



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ИНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ – СЛИВЕН
Катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“

Маг. инж. Веселина Красиминова Димитрова

**ПОЛУЧАВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕДНО –
И МНОГОСЛОЙНИ ИЗНОСОУСТОЙЧИВИ ПОКРИТИЯ
ВЪРХУ ЕДНОКАНАЛНИ ПАЛЦОВИ ФРЕЗИ**

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: Материалознание и технология на
машиностроителните материали

Научни ръководители: Проф. д-р инж. Божана Табакова
Проф. д-р инж. Милко Йорданов

СЛИВЕН, 2017г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“ към Инженерно-педагогически факултет – Сливен на ТУ–София на редовно заседание, проведено на 03.11.2017г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 15.02. 2018 г. от 15.00 часа в 1207 на ИПФ, гр. Сливен, бул. "Бургаско шосе" 59 на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-329 / 09.11.2017 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д.т.н. и д.ик.н. Николай Иванов Петров
2. Проф. д.т.н. Венцеслав Цветанов Тошков
3. Проф. д-р Милко Генов Йорданов
4. Доц. д-р Пламен Недков Петров
5. Доц. д-р Цанко Димитров Узунов

Рецензенти:

1. Проф. д.т.н. Венцеслав Цветанов Тошков
2. Доц. д-р Цанко Димитров Узунов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на ИПФ-Сливен на ТУ-София, кабинет №1407.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“ на Инженерно–педагогически факултет – Сливен. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Веселина Красиминова Димитрова

Заглавие: Получаване и изследване на едно– и многослойни износоустойчиви покрития върху едноканални палцови фрези

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

През последните години повишаването на експлоатационните, технологичните и икономическите параметри на металорежещите инструменти и в частност на едноканалните палцови фрези (ЕПФ) се постига основно чрез иновативни методи за нанасяне на едно- и многослойни износоустойчиви покрития. Чрез тях се подобряват механичните, термичните, динамичните и трибологичните свойства на инструментите [3,4].

Използването на подходящо покритие и метод за неговото нанасяне увеличава трайността и производителността на инструментите.

Дисертационният труд е свързан с получаване и изследване на структурата, състава и свойствата на нанесените чрез реактивно магнетронно разпрашване еднослойни и многослойни покрития от циркониев нитрид (ZrN), циркониев карбид (ZrC) и нанесени чрез безтоково химично отлагане композитни никелови покрития с добавки от детонационен нанодиамант (Ni/DND) върху стомани за изработване на ЕПФ.

Като се вземе предвид, че количествено е доказана икономическата ефективност от нанасянето на получените покрития върху ЕПФ, като за всеки тип покритие са предложени оптимални стойности за елементите на режима на рязане, то актуалността на работата е неоспорима.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Цел на дисертационния труд е получаване и изследване на структурата, свойствата, надеждността и икономическата ефективност на еднослойни и многослойни покрития от циркониев нитрид и циркониев карбид, и на еднослойни дисперсионни никелови покрития с добавка от наноразмерен детонационен диамант, нанесени върху стомани за едноканални палцови фрези.

За постигане на поставената цел е необходимо да бъдат изпълнени следните **основни задачи**:

1. Създаване на необходимата експериментална база за получаване чрез магнетронно разпрашване на еднослойни и многослойни покрития от ZrN и ZrC и на дисперсионни никелови покрития с добавки от детонационен нанодиамант Ni/DND по метода “ЕФТТОМ – НИКЕЛ”.
2. Нанасяне на еднослойни покрития от Ni/DND по метода на безтоково химично отлагане “ЕФТТОМ – НИКЕЛ” и на еднослойни и многослойни покрития от ZrN и ZrC чрез реактивно магнетронно разпрашване на синтерована циркониева мишена върху стомани за едноканални палцови фрези.
3. Изследване на структурата, състава и физико-механичните свойства на получените покрития.
4. Изготвяне на алгоритъм за оптимизационно-надеждностни изследвания, изискващ прогнозиране на техническия ресурс, изчисляване

на потоците от откази и възстановявания и изграждане на оптимизационен модел за прогнозиране на режимите на рязане при квазисухо високоскоростно фрезозане с едноканални фрези.

5. Извършване на сравнителен анализ на експлоатационни, технологични и икономически параметри на едноканалните палцови фрези с и без нанесените покрития.

Научна новост

1. Доказана е възможността за получаване на едно- и многослойни покрития от ZrN, ZrC и Ni/DND, върху стомани за едноканални палцови фрези, като е потвърдено, че те притежават нисък коефициент на триене.

2. Доказано е, че дисперсионните никелови покрития с добавки от детонационен нанодиамаант Ni/DND и многослойните покрития от Zr/ZrN/ZrC са подходящи за ЕПФ, предназначени за чисти и фини фрезови обработки, докато еднослойните покрития от ZrC или ZrN са подходящи за ЕПФ, предназначени за груби фрезови обработки в условия на високоскоростна обработка на елементи от алуминиеви листи, композитни панели и HPL плоскости.

3. Доказано е, че отложеният като основа междинен Zr слой, освен за подобряване на адхезията, изменя характера на взаимодействие на кондензиращите атоми с подложката и силно намалява наследствеността при израстване на покритието от повърхностните зърна на стоманените подложки. Затова покритията от ZrC и Zr/ZrN/ZrC притежават по-хомогенна топография в сравнение с покритията от ZrN.

Практическа приложимост

1. Създадени и апробирани са технологични режими за магнетронно нанасяне на изнosoустойчиви покрития от ZrN, ZrC и Zr/ZrN/ZrC върху стомани за едноканални палцови фрези.

2. Изведени са оптимални стойности за елементите на режима на рязане скорост V_c [m/min] и минутно подаване f_m [mm/min] с ЕПФ с нанесени покрития от Ni/DND, ZrN, ZrC и Zr/ZrN/ZrC.

Апробация

Дисертационният труд е представен изцяло пред катедра ММТ на ИПФ-Сливен. Съществени части от него са апробирани и на:

- Национална конференция с международно участие „Сливен'2017“,
- Научен семинар на тема: „Градиентно-функционални нанопокрития, получени чрез вакуумни технологии за биомедицински приложения“ по проект 2016 – Н07/З към НФНИ, В.Търново, 10.02.2017г.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 5 научни статии (от които една самостоятелна) в следните издания:

- сп. „International Journal of Scientific & Engineering Research (IJSER)“,
- сп. „Машиностроителна техника и технологии“,

- сп. „Машиностроене и машинознание“,
- сп. „Известия на съюза на учените – Сливен“.

Структура и обем на дисертационния труд

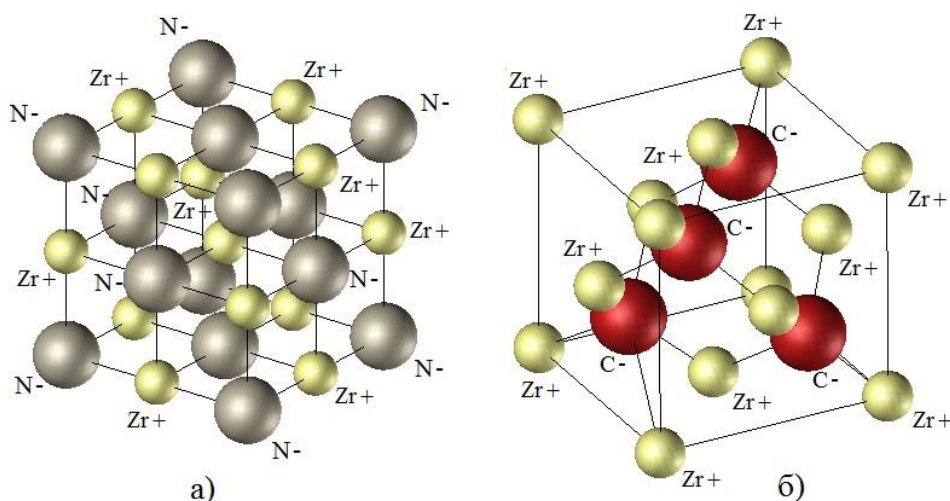
Дисертационният труд е в обем от 175 страници, като включва въведение, 5 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 221 литературни източници, като 124 са на латиница и 57 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 101 фигури и 46 таблици. Номерата на фигурите, формулите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА I. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

Представени са данни от подробен анализ на предназначението и класификация на едноканалните палцови фрези за високоскоростна и високопрецизна обработка на алуминиеви листи, композитни панели и HPL плоскости. Изследвано е тяхното износване и са проучени видовете материали за изработване на инструментите. Анализирани са широка гама износоустойчиви покрития, приложими при ЕПФ. Подробно са описани физичните методи за отлагане на покрития във вакуум (т.нар. PVD методи), както и технологиите за химично безтоково отлагане на дисперсни метални покрития. Разгледани са същността и основните характеристики на циркониевите нитридни и карбидни покрития, както и на никеловите покрития с добавки от детонационен нанодиамаант.

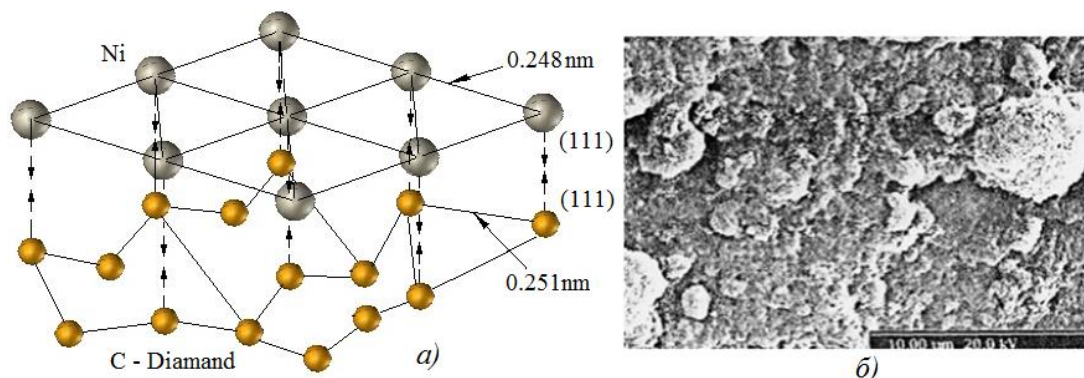
ZrN и ZrC са труднотопими високотемпературни съединения, характеризиращи се с кубична йонна кристална решетка - фиг.1.8,а,б. Покритията от тях притежават висока твърдост и топлоустойчивост, ниски остатъчни напрежения и нисък коефициент на триене.



Фиг.1.8 Кубични йонни кристални решетки [4,184,201,202] :

а) стенноцентрирана – cF8 тип B1 на ZrN, б) обемна тетраедрична - cF8 тип B3 на ZrC.

Безтоковите композитни никелови покрития се състоят от свръх твърди диамантени наночастици (DND), диспергирани в метална матрица от никел [26]. Фигура 1.12 показва силната кохерентност между частиците (DND) и основния метал (Ni), на която се дължи отличната им износо- и корозоустойчивост.



Фиг.1.12 Нанокристални структури:

а) връзка на нанодиаманта и Ni в композитното покритие; б) SEM на микроструктура на детонационни нанодиаманти [26,48,120,166].

От извършения литературен обзор за химичния състав, физичните свойства и експлоатационните характеристики на разгледаните покрития могат да се направят някои основни изводи за тяхната приложимост върху едноканалните палцови фрези за високоскоростна (HSM) и високопрецизна обработка (HPM) на алуминиеви листи, профили, композитни панели, HPL плоскости. Някои от тях са с потвърдителен характер:

1. Проучени и анализирани са условията при износване на ЕПФ.
2. Подробно са анализирани химичният състав и механичните свойства на материалите за изработване на едноканални палцови фрези.
3. Анализирани са експлоатационните и технологичните свойства на широка гама износоустойчиви покрития. Като се акцентира върху тяхната приложимост при отлагане върху стомани за едноканални палцови фрези.
5. Еднослойните и многослойни покрития на циркониева основа, отложени върху инструментите, се характеризират с високи експлоатационни и технологични показатели твърдост, износоустойчивост, якост при циклични и температурни натоварвания, висока устойчивост на химически активни и абразивни среди.
6. Безтоковите химични покрития с частици от DND са предпочитани за нанасяне върху металоурежещи инструменти със сложна геометрия.
7. Добавката на твърди уякчаващи частици от DND към работния разтвор значително подобрява физико-механичните свойства твърдост, износо- и корозионна устойчивост на никеловите покрития.
8. Потвърдена е констатацията, че чрез магнетронно разпрашване, при избор на подходящи параметри на отлагане, е възможно да се отлагат върху металоурежещи инструменти плътни и тънки покрития с ниски остатъчни напрежения и добра адхезия.

Друга част от изводите представят нерешени задачи, които стоят в основата на по-нататъшните изследвания в дисертационния труд:

4. Установено е, че въпреки безспорните си предимства, приложимостта на циркониевите керамични структури ZrN и ZrC като износоустойчиви покрития за ЕПФ, на този етап е относително ограничена. Това се дължи на неясните, неточни и непълни данни относно режимите за тяхното нанасяне и тези, при които функционират покритите с тях инструменти.

В заключение може да се отбележи, че данните относно трайност, технически ресурс и елементи на режима на рязане, при които функционират ЕПФ са оскъдни, основно каталожни, предложени от производители и имат до голяма степен препоръчителен характер. Инструменти от такъв тип намират приложение главно при обработка на алуминиеви листи, композитни панели и HPL плоскости, в условия на единично и дребносерийно производство, от дружества с предмет на дейност доставка и монтаж на алуминиеви профили, фасадни системи и обшивки. Към този момент те използват скъпи инструменти главно от бързорежещи стомани HSS-Co5 (M35) или HSS-Co8 (M42).

В тази връзка идеята на дисертационния труд е да бъдат създадени и апробирани режими за нанасяне на едно- и многослойни износоустойчиви покрития от ZrN, ZrC, Zr/ZrN/ZrC и Ni/DND, върху евтини инструменти от бързорежеща стомана HSS-E, в условия на български лаборатории по физични технологии, на които в последствие да бъде извършен сравнителен анализ относно експлоатационни, технологични и икономически параметри за изясняване на икономическата ефективност от въвеждането им.

ГЛАВА II. АЛГОРИТЪМ ЗА ОПТИМИЗАЦИОННО-НАДЕЖДНОСТНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

В главата е предложен алгоритъм за оптимизационно прогнозиране на максимално допустимите нива на елементите на режима на рязане при фрезование в корелация с критериите висока производителност, ниска технологична себестойност, високо качество на обработваните повърхнини и висока трайност на инструментите.

Предложените алгоритми интерпретират наложените се в практиката фундаментални методи за рисков и оптимизационен анализ на технически системи [42-44,90,91,144] и са изцяло съобразени с тях.

2.1 ПРОГНОЗИРАНЕ И АНАЛИЗ НА ТЕХНИЧЕСКИЯ РЕСУРС ПРИ ОБРАБОТВАНЕ С ЕДНОКАНАЛНИ ПАЛЦОВИ ФРЕЗИ

Трайността на металоурежещия инструмент се определя посредством техническия ресурс T_{RRF} при възстановим и T_{RUF} до невъзстановим отказ, с отчитане на коефициента на триене, по зависимостите (16) и (17).

$$T_{RRF} \equiv VB_{kp} = \int_{t_0}^{T_d} P_{RO}(t).dt.K\mu \quad (16)$$

$$T_{RUF} = \int_0^{\Sigma T_{RRF}} P_{RO}(t).dt. \prod_{i=1}^{n_{RRF}} K\mu_i \quad (17)$$

където:

- VB_{kp} [mm] – критично износване, съвпадащо с критерия на износване;
- P_{RO} - вероятност за безотказна работа;
- $K\mu$ - корекционен коефициент, отчитащ коефициента на триене μ ;
- $n_{RRF}! = \prod_{i=1}^{n_{RRF}} K\mu_i$ - произведение от n_{RRF} броя коефициента на триене;
- n_{RRF} – брой възстановявания до достигане на техническия ресурс при възстановим отказ.

2.2 ПОТОК ОТ ОТКАЗИ И ПОТОК ОТ ВЪЗСТАНОВЯВАНИЯ ПРИ ВИСОКОСКОРОСТНО ФРЕЗОВАНЕ С ЕПФ

Интензивността на потока от откази $\omega(\Delta t)$ и интензивността на потока от възстановявания $\mu(\Delta t)$, в наблюдавания интервал от време Δt , се определят в съответствие с модели, предложени в източници [43,45,46,47], преобразувани във вид, отчитащ възстановим и невъзстановим отказ.

2.3 ОПТИМАЛНИ РЕЖИМИ НА РЯЗАНЕ ПРИ ВИСОКОСКОРОСТНО ФРЕЗОВАНЕ С ЕДНОКАНАЛНИ ПАЛЦОВИ ФРЕЗИ

Определянето на режимите на рязане - скорост V_c [m/min] и минутно подаване f_m [mm/min], при постоянна дълбочина на рязане с ЕПФ, се осъществява чрез паралелно решаване на две многофакторни итеративни еднопараметрични оптимизации. Решението на оптимизационните задачи се свежда до изчисляване на екстремум на целевите функции - технологична себестойност K (33) и технологична производителност Q (39), при удовлетворяване на система от четири технологични ограничения (40-43).

- технологична себестойност (33)

$$K = K_1 + K_u = C_1.V_c^{-1}.f_m^{-1} + C_2.V_c^{n_T-1}.f_m^{y_T-1} [€] \quad (33)$$

- технологична производителност (39)

$$Q = \frac{1}{t_m + \frac{t_{ad}}{T}.t_m} = \frac{1}{\left(\frac{L_c.K_a}{V_c.f}\right) + \left[\left(\frac{t_{ad}.V_c^{n_T}.f^{y_T}.a_p^{x_T}}{k_{tc}}\right)\left(\frac{L_c.K_a}{V_c.f}\right)\right]} \quad (39)$$

където:

- K_1, K_u – уравнения на асимптотични равнини,

- $n_T = 1/m$ – коефициент на относителна трайност,
- m – показател на относителна трайност,
- y_T – степенен показател, отчитащ влиянието на подаването,
- L_c [mm] – дължина на работния ход,
- K_a – корекционен коефициент, характеризиращ влиянието на дълбочината на рязане,
- t_{ad} [min] – време за смяна на инструмент,
- k_{tc} – константа изведена при определени условия, отчитаща типа обработван материал.

Технологични ограничения:

- минимално допустимо подаване:

$$f_{m1} \geq f_{\min} = \max(f_{M_{\min}}, f_{T_{\min}}) \Rightarrow f_{m1} \geq f_{\min} = 30 \text{ mm/min} \quad (40)$$

- минимално допустима икономична скорост на рязане [30]:

$$V_{cQ} = \left(\frac{C_1}{C_2(n_T - 1) \cdot f_m^{y_T}} \right)^{1/n_T} \quad (41)$$

- максимално допустимо подаване [30], съобразно максимална стойност на главната съставляваща на силата на рязане F_c [N]:

$$f_{m2} \leq \left(\frac{F_{c\max} \cdot V_c^{n_F} \cdot D^{z_F}}{a_p^{x_F} \cdot B^{u_F} \cdot z \cdot n_T \cdot K_{Fc}} \right)^{\frac{1}{y_F}} \quad (42)$$

където:

- $F_{c\max}$ [N] – максимална стойност на главната сила F_c [N],
- D [mm] – диаметър на инструмента,
- $z_F = x_F = u_F = n_F = 1$ – степенни показатели,
- B [mm] – широчина на снемания слой метал,
- z – брой режещи пера,
- $K_{Fc} = 8$ – корекционен коефициент, отчитащ типа обработван материал.
- тах скорост на рязане, допускана от мощността на машината [7,30,78]:

$$V_{c2} \leq \left(\frac{60 \cdot 10^3 \cdot P \cdot \eta \cdot D^{z_F}}{a_p^{x_F} \cdot B^{u_F} \cdot z \cdot n_T \cdot K_{Fc}} \right)^{\frac{1}{1-n_F}} \quad (43)$$

2.4 КОНСТАТАЦИИ, ОБОБЩЕНИЯ И ИЗВОДИ ОТ ГЛАВА II

2.4.1 Изведени са зависимости за определяне на техническия ресурс до възстановим T_{RRF} и невъзстановим T_{RUF} отказ, с отчитане на коефициента на триене.

2.4.2 Въз основа на фундаменталните методи за рисков анализ са изведени зависимости за определяне на времената за непрекъсната работа и възстановяване.

2.4.3 Представен е алгоритъм за оптимизационно прогнозиране на максимално допустимите нива на елементите на режима на рязане, съобразно критериите висока производителност, ниска технологична себестойност, високо качество на обработваните повърхнини и висока инструментална трайност.

2.4.4 Съставен е и е представен чрез блок-схема разклонен цикличен алгоритъм за оптимизационно-надеждностно прогнозиране.

ГЛАВА III. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА БАЗА И МЕТОДИКИ ЗА ПОЛУЧАВАНЕ, НАНАСЯНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОКРИТИЯ

В глава III са посочени условията, начинът и апаратурата за провеждане на изследванията. Описани са използваните методи за изследване на тънки покрития. Експерименталните изследвания са реализирани основно в лабораториите по „Материалознание и технология на машиностроителните материали“ към ИПФ-Сливен на ТУ-София; НИЛ по „Електрофизични технологии за термична обработка на металите“ (НИЛ „ЕФТТОМ“), лаборатория „Механични изпитвания и контрол“, Лаборатория по сканираща електронна микроскопия при МТФ на ТУ-София; Научноизследователски център по вакуумни технологии и съоръжения (НЦВТС) на РУ "А.Кънчев" и в лаборатории на фирмите Алкомет АД – Шумен, ХЕС АД – Ямбол.

3.1 МЕТОДИ ЗА АНАЛИЗ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДАННИ

Изследванията са проведени, чрез система от пасивни и активни експерименти, въз основа на регресионен нелинеен анализ на еднофакторни модели.

Обработката на данните е извършена посредством програмни продукти – Microsoft Excel 2013, MatLab R2015a и Maple 15. Опитите са провеждани с пет-кратна повтораемост, като получените зависимости са построени с усреднени стойности за всеки опит.

3.2 ОБРАБОТВАЕМИ МАТЕРИАЛИ. СЪСТАВ И СВОЙСТВА

Основните обработваеми материали с ЕПФ са редуцирани до три групи - алуминиеви листи и профили, алуминиеви композитни панели и HPL (High Pressure Laminate) плоскости. Техният химичен състав и механични свойства формират до голяма степен експлоатационните и икономически съображения при избора на инструментален материал.

3.3 МАТЕРИАЛИ НА СУБСТРАТИТЕ

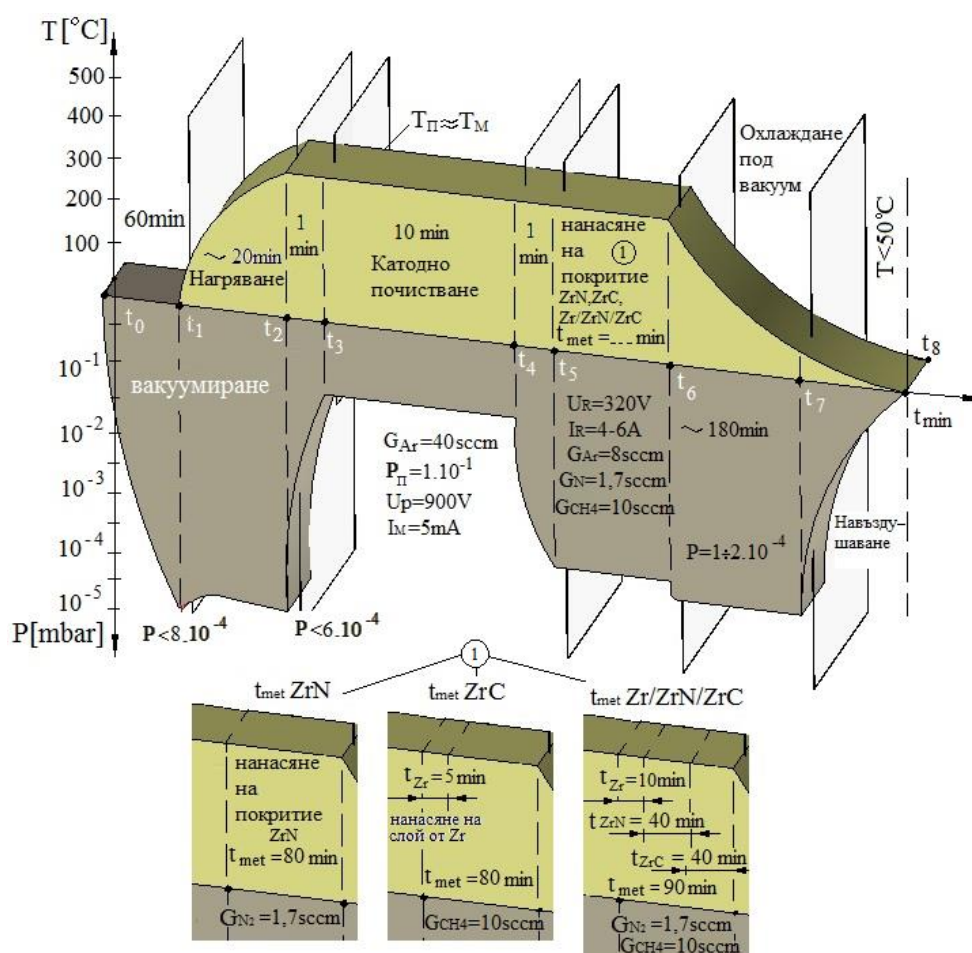
Покритията са нанесени върху образци от закалена HSS-Co5, незакалена HSS-E бързорежещи стомани и неръждаема хром-никелова стомана X25H20. Пробните образци са с размери: $d=20\text{mm}$, $h=5\text{mm}$ и средна грапавост на повърхнините съответно: за стомана HSS-Co5 $R_a=0,05\div 0,08\mu\text{m}$, за стомана HSS-E $R_a=0,06\div 0,09\mu\text{m}$ и за стомана X25H20, $R_a=0,08\div 0,1\mu\text{m}$.

3.4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА БАЗА И РЕЖИМИ ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА ЕДНО- И МНОГОСЛОЙНИ ПОКРИТИЯ ОТ ZrN И ZrC

Еднослойните и многослойни покрития от типа ZrN, ZrC и Zr/ZrN/ZrC са получени и нанесени във вакуумна електрическа пещ с вграден магнетрон ВЕП - 1 към НЦВТС на РУ „А.Кънчев“. Параметрите на режимите за получаване са описани подробно в таблица 3.6 и на фиг.3.5.

Таблица 3.6 Режими за получаване на покрития от ZrN, ZrC и Zr/ZrN/ZrC.

Режим №	Покритие	$P_{\text{нач}}$ [mbar]	$P_{\text{раб}}$ [mbar]	U_p [V]	U_s [V]	I [A]	G_{Ar} [scsm]	G_{N} [scsm]	G_{CH_4} [scsm]	t , [min]
1	ZrN	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	320	0	$4,0 \div 4,1$	8	1,7	-	80
2	ZrC	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$	320	0	$5,9 \div 6,1$	8	-	10	80
3	Zr/ZrN/ZrC	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	320	0	$5,9 \div 6,1$	8	1,7	10	10/40/40



Фиг. 3.5 Време - температурен режим на отлагане на покрития от ZrN, ZrC, Zr/ZrN/ZrC в инсталация ВЕП -1.

Отлагането на композитни никелови покрития по безтоков метод е реализирано по технология за безтоково никелиране [26,28,48], разработена в НИЛ „ЕФТТОМ“ към катедра МТМ на ТУ-София. Процесът се реализира на четири етапа [29,28,48,49]:

- първи подготвителен етап - химическо почистване с органично, алкално или неутрално вещество, разтворител или емулсия;
- втори подготвителен етап - химическа активация с киселинен разтвор,
- отлагане на никелов слой;
- отлагане на композитен наноструктурен слой с прибавяне на свръх твърди частици от детонационен нанодиамант DND, при режим:
 - * време на покриване = 10 min,
 - * концентрация на DND: 2 g/l,
 - * размер на DND: 4,16 μm и 100 μm ,
 - * съдържание на фосфор: около 7,5 wt. % P.

3.6 РЕНТГЕНОСТРУКТУРЕН АНАЛИЗ. ФАЗОВ СЪСТАВ И КОЕФИЦИЕНТ НА ТЕКСТУРОВАНOST НА ПОКРИТИЯТА

Фазовият състав на получените еднослойни и многослойни покрития е изследван чрез рентгенов фазов анализ в $\text{CuK}\alpha$ лъчение със средна дължина на вълната $\lambda=1,5405\text{\AA}$, с помощта на рентгенов дифрактометър „URD-6“, при $U=45\text{ kV}$, $I=40\text{mA}$, филтър Fe, режим на сканиране със скорост $\omega=4\text{deg/min}$ (задържане $\tau=15\text{s/deg}$) и стъпка $\Delta\theta=0,2\text{deg}$.

3.7 ХИМИЧЕН СЪСТАВ НА ПОКРИТИЯТА

Химичният състав на покритията е изследван с помощта на сканиращ електронен микроскоп SEM (модел EVO MA 10 „Carl Zeiss“), към който са вградени допълнително системи и приспособления за количествен и качествен анализ - микро- и нанорентгенов енергиен анализатор EDX, система „Bruker“. Чрез количествен анализ в точка или на определена площ (mapping) е установен състава (спектъра) и концентрацията на основните химични елементи в образците.

3.8 МЕТАЛОГРАФСКИ АНАЛИЗ. МИКРОСТРУКТУРА И ДЕБЕЛИНА НА ПОКРИТИЯТА

За изясняване морфологичните особености на получените слоеве е извършен металографски анализ, при който са изследвани топографията, микроструктурата в план и дебелината в напречно сечение.

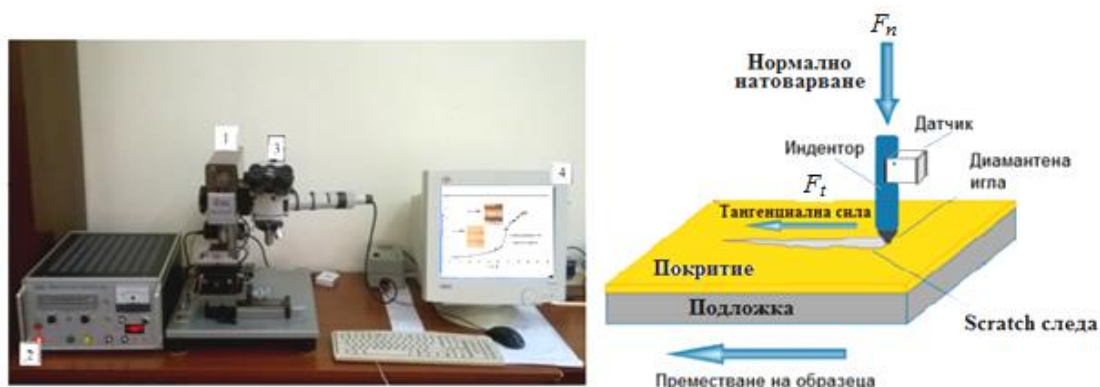
Металографският анализ на образците е проведен в лабораториите по материалознание на катедри ММТ в ИПФ-Сливен и МТМ в РУ „А. Кънчев“.

3.9 ИЗМЕРВАНЕ НА ГРАПАВОСТ

Грапавостта на образците е измерена с профиломер „ACCRETECH - TOKIO SEIMITSU, модел E-35-B“. Уредът позволява отчитане на височинни R_a , R_z , $R_{z\text{max}}$ и стъпкови R_{sm} параметри. Стъпките на отчитане са $\lambda_c=0,08$; 0,25; 0,8 и 2,5 mm.

3.10 ИЗМЕРВАНЕ НА АДХЕЗИЯ И КОЕФИЦИЕНТ НА ТРИЕНЕ НА ПОКРИТИЯТА

Адхезионната якост и коефициентът на триене на покритията в настоящия труд са определени по метода на надраскването (SCRATCH TEST) с помощта на специализиран уред CSEM-REVETEST (Швейцария), в условията на РУ "А. Кънчев", показан на фиг. 3.12.



Фиг. 3.12 Scratch-тестер CSEM-REVETEST [122,155,161,213]:

а) общ вид; б) схема на изпитване.

Към уреда (1) са установени цифровизиран и калибриран микроскоп „NIKON” (3) с 14MP камера HU708A+10 за получаване на цифрово изображение с възможност за последваща обработка и анализ.

3.11 ИЗМЕРВАНЕ НА ТВЪРДОСТ И МОДУЛ НА ЕЛАСТИЧНОСТ

Твърдостта (HV) и модулът на еластичност (E) на получените покрития са определени по метода на Vickers с помощта на нанотестер с компютърно управление FISCHERScope® H100 - фиг.3.15. Измерванията са проведени в лабораторията по материалознание на ИПФ-Сливен.



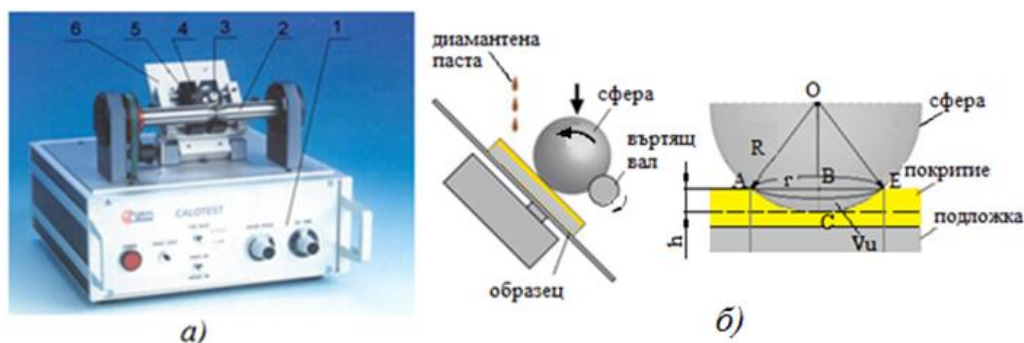
Фиг. 3.15 Общ вид на нанотестер FISCHERScope® H100 [24,200,214]:

1-компютър; 2-образец; 3-стойка; 4-измерваща глава;
5-изчисляващо устройство.

3.12 АБРАЗИВНА ИЗНОСОУСТОЙЧИВОСТ

В настоящият труд износоустойчивостта на покритията е определена в условията на абразивно износване, чрез местно изтриване със стоманена сфера по метод, представен в източник [24], наречен “Ball-wear”, основаващ

се на метода CALOTEST. Изследването е реализирано с помощта на специализиран уред CSEM-CALOTEST – фиг.3.18. При този метод степента на износване се определя по износения обем на покритието V_u .



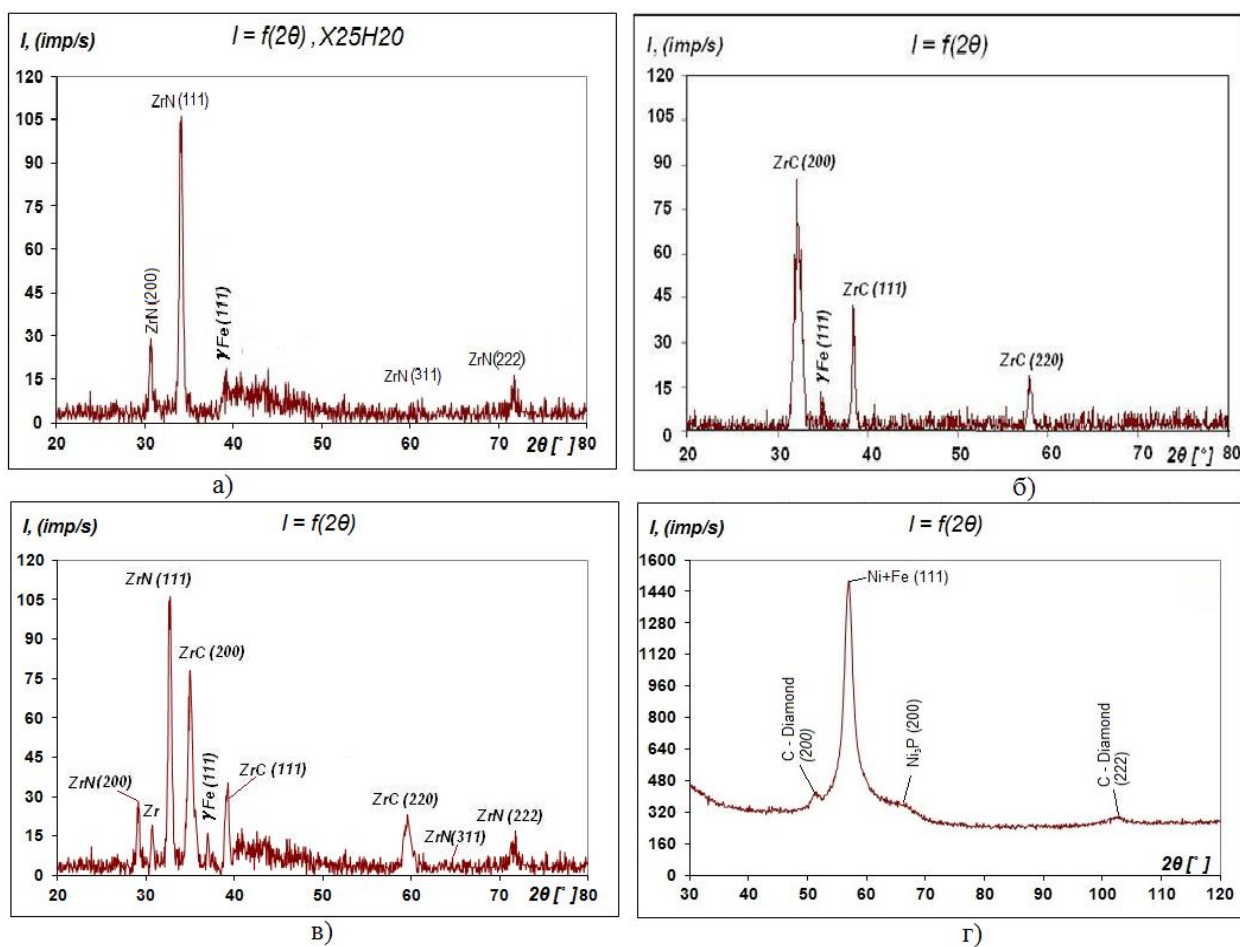
Фиг. 3.18 Общ вид на уред CSEM-CALOTEST® [17,24,38,208]:

а) външен вид: 1-пулт за настройка; 2-задвижващ вал; 3-стоманена сфера Ø30 mm; 4-образец; 5-държачи; 6-опорна маса; б) принцип на изследването.

ГЛАВА IV. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНИЯТА

4.1 РЕНТГЕНОСТРУКТУРЕН АНАЛИЗ

Резултатите от XRD анализа са представени на фиг.4.1 - 4.4.



Фиг. 4.1 - 4.4 Рентгенограми на покрития от:

а) ZrN, б) ZrC, в) Zr/ZrN/ZrC, г) Ni/DND.

Те доказват наличието на съответните чисти фази с характерните за тях кристалографски направления, което неоспоримо показва, че успешно са получени магнетронни покрития от ZrN, ZrC, Zr/ZrN/ZrC и отложени по безтоков метод наноструктурни композитни Ni/DND покрития.

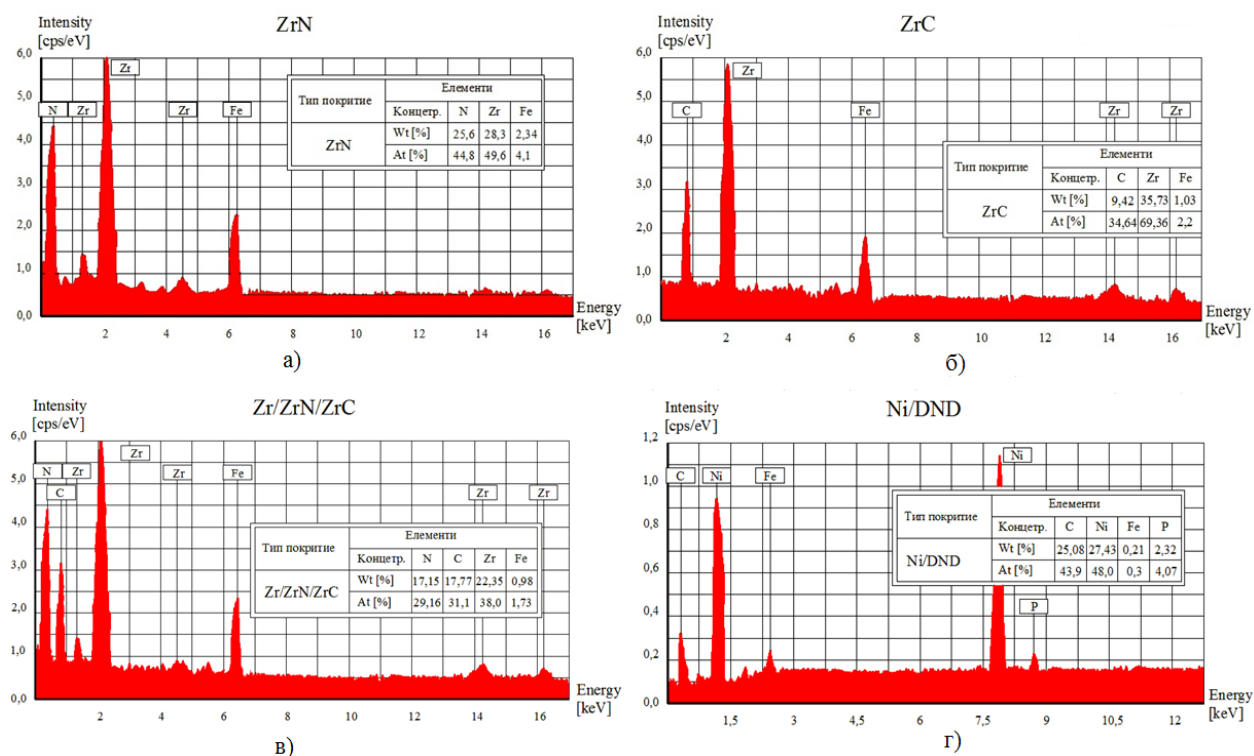
Рентгенограмите на еднослойните покрития от ZrN и ZrC имат еднофазов състав. Наблюдават се линии на γ Fe от подложката.

При многослойното покритие освен линиите на основните фази ZrN и ZrC се наблюдават и тези на отложения като основа Zr-слой и γ Fe от подложката.

Относно покритието от Ni/DND освен основния пик на фазата на Ni са регистрирани и тези на DND структурата (C-Diamond) и кристалната фаза на съединението Ni_3P , отделена в резултат на термичната обработка.

4.2 ХИМИЧЕН СЪСТАВ – СПЕКТРАЛЕН EDX АНАЛИЗ

Резултатите от EDX анализа са представени в графичен вид от фиг.4.6 до фиг.4.9 и напълно потвърждават тези от XRD анализа. Те показват разпределението на основните елементи и тяхната концентрация в тегловни (Wt %) и/или атомни (At %) процента по дълбочина на самото покритие или на границата покритие – подложка.



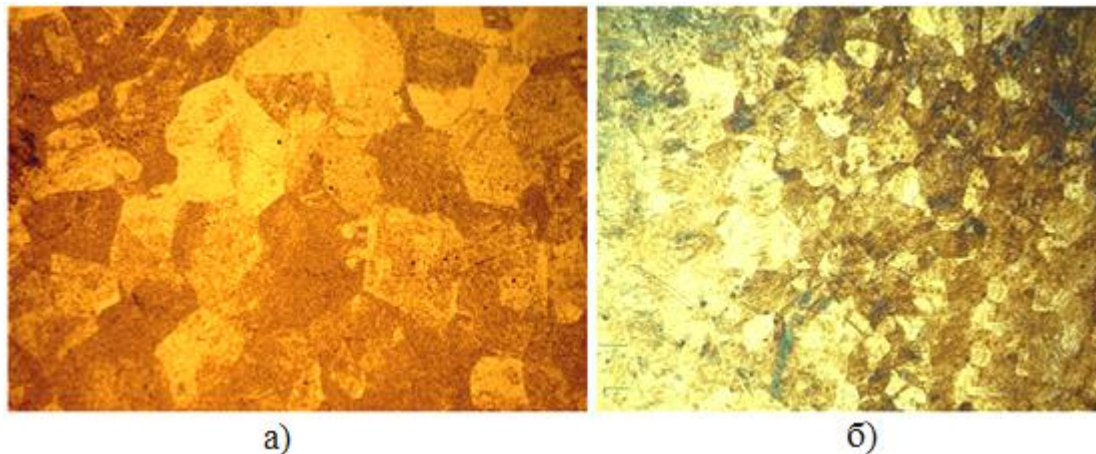
Фиг. 4.6-4.9 EDX анализ на покрития от:
а) ZrN, б) ZrC, в) Zr/ZrN/ZrC, г) Ni/DND.

Регистрираните спектри съдържат само елементите на покритията – Zr, N и Fe (за покритието от ZrN), Zr, C и Fe (за покритието от ZrC) и Zr, N, C и Fe (за покритието от Zr/ZrN/ZrC). Това доказва, че получените резултати напълно корелират с тези от XRD анализа.

4.3 МЕТАЛОГРАФСКИ АНАЛИЗ

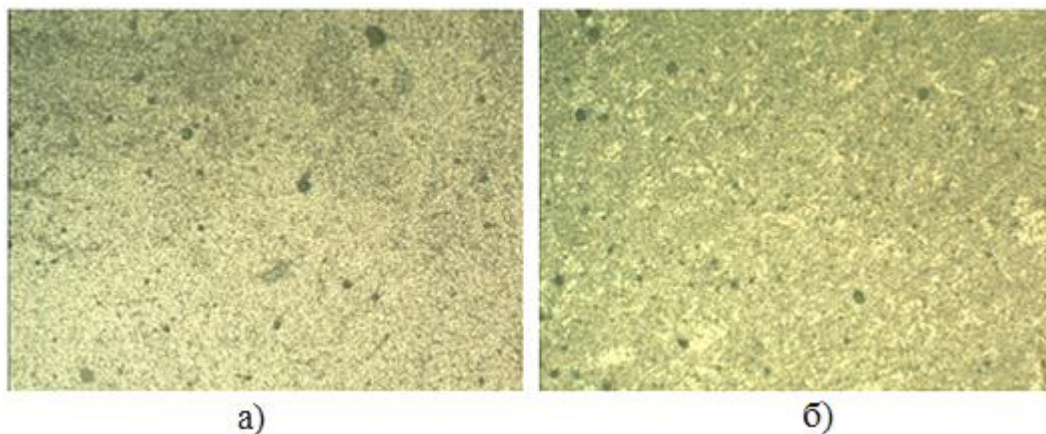
4.3.1 ТОПОГРАФИЯ НА ПОКРИТИЯТА

Микроструктурата в план на еднослойните покрития от ZrN, ZrC и Ni/DND при различните режими на отлагане са показани съответно на фигури 4.10 - 4.13.



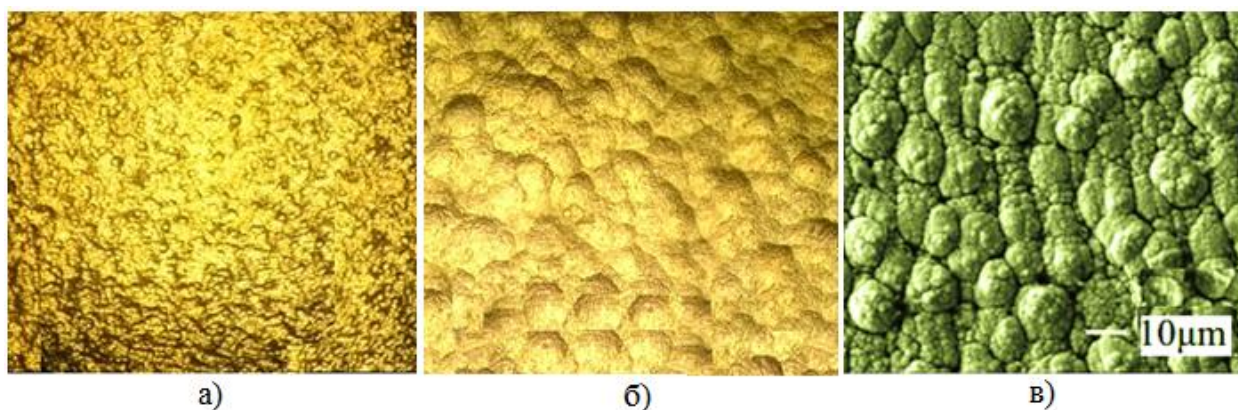
Фиг. 4.10 Топография на покрития от ZrN върху стоманите:
а) HSS-Co5, б) HSS-E, (x200).

Покритията от ZrN притежават равномерна и гладка повърхност, независимо от марката на стоманата на подложката. Металографските снимки на покритията от ZrN, отложени върху двете марки стомани (фиг.4.10) показват на места участъци с нехомогенна многоъгълна структура, дължаща се на наследствеността при израстване на покритието от нехомогенната зърнеста структура на стоманените подложки.



Фиг. 4.12 Топография на покрития от ZrC върху стоманите:
а) HSS-Co5, б) HSS-E, (x200).

Покритията от ZrC, отложени върху подложките от двете марки стомана (фиг.4.12), са с хомогенна и гладка повърхност. Поради предварително нанесения слой от Zr се наблюдава скриване на наследствеността при израстване на покритието от повърхностните зърна на стоманените подложки. Затова карбидните покрития са с по-хомогенна топография в сравнение с нитридните.



Фиг. 4.13 Топография на покрития от Ni/DND върху стомана HSS-E при различни увеличения:

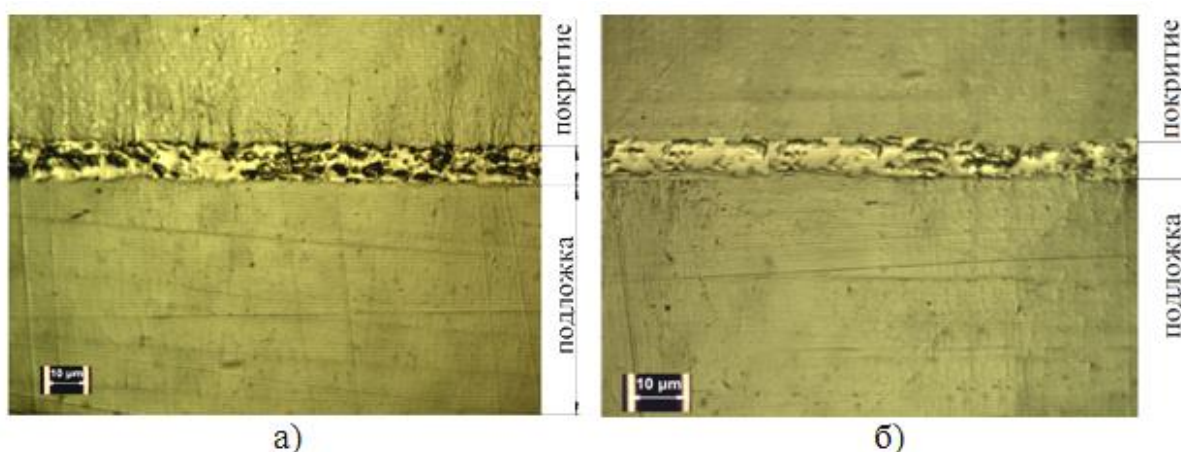
а) (x200); б) (x1000); в) SEM - изображение на микроструктурата.

Получените покрития от Ni/DND са плътни, равномерно отложени с гладки повърхности и наличие на фино диспергирани частици. Получените структури са с типичната за технологията на безтоково отлагане на покрития куполообразна структура, като всеки купол се състои от много фини кълстерни кристали – фиг.4.13,в. Размерите на зърната (кристалите) са различни, поради различната скорост на зараждане на активни центрове и нарастване на зърната. По-големите куполи са изградени от повече зърна, поради по-дългото време на растежа им и обратно.

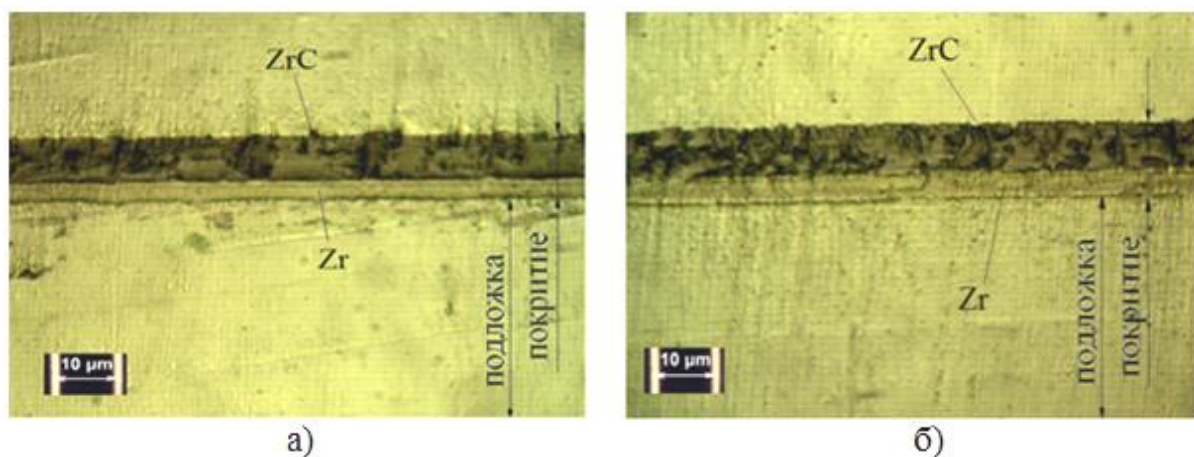
4.3.2 МИКРОСТРУКТУРА И ДЕБЕЛИНА НА ПОКРИТИЯТА

В настоящата работа дебелините на отложените слоеве са измерени по два начина: чрез измерване с окуляр-микрометър в напречен микрошлиф (за покритията от ZrN, ZrC и Zr/ZrN/ZrC) и чрез метода Calotest, посредством специализирания уред CSEM-CALOTEST (за покритията от Ni/DND).

Структурите на еднослойните покрития от ZrN и ZrC в напречно сечение са показани на фиг.4.15 и 4.16.



Фиг. 4.15 Микроструктура в напречно сечение на покрития от ZrN върху стоманите: а) HSS-Co5; б) HSS-E, (x1500).



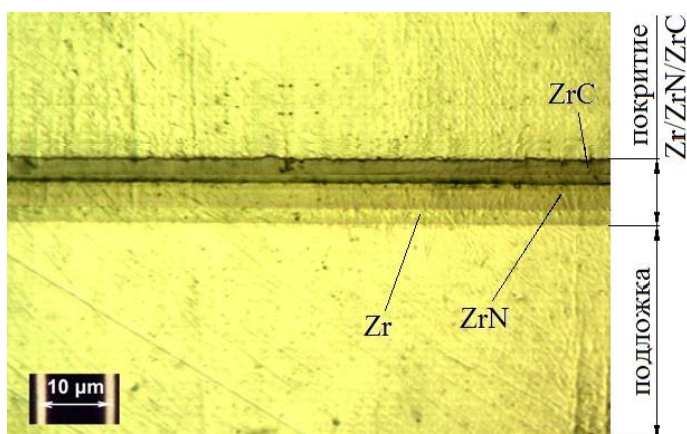
Фиг. 4.16 Микроструктура в напречно сечение на покрития от ZrC върху стоманите: а) HSS-Co5; б) HSS-E, (x1500).

Установено е, че покритията от ZrN, отложени върху субстрати от двете марки стомани са еднослойни, с равномерна дебелина от $\delta=6,7\div7,0\mu\text{m}$ и без видимо наличие на подслое. Изследванията показват, че нанесените върху стомана HSS-E покрития са кондензати с добра плътност, а тези отложени върху бързорежещата стомана HSS-Co5 са с пореста структура, дължаща се на затрудненото захващане и миграция на адатоми върху повърхността на високолегираните подложки, при което възникват случайно разпределени празнини и пори в началото на формиране на слоя.

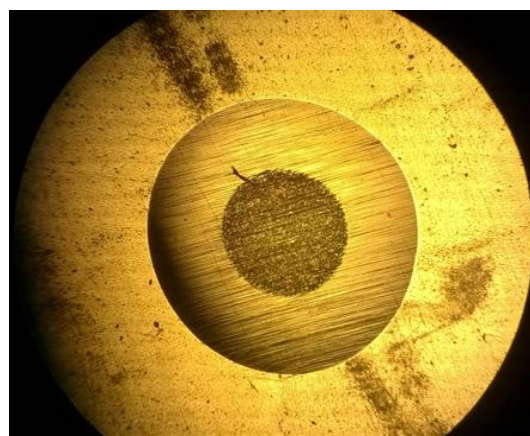
Резултатите за покритията от ZrC показват наличието на два ясно изразени слоя – тънък и плътен подслой от чист Zr и плътен слой от ZrC. Отложеният като основа подслой от Zr служи за подобряване на адхезията с подложката и релаксация на напреженията между нея и слоя от ZrC.

Структурата на полученото многослойно покритие от Zr/ZrN/ZrC в напречен план е показана на фиг.4.17. Микроструктурният анализ показва ясно изразена трислойна структура:

- предварително отложен слой от Zr, под форма на тънка светла ивица,
- слой от ZrN с бледожълт цвят,
- завършващ слой от ZrC, открояващ се като тъмно-сива ивица.



Фиг.4.17 Микроструктура на Zr/ZrN/ZrC върху стомана HSS-E, (x1500).



Фиг.4.18 Калотест на покритие от Ni/DND върху стомана HSS-E (x50).

Не се наблюдава структурно разслояване, което доказва равномерния им химичен състав в рамките на всеки слой.

Обобщените резултати от измерването на общата дебелина на получените покрития и дебелините на съставните им слоеве са представени в таблица 4.3. Резултатите показват, че се наблюдава разлика в дебелините на еднослойните нитридни и карбидни слоеве, като карбидните са с по-голяма дебелина. При трислойните покрития, тъй като режимът е с по-голяма обща продължителност (90 min), то и дебелината им е най-голяма.

Таблица 4.3 Обобщени данни за дебелините на покритията.

Режим	Покритие	t, [min]	δ Zr [μ m]	δ ZrN [μ m]	δ ZrC [μ m]	$\delta_{\text{общо}}$ [μ m]
1	ZrN	80	-	6,7	-	6,7
2	ZrC	80	2,3	-	7,5	9,8
3	Zr/ ZrN/ ZrC	10/40/40	3,4	4,9	3,9	12,2

Поради характера и особеностите на структурата на покритията от Ni/DND, дебелината е определена по метода калотест, чрез формула, представена в Глава III.

В таблица 4.4 са представени данните за дебелината на покритието.

Таблица 4.4 Дебелина на покритие от Ni/DND.

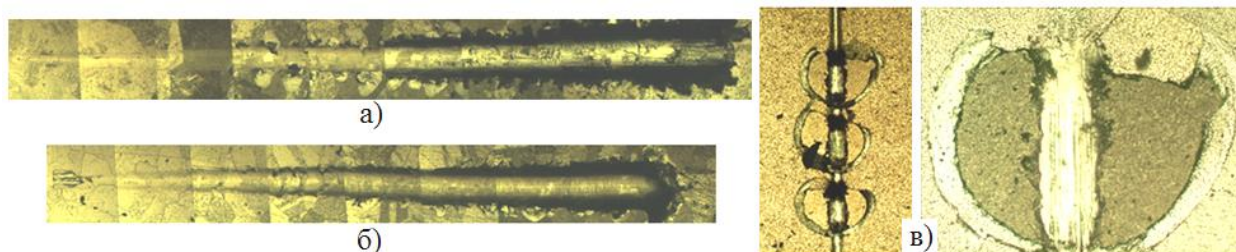
Режим	Покритие	t _{Ni} [min]	t _{Ni+DND} [min]	t, общо [min]	$\delta_{\text{общо}}$ [μ m]
4	Ni+DND	10	10	10/10	7,5

Върху шлифа ясно се очертава само Ni/DND слой. Поради малката дебелина на нанесения преди него Ni слой, последният не се наблюдава.

4.4 АДХЕЗИЯ И КОЕФИЦИЕНТ НА ТРИЕНЕ

4.4.1 АДХЕЗИОННА ЯКОСТ

На фиг.4.19 - 4.22 са посочени видът и характерът на следата от надраскване, получена от индентора на Scratch-тестера.



Фиг. 4.19 Следи от Scratch-test на покритието от ZrN върху стоманите: а) HSS-Co5; б) HSS-E; в) характерни откъртвания, (x50).

Видът на следите на фиг.4.19,а,б ясно илюстрира характера на типичните крехки откъртвания при покритията от ZrN, възникващи в условия на по-слаба адхезия с подложката, поради липсата на междинен Zr слой.

Металографските снимки на следите от Scratch-test на покритията от ZrC и Zr/ZrN/ZrC, са представени на фиг.4.20 - фиг.4.21. Видно е, че и при двата вида покрития преобладава разрушаване, характерно за жилави материали.

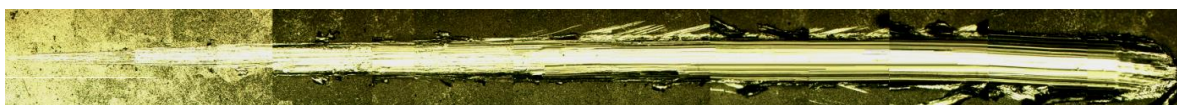


а)



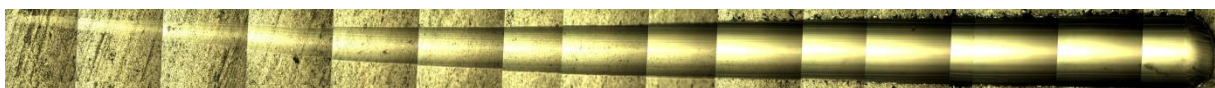
б)

Фиг. 4.20 Следа от Scratch-test на покритието от ZrC върху стоманите:
а) HSS-Co5; б) HSS-E.



Фиг. 4.21 Следа от Scratch-test на покритието от Zr/ZrN/ZrC
върху стомана HSS-E.

На фиг.4.22 е показан характера на следата, получена от Scratch-теста на покритие от Ni/DND.



Фиг.4.22 Следа от Scratch-test на покритието от Ni/DND
върху стомана HSS-E.

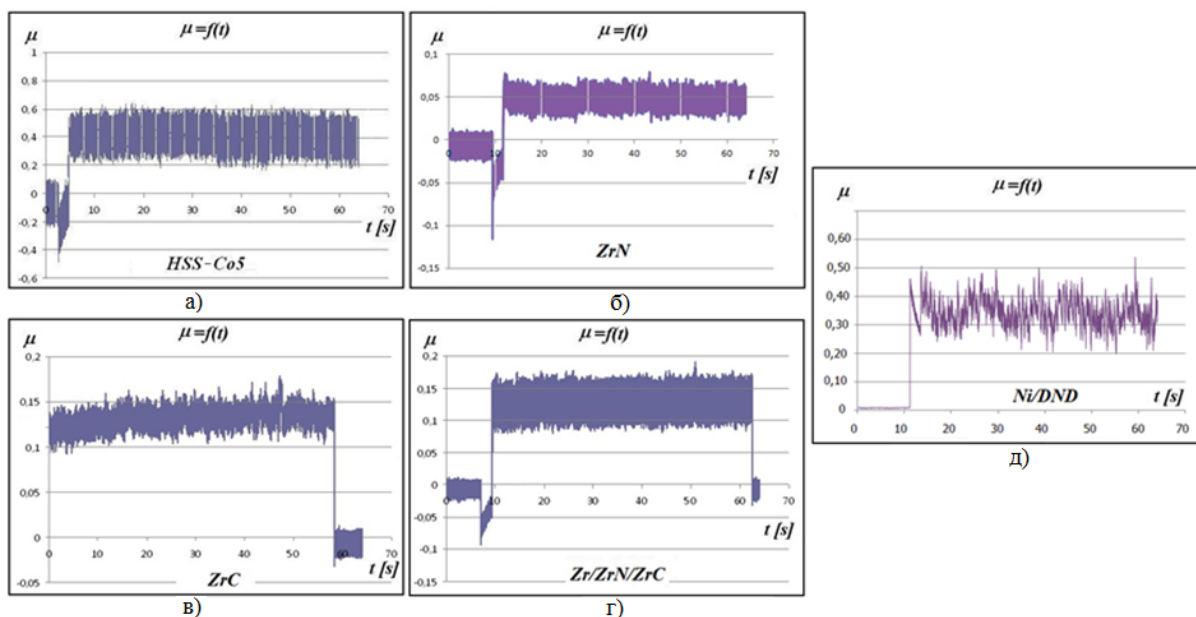
В началото, при ниски натоварвания, се наблюдава пластична деформация в покритието. С нарастване на натоварването възникват локални откъртвания по границите на следата и наличие на пукнатини вътре в следата, а в края на следата се наблюдава видимо разрушаване и перфорация на покритието. Наличието на уякчаващи частици от DND създава условия за увеличаване на адхезионната якост, което е вследствие на увеличената контактна повърхност между субстрата и никеловите атоми.

4.4.2 КОЕФИЦИЕНТ НА ТРИЕНЕ

В табл. 4.6 и фиг. 4.24 са представени резултатите от изследване на коефициента на триене на покритията и непокритата стомана HSS-Co5.

Таблица 4.6 Измерени коефициенти на триене.

материал	μ – по литературни данни	измерен μ	средна стойност на μ
1.HSS-Co5	0,40÷0,55	0,13÷0,61	0,37
2.ZrN	0,25÷0,35	0,07÷0,26	0,17
3.ZrC	0,2÷0,3	0,13÷0,15	0,14
4. Zr/ZrN/ZrC	0,15÷0,2	0,09÷0,17	0,13
5. Ni/DND	0,18÷0,45	0,35÷0,37	0,36

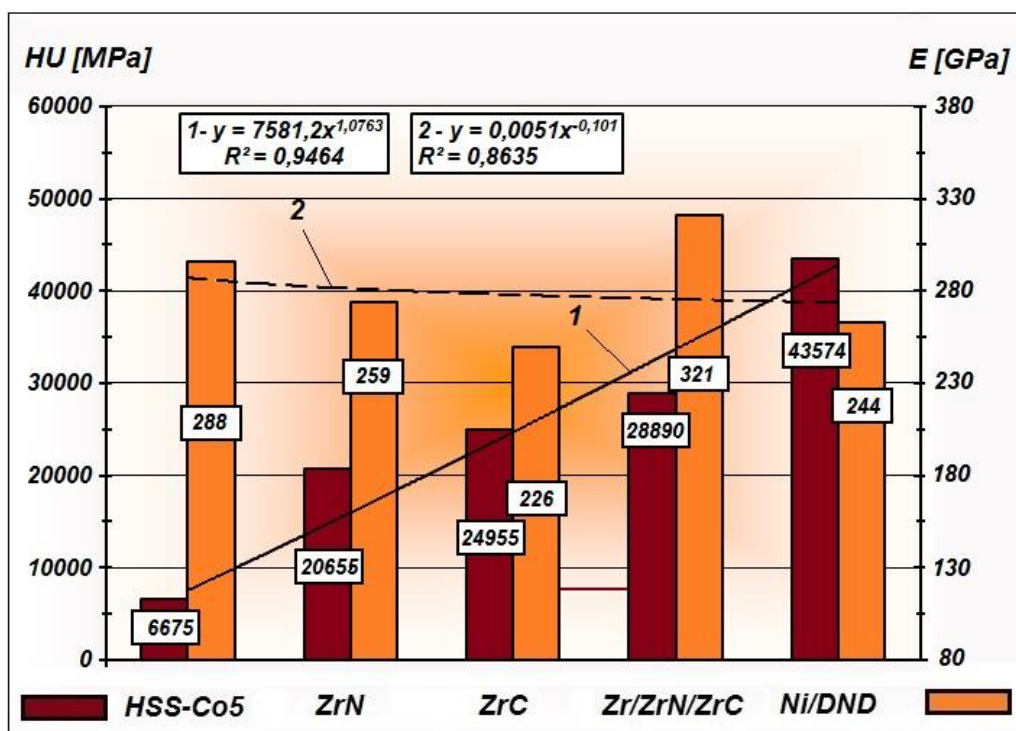


Фиг.4.24 Диаграми от измерване на коефициентите на триене μ за образци от: а) HSS-Co5; б) ZrN; в) ZrC; г) Zr/ZrN/ZrC; д) Ni/DND.

Данните показват, че коефициентът на триене на отложените върху подложки от незакалена стомана едно- и многослойни циркониеви покрития е по-нисък в сравнение с този на закалената стомана HSS-Co5 и покритието от Ni/DND.

4.5 ТВЪРДОСТ, МОДУЛ НА ЕЛАСТИЧНОСТ И ЕНЕРГИЯ ЗА ДЕФОРМАЦИЯ

Получените резултати от измерванията на твърдостта и на модула на еластичност на покритите и непокрита образци са представени на фиг.4.25.



Фиг. 4.25 Измерени твърдост HU и модул на еластичност E .

Измерените стойности показват, че твърдостта на еднослойните покритията от ZrN и ZrC, нанесени върху стомани HSS-E е между 3 и 3,8 пъти по-висока от тази на образците от HSS-Co5 без покритие, като в същото време нитридните покрития показват по-ниски твърдости от карбидните.

Данните от фиг. 4.25 сочат, че твърдостта на многослойните покрития е с около 14% по-висока от тази на еднослойните покрития от ZrC.

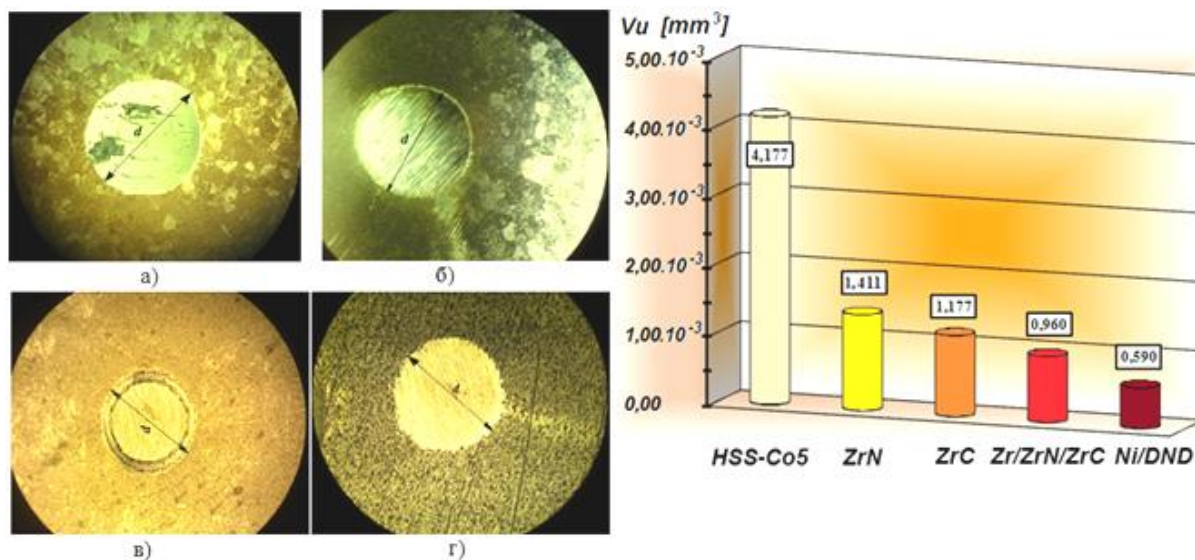
Най-високи стойности на твърдостта са получени за термообработеното покритие от Ni/DND, което се дължи на нанодиамантите в него.

Резултатите за модула на еластичност на покритията не следват конвенционалната теория за линейно-еластично разрушение, според която при по-висока твърдост на материалите се предвижда по-голям модул на еластичност. В случая най-високи стойности са отчетени при многослойното покритие, следвано от образците от HSS-Co5, без нанесено покритие, и чак след това се нареждат покритията от Ni/DND, ZrN и ZrC.

4.6 АБРАЗИВНА ИЗНОСОУСТОЙЧИВОСТ

В настоящата работа износоустойчивостта на покритията е изследвана чрез изчисляване на износения обем на покритието V_u , след време 6 min абразивно износване чрез триене.

Фиг. 4.27 показва вида на получения от износването отпечатък върху повърхността на покритията. Получените резултати за износения обем V_u [mm^3] са обобщени и представени на фиг. 4.28.



Фиг. 4.27 Общ вид на отпечатъка от износване, върху стомана HSS-E за покритие от: а) ZrN; б) ZrC; в) Zr/ZrN/ZrC; г) Ni/DND, (x50).

Фиг. 4.28 Обемно износване на покритията.

Данните показват, че износоустойчивостта на образците от HSS-Co5 без покритие е до три пъти по-ниска от тази на образците с покритие. От друга страна, износоустойчивостта на покритията от ZrN отстъпва на тази от ZrC и Zr/ZrN/ZrC. Това се дължи основно на по-високата твърдост на покритията от

ZrC и Zr/ZrN/ZrC. Най-висока устойчивост на абразивно износване показва термообработеното покритие от Ni/DND поради нанодиамантите в него.

4.7 КОНСТАТАЦИИ, ОБОБЩЕНИЯ И ИЗВОДИ ОТ ГЛАВА IV

От проведените изследвания и отчетените резултати за експлоатационните и технологичните показатели на получените покрития, могат да бъдат направени редица изводи, по-важните от които са:

4.7.1 По метода на реактивното магнетронно разпръскване на синтерована циркониева мишена във вакуумна пещ успешно са получени и нанесени еднослойни покрития от ZrN и ZrC. Създадените режими позволяват и получаването на трислойни покрития от Zr/ZrN/ZrC чрез последователна смяна на реакционните газове N_2 и CH_4 в работната камера.

4.7.2 Технологията за безтоково никелиране ЕФТТОМ-НИКЕЛ е приложима за нанасяне на дисперсионни никелови покрития с добавка от наноразмерен детонационен диамант върху стомани за ЕПФ.

4.7.5 Доказано е, че отложеният като основа междинен Zr слой, освен за подобряване на адхезията, изменя характера на взаимодействие на кондензиращите атоми с подложката и силно намалява наследствеността при израстване на покритието от повърхностните зърна на стоманените подложки. Затова покритията от ZrC и Zr/ZrN/ZrC притежават по-хомогенна топография в сравнение с покритията от ZrN.

4.7.6 Резултатите от рентгеноструктурния анализ на получените многослойни покрития на циркониева основа показват наличието на нитридни и карбидни фази, като преобладаващи са линиите (фазите) на нитрида. Поради невъзможност за пълно почистване на мишената при преминаване от нитрид към карбид и особеностите в конструкцията на пещта, е възможно получените фази да не са чисти, а карбонитридни.

4.7.9 Дисперсионните никелови покрития с добавка от детонационен нанодиамант показват значително по-високи твърдост и износоустойчивост в сравнение с едно- и многослойните покрития на циркониева основа.

4.7.11 Коефициентът на триене на отложените върху подложки от незакалена стомана едно- и многослойни циркониеви покрития е по-нисък в сравнение с този на закалената стомана HSS-Co5 и покритието от Ni/DND.

4.7.15 Твърдостта на многослойните покрития е с около 14% по-висока от тази на еднослойните, като причина за това е по-голямата твърдост на завършващия слой от ZrC. Най-високи стойности на твърдостта притежава термообработеното покритие Ni/DND, отложено върху стомана HSS-E.

4.7.16 Основните фактори, оказващи влияние върху твърдостта на получените покрития са вида на текстурата, стойността на коефициента на текстурированост и химичния състав на фазите. При многослойните покрития от Zr/ZrN/ZrC измерването на твърдостта в план е значително по-сложно, поради многослойността на покритията и факта, че всеки следващ подслой от повърхността навътре се явява на практика подложка на предходния.

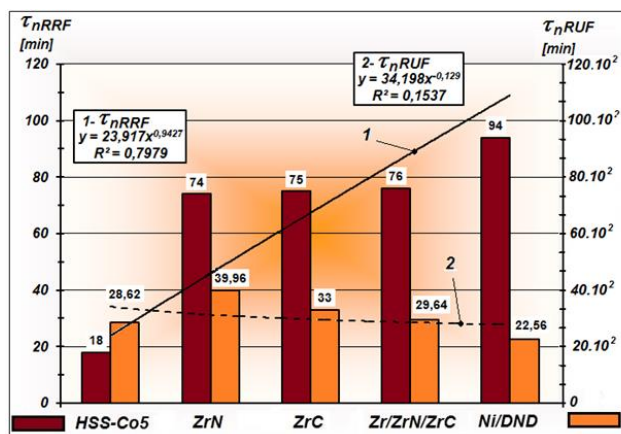
ГЛАВА 5. ЕКСПЛОАТАЦИОННИ, ТЕХНОЛОГИЧНИ И ИКОНОМИЧЕСКИ ПАРАМЕТРИ НА ЕПФ С НАНЕСЕНИ ИЗНОСОУСТОЙЧИВИ ПОКРИТИЯ – СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ

Сравнителният анализ на резултатите от експерименталните изследвания относно експлоатационните, технологичните и икономическите параметри на нанесените износоустойчиви едно- и многослойни покрития върху едноканални палцови фрези се налага от необходимостта да се изясни икономическия ефект от въвеждането им в производствени условия.

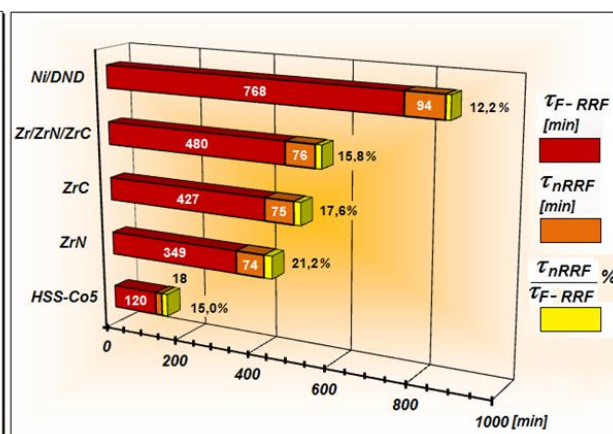
5.1 ЕКСПЛОАТАЦИОННИ ТРАЙНОСТНИ ПАРАМЕТРИ НА ЕПФ

Обобщените резултати за трайностните параметри *време за непрекъсната работа* τ_{F-RRFi} [min] до настъпване на възстановим отказ и *време за пребиваване в процес на възстановяване* при възстановим отказ τ_{nRRFi} [min], както и тяхното отношение в % са показани на фиг.5.5 и фиг.5.6.

Времената за непрекъсната работа τ_{F-RRFi} [min] са най-високи при ЕПФ с покрития от Ni/DND и най-ниски при инструменти без покритие от стомана HSS-Co5, което е в пълна корелация с тяхната трайност, твърдост и износоустойчивост. Тази тенденция не е актуална при анализ на сумарните времена. Сумарното време за работа на ЕПФ без покритие от стомана HSS-Co5 е по-малко от това при ЕПФ с покритие, с изключение на покритието Ni/DND. Това се обяснява с по-ниското в пъти време за възстановителни операции на инструментите от HSS-Co5, спрямо тези с покритие.



Фиг. 5.5 Времена за пребиваване в процес на възстановяване.

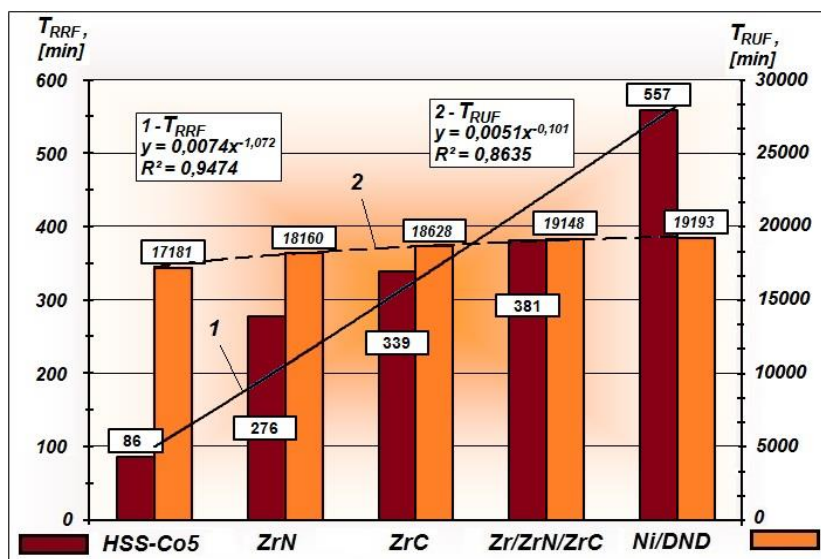


Фиг. 5.6 Отношението в % на времената τ_{F-RRFi} и τ_{nRRFi} .

На фиг. 5.6 е показана обобщена графика, представяща отношението в % на времената τ_{F-RRFi} и τ_{nRRFi} . Наблюдаваната тенденция е идентична с тази, отчитаща сумарните времена τ_{nRUF} .

5.2 РЕСУРСЕН АНАЛИЗ

На фигура 5.8 са посочени резултатите за стойността на техническия ресурс при възстановим T_{RRF} [min] и невъзстановим T_{RUF} [min] отказ. Те са актуални за изследван интервал от време 19 200 min, формиран при двусменен осем-часов, едномесечен режим на работа на ЕПФ.

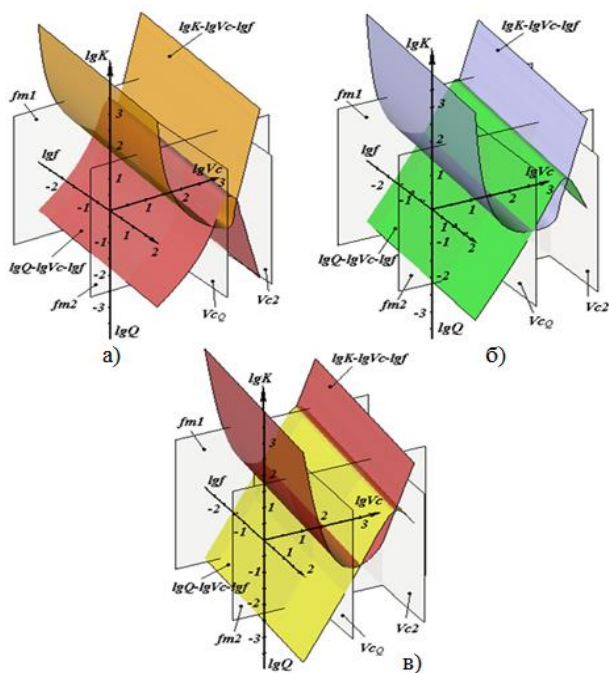


Фиг. 5.8 Технически ресурс на ЕПФ с и без покритие до T_{RRF} и T_{RUF} отказ.

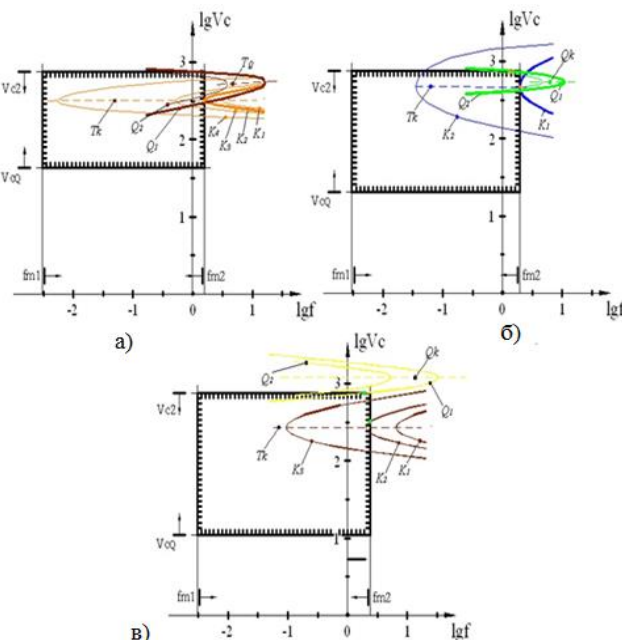
От графиката е видно, че наличието на покритие, значително повишава срока за техническа експлоатация на инструментите. Влиянието е по-силно изразено при техническия ресурс до възстановим отказ T_{RRF} и по-слабо при невъзстановим отказ T_{RUF} . Резултатът е в корелация с увеличените експлоатационни показатели - твърдост и изнosoустойчивост.

5.3 ТЕХНОЛОГИЧНИ ПАРАМЕТРИ

Технологичните параметри скорост V_c [m/min] и минутно подаване f_m [mm/min] при фрезование с ЕПФ са изведени въз основа на предложения в глава втора оптимизационен алгоритъм.



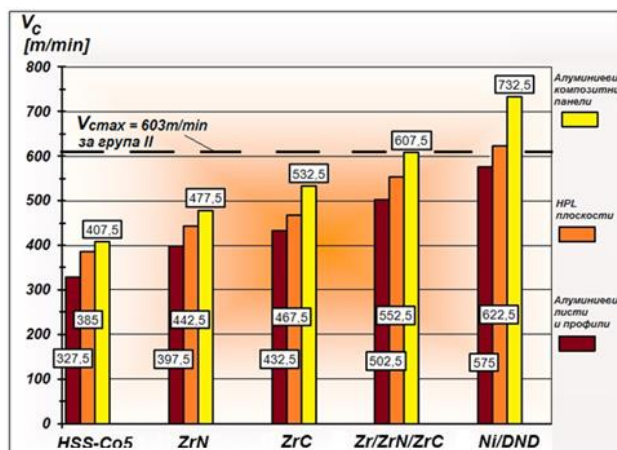
Фиг.5.10 Зависимости на технологичната себестойност K и технологичната производителност Q от V_c и f .



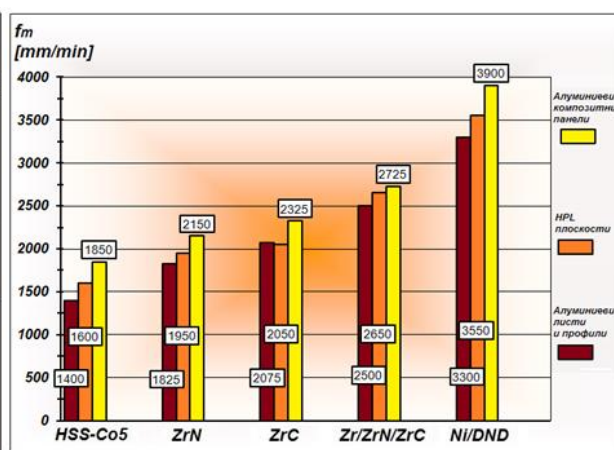
Фиг.5.11.Оптимизационен модел при обработка на: а) алуминиеви листи, б) HPL плоскости, в) АКП.

По резултатите са построени графичните зависимости за технологичната себестойност и технологичната производителност $\lg Q - \lg V_c - \lg f_m$, част от които са показани на фиг.5.10. Моделите имат форма на наклонени улеи.

Оптималните решения се получават в пресечните точки на изолиниите от системата $\lg Q - \lg V_c - \lg f_m$ с някои от правите на ограничения (f_{m1} , f_{m2} , V_{cQ} , V_{c2}), което е дадено на фиг. 5.11.



Фиг. 5.13 Оптимални стойности за скоростта на рязане V_c [m/min].

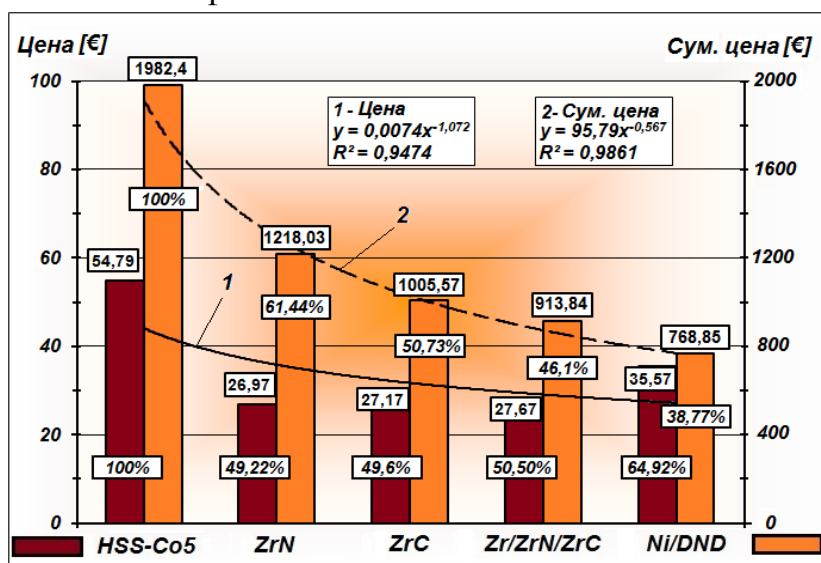


Фиг. 5.14 Оптимални стойности за минутно подаване f_m [mm/min].

Резултатите, представени на фиг.5.13 и фиг.5.14 показват, че стойностите на показателите са най-ниски при фрезование на алуминиеви листи, нарастват при фрезование на HPL плоскости и особено при алуминиеви композитни панели, което се дължи основно на по-високата твърдост на първите.

5.4 ТЕХНИКО – ИКОНОМИЧЕСКИ АНАЛИЗ НА ИНСТРУМЕНТИ С НАНЕСЕНИ ИЗНОСОУСТОЙЧИВИ ПОКРИТИЯ

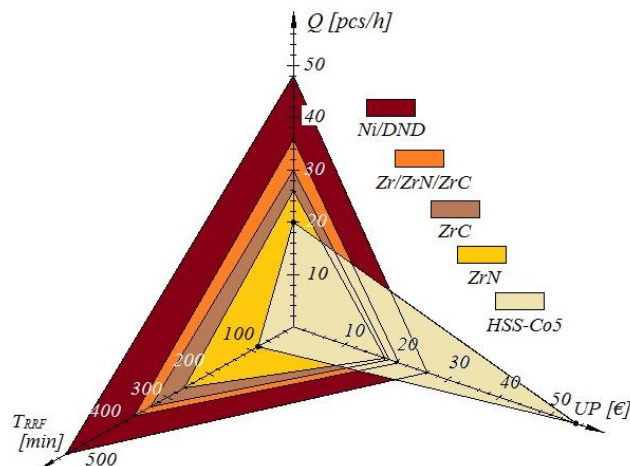
Формираните сумарни единични цени UP [€] с отчитане на възстановителните операции, както и сумарни общи цени TUP [€] на партида едноканални палцови фрези (обобщен анализ) при различен тип стомана и покритие са показани на фиг. 5.15.



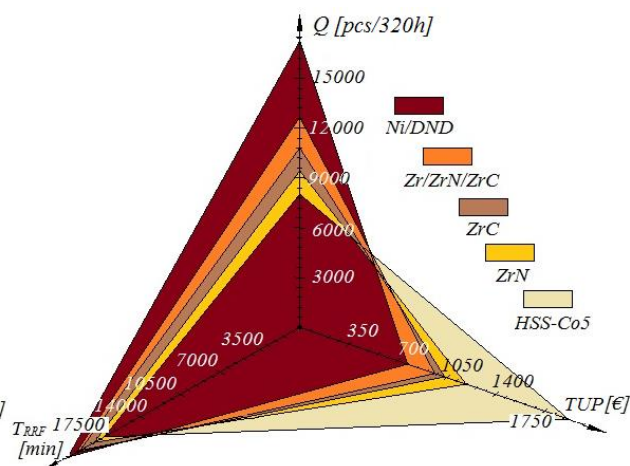
Фиг.5.15 Финансови разходи за инструменти с и без нанесени покрития.

Резултатите недвусмислено доказват положителния икономически ефект от въвеждането на получените покрития в рамките на техническия ресурс на ЕПФ до възстановим T_{RRF} и невъзстановим отказ T_{RUF} .

Съотношенията между експлоатационни, технологични и икономически параметри на ЕПФ с и без нанесени покрития в обобщен вид са представени на фиг.5.17 и фиг.5.18.



Фиг. 5.17 Резултати от елементарен анализ.



Фиг. 5.18 Резултати от обобщен анализ.

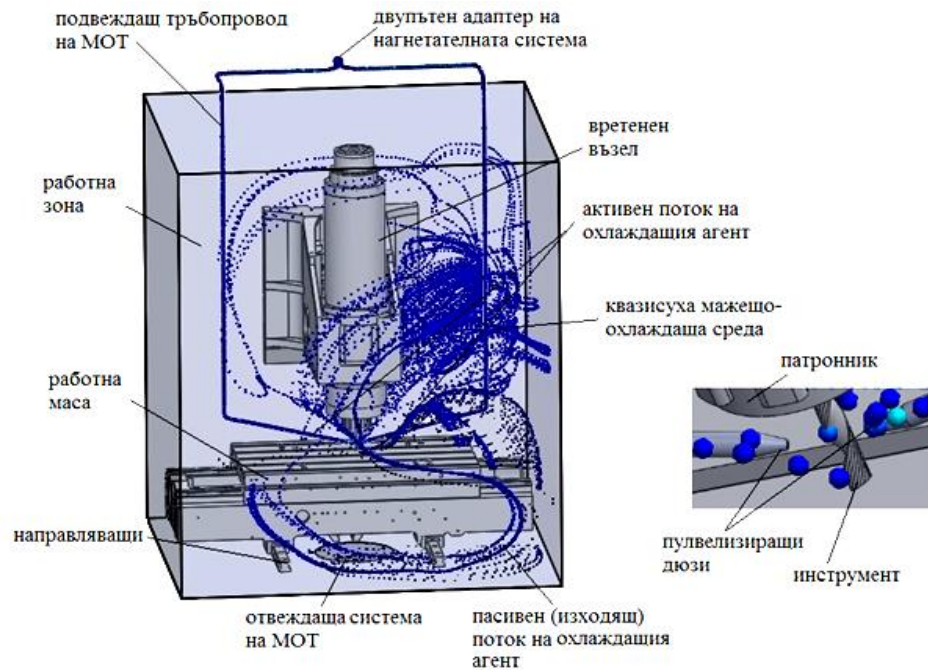
Потвърдени са очакванията, според които инструментите с нанесени никелови композиционни покрития с добавки от детонационен нанодиамамент Ni/DND притежават най-добри експлоатационни и технологични параметри, при най-ниска цена. След тях се нареждат последователно ЕПФ с отложени покрития от Zr/ZrN/ZrC, ZrC и ZrN. Най-ниска производителност, при най-нисък ресурс и най-висока цена, имат едноканалните палцови фрези от бързорежеща закалена стомана HSS-Co5 без покритие.

5.5 СИМУЛАЦИОННО МОДЕЛИРАНЕ, ИМИТИРАЩО РЕАЛНИ ПРОИЗВОДСТВЕНИ УСЛОВИЯ

Въз основа на получените резултати за физико-механичните параметри, термодинамични характеристики и елементите на режима на рязане, успешно са проведени симулационни изследвания, имитиращи реалните производствени условия, при които функционират едноканалните палцови фрези при квазисухо високоскоростно фрезование.

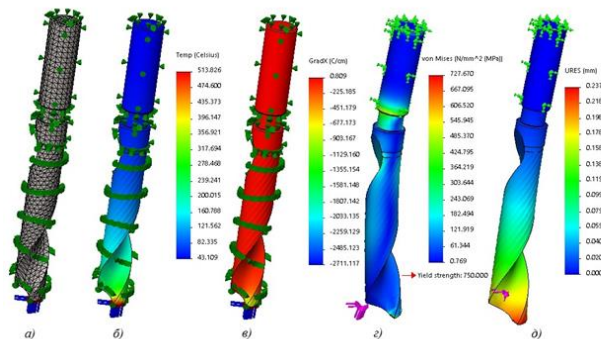
Термичният симулационен модел е реализиран в условия на стационарен, директен кондуктивен топлообмен с коефициенти, различни при различните типове инструментални материали и покрития, ограничен от тялото на инструмента и топлоотвеждащата гранична фаза под формата на конвективна охлаждаща среда - фиг. 5.20.

Тук пулверизираният охлаждащ агент, формиран като емулсия от мажещи, охлаждащи компоненти и въздух се внася под високо налягане в зоната на рязане като мъгла чрез две следящи пулверизиращи дюзи.

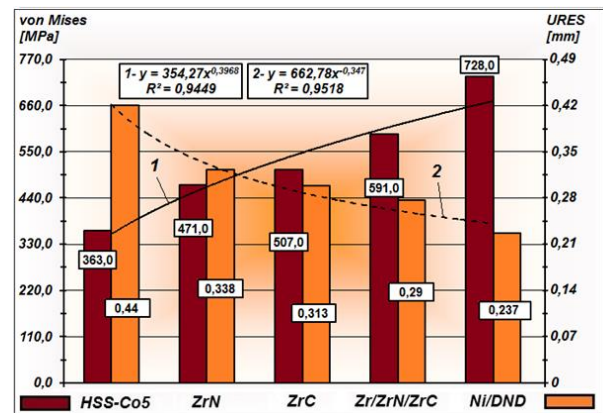


Фиг.5.20 Модел на флуидна термодинамична симулация.

Реализирана е комплексна якостно-деформационна проверка по метода на крайните елементи. Резултатите са получени въз основа на съчетани силови, термични и флуидни симулации на ЕПФ с и без покрития, които са частично показани на фиг.5.25.



Фиг.5.25 Симуляционно моделиране и анализ на ЕПФ с покритие от Ni/DND: а) омрежване на модела, б) температурно поле, в) температурен градиент, г) напрежение на огъване, д) деформация.



Фиг.5.26 Якостно – деформационен анализ.

В резултатната графика на фиг.5.26 ясно се очертава тенденцията според която, въпреки че понасят най-интензивното, както силово така и термично въздействие, инструментите с покритие от Ni/DND допускат най-високо натоварване при най-ниска деформация, следват тези с многослойното покритие от Zr/ZrN/ZrC и ЕПФ с еднослойни покрития от ZrC и ZrN. Инструментите от HSS-Co5 без покритие допускат най-ниско натоварване.

5.6 КОНСТАТАЦИИ, ОБОБЩЕНИЯ И ИЗВОДИ ОТ ГЛАВА V

От проведения сравнителен анализ могат да бъдат направени следните по-важни изводи:

5.6.6 Наличието на покритие, значително повишава срока за техническа експлоатация на инструментите. Влиянието е по-силно изразено отново при техническия ресурс до възстановим отказ T_{RRF} и по-слабо при невъзстановим отказ T_{RUF} . Резултатът е в корелация с увеличените експлоатационни показатели твърдост и износоустойчивост на инструментите.

5.6.8 Изведени са оптимални стойности за елементите на режима на рязане при фрезозане с ЕПФ с нанесени дисперсионни никелови покрития Ni/DND или покрития от ZrN, ZrC и Zr/ZrN/ZrC - скорост V_c [m/min] и минутно подаване f_m [mm/min] при обработката на елементи от алуминиеви листи, композитни панели и HPL плоскости.

5.6.10 Извършен е сравнителен анализ, недвусмислено доказващ положителния икономически ефект от въвеждането на износоустойчиви покрития в рамките на техническия ресурс на ЕПФ.

5.6.18 Установено е, че покритието от Ni/DND допуска най-високо натоварване на ЕПФ при най-ниска деформация, следват многослойното покритие Zr/ZrN/ZrC и еднослойните покрития ZrC и ZrN. Инструментите от HSS-Co5 без покритие допускат най-ниско натоварване.

ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. НАУЧНО – ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1.1 Доказана е възможността за получаване на едно- и многослойни покрития от ZrN, ZrC и Zr/ZrN/ZrC чрез реактивно магнетронно разпръскване на синтерована циркониева мишена във вакуумна пещ и на еднослойни дисперсионни никелови покрития с добавки от детонационен нанодиамант Ni/DND по безтоков метод “ЕФТТОМ–НИКЕЛ” върху стомани за едноканални палцови фрези.

1.2 Потвърдено е, че отложеният като основа междинен слой от Zr подобрява адхезията на покритията от ZrN, ZrC и Zr/ZrN/ZrC с подложката.

1.3 Потвърдено е, че получените покрития притежават нисък коефициент на триене, необходим за бързото отвеждане на стружката извън зоната на рязане при високоскоростно фрезозане с едноканални палцови фрези.

1.4 Доказано е, че дисперсионните никелови покрития с добавки от детонационен нанодиамант Ni/DND и многослойните покрития от Zr/ZrN/ZrC са подходящи за ЕПФ, предназначени за чисти и фини фрезови обработки, докато еднослойните покрития от ZrC или ZrN са подходящи за ЕПФ, предназначени за груби фрезови обработки.

1.5 Чрез Бейсов вероятностен модел, базиран върху основния закон на надеждността, при детерминиран интервал и гранични нива на вариране на изследваните фактори, са изведени зависимости за определяне на техническия ресурс на едноканални палцови фрези до възстановим T_{RRF} и невъзстановим T_{RUF} отказ, с отчитане на коефициента на триене.

1.6 Предложен и апробиран е алгоритъм за оптимизационно - надеждностно прогнозиране на максимално допустимите нива на елементите на режима на рязане, съобразно критериите висока производителност и ниска технологична себестойност, отчитащ структурата и свойствата на нанесените износоустойчиви покрития върху ЕПФ при високоскоростна обработка на елементи от алуминиеви листи, композитни панели и HPL плоскости.

1.7 Доказано е, че отложеният като основа междинен Zr слой, освен за подобряване на адхезията, изменя характера на взаимодействие на кондензиращите атоми с подложката и силно намалява наследствеността при израстване на покритието от повърхностните зърна на стоманените подложки. Затова покритията от ZrC и Zr/ZrN/ZrC притежават по-хомогенна топография в сравнение с покритията от ZrN.

2. ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

2.1 Създадени и апробирани са технологични режими за магнетронно нанасяне на износоустойчиви покрития от ZrN, ZrC и Zr/ZrN/ZrC върху стомани за едноканални палцови фрези.

2.2 Доказано е, че получените покрития водят до увеличаване на твърдостта и износоустойчивостта на ЕПФ при обработване на алуминиеви листи, композитни панели и HPL плоскости.

2.3 Чрез поелементен и обобщен анализ количествено е доказана икономическата ефективност от нанасянето на изследваните износоустойчиви покрития върху стомани за едноканални палцови фрези, с паралелно отчитане на показателите производителност, технически ресурс и цена на инструмента.

2.4 Въз основа на паралелно решаване на две многофакторни, итеративни, еднопараметрични, оптимизационни задачи с пофакторно сканиране са изведени оптимални стойности за елементите на режима на рязане - скорост $V_c[m/min]$ и минутно подаване $f_m[mm/min]$ при обработката на елементи от алуминиеви листи, композитни панели и HPL плоскости с ЕПФ с нанесени покрития от Ni/DND, ZrN, ZrC и Zr/ZrN/ZrC.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. **Димитрова В., М.Йорданов, М.Николова, В.Захариева**, Получаване на покрития от ZrN чрез магнетронно разпрашаване във вакуумна пещ, сп. Известия на Съюза на Учените – Сливен, ISSN 1311-2864, том 32, кн.1, с. 27-32, 2017

2. **Dimitrova V.**, V.Dimitrov, Physicochemical properties of materials for single flute end mill cutters, International Journal of Scientific & Engineering Research (IJSER), ISSN 2229-5518, Volume 6, Issue 5, pp.1256-1262, 2015 (*Impact Factor 3,2*)
3. Йорданов М., Б.Табакова, **В.Димитрова**, М.Николова, Получаване и изследване на едно- и многослойни покрития на циркониева основа, нанесени върху стомани за едноканални палцови фрези, сп. Машиностроителна техника и технологии, ISSN 1312-0859, кн.1, с. 83-86, 2016
4. **Димитрова В.**, Сравнителен технико – икономически анализ на едноканални палцови фрези с и без нанесени износустойчиви покрития, сп.Машиностроителна техника и технологии, ISSN 1312-0859, кн.1, с. 91-95, 2016
5. **Димитрова В.**, М.Йорданов, Б.Табакова, М.Николова, Е.Янков, В.Димитров, Изследване износоустойчивостта на едно- и многослойни покрития, нанесени върху стомана HSS-E, Национална конференция с международно участие „Сливен'2017“, юли, 2017 (приета за отпечатване в сп. Машиностроене и машинознание).

УЧАСТИЕ В НАУЧНИ ПРОЕКТИ

1. Договор № 152ПД0007-16/2015 към НИС на ТУ- София на тема:
"Получаване и изследване на едно- и многослойни износоустойчиви покрития върху стомани за едноканални палцови фрези".
2. Договор № 07/3 от 14.12.2016 към НФНИ на МОН на тема:
„Градиентно-функционални нанопокрития, получени чрез вакуумни технологии за биомедицински приложения“.
3. Договор № 2016-МТФ-02 към ФНИ на РУ"А.Кънчев" на тема:
”Разработване и усъвършенстване на специализирани апаратури за микроструктурен и трибологичен анализ чрез цифровизиране на получаваната информация”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Издавам своята благодарност на научните ми ръководители проф. д-р инж. Божана Табакова и проф. д-р инж. Милко Йорданов за помощта, съветите и компетентното ръководство при разработването и написването на дисертационния труд.

Благодаря на хим. М. Сачков от НИЛ „ЕФТТОМ” към ТУ-София, както и на доц. д-р инж. Ив. Дерменджиев†, гл. ас. д-р инж. М. Николова, гл. ас. д-р инж. В.Захариева и гл. ас. д-р инж. Е.Янков от РУ "А.Кънчев" за оказаното съдействие при провеждане на експериментите и изследванията.



TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA
FACULTY OF ENGINEERING AND PEDAGOGY OF SLIVEN
Department „Mechanical Engineering, Manufacturing Engineering
and Thermal Engineering“

Veselina Krasimirova Dimitrova, M.Sc.Eng.

OBTAINING AND INVESTIGATION OF MONO - AND
MULTILAYERED WEAR RESISTANT COATINGS ON SINGLE
FLUTE END MILL CUTTERS

ABSTRACT of Ph.D. THESIS

The current PhD Thesis is aimed at solving the problems related with obtaining and investigation of the structure, composition and properties of deposited by reactive magnetron sputtering and electroless method the mono nanostructured coatings from zirconium nitride – ZrN, zirconium carbide – ZrC, composite nickel coatings with detonation nanodiamond additives Ni/DND and multilayer gradient coatings from type Zr/ZrN/ZrC, on steel for Single flute end mill cutters (SFEMC).

The ZrN, ZrC, and Zr/ZrN/ZrC coatings are deposited by reactive magnetron sputtering in the vacuum electric furnace with built-in magnetron (PVD methods), and these from Ni/DND, by using the technology for nickel electroless method with strength nanodiamond additives EFTTOM-NICKEL.

The experimental investigation are realized mainly in Laboratories of Materials Science and Engineering Materials Technology at FEP of Sliven of TU-Sofia, Science Research Laboratory (EFTTOM), Laboratory of Mechanical testing and control, Scanning Electron Microscope (S.E.M) Laboratory in the Faculty of Industrial Technology of TU of Sofia and Scientific and Research Center for Vacuum Technology and Facilities of "Angel Kanchev" University of Ruse, as well as in laboratories of companies: Alcomet AD Shumen, Hydraulic Elements and Systems PLC- Yambol.

Experimental testing includes: metallographic and X-Ray analysis of coatings, adhesion, coefficients of friction, abrasion wear resistance, physico-mechanical properties, hardness and Young's modulus and the resulting roughness.

In conclusion, quantitatively has been proven of the application of wear-resistant coatings on single flute end mill cutters, with the parallel reporting of performance, mean time between failures and price of the tools in the conditions of Bulgarian laboratories for physical technologies.