

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Радостина Бонева Янкова

ИЗСЛЕДВАНЕ НА НАВАРЕНИ СЛОЕВЕ, ПОДЛОЖЕНИ НА ИЗНОСВАНЕ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на образователната и
научна степен „ДОКТОР”**

**по докторска програма: Технология на машиностроителните материали
професионално направление: Машинно инженерство**

Научен ръководител: Доц. д-р инж. СЕРГЕЙ КИРОВ КИРОВ

Рецензенти:

- 1. проф. д-р инж. Мара Крумова Кандева-Иванова - ТУ- София**
- 2. доц. д-р инж. Росица Веселинова Петкова –Слипец- ВСУ -Варна**

Варна 2019 г.

Дисертационният труд е обсъден на 25.06.2019 г. в катедра „МАТЕРИАЛОЗНАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ НА МАТЕРИАЛИТЕ“ на катедрен съвет, съгласно заповед на Ректора на ТУ-Варна № 347 /19.06.2019 г. и насочен за защита.

Автор: инж. Радостина Бонева Янкова

Заглавие: Изследване на наварени слоеве, подложени на износване

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Радостина Бонева Янкова

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА НАВАРЕНИ СЛОЕВЕ, ПОДЛОЖЕНИ
НА ИЗНОСВАНЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на образователната и
научна степен „ДОКТОР”**

Варна 2019 г.

Дисертационният труд съдържа 143 страници, включително 74 фигури, 31 таблици, 35 формули, оформени в 5 глави, приноси на дисертационния труд, списък с публикациите на автора по темата на дисертационния труд и списък на използваната литература от 131 заглавия, от които 87 на кирилица и 44 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на г. от ч. в на открито заседание на жури сформирано със заповед на Ректора №/..... г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересуващите се в Докторантски център, стая 318 НУК.

ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Актуалност на проблема

Актуалността на научните изследвания по настоящата разработка, произтича от стремежа да се сведат до минимум загубите от износване на работните органи и детайлите в контактните съединения на машините. В този аспект, особено важно е провеждането на изследване на износването на повърхнини, работещи в екстремални условия на контактни взаимодействия, каквито са експлоатационните условия на земеделската и строително-пътна техника – висока запрашеност с абразивни микрочастици, наличие на влага, агресивни компоненти, натоварвания и др.

2. Цели и задачи на изследването

Целта на дисертационния труд е комплексна оценка и сравнителен анализ на структурните, механичните и трибологични характеристики, получени при различни методи за наваряване и условия на триене.

Задачите, които са формулирани за постигане на поставената цел са следните:

- ❖ Анализиране свойствата на различни видове материали, които се използват за възстановяване на детайли, подложени на абразивно износване;
- ❖ Разработване на методика за определяне степента на износване;
- ❖ Изследване влиянието на абразивната среда, контрагентното и режима на триене върху параметрите на износване на наварени образци;
- ❖ Определяне на зависимостта между твърдостта по дълбочина на наварения слой и износоустойчивостта;
- ❖ Изследване влиянието на химичния състав на наварения метал върху износоустойчивостта;
- ❖ Изследване релефа на повърхността на наварения слой след износване;
- ❖ Определяне и визуализиране на едновременното влияние на няколко фактора, влияещи на абразивното износване след наваряване, чрез компютърна симулация;
- ❖ Математическо моделиране на процеса абразивно износване, в зависимост от твърдостта на материала и вида на абразивната среда;

3. Обект и предмет на изследване

Материалите, които се използват включват електроди за наваряване, чиито метал в заваръчния шев има висока устойчивост срещу абразивно износване. Подбрани са материали, с

различно процентно съдържание на въглерод и легиращи елементи, които са определящи в процеса на износване. Изследвани са и конвенционални материали –различни марки стомани в сурово състояние и термообработени. Променливите параметри в условията на триене се явяват вида на абразивната среда, вида на контралялото, използвано при експерименталните изследвания и режима на триене.

4. Методи на изследване

Методите за изследване включват: експериментално изследване на износване при различни режими на триене, определяне на твърдост по дълбочина на наварения слой, металографски и рентгеноструктурен анализ на наварения слой, изследване релеф след износване.

5. Място на изследване

Изследванията са проведени в лабораториите на катедра МТМ и ТМММ при ТУ – Варна и лабораторията по трибология в ТУ-София. Лазерно наварените образци са изработени във фирма “Хофман Консулт България”.

6. Научна новост на изследването

Разработена е методика за изследване на абсолютни и относителни характеристики на износването, в условия на абразивно износване. Предимство на методиката се явява осигуряването на еднаквост на условията на износване, чрез поддържане на относителна хомогенност на абразивната среда, при по-дълъг път на триене, което предполага абсолютната повтаряемост на експеримента. Изследвана е връзката между различни фактори, влияещи на абразивното износване след наваряване.

7. Практическа ценност на изследването

Към резултатите с приложна насоченост могат да се посочат получени експериментални данни и зависимости с разработената методика за механизмите на абразивно износване; взаимовръзката между микроструктурата, механичните и трибологични характеристики на наварени покрития при промяна на основни групи фактори – абразивна среда и естество на материала на контактните повърхнини (противоялото). Получените резултати дават възможности за препоръки при избор на материал за изработване или възстановяване на детайли в съответствие с реалните експлоатационните условия на работа.

8. Аprobация на изследването

Основните резултати от изследванията са докладвани и публикувани в следните научни форуми и издания:

Конференции:

- 11 th International Conference on Tribology, BULTRIB'15, 11-13 september 2015, Sozopol;
- 12 th International Conference on Tribology, BULTRIB'16, 27-29 October, 2016, Sofia, Bulgaria;
- International Conference "NDT Days 2017" – Sozopol

Списания:

- Известие на съюза на учените-Варна, Секция „Технически науки“1, 2016, стр.73-75;
- Годишник на ТУ-Варна , 2016, стр. 81-82;
- ТРИБОЛОГИЧЕН ЖУРНАЛ БУЛТРИБ, Година V, брой 05 (05), 2015 , стр.282-286;
- ТРИБОЛОГИЧЕН ЖУРНАЛ БУЛТРИБ, Година VI, брой 06 (06), 2016 , стр.209-216;
- Научни известия на НТСМ, бр.1(216) ISSN 1310-3946, НТСМ – София, с. 258-261, 2017г.;

9. Публикации по дисертационния труд

Основните етапи от разработването на дисертационния труд са отразени в 4 публикации, списък на които е приложен в края на автореферата.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

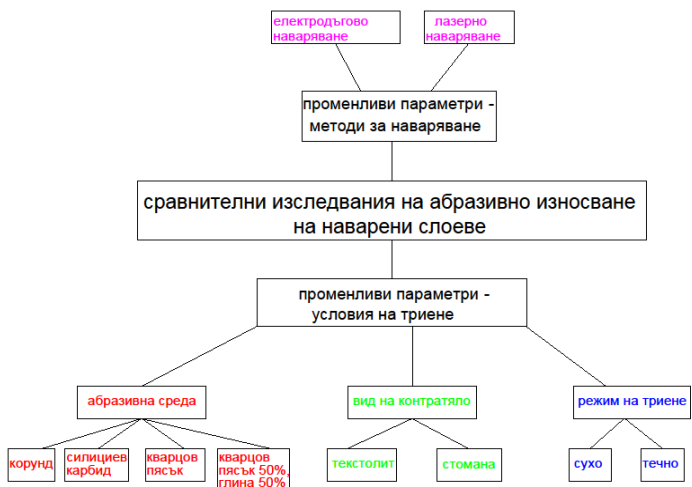
Глава I. Анализ на някои аспекти от изследванията по проблема

В първа глава е представен литературен обзор, в който са анализирани някои основни аспекти в изследванията на износване. Представени са критериите за оценка на износването. Посочени са видовете износване, според основните фактори, които го определят. Разгледана е кинетиката на процеса и измененията, произтичащи от износването. Представени са използваните в лабораторната практика кинематични схеми на триене и са класифицирани абразивните среди. Разгледани са методите за изследване на износоустойчивост, според вида на износването и количествената характеристика, която се оценява.

Обърнато е внимание на възстановяването на износени повърхнини чрез наваряване, като са класифицирани методите и материалите за наваряване. Посочени са характеристиките, свързани с износоустойчивост на типовете материали за наваряване, в зависимост от износащите фактори.

Глава II. Материали и методики на изследване

Във втора глава са разгледани материалите и методиките, които се използват при изследването на износване. На фиг. 1 е представена схемата с избраните процеси и променливи параметри.



Фиг. 1. Схемa на избраните процеси и променливи параметри

2.1. Видове материали подложени на абразивно износване

Изработени са лазерно наварени образци с различна твърдост във фирма “Хофман Консулт България” с апарат за лазерно наваряване ALM-200 с лазерен кристал– Nd: YAG.



Фиг.2. Апарат за лазерно наваряване

В лаборатория в ТУ Варна са наварени слоеве върху образци от средновъглеродна, нисколегирана стомана 40X /ГОСТ 10702-78/. Материалите, които се използват включват електроди за наваряване, чиито метал в заваръчния шев има висока устойчивост срещу абразивно износване. Подбрани са материали, с различно процентно съдържание на въглерод и легиращи елементи, които са определящи в процеса на износване.

За сравнителен анализ са изследвани и конвенционални материали –различни марки стомани в сурово състояние и термообработени, както и реален детайл от земеделската техника.

Таблица 1. Материали за наваряване

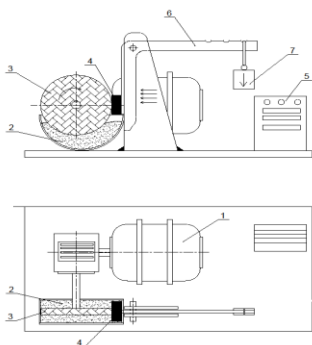
<i>Марка</i>	<i>Химичен състав</i>				<i>Диам. на електр. тт</i>	<i>Ток, А I слой</i>	<i>Ток, А II слой</i>	
	<i>C, %</i>	<i>Si, %</i>	<i>Mn, %</i>	<i>Cr, %</i>				
EH 550 / E Fe8/	0.5	2.4	0.4	9.0	3.2	140	170	
OK 84.78 / E ZFe14/	4.5	0.8	1.5	33.0	3.2	120	150	
OK Weartrode 60T / E ZFe14/	4.8	0.7	1.0	34.3	3.2	115	160	
<i>Марка</i>	<i>Химичен състав</i>					<i>Диам. на елект. тт</i>	<i>Ток, А I слой</i>	<i>Ток, А II слой</i>
	<i>C, %</i>	<i>Mo, %</i>	<i>Nb, %</i>	<i>Cr, %</i>	<i>W, %</i>			
Abradur 66 /E Fe 16/	6.0	6.0	6.0	22.0	2.0	3.2	100	120
Abradur 64 E Fe 15/	6.0		7.5	26.0		3.2	110	140

Таблица 2. Химичен състав на използваните стомани

Марка	Химичен състав					
	C, %	Si %	Mn %	Cr %	Mo %	V %
40X <i>/ГОСТ 10702-78/</i>	0,36-0,44	0,2-0,4	0,5-0,8	0,8-1,1	-	-
ШХ15 <i>/ГОСТ 801-78/</i>	0,95-1,05	0,2-0,4	0,2-0,4	1,3-1,6	-	-
X12MФ <i>/ГОСТ 5950-2000/</i>	1,45-1,65	0,1-0,4	0,15-0,4	11-13	0,4-0,6	0,1-0,3

2.2. Лабораторен стенд за изпитване на износоустойчивост

С цел провеждането на изследвания, осигуряващи изпитвания при условия близки до реалните е конструиран и разработен лабораторен стенд за изпитване на износване, който е предназначен за метални образци с плоски и цилиндрични повърхнини и е с възможност за бърза подмяна на контратялото, изработено от различни материали/метали, полимери, керамики/, както и за промяна условията на триене – сухо, полусухо, абразивно и др. Принципна схема е представена на фиг.3.



Фигура 3. Принципна схема



Фигура 4. Готова установка

1. Двигател редуктор, 2. Абразив, 3. Сменяемо контратяло, 4. Пробен образец,
5. Честотен преобразувател, 6. Лостов механизъм, 7. Тежести

Изследваният образец се монтира неподвижно на лостов механизъм, който го притиска към контралялото със сила 10N. Чрез честотен преобразувател се регулират оборотите на контралялото и съответно изминатия път на триене.

При въртеливото движение на контралялото, потопено в получената смес от абразив и машинно масло, се извършва непрекъснато разбъркване и поддържане на нейната относителна хомогенност. Това осигурява еднаквост на условията на износване при всички образци и повтаряемост на резултатите. Свободните абразивни частици, носени от флуида, попадат в зоната на контакт между образца и контралялото, проникват в двете повърхности и чрез надирание ги разрушават.

Конкретните условия на изпитване осигуряват висока интензивност на процеса абразивно износване, повтаряемост на резултатите и са подходящи както за меки, така и за твърди материали.

2.3. Методики за експериментално изследване на износоустойчивост

Изработени са пробни образци, върху които са проведени изследвания, включващи:

- определяне на твърдост HV5 по дълбочина на наварения слой ;
- изпитване на износване в режим на течно триене и в режим на сухо триене;
- определяне параметрите на износване – път на износване, масово износване, интензивност на износване; износоустойчивост;
- металографски анализ, включващ макроструктурен и микроструктурен анализ на износените образци в различните зони;
- изследване релеф на повърхността след износване;
- рентгеноструктурен фазов анализ на наварения слой преди и след износване;
- определяне и визуализиране на едновременното влияние на няколко фактора, влияещи на абразивното износване след наваряване чрез компютърна симулация;
- получаване на математичен модел на процеса абразивно износване, в зависимост от твърдостта на материала и вида на абразивната среда;

2.4. Методика за изпитване на абразивно износване в режим на течно триене

Първият режим на триене е осъществен, чрез използване на разработения стенд в лаборатория на Технически Университет Варна. Проведеното сравнително изследване на хидроабразивно износване е извършено в среда от абразивни частици, смесени в определена консистенция с минерално машинно масло с висок вискозитет. Машинното масло се явява

носител на частиците, осигуряващ хомогенност на абразивната среда. По този начин се предотвратява нагряване на абразивната среда, вследствие триенето на повърхността.

За установяване на динамиката на сработване и износване на изследваните материали, се провеждат по 3 опита с всеки материал. Натоварването върху пробния образец, осъществено чрез тежестите на лостовата система на стенда е 10N. Честотният преобразувател е настроен с обороти на въртене, които осигуряват скорост на износване 43m/min. Извършени са 5 серии на изпитване, всяка с продължителност по 5 min.

Големината на износване се определя по тегловния метод, за всеки от материалите с помощта на аналитична везна с точност 0,001 g., като всички образци се почистват, подсушават и претеглят, в началото и края на всяка серия изпитване. Изменението на масата на образците след всяка серия изпитване, дава възможност да се получи динамиката на изменение на износването. Масовото износване се определя от зависимостта:

$$\Delta m = m_n - m_k, \text{ mg} \quad (1)$$

където:

m_n - масата на образца в началото на изпитването, mg;

m_k - масата на образца в края на изпитването, mg;

Интензивност на износване е определена от зависимостта:

$$I = \Delta m / S, \text{ mg/m} \quad (2)$$

където:

S- изминатия път на триещата се повърхност по време на трибологичното изпитване.

Износоустойчивостта представлява реципрочна стойност на интензивността на износване:

$$E = 1/I \quad (3)$$

2.5. Методика за измерване на твърдост.

Измерванията на твърдост са извършени по метода на Викерс с натоварване 5 kg., съгласно БДС EN-ISO 6507-2006. Измерванията са проведени с приставка HANEMANN . Диагоналите на отпечатъка са отчетени с оптичен микроскоп тип "NEOFOT 2", който е прикрепен към прибора.

2.6. Избор на абразивни среди при експерименталните изследвания

В режим на хидроабразивно износване се използват три вида абразивни среди (табл.3). Абразивните среди са подбрани с еднакъв зърнометричен състав – 120 μm. Класифицирани са спрямо обемната плътност, която е определена експериментално за всяка от трите абразивни среди.

Таблица 3. Абразивни среди при изпитване на износване.

1	силициев карбид 2C-120-F-120	$\rho = 2.7 \text{ g/sm}^3$
2	кварцов пясък 50%, глина 50%	$\rho = 2.1 \text{ g/sm}^3$
3	кварцов пясък с едрина на зърното C120	$\rho = 2.4 \text{ g/sm}^3$

В режим на сухо триене се използва абразивна среда Корунд Р 120.

2.7. Контактни процеси при триене и износване, избор на контратяло

Задължителни условия да има триене, а оттам и износване са:

- допирание между телата
- релативно преместване между тях

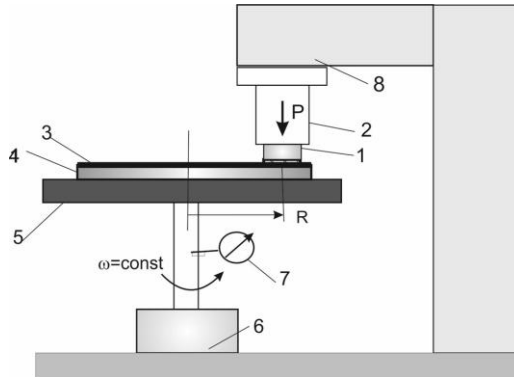
Повърхнините на телата и след най-прецизни обработки са грапави, затова допирането между тях се извършва в отделни зони (контактни петна). Изследвания показват, че допирането на твърдите тела се осъществява винаги в отделни зони, чиято сумарна площ се нарича фактическа площ на допирание. Тя винаги е по-малка от номиналната (видимата) площ на контакта и нараства линейно с увеличаване на нормалния натиск.

За изследване влиянието на контактната площ върху параметрите на износване се използват контрателата от различни материали с различен коефициент на триене и фактическа площ на контакта. Контрателата, които се използват при експерименталните изследвания на абразивно износване са изработени от текстолит и стомана 45 в сурово състояние.

2.8. Методика за изпитване на абразивно износване в режим на сухо триене

Трибологичните изследвания на наварените образци, в режим на сухо триене, са осъществени в Лабораторията по трибология на Технически Университет София. Изследвани са 5 вида образци, като 4 от тях са наварени с износоустойчиви електроди, а петия образец е еталонен образец, изработен от стомана 40X, който се използва за базов при сравнителните изследвания – табл.4.

Абразивното износване на образците се изследва в условия на сухо триене по повърхнина с твърдо закрепени абразивни частици с триботестер „Палец диск“, схематично представен на фиг. 5.



Фигура 5. Схема на триботестер «Палец диск» за изследване на износването при триене по повърхнинна със закрепен абразив

Изследваният цилиндричен образец 1 (палец) се закрепва неподвижно в леглото на държач 2 в натоварваща глава 8, така че челната повърхнина на образца контактува с абразивната повърхнина 3, захваната неподвижно за хоризонтален диск 4. Дискът 4 се задвижва от електродвигател 6 и се върти около вертикалната си централна ос с ъглова скорост $\omega = const$.

Нормалното натоварване P е приложено в центъра на тежестта на контактната площадка между образца и абразивната повърхнина и се осигурява с тежести с помощта на лостова система в натоварващата глава. Пътят на триене се задава чрез броя обороти (цикли) с оборотомера 7.

Устройството позволява изменение на скоростта на плъзгане чрез изменение на ъгловата скорост на диска от управляващ блок и/или чрез изменение на разстоянието R между оста на въртене на диска 4 и оста на образца 1.

Абразивната повърхнина 3 се моделира чрез импрегниран корунд (E) с твърдост 9.0 по скалата на Моос.

Методиката на изследване се състои в измерване на масовото износване m на всеки образец за определен път на триене L (брой цикли на триене) и изчисляване на интензивността на износване \dot{i} по формулата:

$$I = \frac{m}{\rho \cdot A_a L} \quad (4)$$

Износоустойчивостта E на покритията се пресмята като реципрочна стойност на интензивността, т.е.

$$E = \frac{\rho A_a L}{m} \quad (5)$$

където ρ е плътността на материала на покритието.

Всички изпитания са проведени при еднакви условия на контактно взаимодействие – натоварване, скорост на плъзгане, път на триене и вид и параметри на абразива.

2.9. Методика за металографски анализ

Микроструктурата на наварения слой е изследвана чрез металографски анализ. Извършено е пакетиране на пробите, чрез заливане с епоксидна смола. Подготвените микрошлифове са шлифовани с помощта на машина Metasinecs и металографски шкурки. Полирани са на машина Metapolan с паста ГОИ и са третираны с 3%-ен разтвор на азотна киселина (HNO_3) и царска вода с подходяща в съответния случай продължителност. Обектите са изследвани с помощта на металографски микроскоп Neophot 2, притежаващ набори от окуляри и обективи, а също и допълнително оборудване, даващо възможност за наблюдение на микроструктурите в поляризирана светлина или при косо осветление. Микроскопът е допълнително окомплектован с дигитална фотосистема Capture 2.7. Общото увеличението на металографската структура е определено с помощта на обект микрометър, фотографиран и обработван аналогично на съответната структура. Определена е структурата на материала, както и наличието на карбидни включения в наварения слой.

2.10. Методика за изследване релеф на повърхността след износване

За да се регистрира промяната на фактическата площ на контакта и броя на контактните петна е изследван релефа на повърхността, след износване, като е отчетена графично грапавостта на профила след износване.

Релефът на повърхността е изследван чрез отчитане на грапавост с измервателен уред Mitutoyo в Лаборатория към катедра ТМММ към Технически Университет Варна.

2.10. Методика за рентгеноструктурен фазов анализ преди и след износване

Проведен е фазов анализ на рентгенов дифрактометър УРС-50М в Сг излъчване в Лабораторията по структурен анализ към катедра МТМ на Технически Университет Варна. Качественият фазов анализ е извършен въз основа на получените дифрактограми.

Идентифицирането на фазите е според пресметнатите междуплоскостни разстояния и съпоставянето им с данните за теоретичните междуплоскостни разстояния на различните фази от специализирани справочници.

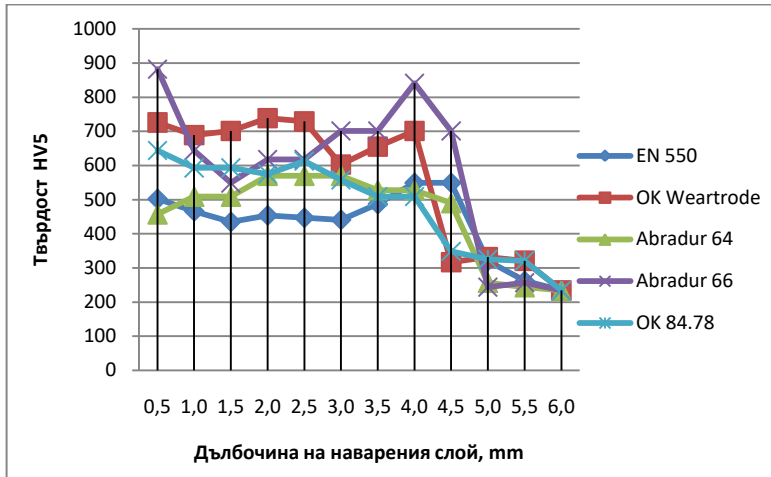
ИЗВОДИ КЪМ ГЛАВА II

- За оценяване и анализиране на структурните, механичните и трибологични характеристики, получени при различни методи за наваряване и условия на триене е избрана схема с променливи параметри.
- Подбрани са материали, с различно процентно съдържание на въглерод и легиращи елементи, които са определящи в процеса на износване. За получаване на сравнителен анализ, са изследвани и конвенционални материали –различни марки стомани в сурово състояние и термообработени, както и реален образец от земеделска техника.
- Конструиран и разработен е лабораторен стенд за изпитване на износване, който е предназначен за метални образци с плоски и цилиндрични повърхнини и е с възможност за бърза подмяна на контратялото, изработено от различни материали/метали, полимери, керамики/, както и за промяна условията на триене – сухо, полусухо, абразивно и др.
- Избрана е методиката за експериментални изследвания, която включва:
 - определяне на твърдост по дълбочина на наварения слой;
 - изпитване на износване в различни режими на триене;
 - металографски анализ;
 - изследване релеф на повърхността;
 - рентгеноструктурен анализ на наварения слой преди и след износване;

ГЛАВА III. РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

3.1. Твърдост по дълбочина на наварения слой

Твърдостта на наварения слой е отчетена със стъпка 0.5mm до дълбочина 6mm, или до достигане на основния материал.

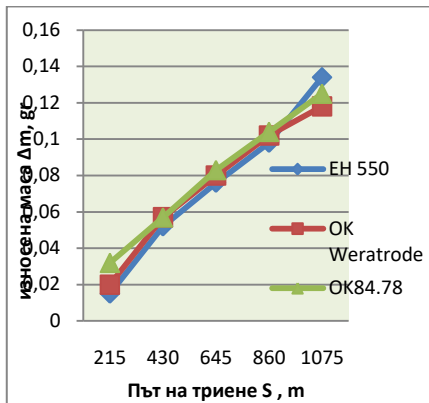


Фигура. 6. Диаграма на Твърдост HV5 по дълбочина на наварения слой

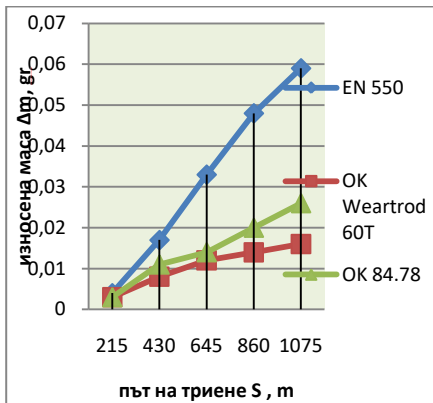
Навареният слой е с дълбочина 4-4.5 mm. След тази дълбочина твърдостта е определена от основния материал.

3.2. Резултати от абразивно износване на наварени слоеве в условия на течно триене при подмяна на абразивните среди

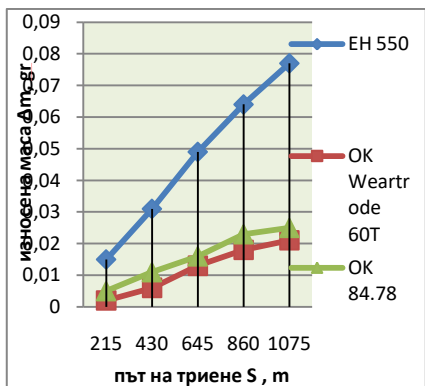
Електродите, които се използват за наваряване са EN 550, OK Weartrode 60t и OK 84.78. На базата на експериментално получените стойности за параметрите на износването са построени диаграмите на масовото износване спрямо пътя на триене (фиг.7, 8, 9) и на износоустойчивостта на образците в различните абразивни среди (фиг.10, фиг.11).



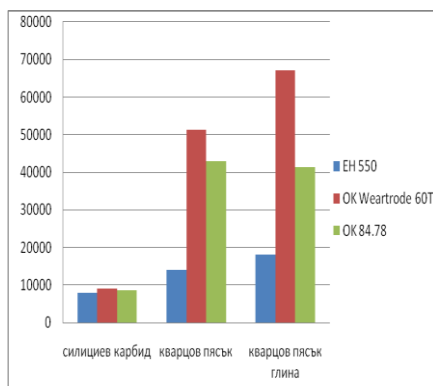
Фигура 7. Диаграма на износената маса спрямо път на триене в среда от сил. карбид



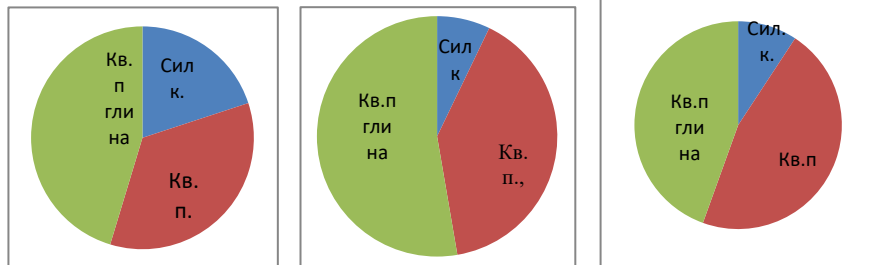
Фигура 8. Диаграма на износената маса в кварцов пясък 50 %, глина 50%;



Фигура 9. Диаграма на износената маса спрямо път на триене в среда от кварцов пясък



Фигура 10. Износоустойчивост E на в трите абразивни среди



а)

б)

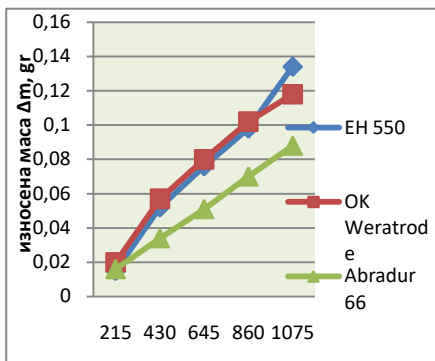
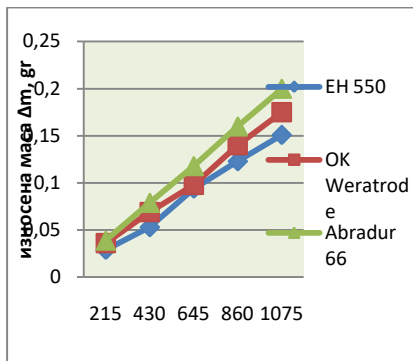
в)

Фигура 11. Износоустойчивост на образец: а) наварен с ЕН 550 в различните абразивни среди; б) наварен с ОК Weartrade 60Т в различните абразивни среди; в) наварен с ОК 84.78 в различните абразивни среди;

Видът на абразивната среда оказва съществено значение при износането. Силициевият карбид е най-силно абразивната среда, като износоустойчивостта и на трите образеца е ниска. Като най-слабо абразивна среда се явява сместа от кварцов пясък и глина. Износоустойчивостта на образците в тази среда значително нараства.

3.3. Резултати от абразивно износане на наварени слоеве в условия на течно триене при подмяна контратялото

Изследвано е влиянието на контактната площ върху параметрите на износане на наварени образци, като са използвани електроди ЕН 550, ОК Weartrade 60Т и Abradur 66. Контрателата, които се използват са изработени от стомана 45 и текстолит. Изследванията са проведени в режим на течно триене, с абразивна среда от силициев карбид. На базата на експериментално получените стойности за параметрите на износането са построени диаграмите на масовото износане и на износоустойчивостта на образците с различните контратела (фиг.12).

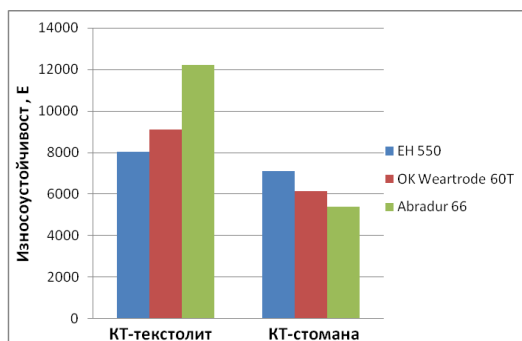


а)

б)

Фигура 12. Диаграма на износената маса спрямо път на триене:

а) при контратяло от стомана; б) при контратяло от текстолит;



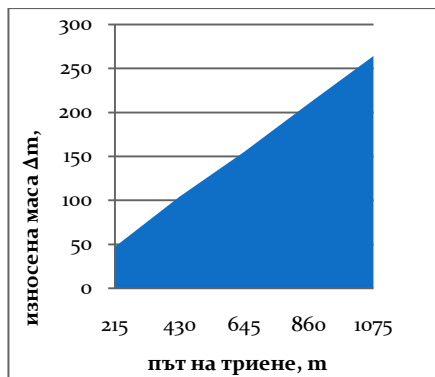
Фигура 13. Износоустойчивост E на образците наварени с различните електроди с различните КТ(контратела).

При конкретните условия на изпитване в среда от силициев карбид, с контратяло от текстолит, най-добра износоустойчивост се наблюдава при образец, наварен с електрод Abradur 66. Определящ фактор за степента на износване е твърдостта на наварения слой.

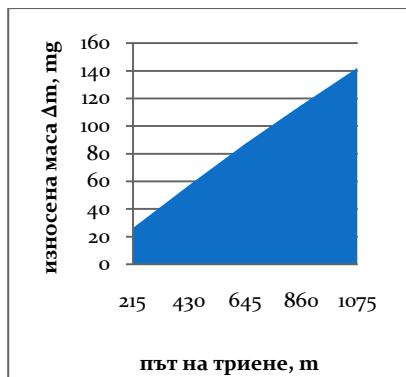
3.4. Резултати от абразивно износване на лазерно наварени слоеве в условия на течно триене

Методът на лазерното наваряване се използва основно за детайли и инструменти, изработени от скъпоструващи, средно и високо легирани стомани и специални сплави, като

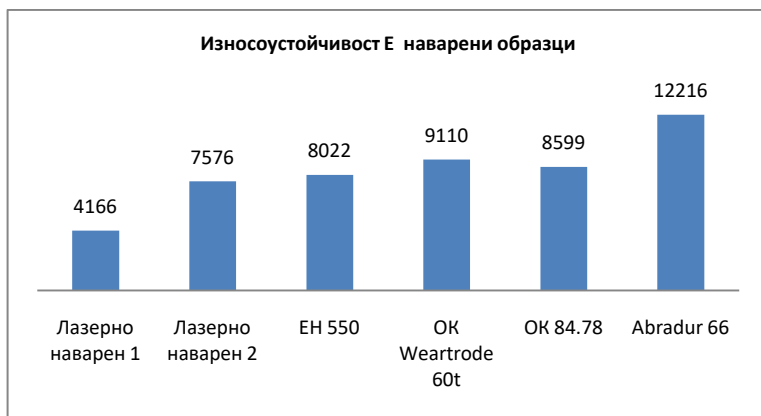
инструментална екипировка, съоръжения за автомобилната промишленост като клапани, съединители, колянни валове, бутала на цилиндри и др. Изготвени са лазерно наварени пробни образци във фирма “Хофман Консулт България”. Използвани са два вида материали за наваряване с твърдост 390 HV и 560 HV. На базата на експериментално получените стойности за параметрите на износването са построени диаграмите на масовото износване спрямо път на триене (фиг.14, 15) и на износоустойчивостта на образците (фиг.16) с различните материали.



Фигура 14. Лазерно наварен с мат. 4232604; 390 HV



Фигура 15. Лазерно наварен с мат. 4230904; 560 HV



Фигура 16. Износоустойчивост на наварени образци

Лазерно наварените образци не са подходящи при тези условия на изпитване и имат пониска износоустойчивост от наварените с електроди образци с подобна твърдост.

3.5. Резултати от абразивно износване на наварени слоеве в условия на сухо триене

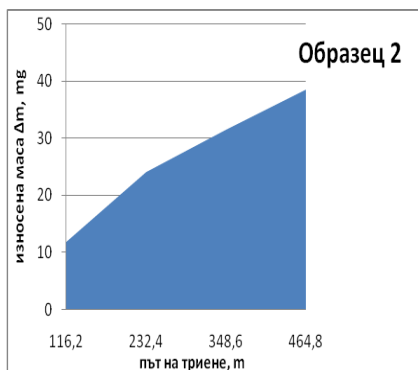
Представени са резултатите от експерименталните изследвания на абразивно износване при различен брой цикли (500, 1000, 1500, 2000), съответно път на триене (116.2m, 232.4m, 348.6m, 464.8m).

Таблица 4. Експериментални резултати за параметрите на износването

N	500	1000	1500	2000
L, [m]	116,2	232,4	348,6	464,8
<i>Образец № 1- наварен с EH550</i>				
m, [mg]	25,4	38,4	63,3	70,5
i	0,12.10 ⁻⁶	0,09.10 ⁻⁶	0,1.10 ⁻⁶	0,09.10 ⁻⁶
I	0.83.10 ⁷	1,1.10 ⁷	1.10 ⁷	1,2.10 ⁷
<i>Образец № 2- наварен с ОК Weartrode 60T</i>				
m, [mg]	11,9	24,1	31,5	38,5
i	0,06.10 ⁻⁶	0,06.10 ⁻⁶	0,05.10 ⁻⁶	0,05.10 ⁻⁶
I	1,7.10 ⁷	1,7.10 ⁷	1,9.10 ⁷	1,9.10 ⁷
<i>Образец № 3- наварен с Abradur 66</i>				
m, [mg]	0,8	1,7	3,3	3,7
i	0,004.10 ⁻⁶	0,004.10 ⁻⁶	0,005.10 ⁻⁶	0,045.10 ⁻⁶
I	25,4.10 ⁷	25,4.10 ⁷	20.10 ⁷	22.10 ⁷
<i>Образец № 4- наварен с Abradur 64</i>				
m, [mg]	2,9	4,2	5,5	8,7

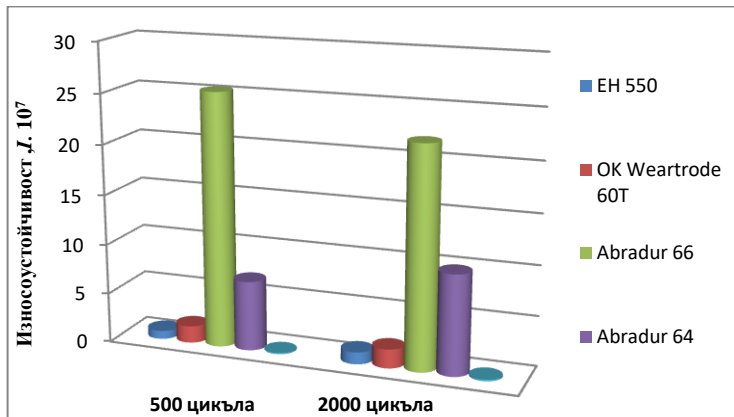
i	$0,014 \cdot 10^{-6}$	$0,01 \cdot 10^{-6}$	$0,009 \cdot 10^{-6}$	$0,01 \cdot 10^{-6}$
I	$7 \cdot 10^7$	$9,7 \cdot 10^7$	$11,1 \cdot 10^7$	$10 \cdot 10^7$
<i>Образец № 5 – базова повърхнина (Еталон Ст40Х)</i>				
m, [mg]	175,3	279,2	437,7	503,1
i	$0,86 \cdot 10^{-6}$	$0,68 \cdot 10^{-6}$	$0,72 \cdot 10^{-6}$	$0,616 \cdot 10^{-6}$
I	$0,12 \cdot 10^7$	$0,146 \cdot 10^7$	$0,14 \cdot 10^7$	$0,162 \cdot 10^7$

Построени са диаграмите на износените маси, спрямо пътя на триене фиг.17, както и диаграма за изнosoустойчивостта на наварените детайли при 500 и 200 цикъла фиг.18.





Фигура 17. Диаграмите на износените маси, спрямо пътя на триене

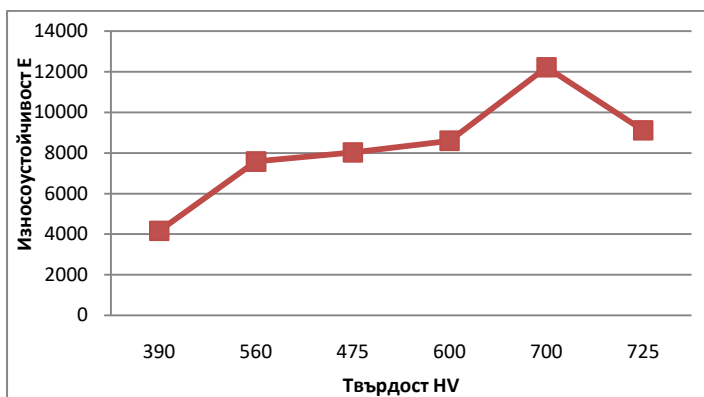


Фигура 18. Диаграма на износоустойчивостта на различните покрития при 500 и при 2000 цикъла

При конкретните условия на износване - сухо триене по повърхнина с твърдо закрепени абразивни частици, най-добра износоустойчивост се получава при използване на материал, който е комплексно легиран, с голяма твърдост, определена от високото съдържание на въглерод и карбидните включения. Износоустойчивостта на такъв материал е многократно по-висока.

При 500 и при 2000 цикъла няма съществена разлика в износоустойчивостта на всеки един от материалите. Това показва, че образците се намират във втори етап на износване или участъка на бавно (стационарно) износване, където обикновено скоростта на износване е

сравнително постоянна. В сравнение с базовата повърхнина, износоустойчивостта на наварените детайли е значително по-висока.

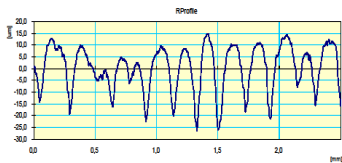
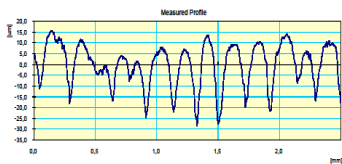


Фигура 19. Диаграма на износоустойчивостта спрямо твърдостта HV на наварените образци

На фиг. 19. е представена зависимостта между твърдостта HV на изследваните наварени образци и износоустойчивостта им при еднакви условия на изпитване. Износоустойчивостта им се увеличава с повишаване твърдостта на наварения слой. Най добра износоустойчивост се наблюдава при твърдост 700 HV.

3.6. Изследване релефа на повърхнините на наварените слоеве след износване

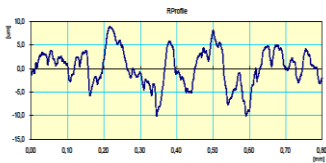
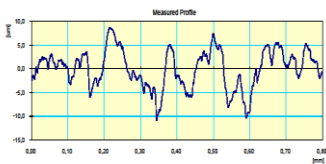
Изследван е релефа на повърхността, след износване, като са отчетени графично стойностите на Ra, Rz и Rq. Релефът на повърхността е определен чрез отчитане на грапавост с измервателен уред Mitutoyo в Лаборатория към катедра ТМММ към Технически Университет Варна. Визуализиран е профила, получен след износване в определен режим. При използване на контратяло от текстолит, износеният пробен образец е с висока грапавост, определена от профила на контратялото. Това осигурява по-голяма контактна площ, като се има предвид, че хидроабразива прониква в грапавините. С увеличаване на контактната площ на триене се намалява налягането върху пробния образец и се увеличава износоустойчивостта на материала. По-малката контактна площ при използване на контратяло от стомана, определя по-високото износване.



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-301	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	I
Profile	R	Cut-Off	2.5 mm
Range	AUTO	Filter	GAUSS
Ra	7.84um		
Rz	41.32um		
Rq	9.47um		

Copyright (C) 2001-2005 Mitutoyo Corporation

Фигура 20. Грапавост на образец наварен ОК Weartrode 60T, контрагяло-текстолит

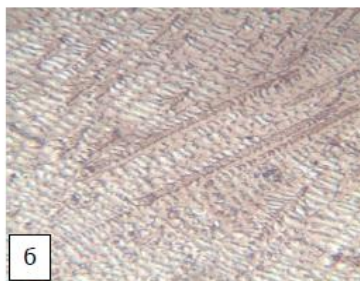


Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-301	Comment	Ver3.20
Standard	ISO 1997	N	I
Profile	R	Cut-Off	0.8 mm
Range	AUTO	Filter	GAUSS
Ra	3.20um		
Rz	18.80um		
Rq	3.87um		

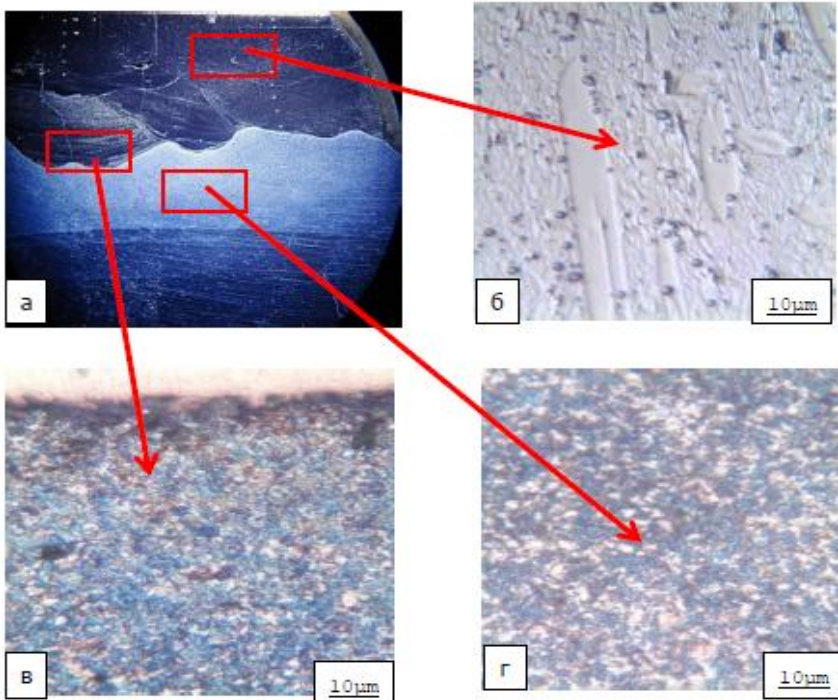
Copyright (C) 2001-2005 Mitutoyo Corporation

Фигура 21. Грапавост на образец наварен с ОК Weartrode 60T, контрагяло- St45

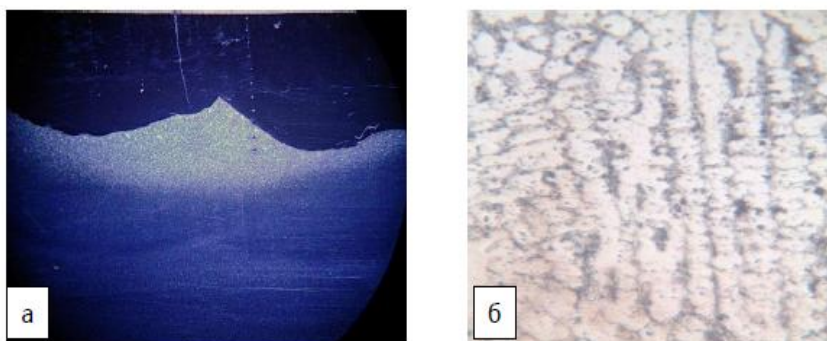
3.7. Резултати от металографски анализ на наварени слоеве



Фигура 20. Наварен слой с EN 550, а) макроструктура; б) наварен слой



Фигура 21. Металографски анализ на наварен слой с електрод ОК Weartrode 60Т, а) макроструктура; б) наварен слой; в) преходна зона; г) зона на термично влияние

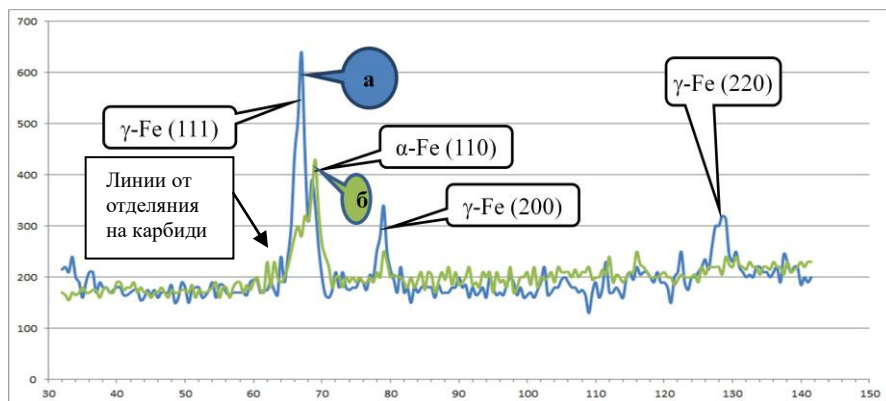


Фигура 22. Наварен слой с ОК 84.78, а) макроструктура; б) наварен слой

В зоната на наварения метал при използване на електрод ЕН 550 се наблюдават дендритни кристали с образуван мартензит по техните граници, което се определя от неравномерното разпределение на въглерода и хрома в тях.

Микроструктурата на наварените слоеве с останалите електроди е изградена от аустенитно-мартензитна матрица с първични хромови карбиди, формирани в процеса на кристализация. Според химичния състав, определен от високото съдържание на въглерод $4,5 \div 6\%$ и хром $22 \div 34\%$, може да се предположи, че хромовите карбиди са от типа $(Cr,Fe)_7C_3$. Те са определящи за високата твърдост и износоустойчивост на образците.

3.8. Резултати от рентгеноструктурен фазов анализ



Фигура 23. Ренгенограма от проведенят фазов анализ (Cr- K α) на навареният метал с електрод Weartrode 60T; а) преди изпитването на износване; б) след изпитването на износване

Проведен е фазов анализ на рентгенов дифрактометър УРС-50М в Cr излъчване. Качественият фазов анализ е извършен въз основа на получените дифрактограми. Идентифицирането на фазите е според пресметнатите междуплоскостни разстояния и съпоставянето им с данните за теоретичните междуплоскостни разстояния на различните фази от специализирани справочници.

На фиг.23 е представена Рентгенограма от проведенят фазов анализ (Cr- K α) на навареният метал с електрод ОК Wertrode 60T, който е с най-висока износоустойчивост и в трите абразивни среди. След наваряването преди изпитване на абразивно износване се наблюдава аустенитна структура с карбидни включения, които са се запазили като метастабилна структура. В резултат на износването протичат структурни промени, като аустенита се

трансформира в мартензит, вследствие измененията, дължащи се на контактните деформации, като пластичното деформиране на повърхностните слоеве.

ИЗВОДИ КЪМ ГЛАВА Ш

- Анализът на резултатите от абразивно износване позволява да се предприемат мерки за повишаване на дълготрайността на машинните елементи, като се създадат подобрени повърхостни слоеве, които притежават високи експлоатационни свойства.
- Наваряването с абразивно износоустойчиви електроди значително повишава износоустойчивостта. При конкретните условия на износване - сухо триене по повърхнина с твърдо закрепени абразивни частици, най-добра износоустойчивост се получава при използване на материал, който е комплексно легиран, с голяма твърдост, определена от високото съдържание на въглерод и карбидните включения.
- Видът на абразивната среда оказва съществено значение при износването. Силициевият карбид е най-силно абразивната среда, като износоустойчивостта и на трите образеца е ниска. Като най-слабо абразивна среда се явява сместа от кварцов пясък и глина. Износоустойчивостта на образците в тази среда значително нараства.
- Най-висока износоустойчивост и в трите абразивни среди се наблюдава при образеца, наварен с електрод ОК Weartrode 60T. Причината е високата твърдост, която се определя от първичните карбидни включения.
- Най-ниска износоустойчивост има образецът, наварен с електрод ЕН 550. Това се дължи на по-ниските стойности на твърдостта на наварения слой, поради по-малкото хромово и въглеродно съдържание.
- Видът на контралялото е определящ при износването. При използване на контраляло от текстолит износоустойчивостта е по-висока и при трите наварени образци.
- По-ниската износоустойчивост, съответно по-висока степен на износване на наварените слоеве, при използване на контраляло от стомана, се дължи на по-малката фактическа площ на допиране между двете тела, в сравнение с използване на контраляло от текстолит.
- Един и същи материал, като елемент на трибосистемата, поставен в различни условия на триене, има различно поведение. В абразивна среда от кварцов пясък и абразивна среда от кварцов пясък с глина, износоустойчивостта е от един порядък. В абразивна среда от силициев карбид е многократно по-ниска.

- В определени условия, интензивността на износване се променя плавно и не се влияе съществено от разликата в твърдостта. Пример за това е образец наварен с Abradur 66. В други условия се наблюдава рязка промяна на интензивността на износване, въпреки че, твърдостта се променя в тесни граници.

ГЛАВА IV. ОПРЕДЕЛЯНЕ И ВИЗУАЛИЗИРАНЕ НА ЕДНОВРЕМЕННОТО ВЛИЯНИЕ НА НЯКОЛКО ФАКТОРА, ОПРЕДЕЛЯЩИ АБРАЗИВНОТО ИЗНОСВАНЕ СЛЕД НАВАРЯВАНЕ ЧРЕЗ КОМПЮТЪРНА СИМУЛАЦИЯ

Един от най-важните параметри, при абразивното износване е химичния състав на наварения материал, определящ структурата на слоя. Условен фактор, който отчита степента на влияние на съдържанието на въглерод и основни легиращи елементи върху характеристиките на шева е Въглеродният еквивалент. Той е определен по следната формула:

$$C_{eq} = \%C + \%Mn/6 + (\%Cr + \%Mo + \%V)/5 + (\%Ni + \%Cu)/15 \quad (6)$$

Най-добра устойчивост на абразивно износване се наблюдава при материали богати на карбиди, като определящ химичен елемент е хрома. Хромовия еквивалент се изчислява по формулата:

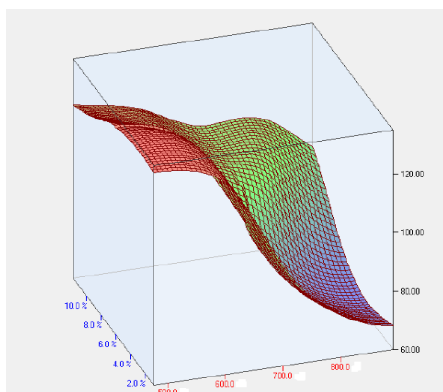
$$C_{req} = \%Cr + \%Mo + 0.75\%W + 5\%V + 1.75\%Nb + 1.5\%Si \quad (7)$$

Чрез софтуерна програма на програмен език Delphi, адаптирана за съответните условия е изследвано едновременното влияние на няколко фактора, определящи абразивното износване след наваряване.

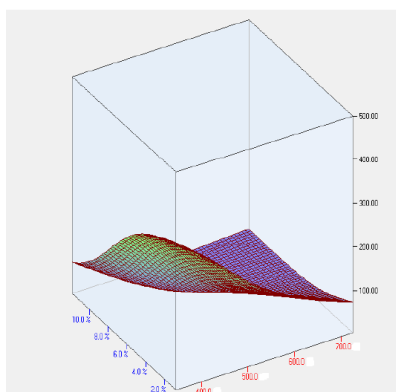
Таблица 5. Входящи данни

Течно триене				
Материал	Твърдост HV	Въглероден еквивалент C_{eq}	Хромов еквивалент C_{req}	Износена маса, mg
ЕН 550	475	2.37	12.6	134
ОК 84.78	600	11.35	34.2	125
40X закал.	603	0.8	1.5	135

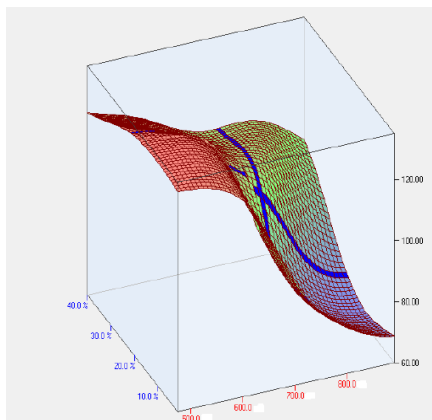
Abradur 66	695	11.6	40	88
OK Weartrode 60T	725	11.83	36.4	118
ШХ15 закал.	739	1.4	2	74
Х12МФ закалена	891	4.5	14	60
Сухо триене				
Материал	Твърдост HV	Въглероден еквивлент Сeq	Хромов еквивалент Сreq	Износена маса, mg
Ст. 40X	345	0.8	1.5	500
ЕН 550	475	2.37	12.6	70.5
Abradur 64	526	11.2	39	8.7
Abradur 66	695	11.6	40	3.7
Ok Weartrode 60T	725	11.83	36.4	38.5



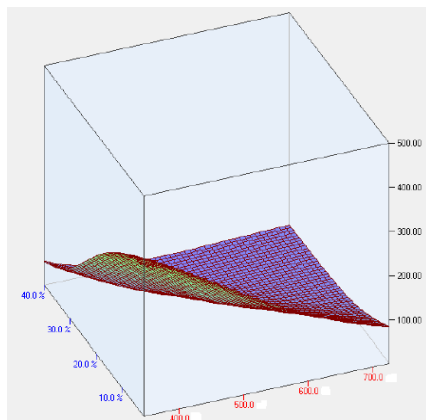
Фигура 24. Зависимост между HV, Сeq и износена маса в режим течно триене



Фигура . 25. Зависимост между HV, Сeq износена маса в режим сухо триене



Фигура 26. Зависимост между HV, Creq и износена маса в режим течно триене



Фигура 27. Зависимост между HV, Creq и износена маса в режим сухо триене

ИЗВОДИ КЪМ ГЛАВА IV

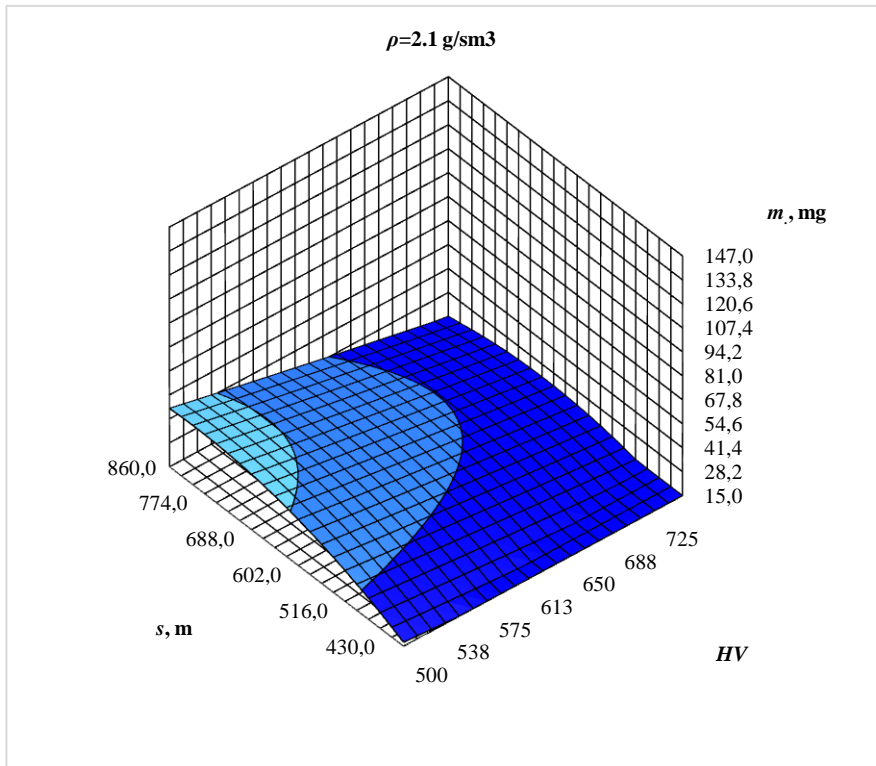
- От графиката може да се определи степента на влияние на химичния състав и твърдостта на материалите, които са определящи за износоустойчивостта на материалите.
- В режим на течно триене, износването е равномерно, като се променя в тесни граници. Износената маса е със занижени стойности при въглероден еквивалент над 10% и твърдост над 650HV, както и при хромов еквивалент над 30% и твърдост над 650 HV.
- В режим на сухо триене, износването е по-интензивно. Износената маса спада значително при стойност на хромовия еквивалент над 10% и твърдост над 500 HV, както и при стойност на въглеродния еквивалент над 4% и твърдост над 450 HV.

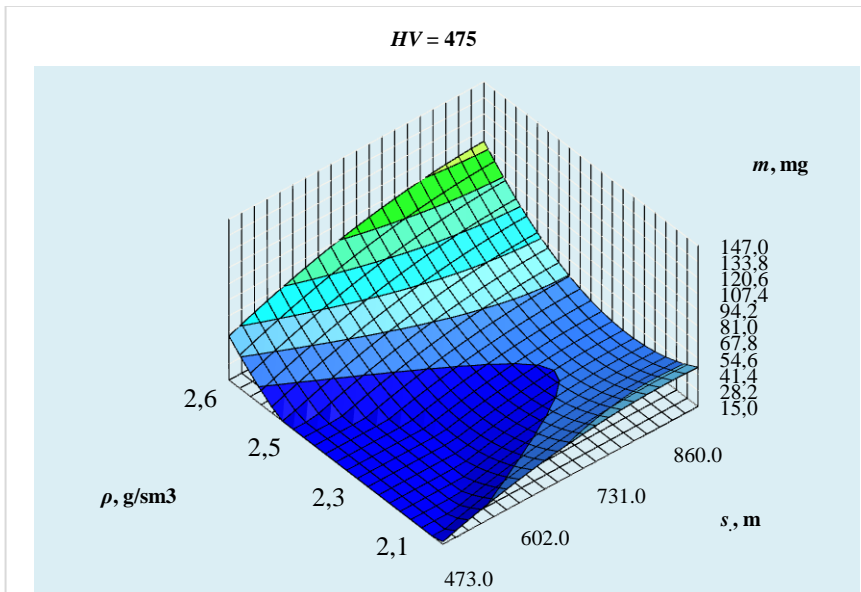
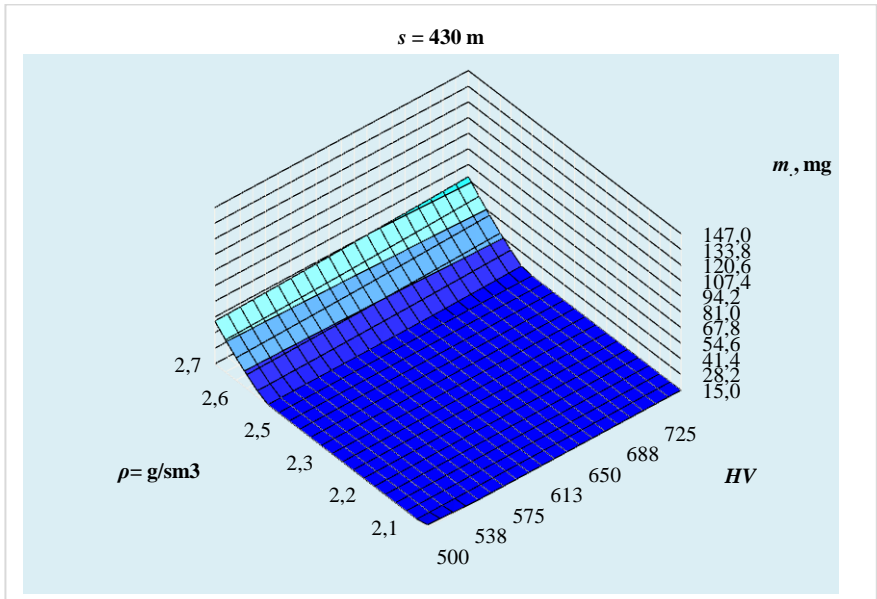
ГЛАВА V. МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ПРОЦЕСА АБЕАЗИВНО ИЗНОСВАНЕ, В ЗАВИСИМОСТ ОТ ТВЪРДОСТТА НА МАТЕРИАЛА И ВИДА НА АБРАЗИВНАТА СРЕДА

За построяване математическия модел на зависимостта между масовото износване m в [mg], избрано за изходен параметър и входните фактори – обемна плътност на абразивната среда

ρ [g/sm³], път на триене s , [m]. и твърдост на наварения слой HV, е избран симетричен квази D – оптимален план от типа V_m с матрица на планиране.

Извършена е проверка за възпроизводимост на експеримента. Определени са коефициентите и тяхната значимост. Извършена е проверка за адекватност на математичния модел по критерия на Фишер и е получено уравнението на регресия. Представен е графичен анализ на регресионния модел, като са показани зависимостите при някои характерни комбинации на факторите.





Фигура 28. Графичен анализ на регресионния модел

ИЗВОДИ КЪМ ГЛАВА V

- На база проведеното планирано експериментално – статистическо изследване за взаимовръзката между технологичните параметри на процеса абразивно износване е получен адекватен регресионен модел за интензивността на износване при използване на материали с различна твърдост (регресионно уравнение).
- Установено е влиянието на основните фактори по степен на значимост и посока на въздействие.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Научно – приложни приноси.

1.1. Разработена е методика за изследване на абсолютни и относителни характеристики на износването на наварени покрития, в условия на абразивно износване в няколко вида абразивни среди, както и с различни видове контрагента.

1.2. Извършена е комплексна оценка и сравнителен анализ на механичните и трибологични характеристики, получени при различни методи и материали за наваряване, както и при различни условия на триене.

1.3. Изследвана е зависимостта на износването от свойствата и структурата на контактуващите материали при различни фактори на контактното взаимодействие.

1.4. Доказано е експериментално как се променя поведението на един и същ материал, като елемент на трибосистемата, поставен в различни условия на триене.

1.5. Предложен е обобщен математичен модел за изследване на износоустойчивостта на наварени слоеве, във функция на твърдостта на наварения слой, в определен режим на износване.

2. Приложни приноси.

2.1. Конструиран и разработен е лабораторен стенд за изпитване на износване, предназначен за метални образци с плоски и цилиндрични повърхнини, с възможност за промяна на условията на триене и параметрите на изпитване.

2.2. На база компютърно – симулационния модел е определена степента на износване на материали с различна твърдост в зависимост от работния режим. Получените резултати дават възможности за препоръки при избор на материал за изработване или въстановяване на детайли в съответствие с реалните експлоатационните условия на работа.

2.3. Адаптирана е софтуерна програма, която интерполира и визуализира едновременното влияние на няколко фактора, влияещи на абразивното износване след наваряване.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. KIROV S., YANKOVA R. - STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED COATINGS AFTER THERMAL IMPACT, ТРИБОЛОГИЧЕН ЖУРНАЛ БУЛТРИБ, Година V, брой 05 (05), 2015 , стр.282-286.
2. KIROV S., YANKOVA R., COMPARATIVE RESEARCH OF ABRASIVE WEAR OF WELDED LAYERS, ТРИБОЛОГИЧЕН ЖУРНАЛ БУЛТРИБ, Година VI, брой 06 (06), 2016 , стр.209-216.
3. Янкова Р., Изследвания на абразивно износване на наварени слоеве при подмяна на контратялото, Известие на съюза на учените-Варна, Скция „Технически науки“1, 2016, стр.73-75;
4. Yankova R., Spasova D., Petrov Pl. ; WEAR OF WELDED LAYERS IN CONDITIONS OF DRY FRICTION , Научни известия на НТСМ, бр.1(216) ISSN 1310-3946, НТСМ – София, с. 258-261 ,2017г.

Научно-изследователска работа по други договорни теми и задачи:

- Проект в помощ на докторанти ПД13/2016г. на тема: „Изследване на наварени слоеве, подложени на износване“.
- Научноизследователски проект: „Изработване на стендове за механични изпитвания на метални материали“- НП19/2015, с ръководител доц.д-р Сергей Киров

Специални благодарности на:

доц. д-р инж. Сергей Киров, доц. д-р инж. Георги Антонов, доц. д-р инж. Ярослав Аргиров, доц. д-р инж. Пламен Петров, ас. д-р инж.Кръстин Йорданов и на всички, които са били съпричастни към моята дисертационна работа.

Annotation

The main aim of the doctoral thesis is a complex assessment and comparative analysis of the structural, mechanical and tribological characteristics, obtained by different welding methods and friction conditions. The properties of different types of materials which are used to restore the parts exposed to abrasive wear have been analyzed. The impact of abrasive environment, counter-body and friction mode on the wear parameters of welded samples has been researched. The impact of the chemical composition of the welded metal on the wear resistance of the samples has been determined.

The materials used include welding electrodes whose metal in the welding seam has high resistance to abrasive wear. Materials with different percentages of carbon and alloying elements that are determinative in the wear process have been selected.

Test methods include: Experimental wear test under different friction modes; Defining the hardness by the depth of the clad layer; Metallographic and X-ray diffraction phase analysis of the welded layer; Metal relief test after wear.

The simultaneous impact of several factors influencing the abrasive wear after welding has been defined and visualized by computer simulation.

A mathematical model for the wear resistance of welded layers of different hardness under certain wear conditions has been achieved.