

Литературният обзор (Глава 1) е представен в 33 стр., което е сравнително голям обем на фона на общия обем на дисертацията. В замяна на това материалът е изложен аналитично, от актуална гледна точка и с оглед на задачите, които си поставя дисертанта. Използван е дедуктивен подход - от по-простото и по-старото (експерименти на Петров и Tower, класическо уравнение на Reynolds) към съвременните случаи на термо и еластохидродинамиката.

Обзорът добре демонстрира образователно-научния характер на работата. Смятам за достойнство констатацията, че от него и неспециалист в областта на хидромеханиката, ще схване предпоставките, при които е изведено базовото уравнение на Reynolds : смазката е несвиваем нютонен флуид с постоянен вискозитет; флуидният поток в лагерната хлабина е ламинарен и изотермичен ; налягането на смазката по дебелината на слоя е постоянно ; повърхностните слоеве на вала и черупката са идеално гладки и недеформируеми; полепването между смазката и повърхностите на лагера е пълно.

В обзора се разглеждат изследванията в областта на хидродинамиката на лагерите през 20 век. Това е една от областите на трибологията с най-голям брой публикации, в които се подлагат на проверка всички споменати по-горе предпоставки при извода на уравнението на Reynolds. Съвременните лагерни възли са високоскоростни и натоварени, при което предпоставката за изотермично поведение на смазката е неприемлива. Термокоэффициентът на вискозитета се мени в широки граници – появява се термохидравличната теория на лагерите. При високите скорости на въртене и с отчитане на грападостта на повърхностите течението на смазката в лагерната хлабина преминава от ламинарно в турбулентно. Химмотологията се развива динамично – появяват се полусинтетични и синтетични смазки с ред нови присадки, което прави съвременните смазки ненютонени флуиди. При това смазка с един химичен състав, в зависимост от скоростта на деформиране може да се държи като нютонена или ненютонена течност.

Специално място в обзора е отделено и на еластохидродинамичния ефект. Той е характерен за висшите (неконформни) контактни двойки като търкалящи лагери, зъбни и гърбични механизми. В тези случаи, в областта на малките номинални площи на допиране, налягането на смазката нараства многократно и скокообразно, което изисква задължително отчитане на деформациите на контактните повърхности на лагера и на промените във вискозитета на смазката.

В обзора обосновано се констатира тенденция за изследване на комбинираното влияние на няколко от изброените фактори върху разпределението на налягането в лагерите.

Обзорът завършва с ясно формулирана цел.

Задачите на работата следват логически от формулираната цел.

Глава 2 е посветена на експериментално изследване на разпределението на налягането на маслото в радиален плъзгащ лагер. Самият опит на

докторантката да се създаде за целта опитна установка е похвален. Тя съдържа известни елементи като лостова система за радиално натоварване и монтиран върху нея измервател на силата на триене. Добро впечатление прави идеята чрез един радиален канал във втулката и чрез нейното завъртането на ъгъл θ или осово изместване по шийката, да се заснемат двете разпределения на флуидното налягане. Недостатък на стенда са ниските радиални натоварвания, които може да създава. Лагер, чиято шийка е с диаметър $40 \cdot 10^{-3}$ m може да поема десетократно по-големи радиални натоварвания. От метрологична гледна точка закрепването на манометър към втулката на лагера, както и използването на контактни микрометрични часовници „замърсяват” съществено достоверността на измерване, тъй като те влияят върху равновесието на втулката.

Въпреки направените забележки, получените резултати от четири групи измервания (на разпределението на налягането като функция на оборотите, на радиалното натоварване, по ширината на шийката и от материала на черупката) изглеждат достоверно и в съответствие с известни от литературата резултати. Разбираема е консатацията за по-силно нарастване на налягането под влияние на натоварването в сравнение с това на оборотите на лагера.

Сравнението на разпределенията при алуминиево и полиуретаново покритие може да се оцени като качествено. Резултатите за двата материала са много близки.

Глава 3 разглежда реологията на минерални масла, модифицирани с вискозитетно-индексни присадки. Последните са широко използвани в съвременните течни смазки. Известно е, че тези присадки са високомолекулни полимери, които придават на маслата ненютонови свойства. Коментирани са накратко реологичните характеристики в двата възможни случая – на псевдопластични или дилатантни флуиди, както и на математичните модели, с които те се описват. Това са степенният и кубичният модел (Рабинович).

Основно достойнство на тази глава са експерименталните изследвания на реологията на минерални масла. Сполучливо е използвано българско базово масло с вискозитетен клас по ISO VG 46, с различни проценти на вискозитетно-индексна присадка Polibuten 30. Такова трансмисионно масло е приложимо в общото машиностроене включително и за мазане на плъзгащи лагери.

Опитите са проведени в Лабораторията по реология на смазките в Политехника – Букурещ, която се смята за водеща в нашия регион. Добро впечатление прави следващото описание на подготовката на пробите, използваната апаратура и методиката на работа. Използван е съвременен ротационен вискозиметър с набор от конуси, позволяващи да се реализират скорости на деформация в широк диапазон (200 s^{-1} – 13000 s^{-1}). Програмното осигуряване дава възможност да се сравняват чрез коефициент на корелация опитните резултати с тези от двата модела. Числените стойности на параметрите от моделите се получава чрез регресионен анализ.

Проведените групи опити убедително доказват, че полимерната присадка полибутен превръща базовото масло в ненютонов псевдопластичен флуид (фиг. 3.16–3.23). При това, повишаването на концентрацията на присадката предизвиква осезаемо нарастване на вискозитета и на срязващото напрежение. Двата изпозвани модела – степенен и кубичен описват достатъчно добре реологията на смазката – и при двата $R_f \geq 94 \%$. При по-високите проценти на присадката R_f е по-голям.

Фигура 3.30 е определяща за избора на реологичен модел. Тя доказва, че моделът на Рабинович е по-подходящ за математично описание на изследваната смазка особено при високи скорости на срязване и на процентно съдържание на присадката.

Глава 4 има определящо място в дисертацията, защото в нея се излага механо-математичният модел на изследвания лагер – фиг. 4.1 и 4.2. Лагерът е с крайни размери, натоварен с вертикална радиална сила върху шийката на вала, смазката е масло с ненютонови свойства, течението е изотермично и изовискозно. Върху черупката е нанесено тънко еластично покритие с дебелина d , като $d / r \ll 1$. В т.4.2 и 4.3 е направена обосновка защо в разглежданията се пренебрегват кривините на лагерните повърхности и на масления слой. Това е допустимо, защото относителната лагерна хлабина $\beta \approx 0,001 \ll 1$, както и относителната дебелина на слоя $h / r \approx 0,001 \ll 1$. Тази обосновка е направена след обсъждане на дисертацията в кат. “Приложна механика“. Цитирани са и класически изследвания в областта, където е подходено по същия начин [4, 45, 152, 153]. Според рецензента обосновката може да се приеме.

Представени са двете системи уравнения за разпределение на налягането в лагерната хлабина – за нютонов флуид (ф-ли 4.12) и за флуид по Рабинович (ф-ли 4.13). Тук се включват уравненията за движение на потока в хлабината, уравнението за непрекъснатост и това за дебелината на слоя след деформацията на покритието.

Особено подробно е разгледан случая на нютонов флуид. Изводът е достатъчно сложен, но тук новост не може да се търси. Усвоеният подход като методология има образователен характер.

В Глава 5 е представен извод и числено решение на уравнението за разпределение на ХД налягане за установено движение на вискозен флуид. Прави се с извод на уравнението на Рейнолдс за случая на нютонов флуид. Решението на изходната система диференциална уравнения се търси при използване на класически гранични условия за скоростта на флуида по трите оси на въведената координатна система.

Полученото уравнение не представлява научна новост, въпреки че направеният подробен извод с въвеждането на специфичните предпоставки на конкретната задача има своя творчески елемент и покрива напълно образователните цели на дисертацията.

В същата глава се прави и кратък извод на модифицираното уравнение на Рейнолдс за установеното движение на ненютоновия флуид, описван с модела на Рабинович. В безразмерната форма на това уравнение факторът ψ отчита ненютоновите ефекти на смазочния флуид и аналогично на коефициента на псевдопластичност, разделя изследваните флуиди на псевдопластични и дилатантни.

Решението на еластохидродинамичната задача предполага съвместно решение на уравнението за разпределение на налягането, уравнението за геометрията на масления слой и уравнението за еластичните деформации. Решението на двете уравнения за разпределение на налягането се провежда числено посредством метода на крайните разлики. Използва се итеративна процедура като получената при всеки цикъл система алгебрични уравнения се решава с прилагане на метода на свръхрелаксацията за подобряване на сходимостта на решението. Като начално приближение се използва решението при недеформируемост на еластичното покритие, след което за получената стойност на налягането в дадена точка се определя деформацията. Решението се повтаря до достигане на удовлетворително малка разлика в стойностите на налягането от две последователни приближения.

В Глава 6 от работата са представени резултати от численото решение. Работните параметри за решението са дадени в табличен вид и техните стойности са подбрани от публикации по тематиката с цел сравнение на резултатите. Решенията са представени графично по групи в зависимост от изследвания ефект – на еластичните деформации на покритието, на ненютоновото поведение на флуида и на комбинация от двата ефекта.

Числените резултати за налягането, деформациите и дебелината на филма при деформируемост на покритието са представени с 3D и 2D графики, които показват очакваните тенденции за промяна на изследваните величини в процеса на ЕХД смазване на плъзгащи лагери.

Резултатите за ненютоновите ефекти показват, че за псевдопластичните смазочни материали се наблюдава намаляване на стойностите на ХД налягане в масления слой, докато за дилатантните флуиди е налице обратният ефект. Има съответствие между получените тенденции на влияние и публикувани резултати от други автори.

По отношение на комбинирания ефект, при деформируемо покритие флуидите с ненютонови (дилатантни и/или псевдопластични) характеристики показват същото влияние върху стойностите на налягането както при недеформируема черупка, но ненютоновите ефекти са по-леко изявени.

Носеща способност на лагера и числото на Зомерфелд имат по-ниски стойности при смазване с псевдопластични флуиди и по-високи стойности за

дилатантни смазки в сравнение със случаите на работа с нютонови масла.

3. Оценка на съответствието между автореферата и дисертационния труд

Авторефератът е отпечатан на 43 страници. Съдържа списък с означения, списък на публикациите на докторантката и сведения за апробация на работите по дисертацията. Отразени са и намерените цитирания. Номерирането на формулите и фигурите в автореферата и дисертацията е идентично. Съдържанието на автореферата отразява обективно в обобщен вид направеното в дисертацията.

4. Характеристика и оценка на приносите в дисертационния труд

Дисертацията съдържа научно-приложни и приложни приноси.

По мнение на рецензента основният принос е : Решаване на хидродинамичната задача за радиален плъзгащ лагер с крайна ширина с отчитане на комбинираното влияние на ненютонови смазки и деформируеми повърхностни слоеве на лагерната черупка. За целта е разработен механо-математичен модел на лагера. Изведено е модифицирано уравнение на Рейнолдс при смазване с псевдопластични и дилатантни флуиди, описвани с модела на Рабинович.

Показано е, че и при плъзгащи лагери с полимерно покритие на черупката е възможен режим на еластохидродинамично смазване.

Обосновано е влиянието на вискозно-индексните присадки за превръщане на смазките в ненютонови течности. Експериментално е доказано, че има трансмисионни масла, чиято реология се описва с висока точност от кубичния модел на Рабинович.

Направен е актуален и аналитичен обзор върху хидродинамичната теория на смазването, който има самостоятелно познавателно значение.

Приложни приноси са създаването на стенд на радиален плъзгащ лагер и проведените с него експерименти, които качествено доказват ефекти от разпределението на хидродинамичното налягане.

Приложен принос има и в получаването на подробни опитни данни за реологията на българско трансмисионно масло с вискозно-индексна присадка.

5. Мнение за публикациите на кандидата по темата на дисертацията

Аспирантката има 6 публикации по темата на дисертацията. От тях две са индивидуални и две са на английски език. Една работа е отпечатана в международно списание – *Journal Tribology in Industry*. За същата работа са констатирани две цитирания. Четири от публикации са отпечатани в българския

трибологичен журнал Бултриб. Считам, че по отношение на публикации и цитирания докторантката превишава установените изисквания.

6. Критични бележки и коментарии

6.1 В заключителната част на обзора липсва обяснение защо са избрани за изследване споменатите в целта на работата два фактора – неньютонова смазка и деформируеми повърхности на черупката на лагера. Това става ясно по-нататък в дисертацията, но считам, че от методична гледна точка, би било добре да се обоснове още в първата глава.

6.2 За всички показани в Глава 2 опитни резултати липсва информация за точност и възпроизводимост. Може да се отбележи също, че при такъв вид изследвания на влиянието на няколко фактора много по-информативен би бил планиран експеримент с получаване на обща регресионна зависимост.

Концепцията за усъвършенстването на стенда няма да бъде коментирана, защото рецензентът предпочита да консултира в бъдеще докторантката върху нея, отколкото да я критикува в рецензията си.

6.3 В Глава 3 се разглеждат видовете базови масла, присадките и добавките към тях. Изяснена е разликата между термините присадки и добавки. Въпреки това се използват и двата термина с един и същи смисъл

6.3 При обосновката на модела в Глава 4 на фиг.4.1 и 4.2 се ползва координатна система x, y, z без да е обозначена началната и точка.

В модела не е упоменато мястото, от където се подава смазка в хлабината и това влияе ли на разпределението на ХД налягане.

6.4 При компютърната симулация в Глава 6 са използвани масла с характеристики, взети от литературни източници. Не става ясно, защо не са използвани резултатите от Глава 3..

7. Лични впечатления от дисертанта.

Особени лични впечатления от докторантката нямам. Мога да отбележа само доброто и стегнато докладване на вътрешната защита.

8. Заключение

Представеният ми за рецензиране труд представлява добре структурирано завършено изследване, притежаващо всички атрибути на дисертация за присъждане на степента „доктор“ в т.ч. на: реализиране на стенд, експерименти, механо-математичен модел, извод на уравнения и алгоритъм за численото им решение, ясно формулирани приноси.

Всичко това ми дава убедителни основания да предложа на Почитаемото научно жури да удостои инж. Анелия Николова Маждракова с образователната и научна степен „доктор“ по Научно направление 5.1 Машинно инженерство, Научна специалност Приложна механика.

София, 12.07.2017 г.

Рецензент :

/ доц. д-р А. Янков /

