



# ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

## Факултет „Машиностроене и уредостроене ”

маг. инж. Христо Христов Якимов

### ОБРАБОТВАНЕ НА ЗЪБНИ ПРОФИЛИ ВЪРХУ МАШИНИ С ЦИФРОВО ПРОГРАМНО УПРАВЛЕНИЕ

## А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1 Машинно инженерство

Докторска програма: Металорежещи машини и системи

Научни ръководители: Доц. д-р инж. Йосиф Митев Митев  
Проф. д-р инж. Ирина Стефанова  
Александрова

Рецензенти: Доц. д-р инж. Иван Маринов Амуджев  
Доц. д-р инж. Илия Георгиев Попов

Габрово, 2023 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за официална защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Машиностроителна техника и технологии“ към факултет „Машиностроене и уредостроене“ на Технически университет – Габрово, проведен на 19.04.2023 г.

Дисертационният труд съдържа 171 страници. Научното съдържание е представено в увод, четири глави, приложение и включва 102 фигури и 10 таблици. Цитирани са 105 литературни източника. Номерацията на фигурите, таблиците и формулите в автореферата е в съответствие с тази в дисертацията.

Разработката/изследванията на/по дисертационния труд е/са извършена/и в катедра „Машиностроителна техника и технологии“ към факултет „Машиностроене и уредостроене“ на Технически университет – Габрово и във фирма Подемкран гр. Габрово.

Официалната защита на дисертационния труд ще се състои на ..... Г.  
от ..... ч. в зала ..... на Технически университет – Габрово.

Автор: Христо Христов Якимов

Заглавие: ОБРАБОТВАНЕ НА ЗЪБНИ ПРОФИЛИ ВЪРХУ МАШИНИ С ЦИФРОВО  
ПРОГРАМНО УПРАВЛЕНИЕ

Тираж: ..... бр.

Място на отпечатване:

## СПИСЪК С ИЗПОЛЗВАНИ СЪКРАЩЕНИЯ

$d_a$  – върхова окръжност  
 $d_f$  – петова окръжност  
 $d_i$  – гранична окръжност  
 $m$  – модул  
 $E_i$  – еволвента  
 $Z$  – брой зъби  
 $\omega_1$  – ротация на инструмента  
 $\omega_2$  – ротация на заготовката  
 $V_c$  – скорост на рязане  
 $r_t$  – радиус на инструмента  
 $\beta_1$  – ъгъл на наклона на зъбите на детайла  
 $\beta_i$  – ъгъл на наклона на зъбите на инструмента  
 $\alpha_o$  – главен заден ъгъл  
 $\alpha_f$  – страничен заден ъгъл  
 $\gamma_o$  – главен преден ъгъл  
 $x_n$  – корекционни коефициенти  
 $i_{12}$  – предавателно отношение между инструмента и заготовката  
 $\sigma_0$  – половината от ъгловата дебелина на зъб в основната окръжност  
 $\varphi_2$  – ъгъл на завъртане на детайла  
 $\Delta\beta_d$  – хеликоидалния ъгъл на цилиндричната окръжност на зъбоструговия инструмент  
 $\Delta\beta_u$  – страничен преден ъгъл на инструмента  
 $f_{HA}$  – стойност на отклонението на ъгъла на профила на съответния зъб;  
 $f_{HB}$  – отклонение на ъгъла на направлението на съответния зъб;  
 $f_A$  – отклонението на профила;  
 $f_B$  – направлението на съответния зъб;  
 $ff_A$  – отклонение от формата на профила;  
 $ff_B$  – направлението на съответния зъб;  
 $D$  – степен на точност.  
 $F_p$  – Стойност на натрупаната грешка на стъпката;  
 $F_u$  – Стойност на най-голямата разлика в стъпката между два съседни зъба;  
 $F_p$  – Стойност на най-голямата разлика в стъпката между два не съседни зъба;  
 $f_p$  – Стойност на единичната грешка на стъпката;  
 $F_r$  – Стойност на грешката на радиално биене

## **ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

### **Актуалност на проблема**

Тенденции в съвременното машиностроително производство са увеличаване на честотата на смяна на произвежданите изделия и намаляване на времето за пренастройване на производствената техника. Към днешна дата решенията на тази задача са главно чрез използване на различни технологични машини, промишлени роботи, контролно-измервателни уреди и спомагателни съоръжения, имащи обща структурна характеристика – висока гъвкавост, реализирана чрез система за цифрово програмно управление.

Обработването на зъбни профили – еволвентни, нееволвентни, шлицеви и др., все още е трудоемка задача, свързана със специализиран машинен парк с ниска гъвкавост и високи разходи. Конвенционалните зъбообработващи машини покриват стандартите за качество на зъбните колела, тяхната точност и изискуеми параметри, но невъзможността за концентрация на операциите и големите времена за обработване са предизвикателство, преодоляването на което ще разкрие хоризонт за автоматизация и оптимизация и ще намали себестойността на детайлите, включващи зъбни профили. Развитието и навлизането в производството на стругови обработващи центри с цифрово програмно управление поставя задачата да се търсят методи и средства за обработването и на зъбни профили върху тези машини. Приложението на традиционните методи, като зъбофрезование и зъбодълбане, не е достатъчно ефективно или те са неприложими в повечето случаи.

Настоящият дисертационен труд е посветен на технологични задачи, свързани с приложението на метода зъбоструговане при обработване на зъбни профили върху струго-фрезови машини с цифрово програмно управление. Разгледани са въпроси, свързани с програмирането на оборудването, профилирането на инструментите, избор на технологични режими и оптимизация на качествени параметри при приложението на метода.

Възможността с един инструмент с определен модул да се нарязват както вътрешни, така и външни зъби, зъби с различен ъгъл на наклон, леви и десни, прави зъбоструговането особено перспективен и актуален метод, отговарящ на всички изисквания в машиностроенето.

### **Цел и задачи на дисертационния труд**

На основата на теоретико-експериментални методи да се оценят технологичните възможности на процеса зъбоструговане с оглед разкриване на възможности за приложението му върху струго-фрезови обработващи центри и оптимизиране на условията за неговата реализация.

В настоящото изследване са решени следните основни задачи:

- Анализ на технологичните възможности на методите и оборудването за обработване на зъбни профили с оглед на параметрите производителност, точност и възможност за концентрация на операциите;
- Теоретично изследване на технологичните основи на процеса зъбоструговане с оглед на приложението му върху струго-фрезови обработващи центри;
- Създаване на методика за профилиране на зъбостругови инструменти;
- Анализ на програмните възможности за реализиране на метода и съставяне на управляващи програми;
- Комплектуване на оборудване и реализиране на експериментални изследвания на процеса зъбоструговане върху струго-фрезови обработващ център;
- Моделиране на качествените параметри на процеса зъбоструговане и определяне на оптимални условия за неговата реализация.

### **Методи на изследване**

Представените в работата изследвания са осъществени със съвременни и адекватни за решаване на поставените задачи методи и технически средства. Приложени са методи за моделиране, статистическа обработка и анализ на експерименталните резултати, планиране на експериментите и оптимизиране посредством специализиран софтуер.

### **Научна новост**

Обосновано е реализирането на процеса зъбоструговане при нарязване на наклонени зъби, при който подаването е по направление на зъба и не се налага корекция в ъгловата скорост. Доказана е неговата работоспособност.

Построени са адекватни теоретико-експериментални модели за отклонението от профила на зъба, отклонението в направлението на зъба, натрупаната грешка на стъпката, най-голямата разлика в стъпката и грешката от радиално биене, отразяващи влиянието на ъгълът на кръстосване и подавателната скорост. Определени са оптимални условия за реализация на метода зъбоструговане чрез многоцелева оптимизация.

### **Приложимост**

Разработен е метод за графично профилиране, основаващ се на възможностите на CAD/CAE софтуер, позволяващ построяване на зъбни профили, необходими при профилирането на зъбообработващи инструменти.

Разработена е управляваща програма за реализация на метода зъбоструговане на база на функцията "Електронна предавка".

Разширени са технологичните възможности на клас машини с ЦПУ, които се внедряват интензивно в съвременното производство, чрез прилагане на метода зъбоструговане.

### **Апробация на дисертационния труд**

Дисертационната работа е докладвана и обсъждана на разширено заседание на катедра "Машиностроителна техника и технологии" при ТУ–Габрово.

Етапи от дисертационната работа са обсъждани и публикувани в:

- Национална конференция по машиностроене и машинознание, гр. Варна, 2017 г., 2021 г. и 2022 г.;
- Научна конференция TechCo – Lovech 2018 г.;

### **Структура и обем на дисертационния труд**

Дисертационният труд съдържа 4 глави, приети означения и съкращения, класификация на приносите, списък на публикациите по дисертацията, използвана литература и съдържание, в обем от 171 страници, в който са поместени текст, формули, 102 фигури и 10 таблици.

# СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

## ГЛАВА ПЪРВА

### АНАЛИЗ И ПРОБЛЕМАТИКА ПРИ ОБРАБОТВАНЕ НА ЗЪБНИ КОЛЕЛА В СЪВРЕМЕННОТО МАШИНОСТРОЕНЕ

Зъбните профили се формират от периодично повтарящи се сложни повърхнини и налагат приложението на специални методи или инструменти за изработването им, което е довело до развитието на отделен клас специализирани машини и инструменти. Необходимостта от концентрация на операциите налага търсенето на възможности за интегриране на тези методи към съвременните машини, тип обработващ център.

Зъбостругването, като метод, е дефинирано още през миналия век, но проложимостта му се забавя от трудности при интеграцията му върху конвенционални зъбообработващи машини. Те са главно кинематични поради дългите вериги, внасящи грешка при обработването.

Към настоящия момент, високата степен на интеграция на металорежещи машини с цифрово програмно управление с широк спектър на технологични възможности създава условия за решаване на проблемите при зъбостругването, като се разкриват технологични възможности за обработка на различни видове профили както зъбни, така и шлицови, храпови и др., с висока степен на точност и производителност.

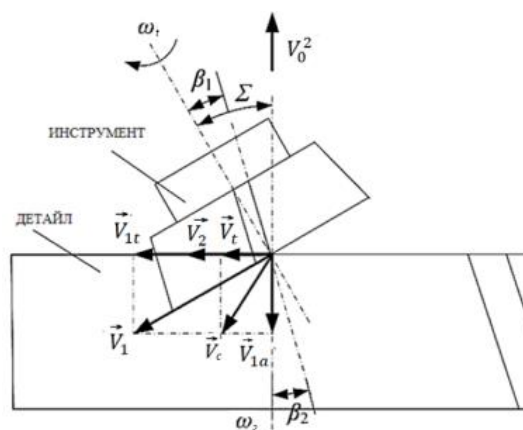
Проведени са голям брой изследвания, насочени към кинематиката на процеса и особеностите на стружкообразуването. Създадени са теоретични методи за профилиране на зъбостругови инструменти. Технологичните основи на приложението на метода не са разработени в достатъчна степен, като много от параметрите на процеса не са достатъчно изследвани. Високата гъвкавост, съчетаването на предимствата на зъбодълбането с производителността на зъбофрезването, премахването на преустановяването и на съпътстващите грешки при обработка на детайла позволяват решаването на редица проблеми в машиностроенето и правят метода основно перспективно решение при зъбообработване.

## ГЛАВА ВТОРА

### ТЕХНОЛОГИЧНИ ОСНОВИ НА МЕТОДА ЗЪБОСТРУГОВАНЕ

Нарязването на зъбни колела чрез зъбостругване се основава на метода центроидно обхождане, реализиран посредством зацепване на двойка зъбни колела с кръстосани оси. При този метод (фиг. 2.1) детайлът и инструментът извършват строго синхронизирани въртеливи движения със скорости  $\omega_t$  и  $\omega_2$ . В резултат на кръстосването на осите на инструмента и обработвания детайл под ъгъл  $\Sigma$  е налице относително плъзгане между профилите на зъбите на инструмента и детайла, което е главното движение за процеса. Подавателното движение се извършва обикновено от инструмента по оста на ротация на заготовката.

Периферната скорост на инструмента  $\vec{V}_1$  може да бъде представена в координатната система на детайла като сума от векторите  $\vec{V}_{1a}$  и  $\vec{V}_{1t}$ , съответно – аксиална и тангенциална компонента. В точката на контакт между двата профила (зоната за рязане) периферната скорост на детайла  $\vec{V}_2$  и тангенциалната компонента  $\vec{V}_{1t}$  се



Фиг. 2.1. Кинематична схема на процеса зъбостругване

различават със скоростта на плъзгане в тангенциално направление  $\vec{V}_t$ . Сумата на векторите на тези скоростите  $\vec{V}_t$  и  $\vec{V}_{1a}$  е векторът на скоростта на рязане  $\vec{V}_C$ , съвпадащ със скоростта на относителното плъзгане.

Процесът предполага използването на инструменти с наклонени зъби, като в този случай могат да се обработват зъбни колела с прави или наклонени зъби. Възможно е и използването на инструменти с прави зъби, но в този случай отпада възможността да се обработват зъбни колела с прави зъби.

### 2.1. Скорост на рязане при зъбоструговане

Стойността на скоростта на рязане  $V_C$  е от съществено технологично значение, тъй като тя определя трайността на инструмента и е в зависимост от физико-химичните свойства на обработвания материал. Скоростта се определя от множество фактори, като част от тях са технологични, а друга част – конструктивни. Конструктивните фактори са известни, докато за технологичните има много малко информация.

Стойността на скоростта на рязане  $V_C$  се пресмята по зависимостта:

$$V_C = \omega_t \cdot r_t \cdot \sin \Sigma \text{ [m/min]}, \quad (1)$$

където:  $\omega_t$  [rad.s<sup>-1</sup>] - ъглова скорост на инструмента;

$\Sigma$  [deg]- ъгъл на кръстосване;

$r_t$  [mm] - радиус на инструмента;

$z_t$  – брой зъби на инструмента;

$m_n$  [mm] - нормален модул на зъбите.

При нарязване на зъбни колела с наклонени зъби осовото подаване със скорост  $V_O$  обикновено е по оста на нарязваното колело (ос Z). Ъгловите скорости на инструмента и детайла, разположени под ъгъл, равен на наклона на зъбите на инструмента, са съответно  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Поради влиянието на осовото подаване точката на контакт се премества и действителната ъглова скорост на зъбоструговия инструмент  $\omega_t$  трябва да бъде коригирана. Необходимата корекция на относителната ъглова скорост на инструмента  $\Delta\omega_t$  се определя от:

$$\Delta\omega_t = \frac{2V_O \sin \beta_1}{m_n z_d} \quad (3)$$

където:  $z_d$  - брой зъби на детайла;

$\beta_1$  - ъгъл на наклона на зъбите на инструмента.

Ъгловите скорости на детайла и инструмента трябва да удовлетворяват следното условие:

$$\omega_t = \frac{z_t \omega_2}{z_d} + \frac{2V_O \sin \beta_1}{m_n z_d} \quad (4)$$

При реализация на процеса върху 5-осна стругова машина има възможност подавателното движение да не е по ос Z, а по действителното направление на зъба. В този случай корекция в скоростта  $\omega_t$  не е необходима. Друго предимство в случая е, че условията за работа на левия и десния профил на инструмента са еднакви.

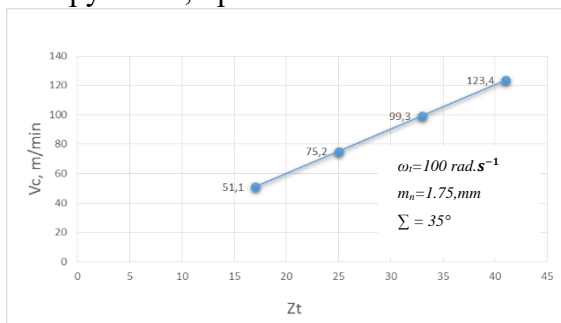
### 2.2. Фактори, определящи скоростта на рязане при зъбоструговане

Качеството и производителността зависят от скоростта на рязане. Необходимо е изследване на зависимостта на скоростта на рязане от влияещите фактори с цел обосновка на избор на нива при технологични изчисления. От зависимости (1) и (3) се вижда, че влияещите фактори могат да се групират като конструктивни (модул, ъгъл на наклона на зъбите и брой зъби на нарязваното зъбно колело) и технологични (брой зъби на инструмента, ъглова скорост на инструмента, ъгъл на кръстосване и подавателна скорост). Изследването се извършва графично чрез построяване на зависимостите:  $V_C=f(\omega_t)$ ;  $V_C=f(z_t)$ ;  $V_C=f(m_n)$  и  $V_C=f(\Sigma)$ . Диапазонът на изменение на факторите е избран в съответствие с най-често срещаните случаи в практиката при обработване на средно големи детайли. Броят на зъбите на инструмента е избран в границите от 17 до

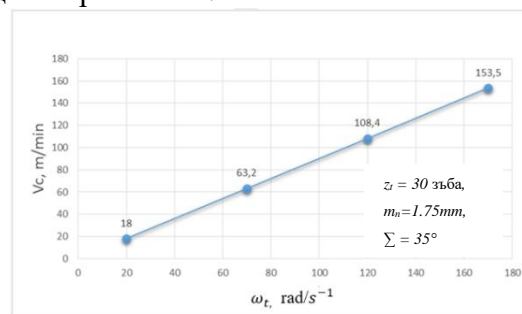
41 зъба, модулът – от 1 до 2,5 mm, ъгълът на кръстосване на осите - от 25° до 40°, а ъгловата скорост - от 20 до 170  $rad.s^{-1}$ .

За определяне на влиянието на броя на зъбите на инструмента върху скоростта на рязане е построена зависимостта  $V_c=f(z_t)$  в диапазона на  $z_t$  от 17 до 41 зъба през 8 зъба, като останалите фактори са в средно ниво. Получената зависимост (фиг. 2.2.) е линейна, като скоростта на рязане се изменя в диапазона от 50 до 120 m/min. Тези стойности са относително високи и съответстват на използването на металокерамични инструменти.

За установяване на влиянието на ъгловата скорост  $\omega_t$  върху скоростта на рязане е построена, аналогично на горната зависимост, функцията  $V_c=f(\omega_t)$  при диапазон на изменение на  $\omega_t$  от 20 до 170  $rad.s^{-1}$  през 50  $rad.s^{-1}$ , като останалите фактори се намират в средно ниво, съответно:  $z_t = 30$  зъба;  $m_n = 1,75$  mm,  $\Sigma = 35^\circ$ . Скоростта на рязане (фиг. 2.3.) тук се изменя в по-широк диапазон от 20 до 153 m/min. Тези стойности също са относително високи и изискват използването на металокерамични инструменти, приложението на които все още е ограничено.

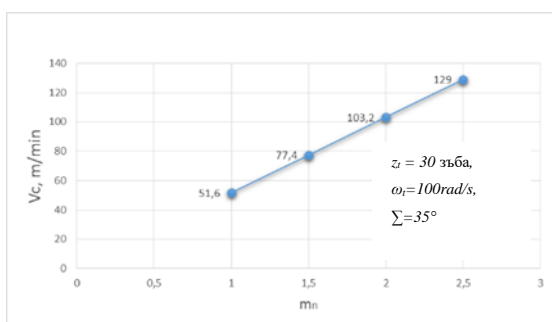


Фиг. 2.2. Зависимост на скоростта на рязане от броя на зъбите на инструмента  $V_c=f(Z_t)$

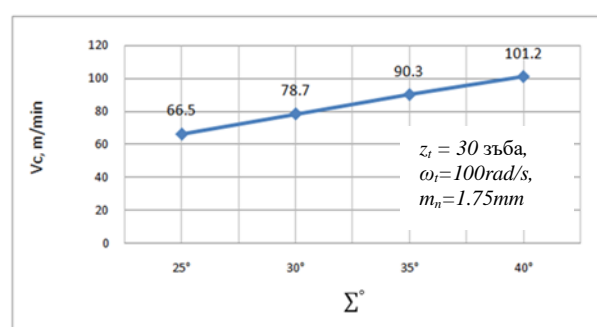


Фиг. 2.3. Зависимост на скоростта на рязане от ъгловата скорост на инструмента  $V_c=f(\omega_t)$

Модулът на зъбите е конструктивен фактор и не подлежи на технологичен избор, но оказва влияние върху скоростта на рязане. Неговото влияние се представя със зависимостта  $V_c=f(m_n)$ . Зависимостта (фиг. 2.4) е построена аналогично на предходните две, като е подбран диапазон за изменение на модула от 1 mm до 2,5 mm през 0,5 mm. Останалите фактори се намират в средно ниво, съответно:  $\omega_t=100$  rad/s,  $z_t=30$ ,  $\Sigma=35^\circ$ . Скоростта на рязане се изменя в диапазона от 50 до 130 m/min.



Фиг. 2.4. Зависимост на скоростта на рязане от модула  $V_c=f(m_n)$



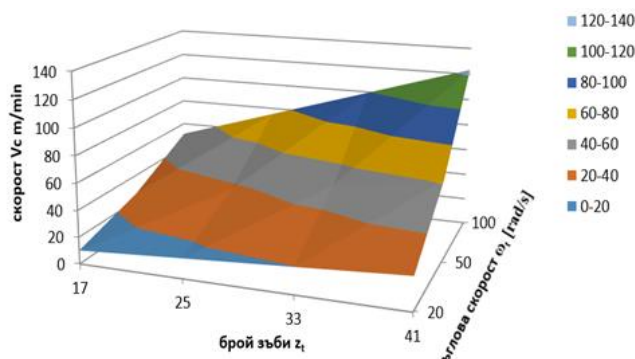
Фиг. 2.5. Зависимост на скоростта на рязане от ъгъла на кръстосване  $V_c=f(\Sigma)$

Ъгълът на кръстосване на осите на инструмента и обработвания детайл  $\Sigma$  се определя като сума от ъглите на наклон на зъбите на инструмента и детайла. Може да се разглежда като фактор с конструктивен и технологичен характер, тъй като може да бъде избран инструмент с определен наклон на зъбите. Влиянието му върху скоростта на рязане  $V_c=f(\Sigma)$  е изследвано аналогично на предходните зависимости в диапазона за изменение на  $\Sigma$  от 25° до 40° през 5°, като останалите фактори са в средно ниво,

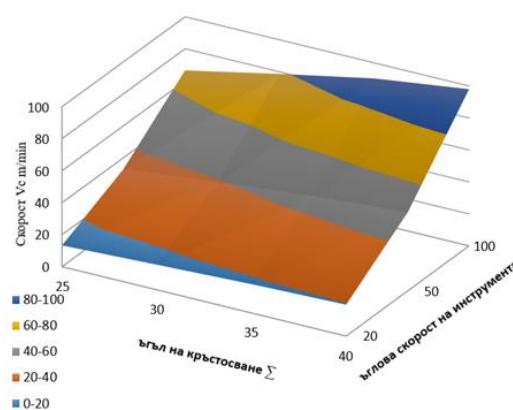


съответно:  $\omega_t = 100 \text{ rad/s}$ ,  $z_t=30$ ,  $m_n=1.75 \text{ mm}$ . Получената графична зависимост (фиг. 2.5) е линейна, като скоростта на рязане се изменя в диапазона от 66 до 101 m/min. Получените стойности при така избраните фактори също са относително високи и изискват използването на металокерамични инструменти. В случая чрез промяна на стойностите на факторите може да се получи диапазон на скоростта на рязане съответстващ на инструменти от бързорежещи стомани.

За по-добра визуализация и оценка на зависимостта на скоростта на рязане от ъгловата скорост и броя на зъбите на инструмента е удачно представянето на функцията  $V_c=f(\omega_t; z_t)$ , като останалите два фактора – модул на зъбите и ъгъл на кръстосване на осите, са в средно ниво, съответно:  $m_n=1,75 \text{ mm}$  и  $\Sigma=35^\circ$ .



Фиг. 2.6. Зависимост на скоростта на рязане от ъгловата скорост и броя зъби на инструмента  $V_c=f(\omega_t; z_t)$



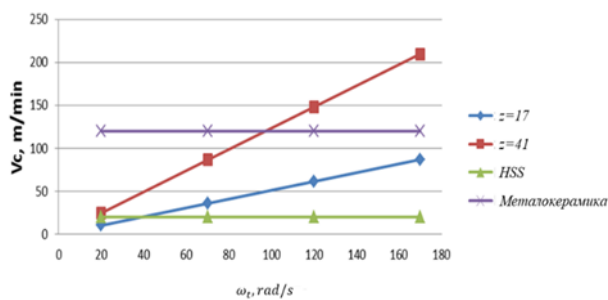
Фиг. 2.8. Зависимост на скоростта на рязане от ъгловата скорост и ъгъла на кръстосване  $V_c=f(\omega_t; \Sigma)$

Функцията  $V_c=f(\omega_t; z_t)$  описва наклонена равнина (фиг. 2.6), даваща връзката между скоростта на рязане, ъгловата скорост и броя зъби на инструмента. Чрез построяване на сечения при определена скорост на рязане може да се формират зони за избор на параметрите брой зъби на инструмента и скорост на ротация на инструмента.

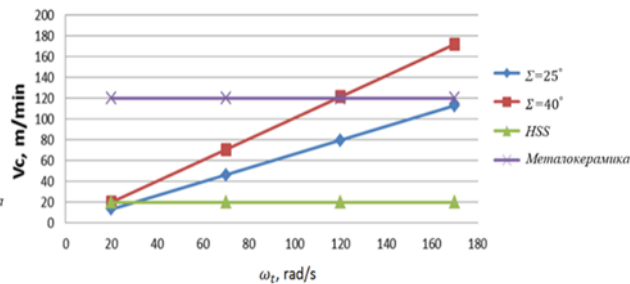
Аналогично са построени и останалите зависимости:  $V_c=f(\omega_t; \Sigma)$  (фиг. 2.8);  $V_c=f(\omega_t; m_n)$ . Те съвместно с показаната по-горе зависимост  $V_c=f(\omega_t; z_t)$ , позволяват обоснован избор на инструмент при проектиране на технологичен процес за зъбоструговане.

Тъй като повечето фактори, с изключение на  $\omega_t$ , са и конструктивни параметри на инструмента, те не са достъпни за оперативно управление. Корекция на скоростта на рязане единствено може да бъде направена чрез технологичния параметър  $\omega_t$ , тъй като единствено той е достъпен за избор и регулиране при осъществяването на технологичния процес. За тази цел са построени номограми, отчитащи и материала на инструмента. Зависимостите  $V_c=f(\omega_t; z_t)$ ,  $V_c=f(\omega_t; m_n)$  и  $V_c=f(\omega_t; \Sigma)$  са построени в диапазон от стойности на  $\omega_t$  от 20 до 170  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ . (190 до 1630  $\text{min}^{-1}$ ), като в същата координатна система са построени и две граници, съответстващи на приетите скорости на рязане за обработка на най-често срещаните материали:  $V_c=20 \text{ m/min}$  - за инструменти от бързорежещи стомани;  $V_c=120 \text{ m/min}$  - за металокерамични инструменти.

Номограмата на фиг. 2.10 отчита броя зъби и материала на зъбоструговия инструмент при определяне на скоростта на рязане. Построени са границите, определени от условно избраните максимален и минимален брой зъби на инструмента, съответно  $z=41$  и  $z=17$ . Построяването е направено при стойности на модула  $m_n=1.75 \text{ mm}$  и ъгъл на кръстосване  $\Sigma=30^\circ$ .



Фиг. 2.10. Диаграма за избор на скоростта на рязане в зависимост от броя на зъбите на зъбоструговия инструмент



Фиг. 2.12. Диаграма за избор на скоростта на рязане в зависимост от ъгъла на кръстосване

Вижда се, че трудно може да се осигурят условия за използване на инструменти от бързорежеща стомана. Зоната им за приложение е много малка - левият долен ъгъл на номограмата. За инструментите от металокекерамика зоната е много по-голяма и ограниченията при избора на параметрите им са много по-малки.

Влиянието на модула върху скоростта на рязане е построено аналогично на предходната номограма. Номограмата на фиг. 2.12 отчита влиянието на ъгъла на кръстосване на оста на инструмента спрямо заготовката върху скоростта на рязане. Тя е построена при ъгли на кръстосване  $\Sigma = 25^\circ$  и  $\Sigma = 40^\circ$ ; стойности на модула  $m_n = 1,75 \text{ mm}$  и брой на зъбите на инструмента 27.

Характерно и за трите номограми е, че зоната за използване на бързорежещи инструменти е малка. Приложението на такива инструменти ограничава производителността на метода в известна степен, което се компенсира от по-ниските разходи за инструмент. Чрез подбор на параметрите на инструмента – брой и наклон на зъбите, е възможно оптимизиране на скоростта на обработка. При проектирането на зъбостругови инструменти с модул по-голям от 1,5 - 2 mm и брой зъби над 20 е желателно използването на металокекерамика.

### 2.3. Подавателна скорост

Аналогично на конвенционалните методи за обработване чрез стружкоотнемане и тук подаването осигурява непрекъснатост на процеса. Скоростта  $V_0$ , с която се осъществява относителното осово движение на инструмента спрямо детайла, формира дебелината на срязвания слой материал. Така тя определя и силите на рязане. Широчината на срязвания слой материал се определя от модула на зъбите и броя едновременно режещи зъби. Следователно силите на рязане ще нарастват при увеличаване на броя на зъбите на обработваното зъбно колело и ще бъдат най-големи при зъбостругване на вътрешни зъби.

Скоростта  $V_0$  се определя по известната зависимост:

$$V_0 = 60 \cdot n_t \cdot z_t \cdot s_{ot} \quad [\text{mm/min}] \quad (5)$$

където:  $n_t$  - честота на въртене на инструмента;  $z_t$  - брой на зъбите на инструмента;  $s_{ot}$  - подаване на зъб.

Направените изчисления, съгласно представените по-горе номограми и при подаване на зъб  $s_{ot} = 0,03 \text{ mm/зъб}$ , показват, че скоростта  $V_0$  има стойности, надвишаващи  $500 \text{ mm/min}$ , като тя остава значително по-ниска от скоростта на рязане  $V_c$  и не трябва да се очаква значима кинематична промяна в страничните задни ъгли.

## ГЛАВА ТРЕТА ПРОФИЛИРАНЕ НА ЗЪБОСТРУГОВ ИНСТРУМЕНТ

Задача на настоящата глава е да се проектира монолитен зъбостругов инструмент, като основно акцентът е върху профилирането на работните повърхнини на инструмента. Условието на работа се осигуряват чрез подбор на подходящи стойности на ъглите на инструмента по класическите методи.

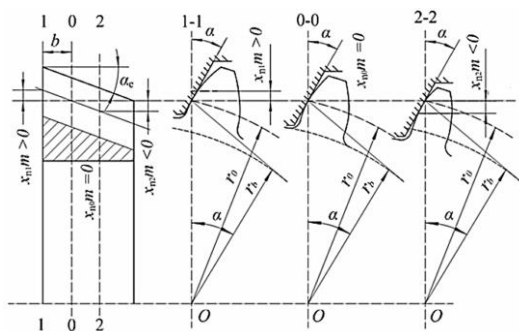
Принципът на работа на зъбните предавки се представя от взаимното обтъркаване на спрегнати зъбни профили. Следователно отделните профили на зъбоструговия инструмент могат да се проектират като съответстващи по профил на спрегнатия зъбен профил. Съществуват множество разработени аналитични и графични методи за проектиране на работните еволвентни профили на зъбообработващи инструменти. Те са ориентирани към най-разпространените зъбни еволвентни предавки, като генерират само работната част на профила, а останалата част се оформя конструктивно. В съвременното машиностроене навлизат предавки с модифицирани и различни от еволвентни зацепвания, както и различни профилни съединения, които не са обект на съществуващите методи. Решението е използването на възможностите на съвременните CAD системи за моделиране, като за целта е необходимо да се разработи универсална методика, обединяваща предимствата на аналитичното и графичното проектиране с възможностите за симулиране на работата на проектирания инструмент.

Съществено значение за точността на повърхнините, получени по метода на зъбоструговане, са грешките от конструиране и изработване на инструмента. Те се наследяват пряко от обработените повърхнини, най-често зъбни профили, като влияят съществено върху точността. От това следва, че точността на метода зъбоструговане зависи главно от точността на конструирувания инструмент, тъй като кинематичната точност на машините, върху които се реализира процесът, е значително по-висока. Най-често зъбоструговането се извършва с инструмент, много близък до конвенционално зъбодълбачно колело за обработване на цилиндрични зъбни колела с наклонени зъби. Известно е, че тези инструменти се характеризират с висока точност при работа, с дълготрайност и възможност за получаване на коригирани профили. Въпреки това, при обработване на зъбни колела с прави зъби с голяма широчина на зъбите е възможно да се получи интерференция в междузъбието към отдалечения край на зъба на инструмента. При монолитна конструкция на зъбоструговите инструменти за обработване на зъбни колела, без възможност за смяна на режещата част при износване или дефектиране, коректно е те да бъдат презаточвани по предната повърхнина и по главната задна повърхнина. В повечето случаи това затруднява и оскъпява прилагането на процеса. Проектирането включва осигуряване на условия за работа (рязане) на инструмента и за получаване на профила на повърхнината. Условието за рязане изискват осигуряване на подходяща геометрия на инструмента.

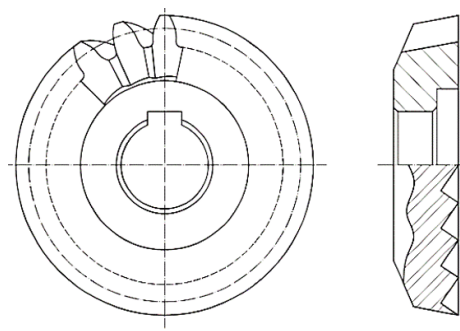
### 3.1. Осигуряване на условия за рязане

#### 3.1.1. Геометрия на инструмента

При монолитните инструменти е необходимо да се осигурят условия за възстановяване на работоспособността чрез презаточване. За да може да се презаточи инструментът след износване и да се удължи неговият живот, новият зъбостругов инструмент се конструира с положителен корекционен коефициент. От една страна, корекционният коефициент, приложен към зъбите на зъбоструговите инструменти, допринася за универсалността им. От друга страна, главният заден ъгъл  $\alpha_0$  и страничният заден ъгъл  $\alpha_f$  намаляват дебелината на зъба от върха към края по посока на винтовата линия, поради което инструментът прилича на винтов зъбодълбачен инструмент.



Фиг. 3.1. Профил на инструмента в различните сечения



Фиг. 3.2. Зъбостругов инструмент (а) с отделно заточване на всеки зъб по предната повърхнина

Както е показано на фиг. 3.1, инструментът е еквивалентен на винтово конусно зъбно колело поради голямата и променяща се корекция. Корекционните коефициенти  $X_{n0}$ ,  $X_{n1}$  и  $X_{n2}$  са различни в различните сечения – колкото по-далеч са те от предната повърхнина, толкова стойностите на коефициентите са по-малки. В някои случаи се приема нулево сечение в средата на сечението на зъба.

При кинематична възможност главният заден ъгъл  $\alpha_o$  и страничният заден ъгъл  $\alpha_f$  могат да се осигурят чрез допълнително кръстосване на осите на инструмента и детайла под ъгъл  $\alpha_k$ . В този случай страничните задни ъгли  $\alpha_f$  се осигуряват за сметка на дебелината на зъба в различните сечения.

### 3.1.2. Геометрия на предната повърхнина на инструмента

Предната повърхнина на инструмента е определяща за процеса. Нейната геометрия осигурява правилна форма на режещите ръбове, отвеждане на стружките и намаляване на силите при рязане. Инструментът трябва да се заточва и презаточва по предната повърхнина, което трябва да се предвиди в технологията за изработването му.

При традиционната конструкция предната повърхнина на инструмента съвпада с челото му. Въпреки че презаточването по предната повърхнина на инструмента е лесно, задните ъгли не са еднакви, което от своя страна може да доведе до неравномерно разпределение на натоварването по време на процеса зъбоструговане, а оттам и до ниска производителност.

В сравнение с конвенционалния зъбостругов инструмент, модифицираният инструмент (фиг. 3.2) е конструиран така, че предната повърхнина на инструмента е перпендикулярна на винтовата линия, по която са ориентирани зъбите. Следователно зъбите на новия инструмент са проектирани наклонени, така че предната повърхнина съвпада с нормалната равнина под ъгъл на наклон на винтовата линия  $\beta_o$  (фиг. 3.3). Така заточеният инструмент позволява еднакви задни ъгли и на двете странични задни повърхнини и не позволява интерференция между предната повърхнина на зъбоструговия инструмент и повърхнината на зъба на нарязаното колело.

$\alpha_o$  – главен заден ъгъл

$\beta_o$  – ъгъл на наклона на зъба

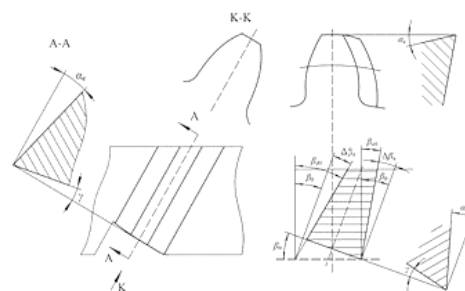
$\beta_{do}$  – работен ъгъл от дясната страна на профила

$\Delta\beta_d$  – ъгъл на наклона от дясната страна на профила

$\Delta\beta_u$  – ъгъл на наклона от лявата страна на профила

$\beta_{uo}$  – работен ъгъл от лявата страна на профила

$\gamma_o$  – преден ъгъл



Фиг. 3.3 Статични и работни ъгли по предната повърхнина в нормално сечение

За да се подобрят условията на рязане на инструмента, предният ъгъл  $\gamma_0$ , под който е разположена предната повърхнина, трябва да е от  $3^\circ$  до  $5^\circ$ , като за предпочитане са малките стойности с цел минимална промяна на профила. (Фиг. 3.3).

### 3.2. Аналитично профилиране на инструмента

Според принципа на зъбните предавки, цилиндрична зъбна двойка от винтови колела се представя от спрегнати зъбни профили. Следователно отделните ножове на зъбоструговия инструмент могат да се проектират като съответстващи по профил на спрегнатия зъбен профил.

Аналитичните методи за определяне на профила на инструмента са сравнително сложни и подходящи за контрол на зъбите на инструмента. За практическо приложение са по-подходящи графичен или комбиниран аналитико-графичен метод за профилиране, даващи възможност за работа и с други профили.

### 3.3. Графично профилиране

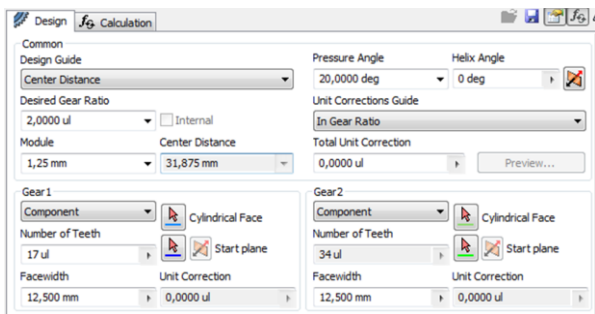
Графичното профилиране с помощта на специализиран софтуер от клас CAD/CAE позволява точно създаване на зъбни и други профили, с които да бъдат профилирани необходимите за зъбообработка инструменти. Основните предимства на CAD/CAE системите при проектиране на зъбостругов инструмент са:

- посредством CAD среди се получава точен и реален модел на необходимия зъбостругов инструмент;
- реализира се възможност за автоматизирано генериране на работния профил на зъбостругови инструменти;
- възможност за анализ на моделирания профил на инструмента за проверка на зони с наличие на подрязване в основата зъба или за подостряне към върха на зъбите чрез симулации във всяка част от работния процес;
- възможности за цялостен анализ на работните повърхнини, в това число и по преходни участъци, за определяне на контактното петно по коефициента на препокриване.

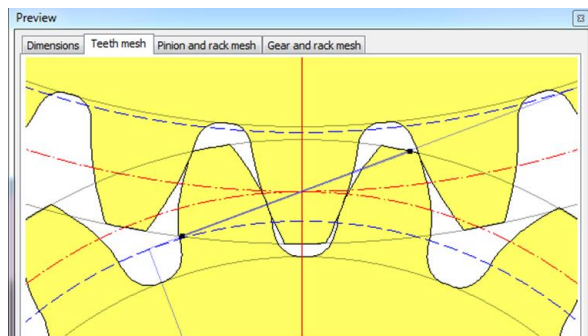
Процесът на графичното профилиране преминава през няколко етапа, в които посредством CAD/CAE системата се решават специфични задачи, свързани с профилирането на зъбоструговия инструмент. Тези етапи обхващат: генериране на зъбен или друг вид профил на детайла; дефиниране на профил на зъб (или междузъбие) от обработвания детайл; създаване на скрипт файл; симулиране на зацепване с отнемане на материал; дефиниране на профил на зъб или междузъбие на инструмента; коригиране на профила; създаване на 3D модел на инструмента и разработване на документация.

#### 3.3.1. Етап първи - генериране на профил на детайла

В първия етап от графичното профилиране на зъбостругов инструмент е необходимо да се построи профилът по зъба на детайла. Ако той е праволинеен (правостенни шлицы, храпов или друг профил), ще бъде начертан съгласно геометричните изисквания. Ако е еволвентен или друг криволинеен профил, той може да се генерира посредством CAE модула за конструктивно проектиране в конкретната CAD среда. Генерирането на спрегнатата зъбна двойка посредством възможностите на генератора в CAD среда на Inventor на Autodesk е представено на фиг. 3.7. При генерирането от първостепенна важност е да се задават коректно геометричните параметри на зъбната двойка, тъй като от зъбното колело, което ще бъде генерирано, следва да се откопира профил на междузъбието за последващо профилиране на зъбоструговия инструмент.



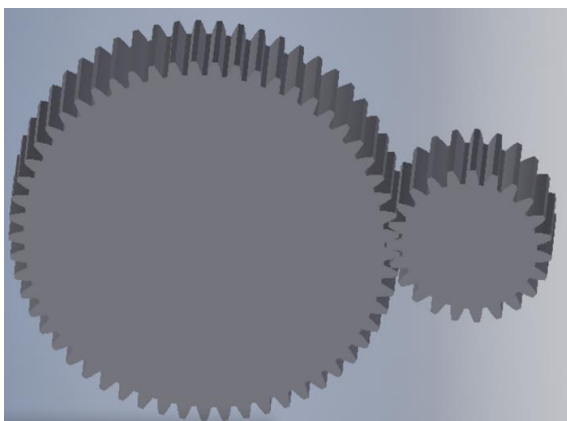
Фиг. 3.7. Задаване на геометрични параметри на зъбна предавка



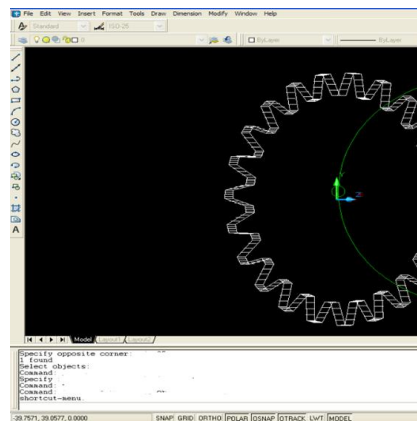
Фиг. 3.8. Симулация на спрегната зъбна двойка

След коректно задаване на параметрите и изчисляване се получава възможност в режим „Preview“ да се провери визуално профильт за подрязване, подостряне и други отклонения (фиг. 3.8). След проверка на профила и сравняване на изчислените параметри със зададените може да се визуализира моделът на предавката (фиг. 3.9).

Следващ етап от графичното профилиране след генерирането и визуализацията за зъбната двойка (фиг. 3.9) е отделянето на зъбното колело, което предстои да бъде изработено, и получаване на копие на профила (фиг. 3.10).



Фиг. 3.9. Визуализация на генерираната зъбна двойка



Фиг. 3.10. Зъбен профил на детайла

### 3.3.2. Етап втори – дефиниране на профил на зъб или междузъбие от обработвания детайл

В този етап се копира необходимият профил и се преминава към подготовката за създаване на профил на инструмента. Така отделеният профил на междузъбие или зъб се разполага по периферията на създадена окръжност с диаметър, равен на диаметъра на зъбното колело, което ще бъде обработено. Профилното междузъбие се копира върху окръжност с диаметър равен на зъбното колело. За да се създаде режещ профил, така построеният профил се екструдира с минимална дебелина, примерно 0,1 mm.

Подготовката на инструмента включва създаване на диск с минимална дебелина и диаметър, равен на диаметъра на второто зъбно колело. След генерирането на зъбната двойка двата диска се допират, като строго се спазва междуцентровото разстояние, тъй като, ако не бъде определено коректно, в процеса на обтъркаване би се получила и натрупала грешка.

### 3.3.3. Етап трети – създаване на скрипт файл

Профилирането на збоструговия инструмент се заключава в обтъркаването без приплъзване и откопирване на профила на междузъбията на първото колело чрез изрязване на част от материала от второто и получаване на профила на зъбите на



инструмента. За целта се създава SCRIPT файл, в който се посочват параметрите на ротация, изрязване и копиране на профила на междузъбието.

При написване на скрипт файл се използват текстови редактори, като най-често това са: Notepad; Edit; PE2 и др.

След създаване на скрипт файла, той трябва да бъде форматиран със съответното разширение. Разширението позволява на софтуерния продукт от клас AutoCAD да „отвори“ и да разчете информацията от скрипт файла. Разширението, използвано в AutoCAD за скриптове е, .SCR. Важен етап в създаването на конкретния скрипт е точното дефиниране на двата елемента. Така се създава условие за копиране, изрязване и последващо поставяне на зъбния профил. Ако дефиницията не е коректна, нежеланите последствия биха се изразили в: грешка в копирането на едното или на двете колела; некоректно поставяне на зъбното колело в новото завъртяно положение.

В конкретния скрипт файл обтъркаването без преплъзване се осъществява чрез последователна ротация на двата елемента. Ротацията е въведена посредством числена стойност, еквивалентна на точен градус на завъртане. Това създава условия за прецизиране на ротацията, което от своя страна намалява зоните на подрязване и подобрява точността на профила.

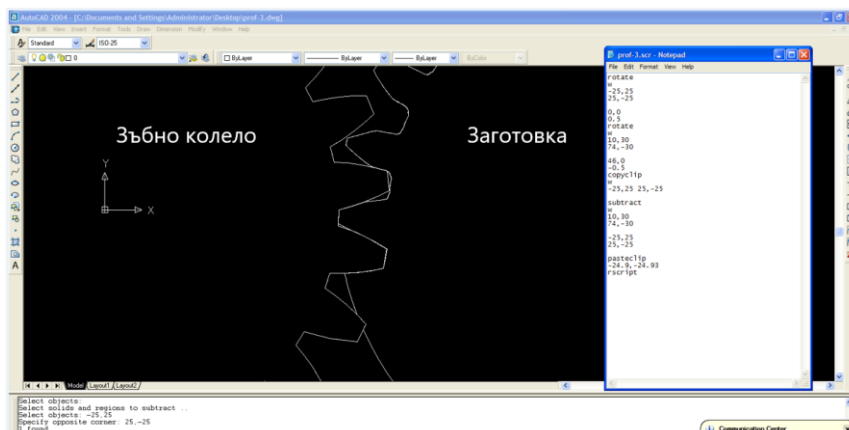
### 3.3.4. Етап четири – симулиране на зацепване с отнемане на материал

Това е основният етап, като подготовката за него включва създаване на изрязващ профил на база генериран зъбен профил на детайла с помощта на AutoDesk Inventor, след което е отделено едно междузъбие (или зъб) и с него е оформен зъбен сектор с цел намаляване на изчислителната работа.

Създадена е „заготовка“ диск за второто зъбно колело, върху което ще бъде генериран профилът на бъдещия зъбостругов инструмент. Важен момент е спазването на междуцентровото разстояние и на предавателното отношение, тъй като, ако не бъдат определени коректно, в процеса на обтъркаване се получава грешка, като с всеки следващ скрипт грешката ще се натрупва и ще доведе до некоректни профили, размери, зони на подрязване и др.

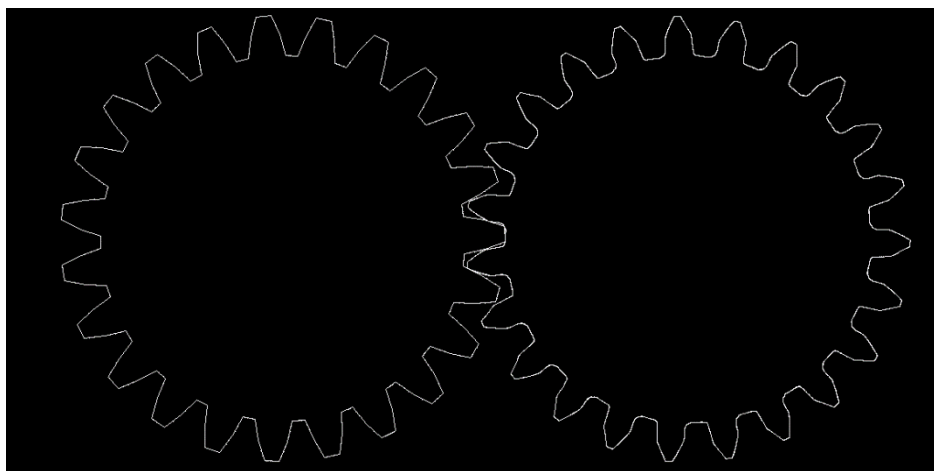
За симулиране на зацепване с отнемане на материал в създадения скрипт файл се посочват избраните параметри на ротация, изрязване и копиране на профила на междузъбието. Профилирането на зъбоструговия инструмент се заключава в обтъркаване на двата елемента и откопирване на профила на междузъбията на първото колело, изрязване на част от материала от второто и получаване на готовите зъби.

На фиг. 3.15. е показана работата на скрипт файл. Във файла са въведени: ротация на зъбно колело обратно на часовниковата стрелка, което съответства на положителна числена стойност; ротация на заготовка по часовниковата стрелка, съответстваща на отрицателна числена стойност. Въведените числени стойности на ротацията са минимални, което обуславя необходимостта от многократно повторение на скрипт файла.



Фиг. 3.15. Симулиране на зацепване с отнемане на материал

При смяна на знака на числените стойности на параметрите на ротация скриптът остава действителен, като двете колела ще сменят посоката си на ротация. Необходимостта от смяна на посоката на ротацията се провокира единствено от предпочитанията на програмиста. Наличието на зона или зони на подрязване е първият белег за наличие на грешка, провокирана от некоректно определено междуцентрово разстояние или от грешно изчислени параметри. Важно уточнение е, че визуалният анализ по време на работата на скрипт файла е първият метод за анализ на профила, който е ефективен за определяне на коректността на параметрите на зъбоструговия инструмент. На фиг. 3.18. са показани обтърналването и образуването профил на зъбоструговия инструмент.



Фиг. 3.18. Пълен профил на зъбоструговия инструмент

3.3.5. Етап пети – дефиниране на профил на зъб (или междузъбие) на инструмента и коригиране на профила

Този етап е аналогичен на втория етап, като тук се дефинира профил на зъб (или междузъбие) от инструмента, който се копира, и се преминава към създаване на 3D модел на инструмента. Така отделният профил на междузъбие (или зъб) съответства на челния профил. Той се разполага по периферията на създадена окръжност с диаметър, равен на диаметъра на инструмента, след което може да бъде размножен за съответния брой зъби на инструмента.

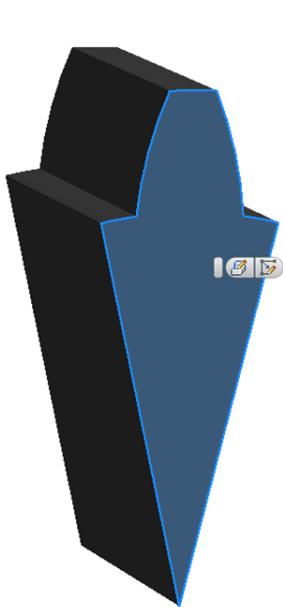
В случай че инструментът е с прави зъби, профилът може да бъде екструдирани на необходимия размер и да се пристъпи към конструктивното оформяне на 3D модела на инструмента.

При зъбостругови инструменти с наклонени под определен ъгъл зъби е необходима още една трансформация на профила, а именно преобразуване от челен в нормален профил. За тази цел е удобно да се използва функцията за графично мащабиране, като коефициентът на корекция е равен на стойността на косинус от ъгъла.

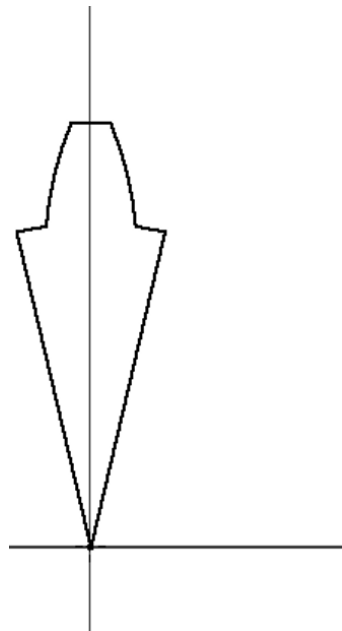
3.3.6. Етап шести – създаване на 3D модел на инструмента и разработване на документация

В случай че инструментът е с прави зъби, челният профил може да бъде екструдирани на необходимия размер (фиг. 3.19.), като при инструмент със заден ъгъл екструзията ще е конусна, а при липса на такъв - цилиндрична. След тази операция се пристъпва към конструктивно оформяне на 3D модела на инструмента.





Фиг. 3.19. Зъб от инструмент с прави зъби



Фиг. 3.20. Зъб от инструмент с наклонени зъби

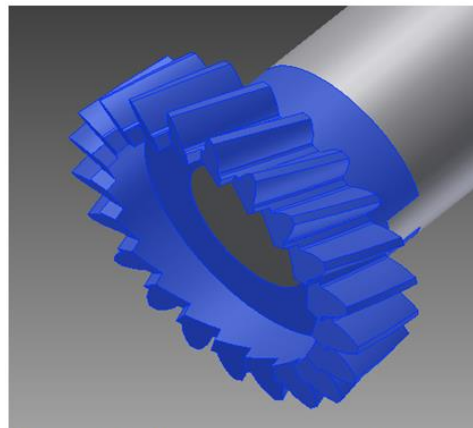


При зъбостругови инструменти с наклонени зъби се налага друг подход при изграждането на модела. Полученият чрез функцията „Мащабиране“ профил в нормално сечение е изходна информация за построяване на модела на инструмента. От него се екструдира само един зъб с винтова конусна или цилиндрична форма (фиг. 3.20), който се размножава необходимия брой пъти.

Следващ етап е оформянето на предната повърхнина на всеки зъб чрез изрязване с равнина, наклонена спрямо нормалната равнина под необходимия преден ъгъл. Задният ъгъл на инструмента е получен при екструдирането в осово направление. Оформянето на работната и съединителната част на инструмента (фиг. 3.22) се реализира по приетите начини, след което може да се пристъпи и към създаване на конструктивна документация.

Така създаденият графичен метод позволява бързо, лесно и точно профилиране на различни конструкции зъбостругови инструменти. Той се базира на знанията и уменията, притежавани от всеки специалист по САМ проектиране и не предполага придобиването на допълнителни такива.

Отворената структура на скрипт файла позволява подбиране на параметрите на точността на инструмента в етапа на създаване на профила съобразно конкретната задача.



Фиг. 3.22. Конструктивно оформяне на инструмента.

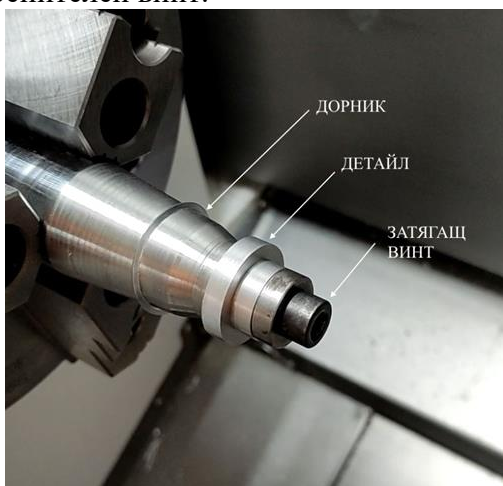
## ГЛАВА ЧЕТВЪРТА ИЗСЛЕДВАНЕ, МОДЕЛИРАНЕ И ОПТИМИЗИРАНЕ НА ПРОЦЕСА ЗЪБОСТРУГОВАНЕ

Основна задача е да се създадат технологични предпоставки за обработване на зъбни профили върху струго-фрезови обработващ център чрез зъбоструговане. Необходимо е: да се осигурят програмни възможности за реализация на процеса зъбоструговане върху струго-фрезови обработващ център, който не е специализиран за тази операция; да се изследват и моделират точностните параметри на зъбния профил в зависимост от режима за обработване; да се определят оптимални условия за процеса с оглед постигане на зададени точностни показатели.

### 4.1. Опитна уредба

Експерименталните изследвания на процеса зъбоструговане са проведени върху опитна уредба (фиг. 4.1.), включваща струго-фрезови обработващ център T2500 и екипировка за установяване на детайла и режещия инструмент, в условията на лаборатория C1.2. “CAD/CAM системи за проектиране и производство на високотехнологични продукти” в Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко - и енергоспестяващи системи и технологии”.

Обработваният детайл се установява върху дорник, захванат в патронника на машината (фиг. 4.2.). Стабилността на детайла по време на обработката се гарантира от скрепителен винт.



Фиг. 4.2. Присъединяване на детайла към дорника

Фиг. 4.3. Зъбостругов инструмент

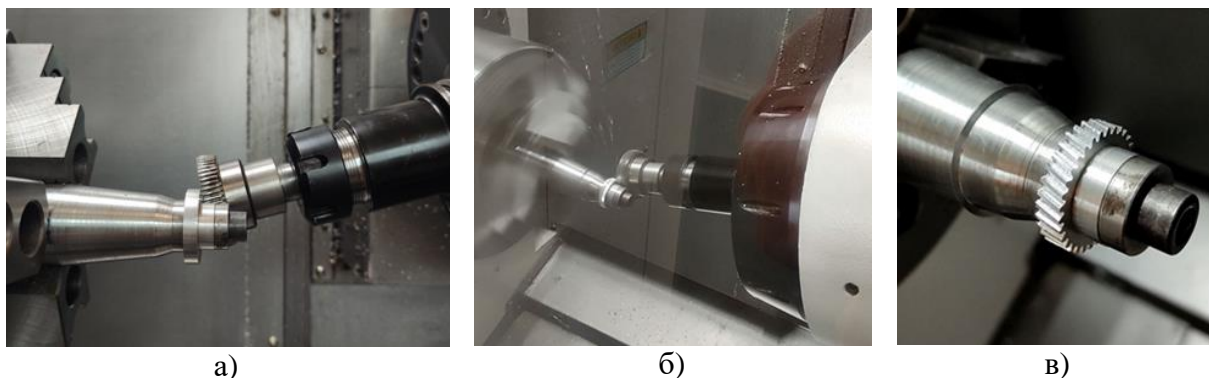
Зъбоструговият инструмент (фиг. 4.3.) е присъединен с помощта на дорник към инструментален държач HSK, чрез който е установен във фрезовото вретено - ос В.

Режещият инструмент е зъбодълбачно колело с модул  $m = 0,8 \text{ mm}$ , брой на зъбите  $z = 60$  и ъгъл на наклон на зъбите  $\beta_1 = 0^\circ$ .

Обработваният детайл е еднакъв за всички опити – зъбно колело с външни зъби с модул  $m = 0,8 \text{ mm}$ , брой на зъбите  $z = 32$  и ъгъл на наклон на зъбите съответно  $\beta_2 = 10^\circ; 15^\circ; 20^\circ; 25^\circ$  и  $30^\circ$ . Широчината на зъбния венец е  $6 \text{ mm}$ , а външният диаметър  $D_w$  е определен от съответната зависимост според ъгъла на наклон на зъбите.

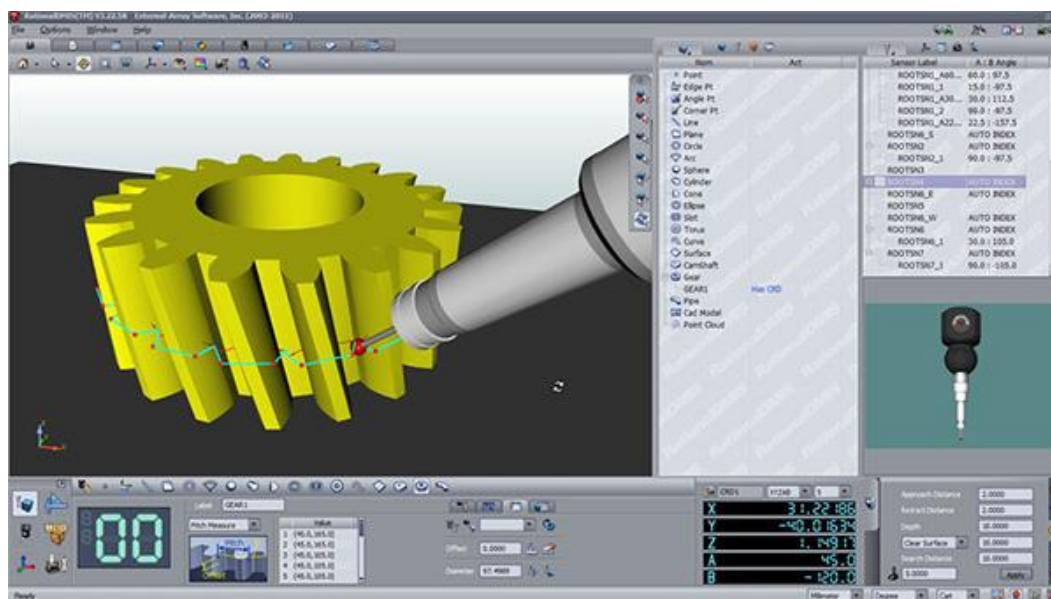
Опитните образци са изработени от алуминиева сплав Д16Т под формата на диск. Избран е по-лесно обработваем материал с оглед запазване на режещите качества на инструмента и избягване на влиянието на износването като фактор. Базовият отвор е с диаметър  $12,5 \text{ mm}$ , избран съобразно дорника на измервателната машина, която се използва за измерване на зъбните колела.

За осъществяване на процеса рязане се реализира ъгъл на кръстосване между осите Z (на детайла) и B (на инструмента), като стойността на ъгъла е от изключително значение за качествените параметри на обработваните зъбните колела. Последователни етапи от реализирането на процеса върху струго-фрезови обработващ център T2500 са показани на фиг. 4.5.



Фиг. 4.5. Моменти от експеримент за зъбоструговане- а) изходна позиция; б) зъбоструговане; в) готов детайл.

Проведени са опити при различни комбинации от фактори. Във всеки опит са проведени по три наблюдения, включващи по едно зъбонарязване. След обработването, образците са измерени в лабораторията на фирма „Подемкран АД“ върху специализирана измервателна машина QUINDOS. Използван е специализиран софтуер QUINDOS GEAR (фиг 4.8.). От всяко измерване са изведени измервателни протоколи.



Фиг. 4.8. Измервателен софтуер QUINDOS GEAR

Резултатите от протоколите за измерване са обобщени в таблици, като резултатите от всеки опит са обработени статистически като малка извадка. Определени са средноаритметичните отклонения за отделните показатели:  $\overline{F_{AL}}$  и  $\overline{F_{AR}}$  - средно отклонение от профила, съответно за ляв и десен профил;  $\overline{F_{BL}}$  и  $\overline{F_{BR}}$  - средно отклонение от направлението, съответно за ляв и десен профил;  $F_r$  - натрупана грешка на стъпката;  $F_r$  - грешка от радиално биене.

## 4.2. Програмни възможности за реализиране на метода зъбоструговане

### 4.2.1. Специални функции и команди в „Sinumerik“ 840, приложими при зъбоструговане

Функцията "Електронна предавка" (EG) дава възможност да се контролира движението на следяща ос в зависимост от главна ос. Връзката между всяка водеща и водима ос се определя от коефициента на свързване. Дефиницията, описана по-долу, и активирането на функцията са отделни процеси. Активирането на функцията не е възможно, ако тя не е дефинирана по-рано.

Група оси, свързани с EG, се дефинира чрез въвеждане на водеща ос и поне на една, но не повече от пет водени оси, всяка със съответния тип връзка. Синтаксисът е EGDEF (водеща ос, водена ос 1, тип връзка 1, водена ос 2, тип връзка 2). Не е необходимо типът на връзката да е еднакъв за всички водени оси и той трябва да бъде програмиран отделно за всяка водена ос.

Коефициентите на свързване са предварително зададени със стойност „нула“, когато е дефинирана групата на осите EG. Като такава, групата няма ефект върху водещата ос, докато не бъде активирана.

Групата оси, свързани с EG, може да се активира със синхронизация и без синхронизация. Програмирането на динамични граници на свързването се осъществява с функциите VELOLIMA и ACCLIMA.

Програмата за зъбоструговане има три характерни части - дефиниране на връзка, работна част и деактивиране на връзката. При дефиниране се настройват параметрите на системата за осъществяване на електронна връзка между основното (C) и фрезовото вретено (CS3). Въвеждат се динамични ограничения с цел предпазване от претоварване. Включва се електронната предавка. В работната част се задават спомагателните и работните ходове, а в деактивираща - се деактивира връзката и се възстановяват първоначалните настройки.

Програмата за дефиниране на връзка има следния вид:

„EGDEF”(C, CS3, 1); Дефиниране на електронна предавка – водеща ос C и водима ос CS3, като определяща е позицията на ос C.

„ACCLIMA”[C] = 100; Задаване на ускорение 100% за ос C.

„ACCLIMA”[CS3] = 20; Ограничаване на ускорението на 20% за ос CS3.

„VELOLIMA”[C] = 50; Ограничаване на скоростта на 50% за ос C.

„VELOLIMA”[CS3] = 25; Ограничаване на скоростта на 25% за ос CS3.

„SPCON”(1,3); Включване контрол на позицията на вретена 1 и 3.

„EGON”(C, “FINE”, CS3, 60, -32); Включване на връзката между ос C и CS3 в режим фино регулиране и предавателно число 60/-32.

„M”[3] = 3 S[3] = 1000; Посока на въртене на CS3 по часовниковата стрелка и честота на въртене 1000 min<sup>-1</sup>.

Траекторията на обработката включва работна част, представляваща права или винтова линия в пространството, и спомагателна част. При необходимост може да се включи и участък за влизане в синхронизация. На практика отношението на широчината на зъбния венец и стъпката на винтовата линия е много малко (1:1000 или по-малко) и отклонението в профила, предизвикано от евентуална замяна на винтовата линия с права, е пренебрежимо малко. Това дава възможност при неточни обработки да се използва за траектория права линия, което е по-неточно, но не изисква сложни изчисления.

### 4.3. Изследване на влиянието на фактори върху точността на метода зъбоструговане

Проведени са предварителни еднофакторни експерименти за: определяне на работоспособността на метода зъбоструговане; проверка на действието на функции за

синхронизиране на движението; определяне на стойности на елементите на режима и траектория на обработката.

В качеството на параметри за оценка на точността са избрани: отклонението от профила на зъба; отклонението от направлението на зъба; натрупаната грешка на стъпката; най-голямата разлика в стъпката; грешката от радиално биене.

Изследваните фактори са ъгъл на кръстосване  $\Sigma$  и подавателна скорост  $V_0$ .

Съгласно определението, ъгълът на кръстосване  $\Sigma$  се формира от ъглите на наклон на зъбите на детайла  $\beta_2$  и инструмента  $\beta_1$ . При ъгъл на инструмента  $\beta_1 = 0$  ъгълът на кръстосване съответства на наклона на зъбите на детайла. За експериментите е избран диапазон за изменение на  $\Sigma$  от  $10^\circ$  до  $30^\circ$ , което съответства на зъбни колела с наклонени зъби. Ъгълът се получава при завъртане на ос В на фрезовото вретено.

Диапазонът на подавателната скорост е избран от 100 mm/min до 500 mm/min с оглед търсене на оптимална стойност, осигуряваща зададената точност при запазване на гладкост и производителност.

#### 4.3.1. Методика за изследвания

Проведени са две серии експерименти при променящ се ъгъл на кръстосване, респективно скорост на рязане, и променяща се подавателна скорост.

##### 4.3.1.1. Влияние на ъгълът на кръстосване $\Sigma$

В първата серия експерименти е изследвано влиянието на скоростта на относително приплъзване, която съвпада със скоростта на рязане, върху качеството на обработения детайл. Различните скорости се получават при различни ъгли на кръстосване. В експеримента са проведени пет опита, съответно при ъгъл на кръстосване  $\Sigma=10^\circ$ ;  $\Sigma=15^\circ$ ;  $\Sigma=20^\circ$ ;  $\Sigma=25^\circ$  и  $\Sigma=30^\circ$ . Те определят скорост на рязане от 13 m/min; 19,4 m/min; 25,6 m/min; 31,7 m/min и 37,5 m/min при постоянна честота на въртене на инструмента от  $1000 \text{ min}^{-1}$ .

##### 4.3.1.2. Определяне на влиянието на подавателната скорост

За определяне на влиянието на подавателната скорост са проведени шест опита при подавателна скорост, съответно: 50 mm/min; 100 mm/min; 200 mm/min; 300 mm/min; 400 mm/min и 500 mm/min, при еднаква геометрия на обработваните детайли и ъгъл на кръстосване  $\beta_1=15^\circ$ . Във всеки опит са проведени по 3 наблюдения.

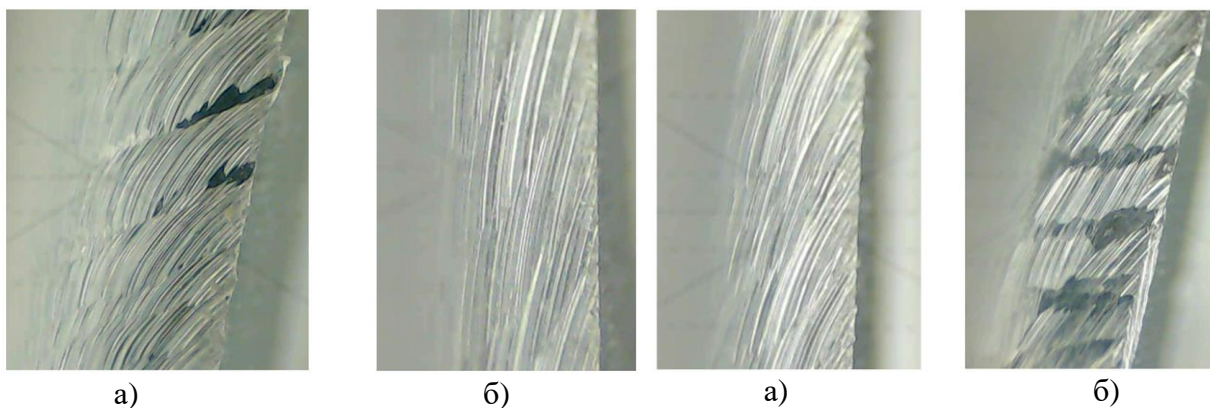
#### 4.3.2. Качество на повърхнината на зъбите на получените образци

Измерването с помощта на специализирана измервателна машина QUINDOS е комплексно и параметрите, характеризиращи повърхнината, като вълнообразност и грапавост, са елемент от измерените стойности на отклонението от профила. Видът на повърхнината характеризира протичането на процеса рязане. При заснемане под микроскоп на получената повърхнина на зъба (фиг. 4.10 и 4.11) ясно се вижда начинът на формиране на повърхнината. Наблюдават се успоредни линии, които представляват следи от режещите ръбове на инструмента, които формират грапавостта на повърхнината. Освен това се наблюдава периодична вълнообразност в резултат на последователността на работа на зъбите на инструмента.

При промяна на ъгъла на кръстосване от  $\Sigma=15^\circ$  (фиг. 4.10а) на  $\Sigma=30^\circ$  (фиг. 4.10б) се увеличава относителната скорост на плъзгане, при което следите увеличават своя размер и стават успоредни на направлението на зъба. Стъпката на вълнообразността от работата на поредните зъби нараства, а височината намалява. Повърхнината подобрява своите качества.

При промяна на подавателната скорост от 300 mm/min (фиг. 4.11а) на 50 mm/min (фиг. 4.11б) се променя основно вълнообразността, като стъпката намалява и става по-ясно изразена. Повърхнината, като цяло, е с по-лошо качество поради многократното преминаване на зъбите.





Фиг. 4.10. Получена повърхнина на зъбите – Фиг.4.11. Повърхнина на зъбите при подавателната скорост а) 300 mm/min, б) 50 mm/min

#### 4.3.3. Резултати от измерванията

Експерименталните резултати са представени в таблици. Получените резултати за качеството на обработените зъбни колела, като цяло, съответстват на степен на точност 7 – 12 за различните параметри.

##### 4.3.3.1. Резултати за влиянието на ъгъла на кръстосване

Стойностите на параметрите характеризиращи отклонението от профила, направлението на зъба, отклоненията в стъпката и радиалното биене, са отчетени от измервателните протоколи на съответните образци и са отразени в таблица 3.

Усреднени резултати от измерване

Таблица 3

Ъгъл	Средни стойности от измерванията								
	Отклонение от профила на зъба [ $\mu\text{m}$ ]			Отклонение от направлението на зъба [ $\mu\text{m}$ ]			Натрупана грешка на стъпката [ $\mu\text{m}$ ]	Най-голяма разлика в стъпката [ $\mu\text{m}$ ]	Грешка от радиално биене [ $\mu\text{m}$ ]
$\Sigma$	$\overline{F_{AL}}$	$\overline{F_{AR}}$	$\overline{F_A}$	$\overline{F_{BL}}$	$\overline{F_{BR}}$	$\overline{F_B}$	Fp	Rp	Fr
10°	0,41	-1,19	-0,4	0,5	2,1	1,3	50,3	41,6	67,7
15°	1,93	0,86	1,4	4,23	-0,43	-0,1	50,0	44,4	54,5
20°	9,3	9,6	9,4	13,0	2,23	7,6	33,0	29,9	52,76
25°	-0,86	-15,2	-8,0	1,2	-0,1	-4,1	59,9	40,4	52,9
30°	-3,13	12,7	4,8	20,0	15,5	12,7	55,7	97,5	89,36

##### 4.3.3.2. Резултати от експеримента за влиянието на подавателната скорост

Резултати от експеримента, определени по описания по-горе начин, са отразени в таблица 5.

Скорост [mm/min]	Средни стойности от измерванията								
	Отклонение от профила на зъба [ $\mu\text{m}$ ]			Отклонение от направлението на зъба [ $\mu\text{m}$ ]			Натрупана грешка на стъпката [ $\mu\text{m}$ ]	Най-голяма разлика в стъпката [ $\mu\text{m}$ ]	Грешка от радиално биене [ $\mu\text{m}$ ]
	$\overline{F_{AL}}$	$\overline{F_{AR}}$	$\overline{F_A}$	$\overline{F_{BL}}$	$\overline{F_{BR}}$	$\overline{F_B}$	Fp	Rp	Fr
100	-1,16	-11,8	-6,5	-41,3	-6,1	-23,7	56,23	44,5	47,3
200	5,5	-5,9	-0,2	3,3	-6,3	-4,8	33,7	26,3	61,7
300	12,8	18,2	15,5	15,3	7,3	11,3	37,8	35,5	45,2
400	9,6	20,0	14,8	20,7	8,6	14,6	61,5	87,2	70,5
500	20,1	5,6	12,8	37,3	25,3	31,3	60,7	100,3	90,3

#### 4.3.4. Анализ на резултатите

##### 4.3.4.1. Влияние на ъгъла на кръстосване върху точността

Резултатите от експериментите са представени в графичен вид, представляващ функция на съответния параметър от ъгъла на кръстосване в градуси. Получените резултати са апроксимирани с права линия.

На фигура 4.12. е представено влиянието на ъгъла на кръстосване върху отклонението на профила на зъба, съответно за левия профил -  $F_{AL}$ , за десния профил -  $F_{AR}$  и средното отклонение -  $F_A$ .

Вижда се, че с увеличаване на ъгъла на кръстосване тенденцията е да се увеличават отклоненията, респективно да намалява точността на обработения профил, като тя се изменя в диапазона 9 – 12 степен на точност. Наблюдава се и определена нелинейност, като при стойности над  $\Sigma=25^\circ$  отклонението намалява.

Характерно е, че „нарастването” на отклонението е в различна посока за двете страни на зъба. Съответно за лявата страна  $F_{AL}$  нараства в отрицателна посока, а за дясната  $F_{AR}$  - в положителна посока. Двете изменения не се компенсират, като средната стойност  $F_A$  нараства с 8  $\mu\text{m}$  за изследвания диапазон.

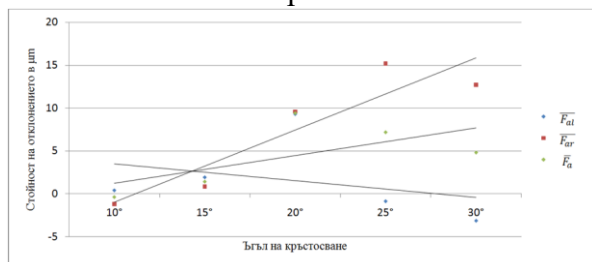
Това влияние може да се обясни с две причини. От една страна, увеличаването на ъгъла на кръстосване увеличава скоростта на относително приплъзване на двата профила (детайл-инструмент), която съответства на скоростта на рязане. От друга страна, при различните ъгли се използва един и същ инструмент с  $0^\circ$  наклон на зъбите, поради което профилът му не съответства на профила на зъба.

Получените резултати за отклонението на профила на зъба доказват, че методът зъбоструговане се характеризира с достатъчна точност за предварително и в определени случаи и за окончателно обработване на зъбни профили.

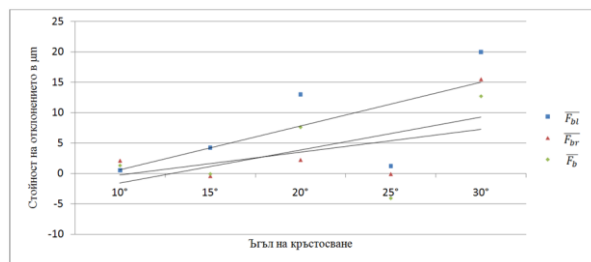
Характерът на изменение на отклонението от направлението на зъба в зависимост от ъгъла на кръстосване е представен на фиг. 4.13. И при този параметър се наблюдава увеличаване на стойностите на отклонението с увеличаване на ъгъла на кръстосване, като зависимостта е по-близка до линейната. При минимален ъгъл от  $10^\circ$  отклонението е около  $2\div 3 \mu\text{m}$ , при  $30^\circ$  нараства  $3\div 4$  пъти до  $15 \mu\text{m}$ . Това изменение съответства на 7 - 12 степен на точност. Характерът и големината на отклонението на левия и десния профил са приблизително еднакви – нарастват с  $10 \mu\text{m}$ .

Увеличаването на отклонението от направлението на зъба при увеличаване на ъгъла на кръстосване се обяснява с факта, че зъбите преминават от тип „наклонени” в тип „винтови”, тоест образуващата на зъба се променя от права във винтова линия. При

съставянето на управляващата програма за зъбонарязването е прието, че инструментът се движи по права линия. С увеличаването на ъгъла тази траектория се отличава от действителната винтовата линия на зъба. Следователно при работа с по-големи ъгли на кръстосване от  $20^\circ$  е желателно траекторията на инструмента да се промени от права в траектория, съответстваща на действителна винтова линия на зъба, като това ще намали отклоненията от направлението на зъба.



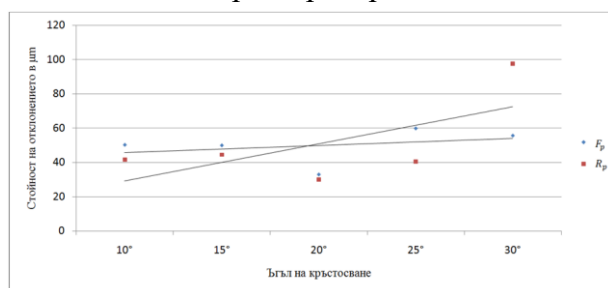
Фиг 4.12. Влияние на ъгъла на кръстосване върху отклонението на профила на зъба



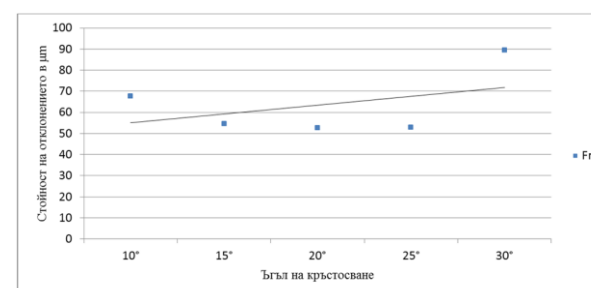
Фиг 4.13. Отклонение от направлението на зъба в зависимост от ъгъла на кръстосване

Получената степен на точност е задоволителна и съответства на получисто обработване на зъбния профил. Препоръчително е да се работи с по-малките стойности на ъгъла на кръстосване или да се компенсира отклонението между правата и винтовата линия на зъба.

Параметрите, характеризиращи отклонението в стъпката на зъбите (натрупана грешка на стъпката  $F_p$  и най-голямата разлика в стъпката  $R_p$ ), във функция от ъгъла на кръстосване са представени на фиг. 4.14. Получената зависимост за натрупаната грешка на стъпката показва, че тя не зависи от ъгъла на кръстосване, като стойността ѝ остава постоянна - около  $50 \mu\text{m}$ , което съответства на 8 степен на точност. Най-голямата разлика в стъпка  $R_p$  показва тенденция за нарастване приблизително с  $60 \mu\text{m}$ . Получените зависимости за отклоненията в стъпката показват, че ъгълът на кръстосване, респективно скоростта на рязане могат да се избират „по-свободно” в целия диапазон, като това няма да повлияе съществено на степента на точност на показателите, характеризиращи точността на стъпката.



Фиг 4.14. Отклонение в стъпката на зъбите - натрупана грешка на стъпката и най-голяма разлика в стъпката



Фиг 4.15. Грешка от радиално биене

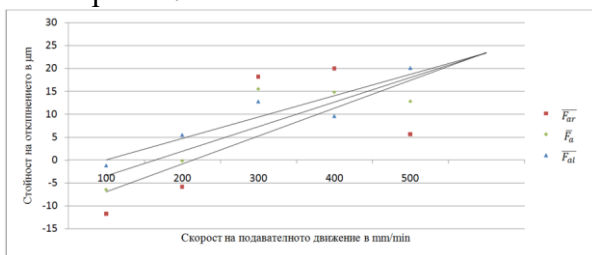
Грешката от радиално биене в зависимост от ъгъла на кръстосване (фиг. 4.15.) се описва с права линия, като изменението е  $15 \mu\text{m}$  за целия диапазон. Получените стойности от  $67 \mu\text{m}$  до  $89 \mu\text{m}$  съответстват на 8 степен на точност. В случая стойностите на радиалното биене се формират основно от грешки при установяване на детайла. При обработване детайлът се установява върху дорник с минимална хлабина, при което възниква определено радиално биене. При измерването детайлът се установява върху конусен дорник с конусност 1:10000 по същия отвор, при което получената грешка при обработването се пренася върху профила.



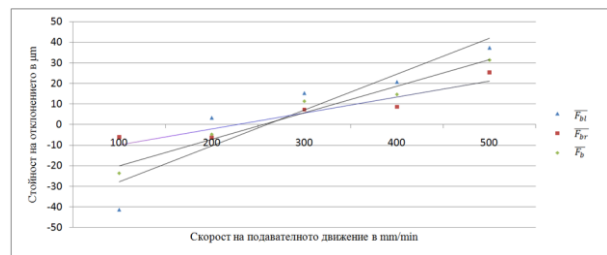
#### 4.3.4.2. Влияние на подавателната скорост върху точностните характеристики

Влиянието на подавателната скорост върху отклонението на профила на зъба (фиг. 4.16.) е ясно изразено, като изменението на скоростта от 100 до 500 mm/min увеличава отклонението 4 пъти. Получените резултати съответстват на 8-11 степен на точност. Зависимостта се наблюдава както при левия, така и при десния зъбен профил. Това влияние се дължи на факта, че при по-висока скорост инструменталните следи в процеса на рязане върху профила на детайла се удължават с увеличаване на скоростта. Следите, оставени от инструмента, имат вълнообразен характер, получен при относителното движение на двата профила. Оттук може да бъде търсено оптимално решение при избор на скорост, отговарящо на зададената точност на детайла.

В отклонението от направлението на зъба (фиг. 4.17.) се наблюдава нарастване на стойностите с увеличаване на подавателната скорост. При образците, обработени със скорост от 100 mm/min, отклонението е 20  $\mu\text{m}$  с отрицателен знак, при последващите опити скоростта нараства през 100 mm/min до достигане на скорост от 500 mm/min, като при максимална скорост отклонението се увеличава до 37  $\mu\text{m}$ , като това изменение отговаря на 7-12 степен на точност.



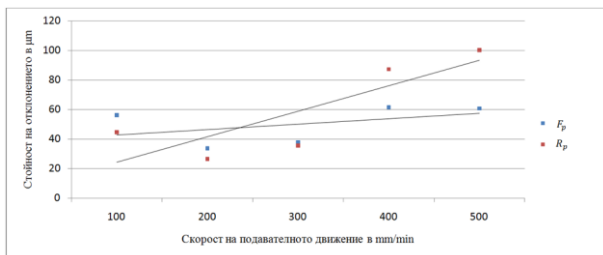
Фиг. 4.16. Влияние на подавателната скорост върху отклонението на профила на зъба



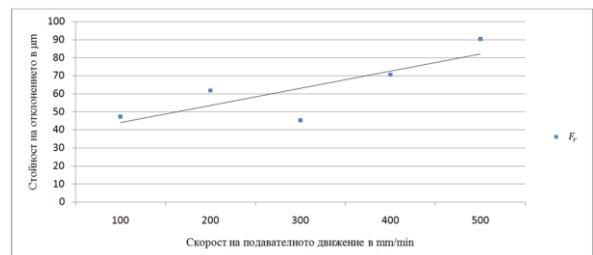
Фиг. 4.17. Отклонение от направлението на зъба

Натрупаната грешка на стъпката  $F_p$  (фиг. 4.18) зависи минимално от скоростта на подавателното движение, като стойността ѝ се променя в рамките на 15  $\mu\text{m}$ , което съответства на 7 степен на точност. Параметърът  $R_p$ , показващ най-голяма разлика в стъпката, визуализира тенденция за нарастване в диапазон от 70  $\mu\text{m}$ . Получените зависимости за отклоненията в стъпката показват, че скоростта на подавателното движение не е целесъобразно да се подбира в целия диапазон, тъй като това би повлияло на показателите, характеризиращи точността на стъпката. Препоръчителната стойност на скоростта на подавателното движение е в диапазона 200-300 mm/min.

Грешката от радиално биене  $F_R$  в зависимост от скоростта на подавателното движение (фиг. 4.19) се изменя линейно, като нараства с 45  $\mu\text{m}$  за целия диапазон. Получените стойности от 49  $\mu\text{m}$  до 90  $\mu\text{m}$  съответстват на 12 степен на точност. Тук също влияние има и грешката при установяване.



Фиг. 4.18. Отклонение в стъпката на зъбите- натрупана грешка на стъпката и най-голяма разлика в стъпката между два зъба, който не са съседни



Фиг. 4.19. Грешка от радиално биене

#### 4.4. Моделиране на точностните параметри на обработените профили

За да се изберат оптимални условия за реализация на процеса, които да гарантират определени точностни параметри на профила на зъбите на обработваното зъбно колело, е необходимо да се построят теоретико-експериментални модели, отразяващи влиянието на ъгъла на кръстосване и подавателната скорост върху: отклонението от профила на зъба; отклонението в направлението на зъба; натрупаната грешка на стъпката; най-голямата разлика в стъпката; грешката от радиално биене.

##### 4.4.1. Условия и план за многофакторният експеримент

Проведените предварителни експерименти и анализът им показват, че факторите, върху които трябва да се изградят моделите, са два - подавателна скорост и ъгъла на кръстосване. Параметри на моделите са отклонението от профила на зъба  $F_A$ , отклонението в направлението на зъба  $F_B$ , натрупаната грешка на стъпката  $F_P$ , най-голямата разлика в стъпката  $R_P$  и грешката от радиално биене  $F_R$ , измерени съгласно т. 4.3.1. Планирането на многофакторни експерименти предполага изследваните зависимости да са непрекъснати в работното факторно пространство. Получените зависимости при предварителните експерименти показват, че в изследвания диапазон функциите са непрекъснати и нелинейни. В тези случаи се препоръчва прилагането на нелинейни многофакторни регресионни модели. Това ще позволи по-подробно описание на повърхнината на реакциите и по-точно областта на оптимума.

За построяване на регресионните модели, отразяващи комплексното влияние на подавателната скорост и на ъгъла на кръстосване върху отклонението от профила на зъба  $F_A$ , отклонението в направлението на зъба  $F_B$ , натрупаната грешка на стъпката  $F_P$ , най-голямата разлика в стъпката  $R_P$  и грешката от радиално биене  $F_R$ , са проведени многофакторни експерименти по оптимален композиционен план от вида  $N=2^2 + 2 \cdot 2 + 1 = 9$  опита. Звездното рамо е  $\alpha=1$ . Броят на наблюденията във всеки опит е 3. Матрицата на плана е представена в таблица 6.

Матрица на плана Таблица 6

№	$x_1$	$x_2$
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	-1	0
6	+1	0
7	0	-1
8	0	+1
9	0	0

Равнища на факторите

Таблица 7

Означения на факторите		Интервал на изменение	Основно равнище	Стойност на факторите	
натурални	кодови			Долно равнище	Горно равнище
$\sum (X_1)$ [deg]	$x_1$	10	20	10	30
$V_0(X_2)$ [mm/min]	$x_2$	200	300	100	500

Нивата и интервалите на вариране на факторите са определени на базата на предварителните експерименти. Основното ниво на ъгъла на кръстосване е  $20^\circ$  при интервал на изменение  $10^\circ$ . Вторият фактор - подавателната скорост, е на основно ниво  $300 \text{ mm/min}$  при интервал на изменение  $200 \text{ mm/min}$ . Определените равнища на факторите са представени в таблица 7.

##### 4.4.2. Резултати от проведените опити и обработка

Съгласно методиката на планирания експеримент са проведени 9 опита с по три наблюдения по реда, описан в т. 4.3.1. Средноаритметичните стойности на резултатите от измерванията за всеки опит са представени в таблица 8.

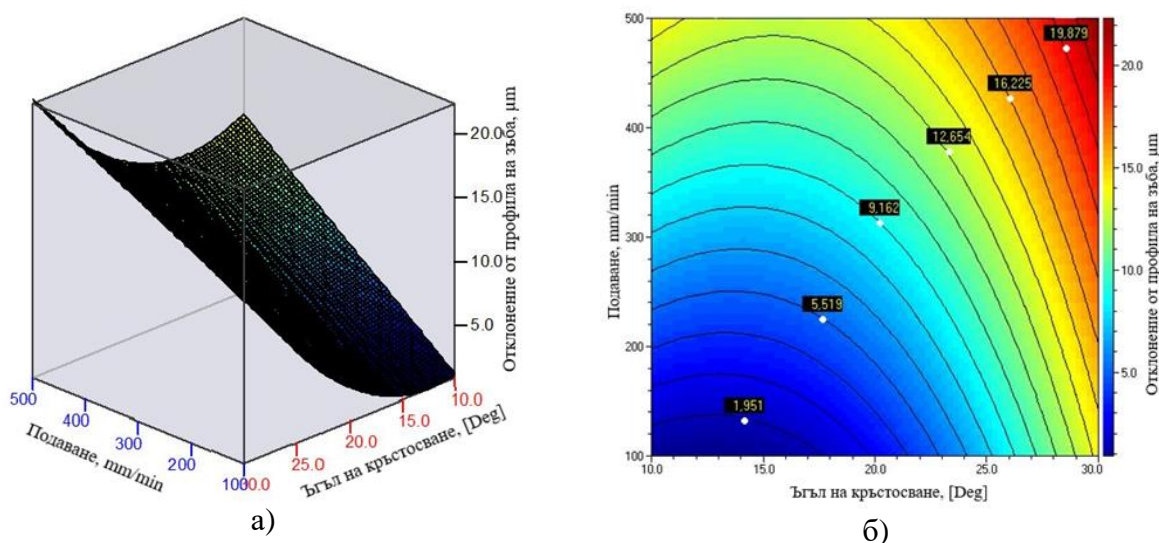
№	Фактори		Измерени параметри				
	$X_1$ [deg]	$X_2$ [mm/min]	Отклонение от профила $F_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Отклонение в направлението $F_b$ [ $\mu\text{m}$ ]	Натрупана грешка на стъпката $F_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	Най- голяма разлика в стъпката $R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	Грешка от радиално биене $F_r$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	10	100	1,1	19,9	61	28,5	47,5
2	30	100	14,6	24,33	58	59,6	62,1
3	10	500	13,5	32,2	55,7	77	74,3
4	30	500	21,9	38,6	50	90,6	88,3
5	10	300	8,7	25,3	51	42,9	66,8
6	30	300	18,5	31,6	41,3	68	71,6
7	20	100	2,7	17,5	57,3	44,5	53,1
8	20	500	14,8	35,65	55,7	90,6	90
9	20	300	8,77	23,5	42	46,7	64

Регресионният анализ, респективно синтезът на полиномите  $y_i$  ( $y_1=F_A$ ;  $y_2=F_B$ ;  $y_3=F_P$ ;  $y_4=R_P$ ;  $y_5=F_R$ ) са реализирани посредством програмен продукт QSTATLAB. Методиката включва определяне на регресионните коефициенти, проверка за значимост по критерия на Стюдънт и проверка на адекватност чрез множествения коефициент на корелация.

Създадените регресионни модели за точностните параметри на обработените зъбни профили и графичната интерпретация на влиянието на подавателната скорост и на ъгъла на кръстосване върху отклонението от профила на зъба  $F_A$ , отклонението в направлението на зъба  $F_B$ , натрупаната грешка на стъпката  $F_P$ , най-голямата разлика в стъпката  $R_P$  и грешката от радиално биене  $F_R$  са представени в точки 4.4.2.1 до 4.4.2.5.

#### 4.4.2.1. Отклонение от профила на зъба $F_A$

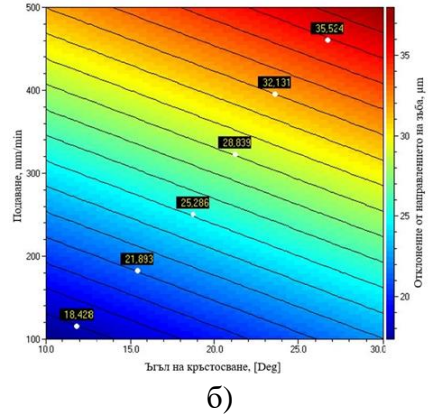
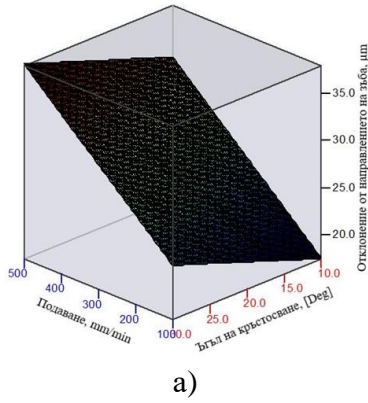
$$y_1 = 3,5883333 - 1,0160833x_1 + 0,04058333x_2 + 0,0436x_1x_1 - 0,0006875x_1x_2$$



Фиг. 4.20. Модел за  $F_A$  - а) общ вид; - б) сечения в повърхнината.

#### 4.4.2.2. Отклонение в направлението на зъба $F_B$

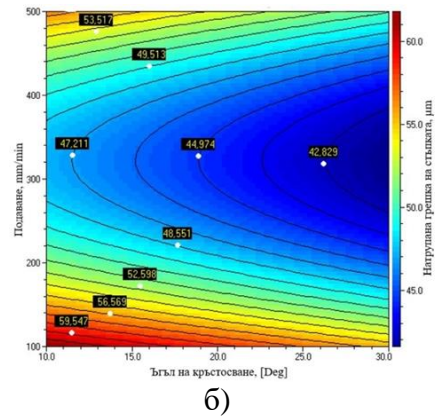
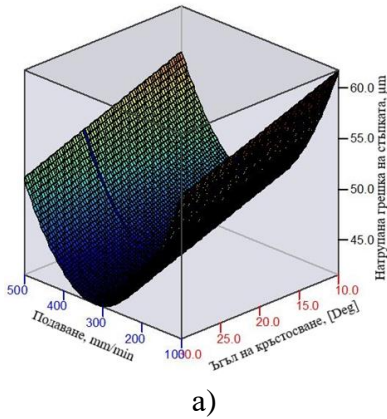
$$y_2 = 10,774444 + 0,2855x_1 + 0,03726667x_2$$



Фиг. 4.23. Модел за  $F_B$  - а) общ вид; - б) сечения в повърхнината.

#### 4.4.2.3. Натрупана грешка на стъпката $F_P$

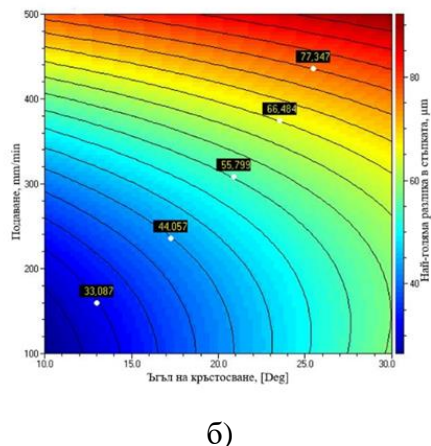
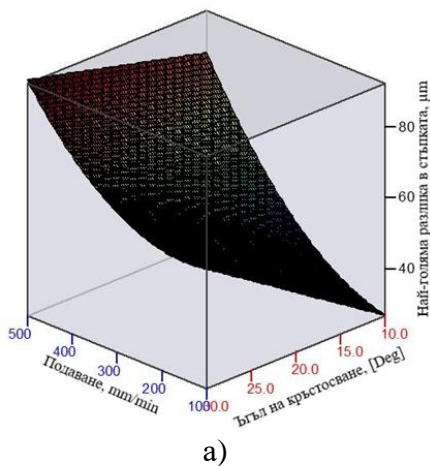
$$y_3 = 80,445833 - 0,30333333x_1 - 0,18483333x_2 + 0,00028708x_2^2$$



Фиг. 4.26. Модел за  $F_P$  - а) общ вид; - б) сечения в повърхнината.

#### 4.4.2.4. Най-голяма разлика в стъпката $R_P$

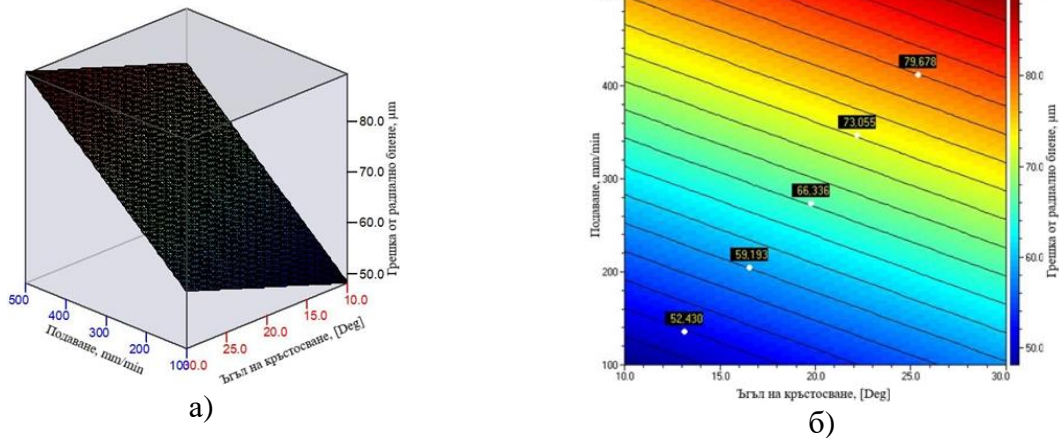
$$y_4 = 7,1832108 + 1,9270098x_1 + 0,00026129x_2^2 - 0,00254559x_1x_2$$



Фиг. 4.29. Модел за  $R_P$  - а) общ вид; - б) сечения в повърхнината.

#### 4.4.2.5. Грешка от радиално биене $F_R$

$$y_5 = 35,025 + 0,55666667x_1 + 0,07491667x_2$$



Фиг. 4.32. Модел за  $F_R$  - а) общ вид; - б) сечения в повърхнината.

Създадените модели показват различна степен на влияние на изследваните фактори върху параметрите на точността на зъбните профили. Следователно съществува и трябва да се търси оптимален режим при който се гарантират високи показатели.

#### 4.5. Многоцелева оптимизация на режимите за обработване

Многоцелевата оптимизация има за задача определянето на комбинация от стойности на управляващите фактори, при която целевите функции - отклонение от профила на зъба  $F_A$ , отклонение в направлението на зъба  $F_B$ , натрупана грешка на стъпката  $F_P$ , най-голяма разлика в стъпката  $R_P$  и грешка от радиално биене  $F_R$ , имат минимални стойности в допустимото факторно пространство. Използваният софтуер QSTATLAB позволява прилагането на различни методи за решаване на оптимизационната задача. Крайните резултати от тях са представени по-долу.

##### 4.5.1. Генетичен алгоритъм

Полученият оптимум е при малък ъгъл на кръстосване и ниска скорост – 11,27° и 100 mm/min.

$\Sigma$	V	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
11,2728	100,0411	0,9594	17,7210	61,4087	28,6502	48,7949

##### 4.5.2. Сканиране

Полученият Парето фронт е при малък ъгъл на кръстосване и ниска скорост – 12,40° и 100,1 mm/min.

Намерен Парето фронт :

$\Sigma$	V	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
12,4026	100,1143	0,9023	18,0463	61,0566	30,5411	49,4293
10,0000	100,0000	1,1583	17,3561	61,8000	26,5206	48,0833
15,0000	100,0000	1,1842	18,7836	60,2833	34,8829	50,8667

##### 4.5.3. Случайно търсене

Полученият Парето фронт е при малък ъгъл на кръстосване и ниска скорост – 16,39° и 109,15 mm/min.

No	$\Sigma$	V	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
1	20,0000	300,0000	8,7567	27,6644	44,7664	53,9660	68,6333
7	11,6936	252,3854	5,8822	23,5185	48,5361	38,8479	60,4423



8 13,4841 106,4752 1,1488 18,5921 59,9301 32,4747 50,5079  
 .....  
 499 16,3889 109,1527 1,8466 19,5212 58,7198 37,3241 52,3255

#### 4.6. Многоцелева оптимизация на режимите за обработване по обобщена функция на полезност

Ефективността на технологичните процеси се оценява най-често с няколко параметъра, като всеки от параметрите има определено специфично значение, но не е достатъчен за оптимално управление на процеса. Обобщената функция на полезност  $\Phi$  е определена като средноаритметична стойност на частните функции на полезност (коэффициентите на полезност)  $\eta_i$ . Стойностите на  $\eta_i$  се получават чрез трансформиране на изходните параметри  $y_i$  чрез използване на скалата на полезност, която съдържа положителните числа от 0 (съответства на най-нежелания резултат) до 1 (съответства на най-полезния резултат). Определените стойности на коэффициентите на полезност и на обобщената средноаритметична функция на полезност са представени в таблица 9.

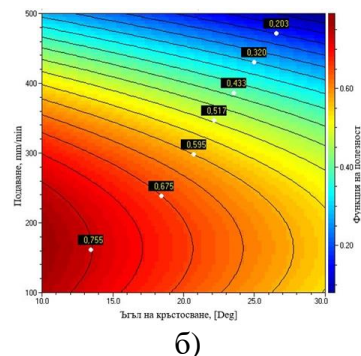
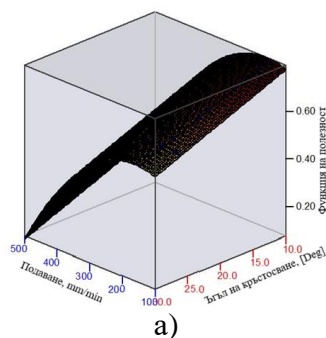
Коефициенти и функция на полезност							Таблица 9		
№	Управляващи фактори		Коефициенти на полезност					Обобщена функция на полезност	
	$X_1$	$X_2$	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$\eta_4$	$\eta_5$	$\Phi_1$	$\Phi_2$
1	10	100	1	0,886	0	1	1	0,7772	0,1466
2	30	100	0,351	0,676	0,152	0,499	0,656	0,4668	0,0880
3	10	500	0,385	0,303	0,279	0,219	0,369	0,311	0,0588
4	30	500	0	0	0,558	0	0,004	0,1124	0,0280
5	10	300	0,635	0,630	0,508	0,768	0,546	0,6174	0,1258
6	30	300	0,163	0,332	1	0,364	0,433	0,4584	0,0997
7	20	100	0,923	1	0,188	0,742	0,868	0,7442	0,1377
8	20	500	0,341	0,1398	0,269	0	0	0,14996	0,0279
9	20	300	0,631	0,6967	0,964	0,707	0,612	0,7221	0,1488
$w_i$			0,15	0,15	0,25	0,3	0,15		

##### 4.6.1. Обобщена целева функция без тегловни коефициенти $\Phi_1$

Регресионният анализ, респективно синтезът на полинома за обобщената функция на полезност  $\Phi_1$ , представена като средноаритметични стойности на частните функции на полезност (коэффициентите на полезност)  $\eta_i$ , е реализиран посредством програмен продукт QSTATLAB. Полученият регресионен модел е представен по-долу.

$$y_1 \leftrightarrow \Phi_1$$

$$y_1 = 0,78783667 - 0,01113333x_1 + 0,00140657x_2 - 4,31E-6x_2x_2$$



Фиг. 4.38. Модел за  $\Phi_1$  - а) общ вид, б) сечения в повърхнината

В така полученият модел е търсен оптимум по методите на случайно търсене, градиентен алгоритъм и генетичен алгоритъм. Крайните резултати са представени по-долу.

Случайно търсене: 500 итерации	Градиентен алгоритъм:	Генетичен алгоритъм:
$\sum$ $V_0$ $\Phi_1$	$\sum$ $V_0$ $\Phi_1$	$\sum$ $V_0$ $\Phi_1$
10,0460 168,0515 0,7906	10,0000 167,0484 0,7912	10,2710 157,9164 0,7881
2500 итерации		
10,1449 156,7873 0,7895		

Получените резултати и при трите метода показват оптимален режим при  $10^\circ - 10,2^\circ$  ъгъл на кръстосване и подавателна скорост 156 – 168 mm/min, при който обобщената функция на полезност има максимална стойност -  $\Phi_1=0,79$ .

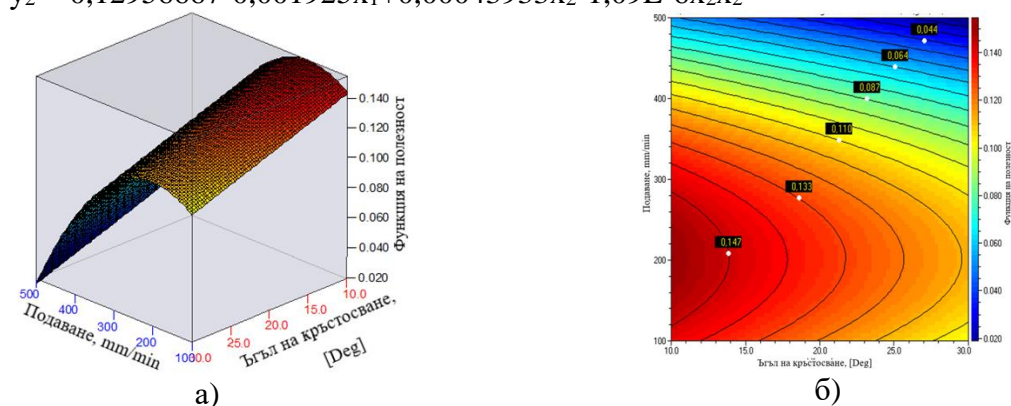
#### 4.6.2. Обобщена функция на полезност с тегловни коефициенти

При съставянето на обобщената средноаритметична функция на полезност с тегловни коефициенти  $w_i$  са приети стойностите, показани в таблици 8 и 9. Даден е превес на параметрите натрупана грешка на стъпката  $F_p$  и най-голяма разлика в стъпката  $R_p$ , съответно със стойности на тегловните коефициенти 0,25 и 0,3.

Създаденият модел на обобщената функция на полезност с тегловни коефициенти е:

$$y_2 \leftrightarrow \Phi_2$$

$$y_2 = 0,12956667 - 0,001925x_1 + 0,00043933x_2 - 1,09E-6x_2^2$$



Фиг. 4.41. Модел за  $\Phi_2$  - а) общ вид, б) сечения в повърхнината

В така получения модел също е търсен оптимум по методите на случайно търсене, градиентен алгоритъм и генетичен алгоритъм.

Случайно търсене 500 итерации	Градиентен алгоритъм:	Генетичен алгоритъм:
$\sum$ $V_0$ $\Phi_2$	$\sum$ $V_0$ $\Phi_2$	$\sum$ $V_0$ $\Phi_2$
10,1147 199,8818 0,1544	10,0000 200,9889 0,1546	10,0623 204,5291 0,1545
2500 итерации		
$\sum$ $V_0$ $\Phi_2$		
10,1123 200,4438 0,1544		

#### 4.7. Експериментална проверка на получените режими

Проверката е направена, като при същите условия, както в т.4.3.1, са обработени две групи по три зъбни колела при определените по-горе режими, както следва:

- първа група - при ъгъл на кръстосване  $\sum=10,2^\circ$  и подавателна скорост  $V_0=160$  mm/min;

- втора група - при ъгъл на кръстосване  $\Sigma=10^\circ$  и подавателна скорост  $V_0=200$  mm/min.

Зъбните колела са измерени съгласно описаната по-горе методика и получените резултати са обобщени в таблица 10.

Получените резултати показват по-добри точностни параметри в сравнение с тези, получени при проведените предварителни енофакторни и многофакторни експерименти. Точността, като цяло е повишена с една степен. При втората серия опити, при завишена тежест на натрупаната грешка на стъпката  $F_r$  и на най-голямата разлика в стъпката  $R_p$  съществува, макар и малка, разлика в получените резултати, като те са по-добри с 10 - 15%.

Обобщени резултати

Таблица 10

№	Фактори		Измерени параметри				
	$\Sigma$ [Deg]	$V_0$ [mm/min]	Отклонени е от профила $F_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Отклонени е в направлени ето $F_b$ [ $\mu\text{m}$ ]	Натрупана грешка на стъпката $F_r$ [ $\mu\text{m}$ ]	Най- голяма разлика в стъпката $R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	Грешка от радиално биене $F_r$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	10,2	160	2,1	5,9	31	18,5	22,5
			3,6	14,3	41	32,6	32,3
			3,5	9,2	35	27	14,8
2	10	200	11,9	2,6	30	20,6	28,3
			7,7	5,3	28	12,9	36,6
			6,1	1,6	21,8	21	21,8

## Заклучение

С настоящия дисертационен труд са постигнати следните по-важни резултати:

Обоснована е необходимостта от решаването на технологични задачи, свързани с реализацията на метода зъбоструговане върху обработващи центри. Доказана е възможността за реализиране на процеса зъбоструговане върху струго-фрезови обработващ център. Основно предимство е възможността за реализирането на нов вариант на кинематиката на процеса при нарязване на наклонени зъби, при който подаването е по направление на зъба и не се налага корекция в ъгловата скорост.

Анализирано е влиянието на конструктивните (модул и ъгъл на наклона на зъбите) и технологичните (брой на зъбите на инструмента и ъгъл на кръстосване на осите) фактори върху процеса зъбоструговане. Обоснован е изборът на брой зъби на инструмента и ъгъл на кръстосване, осигуряващи работата при препоръчителните режими. Направени са препоръки и са построени диаграми. Анализирано е и влиянието на вида на инструменталния материал върху елементите на режима на рязане. Установено е, че при модул, по-голям от 1,5 mm, е препоръчително използването на инструменти от металокерамика. Доказана е ефективността на процеса, позволяващ подавателна скорост  $V_0 = 500$  mm/min.

Обоснована е необходимостта от конструиране и изработване на зъбостругов инструмент в съответствие с конкретния профил на обработваната повърхнина, като определящи за точността са грешките от конструиране и изработване на инструмента, които се наследяват пряко от обработените повърхнини - най-често зъбни профили.

Установено е, че известните аналитични методи за определяне на профила на инструмента са сравнително сложни и са по-подходящи за построяване на профили за контрол на зъбите на инструмента. За практическо приложение са по-подходящи графични или комбинирани аналитико-графични методи за профилиране, които дават възможност за работа и с други видове профили освен еволвентните.



Разработен е метод за графично профилиране, който се основава на възможностите на CAD/CAE софтуер от среден клас и позволява да бъдат построени зъбни профили, чрез които да бъдат профилирани необходимите зъбообработващи инструменти. Реализирана е възможност за автоматизирано генериране на работния профил на зъбостругови инструменти, като профилът на повърхнините на инструмента се получава като спрегнат зъбен профил. Прилагането на симулация във всяка част от работния процес дава възможност за анализ на моделирания профил на инструмента за проверка за зони с наличие на подрязване в основата зъба или подостряне към върха на зъбите. Създадени са възможности за цялостен анализ на работните повърхнини, в това число на преходни участъци, за определяне на контактното петно и на коефициента на препокриване. При необходимост, работният профил може да бъде многократно коригиран и чрез симулация да бъде проверен ефектът от направената корекция.

Разработена е управляваща програма на Siemens 840DSL, реализираща метода на зъбоструговане на базата на функция "Електронна предавка", даваща възможност за контрол на движението на следяща ос според водещата ос, като връзката между тях се определя с коефициент на свързване (предавателно число).

Създадена е методика за експериментална проверка на метода зъбоструговане и оценка на качествените показатели на получения профил на зъбното колело. Избрани са два основни фактора, определящи процеса, и съответни диапазони за изследване. Скоростта на рязане, определена от относителното приплъзване, е в диапазон от 13 m/min до 37,5 m/min, съответно при ъгъл на кръстосване от  $\Sigma=10^\circ$  до  $\Sigma=30^\circ$ , а подавателната скорост е от 50 mm/min до 500 mm/min. В качеството на параметри за оценка на качеството на обработените повърхнини са избрани отклонението от профила на зъба, отклонението в направлението на зъба, натрупаната грешка на стъпката, най-голямата разлика в стъпката и грешката от радиално биене.

Проведени са два предварителни еднофакторни експеримента, като в първия е изследвано влиянието на ъгъла на кръстосване, определящ скоростта на относително приплъзване, а във втория - влиянието на подавателната скорост върху качеството на обработения профил.

Построени са адекватни регресионни теоретико-експериментални модели за отклонението от профила на зъба, отклонението в направлението на зъба, натрупаната грешка на стъпката, най-голямата разлика в стъпката и грешката от радиално биене, отразяващи влиянието на ъгъла на кръстосване и подавателната скорост. Установено е, че двата фактора влияят в една посока, като по-силно е влиянието на втория фактор - подавателната скорост. С нарастването на ъгъла на кръстосване и на подавателната скорост в изследваните диапазони се повишава отклонението в профила с близо 100%, отклонението в направлението на зъба с 50%, натрупаната грешка на стъпката с 20%, най-голямата разлика в стъпката с 40% и грешката от радиално биене до 30%.

Чрез многоцелева оптимизация по концепцията за Парето оптималност и по метода на обобщената функция на полезност са определени условия за реализация на метода зъбоструговане, както следва:

- $\Sigma=12,4^\circ$  и  $V_0=100,1$  mm/min;
- $\Sigma=10,2^\circ$  и  $V_0=160$  mm/min;
- $\Sigma=10,1^\circ$  и  $V_0=200$  mm/min.

Определените стойности на ъгъла на кръстосване и на подавателната скорост осигуряват най-добра комбинация между точностните параметри на обработените зъбни профили.

Методът зъбоструговане може лесно да се реализира върху съвременните стругови машини от клас обработващи центри, като разширява технологичните им възможности за обработка на зъбни и всякакви други периодично повтарящи се профили. Получените резултати за отклонението на профила на зъба доказват, че

методът зъбостругване се характеризира с достатъчна точност за предварително и в определени случаи за окончателно обработване на зъбни профили.

## ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научно-приложни приноси:

Обосновано е реализирането на процеса зъбоструговане при нарязване на наклонени зъби, при който подаването е по направление на зъба и не се налага корекция в ъгловата скорост.

Обоснован е изборът и са построени диаграми за брой зъби на инструмента и ъгъл на кръстосване, осигуряващи препоръчителни режими при рязане.

Доказана е работоспособността на метода зъбоструговане, осигуряваща 7-12 степен на точност

Построени са адекватни теоретико-експериментални модели за отклонението от профила на зъба, отклонението в направлението на зъба, натрупаната грешка на стъпката, най-голямата разлика в стъпката и грешката от радиално биене, отразяващи влиянието на ъгъла на кръстосване и подавателната скорост.

Определени са оптимални условия за реализация на метода зъбоструговане чрез многоцелева оптимизация по концепцията за Парето оптималност и метода на обобщената функция на полезност.

Приложни приноси:

Разработен е метод за графично профилиране, основаващ се на възможностите на CAD/CAE софтуер от среден клас, позволяващ построяване на зъбни профили, необходими при профилирането на зъбообработващи инструменти.

Разработена е управляваща програма за реализация на метода зъбоструговане на базата на функцията "Електронна предавка".

Разширени са технологичните възможности на клас машини с ЦПУ, които се внедряват интензивно в съвременното производство, чрез условия за прилагане на метода зъбоструговане.

## СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Якимов, Х., Й. Митев, И. Александров. Зъбоструговане – перспективи за приложение. -Машиностроене и машинознание, том 28, 2018, 49-53.
2. Якимов, Х. Фактори, влияещи върху скоростта на рязане при зъбоструговане. Научна конференция TechCo – Lovech 2018 г., 153-156.
3. Якимов, Х. Определяне скоростта на рязане при зъбоструговане. Научна конференция TechCo – Lovech 2018 г., 149-152.
4. Якимов, Х. Профилиране на зъбостругов инструмент в CAD/CAE среда I част. -Машиностроене и машинознание, том 31, 2021, 67-71.
5. Якимов, Х. Профилиране на зъбостругов инструмент в CAD/CAE среда II част. -Машиностроене и машинознание, том 32, 2022, 51-55.