



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

**Машинно-технологичен факултет
катедра "Технология на машиностроенето и
металорежещи машини"**

маг. инж. Тодор Стоянов Попов

**ИЗСЛЕДВАНЕ ЕФЕКТИВНОСТТА НА ОПЕРАЦИИТЕ
ПРОБИВАНЕ И ФРЕЗОВАНЕ НА РОЛКОВИ ТАНКЕТИ**

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: Технология на машиностроенето

Научен ръководител: проф. д-р Лъчезар Стоев

СОФИЯ, 2019 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „ТМММ“ към МТФ на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 18.03.2019 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 11.07.2019 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет - София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.1-16 / 20.03.2019 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Доц. д-р инж. Григор Стамболов – председател
2. Проф. д-р инж. Лъчезар Стоев – научен секретар
3. Проф. д-р инж. Ангел Диков
4. Проф. д-тн дхк инж. Николай Минчев
5. Проф. д-тн инж. Симеон Панев

Рецензенти:

1. Проф. д-р инж. Ангел Диков
2. Доц. д-р инж. Григор Стамболов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на МТФ на ТУ-София, блок № 3, кабинет № 3230.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „ТМММ“ на МТФ. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проект.

Автор: маг. инж. Тодор Стоянов Попов

Заглавие: Изследване ефективността на операциите пробиване и фрезоване на ролкови танкети

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Предмет на настоящия дисертационен труд са редица изследвания на процеса челно фрезозане с инструменти с неравномерно разположение на режещите зъби по тяхната периферия. Те са проведени за повишаване на качеството и производителността при обработването на детайли - тип ролкови танкети, които са обект на производствената програма на фирма - „Петров технолоджи“ ЕООД - София, в която авторът работи като технолог. Тези призматични детайли имат по шест страни, като две от тях са разположени спрямо основата му под ъгъл от 45° . С тази си конфигурация детайлът служи като междинен елемент при осъществяването на линейното преместване на различни възли на инструментални машини по техните направляващи, като триенето между тях се осъществява при търкаляне. Танкетата съдържа в себе си набор от търкалящи се сачми или ролки или комбинация от тях плюс сепаратори, които се търкалят по праволинейни улеи с призматично сечение, връщайки се в нарочно оформени рециркулационни отвори.

Цел на дисертационния труд

В резултат на изводите от анализа на проучените литературни източници е формулирана следната цел на дисертацията:

Изследване на ефективността на операцията непълно симетрично челно фрезозане на равнинни повърхнини на ролкови танкети с фрезови инструменти с неравномерно ъглово разположение на режещите пластини по тяхната периферия, както и провеждане на изследвания на процесите за пробиване на рециркулационните и скрепителни отвори на същите детайли, с оглед постигане на високо качество на обработените повърхнини и производителност на отделните операции.

Научна новост

В настоящия дисертационен труд експериментално е изследвана нова схема за челно фрезозане. При нея оста на инструмента е наклонена под малък противоположен ъгъл спрямо посоката на надлъжното подаване в сравнение с класическата технология. При новата схема повече режещи зъби са в едновременно контакт с материала, вследствие на което се повишава стабилността на инструмента и се гасят принудените трептения. В рязането участват, както главните режещи ръбове, така и спомагателните, които вторично калиброват повърхнината. Това резултира в подрязване на върховете на грапавините и чувствително подобряване на грапавостта. При еднакви режими и условия на рязане отклоненията от равнинност на детайлите намаляват при новата схема, а при класическата се увеличават.

Конструирани, изработени и изследвани са нови конструкции на инструменти с неравномерно разположение на режещите пластини по

тяхната периферия. В литературните източници е възприето те да се наричат: инструменти с „диференциално делене“. Ацикличното връзване на режещите им ръбове в обработвания материал допринася за намаляване на вероятността от появата на резонанс и спомага за гасене на принудените трептения. Това резултира в подобряване на грапавостта.

С помощта на сравнително графично моделиране е изяснен механизмът на образуване на микрограпавините при фрезозане със стандартна и двузъба фреза с „диференциално делене“ при отчитане на радиалното и аксиално биене на зъбите.

Извършено е математическо моделиране и оптимизация за определяне на грапавостта на фрезозаните повърхнини при отчитане на влиянието на значимите елементи на режима на рязане и вида на използваните стандартни или специализирани инструменти.

Практическа приложимост

Резултатите от проведените експерименти по новата схема за челно фрезозане с авторските конструкции на инструменти с „диференциално делене“ се използват в условията на фирма „Петров технолоджи“ ЕООД и в учебния процес на катедра ТМММ на МТФ. В същата фирма са внедрени следните две нови технологични схеми: за обработване на стъпални отвори за болтове със скрита глава в наклонени повърхнини на ролкови танкети и за свредловане на техните рециркуляционни отвори.

Апробация

В завършен вид дисертационната работа е докладвана и обсъдена на заседание на катедра ТМММ на МТФ при ТУ-София. Основните резултати от нея са докладвани и обсъдени на международната юбилейна научна конференция „70 години МТФ“, проведена през септември 2015 г.

Публикации

Основното съдържание на дисертационния труд е отразено в 9 научни публикации, поместени в списания и сборници от научни конференции, както следва: сп. „Машиностроене и електротехника“, сп. „Машиностроене и машинознание“ и Международна научна конференция „70 години МТФ“.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от (146) страници, като включва увод, 4 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо (88) литературни източници, като (33) са на латиница и (43) на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо (115) фигури и (12) таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА ПЪРВА: СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА И ОСНОВНИ ЗАДАЧИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ

Настоящата дисертация е породена от необходимостта за разрешаване на конкретни технологични проблеми, свързани с производството на корпусен детайл - съчмена или ролкова танкета, осигуряваща линейно преместване на възли от инструментални машини чрез търкаляне. Тя е обект на производство във фирма „Петров технолоджи“ ЕООД, София. Детайлът танкета е част от производствената програма на немския концерн Bosch Rexroth GmbH, с който фирма „Петров технолоджи“ ЕООД работи в сътрудничество от много години.

За осъществяване на производително обработване на равнинните повърхнини на този детайл е необходимо провеждане на сравнителни изследвания на класически и специализирани фрезови инструменти, както и експериментиране на нова схема за фрезоване.

1.1 Основни насоки за изследвания

Основните насоки за изследвания и оптимизации в настоящата дисертация с *подчертано технологична насоченост* са следните:

- изследване на процеса челно фрезоване с нови конструкции на инструменти с „диференциално делене“, както и
- провеждане на сравнително изследване на класическата схема за челно фрезоване с нова схема за обработване на равнинни повърхнини при друго позиционно разположение на инструмента спрямо заготовката и посоката на надлъжното подаване.

Дисертацията е посветена и на разрешаване на проблемите:

- при обработване на скрепителните отвори на ролкови танкети в наклонени повърхнини, както и
- при дълбокото свредловане на рециркулационните отвори на тези детайли.

1.2 Изводи от литературния обзор

В резултат на направения анализ на подходите за фрезоване на външните повърхнини на детайла „танкета“ и за свредловане на негови характерни отвори, както и въз основа на направения аналитичен обзор, се налагат следните изводи:

- Не е напълно изследвано влиянието на различното разположение на режещите пластини по периферията на инструментите за челно фрезоване при вариране с периферната, радиалната и осовата стъпка на зъбите, установъчната геометрия, биенето и подаването за зъб, по отношение на формирането на топографията на фрезованата повърхнина.

- Липсва публична информация за технологични подходи за свредловане на рециркулационни отвори на ролкови танкети, които са ноухау за фирмите производители. В единствената фирма „Петров технолоджи“ ЕООД, която произвежда тела за ролкови танкети в Р България, не е изследвано влиянието

на геометрията, конструкцията и покритията на различни инструменти за свредловане на рециркулационни отвори на тези детайли, с оглед осигуряване на предписаната точност на формата, размерите и грапавостта на обработените повърхнини, за достигане на оптимална производителност и ниска себестойност на операцията, при отчитане на специфичния материал за заготовката - лагерна стомана 100CrMo7-3.

- Липсват достъпни литературни данни за проведени сравнителни експериментални научно-приложни изследвания и оптимизации на режимите на рязане при свредловане на рециркулационните отвори на ролковите танкети с различни инструменти, с оглед избиране на най-подходящия.

- Намирането на подходящо технологично решение и инструменти за свредловане на отвори в наклонени повърхнини трябва да се съобразява при всяко отделно производство с конструкцията и техническите изисквания за всеки конкретен детайл по отношение на предписаната точност на размерите, формата и грапавостта на обработените отвори, както и с технологичните възможности на оборудването на конкретния производител.

- Търсенето на ново ефективно решение за замяна на операцията шлифване с подходящ метод и инструменти за челно фрезоване на универсални или цифрови машини, които не са предназначени за високоскоростно обработване, с оглед постигане на сравнима точност на размерите, малки отклонения от равнинност и ниска грапавост на фрезованите детайли е трудно постижимо и намирането на такова решение е предизвикателство за конструкторите и технолозите.

- Липсват конкретни литературни данни за препоръчителни режими за челно фрезоване на детайли от лагерна стомана 100CrMo7-3 за определяне на влиянието на геометрията на инструментите върху грапавостта и равнинността на обработените детайли.

- Не е изследвано влиянието на различния наклон на оста на инструмента спрямо посоката на надлъжното подаване при челно фрезоване, спрямо посоката на надлъжното подаване, с оглед оценяване на влиянието на позиционното разположение на челната фреза върху качествените показатели на обработените детайли на машини с различна стабилност, универсални и с CNC-управление.

- Известни са относително малък брой сравнителни резултати от проведени изследвания за определяне на влиянието на инструментите с „диференциално делене“ върху демпфирането на принудените трептения при челно фрезоване, с оглед определяне на резултантната грапавост и отклоненията от равнинност на обработените детайли.

1.3 Задачи, произтичащи от целта

По отношение на пробиваните отвори

1. Да се извърши сравнително изследване и оптимизация на режимите за свредловане на рециркулационните отвори на ролкови танкети с инструменти с различна конструкция, геометрия и покрития, с оглед осигуряване на предписаната точност на формата, размерите и грапавостта на обработените повърхнини, при постигане на оптимална производителност и ниска себестойност на операцията.
2. Да се изследват подходящи технологични схеми, инструменти и режими за свредловане на отворите за скрепителни болтове със скрита глава в наклонените повърхнини на ролкови танкети, с оглед повишаване на производителността на тази операция, при постигане на предписаната точност на размерите, формата и грапавостта на обработените отвори.. за челно фрезоване, при вариране с периферната, радиалната и осовата стъпка на зъбите, установъчната геометрия, биенето и подаването за зъб, върху формирането на топографията на фрезованата повърхнина.

По отношение на външните повърхнини на детайла

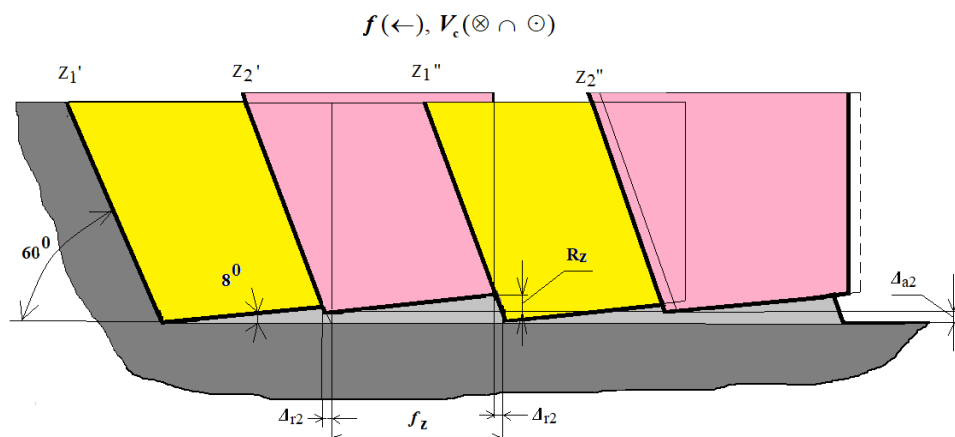
3. Да се извърши сравнително експериментално изследване на влиянието на инструменти за челно фрезоване с равномерно и неравномерно ъглово разположение на режещите пластини по тяхната периферия върху грапавостта и равнинността на обработените ролкови танкети, при факторно вариране на елементите на режима на рязане и еднакви постоянни условия на опитите.
4. Да се направи статистически анализ на резултатите от опитните изследвания на процеса непълно симетрично челно фрезоване с инструменти с постоянна и променлива ъглова стъпка на режещите пластини по тяхната периферия, като се изведат регресионни зависимости за определяне на влиянието на елементите на режима на рязане върху грапавостта на обработените повърхнини и да се извърши еднопараметрична оптимизация.
5. Да се направи сравнително изследване на класическата схема за непълно симетрично челно фрезоване с нова схема за обработване с противоположен наклон на оста на инструмента спрямо посоката на надлъжното подаване, с оглед оценяване на влиянието на различното позиционно разположение на челната фреза върху качествените показатели на обработените ролкови танкети, фрезовани върху машини с различна стабилност.
6. Да се проведе сравнително пълно факторно изследване за определяне на влиянието на елементите на режима на рязане при челно фрезоване с инструменти с постоянно и променливо разположение на режещите пластини по тяхната периферия върху степента на гасене на принудените трептения, с оглед определяне на резултантната грапавост и отклоненията от равнинност на обработените детайли.

ГЛАВА ВТОРА: ГРАФИЧНО МОДЕЛИРАНЕ НА ТОПОГРАФИЯТА НА ФРЕЗОВАНИ ПОВЪРХНИНИ

Втората глава на дисертационния труд е посветена на резултатите от проведено графично моделиране за определяне на влиянието на някои фактори при фрезование с инструменти с „диференциално делене“ върху топографията на обработените повърхнини. Оценява се и влиянието на променливата радиална и аксиална стъпка на зъбите върху формираната грапавост. В тази глава се разглежда случаят на фрезование с двузъба фреза.

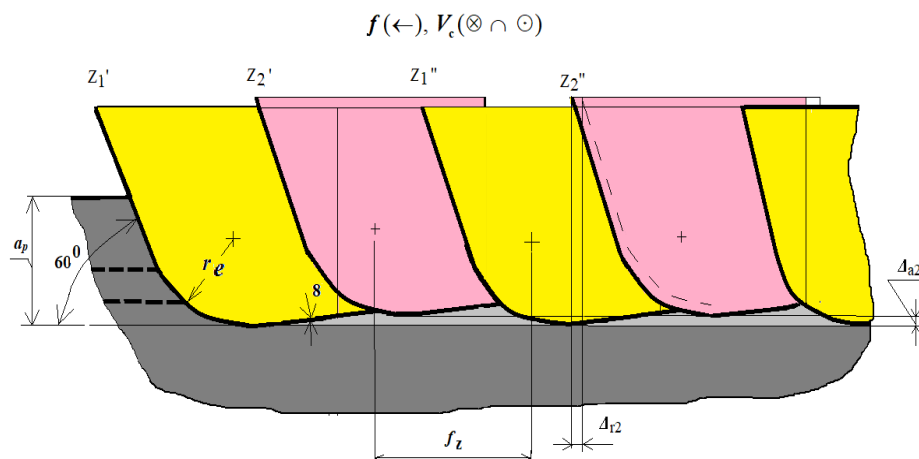
2.1 Графично изследване на микрограпавините при рязане с двузъба фреза

На фиг. 2.2 е показан резултат от графичната визуализация на разположението на срязваните сечения от отделните зъби във вид на последователно образуващи се площи, по направление на подавателната скорост, получени от фреза с установъчни ъгли $\chi_r = 60^\circ$ и $\chi_r' = 8^\circ$. В случая е илюстрирано едновременното влияние на двата вида биене (радиално и аксиално) на зъбите при двузъбата фреза, обект на настоящите изследвания.



Фиг. 2.2 Моментна картина на срязваните слоеве по направление на подавателната скорост от двузъба фреза с установъчна геометрия $\chi_r = 60^\circ$ и $\chi_r' = 8^\circ$

На фиг. 2.4 са илюстрирани напречните сечения по направление на



Фиг. 2.4 Моментна картина на срязваните слоеве по направление на подавателната скорост от двузъба фреза с установъчна геометрия $\chi_r = 60^\circ$, $\chi_r' = 8^\circ$ и радиус при върха r_e

подавателната скорост на срязвания слой материал от последователно врязващите се два режещи зъба на фреза с установъчна геометрия, аналогична на тази от фиг. 2.2, като между главния и спомагателния режещ ръб е въведен преходен радиус r_e .

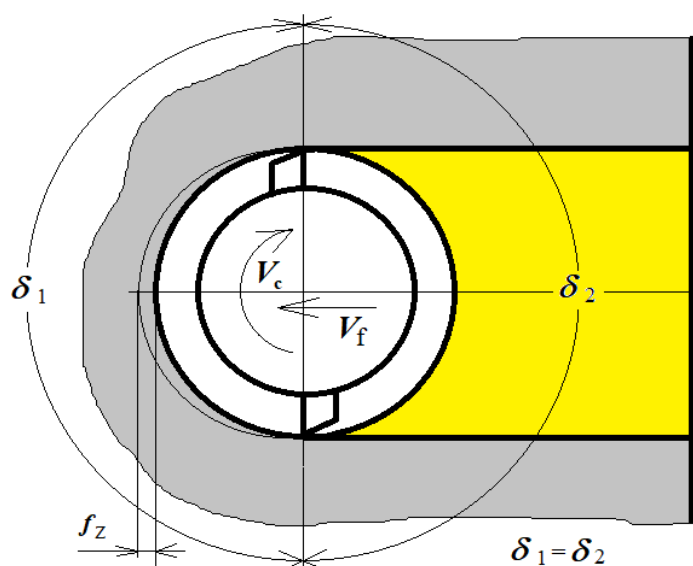
От направените аналитични изследвания могат да се направят следните обобщения:

- геометричните параметри на режещата част на инструмента влияят несъмнено върху качеството на обработваната повърхнина при фрезозане;
- експлоатационните фактори - елементите на режима на рязане и в най-голяма степен подаването в неговите разновидности - за оборот, за минута, за зъб, също определят качеството на обработаната повърхнина при фрезозане;
- биенето в неговите две разновидности (радиално и аксиално) оказва своето въздействие върху качеството на обработаната повърхнина;
- заложената неравномерност на разположението на зъбите също влияе върху качеството на обработаната повърхнина.

Следователно при реални експерименти трябва да бъдат отчитани всички тези фактори, за оптимизиране на условията на рязане и получавания микрорелеф на повърхнината.

2.2 Аналитично изследване на неравномерността при фрезозане с двузъба челна фреза

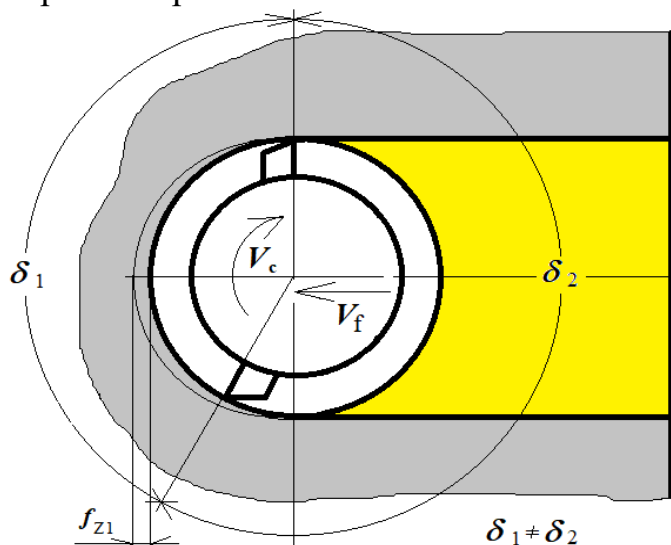
В този раздел аналитично се изследва рязането с двузъба фреза. При този инструмент се получава значителна неравномерност, предвид на това, че периодите на рязане и липса на рязане, в рамките на един оборот, са силно различни. При рязане с двузъба фреза, при която двата зъба са разположени симетрично на 180° по периферията на инструмента, е невъзможно да се осъществи едновременното им врязване в материала. В този случай на симетрично и пълно фрезозане, илюстриран на фиг. 2.7, когато фрезата се е



Фиг. 2.7 Фрезозане с двузъба симетрична фреза с два еднакви контактни ъгъла $\delta_1=180^\circ$ и $\delta_2=180^\circ$

врязала напълно в заготовката, в момента на врязване на единият зъб, другият напуска зоната на рязане. Случаят, при който двата зъба не са разположени симетрично по периферията на инструмента, е различен. При него, в рамките на един оборот, има период, в който двата зъба режат едновременно, в друг период двата зъба няма да режат, в трети период ще реже само първият зъб, а в четвърти период ще реже само вторият.

Фиг. 2.8 илюстрира случая на двузъба фреза с произволна неравномерност.

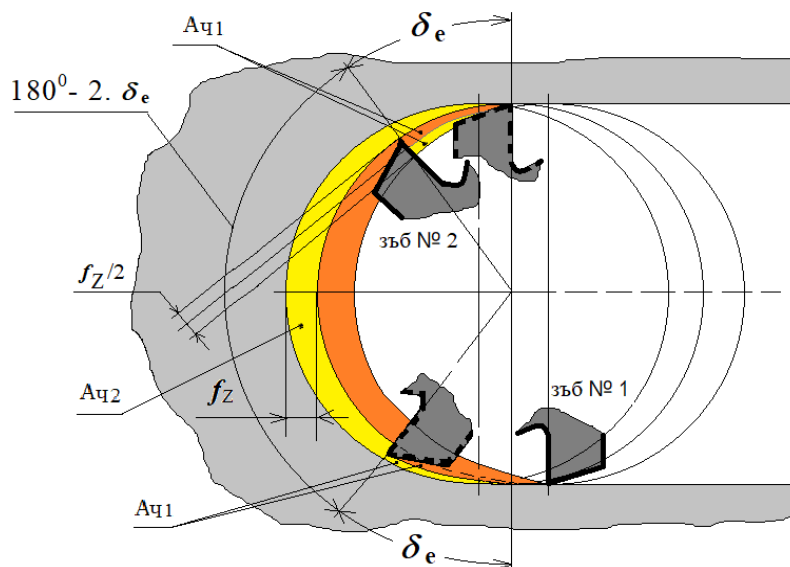


Фиг. 2.8 Фрезование с двузъба несиметрична фреза с различни контактни ъгли

В дисертационния труд са направени пресмятания, в основата на които е известната зависимост: $\mu = \frac{A_{чmax}}{A_{чср}}$ (2.1), за да се оцени неравномерността на процеса фрезование. В тази формула използваните символни обозначения имат следния смисъл: μ - относителен коефициент на неравномерност, $\mu \in \{0 \div 1\}$, $A_{чmax}$ - максимална площ на срязваното сечение от всеки зъб в mm^2 и $A_{чср}$ - средна стойност на срязваното сечение от зъбите в mm^2 .

При анализа на извършените пресмятания за двузъба фреза с несиметрично периферно разположение на зъбите, типичен представител на многозъбите инструменти с „диференциално делене“, се установи, че с нарастване на отношението δ_1/δ_2 се увеличава неравномерността на процеса фрезование, оценявано с коефициента μ .

Фиг. 2.10 илюстрира общия случай, при който зъбът № 1, с по-малкия централен ъгъл, започва да реже. В този момент другият зъб № 2 – този с по-големия централен ъгъл, все още не е срязал докрай своята прибавка.



Фиг. 2.10 Илюстрация на последователността на рязане с двузъба фреза с „диференциално делене“

Получава се така, че в един интервал от време, съответстващ на разликата в централните ъгли на двата зъба (δ_1 и δ_2), те работят заедно, като си разпределят прибавката в рамките на нейната дебелина. В момента, в който зъб № 2 излезе от контакт, зъб № 1 продължава да реже.

С помощта на уравнения (2.4) и (2.5) са пресметнати поредица от

стойности при условията на горния пример. Резултатите са отразени в таблица 2.3.

$$A_{q1} = (D/2) \cdot \delta_e \cdot (f_z/2) \cdot \sin \delta_e; \quad (2.4)$$

$$A_{q2} = (D/2) \cdot 2 \cdot \delta_e \cdot f_z \cdot \sin \delta_e/2. \quad (2.5)$$

Таблица 2.3				
$\delta_e, ^\circ$	20	40	60	80
δ_e, rad	0,349	0,698	1,047	1,396
δ_1 / δ_2	160/200	140/220	120/240	100/260
A_{q1}, mm^2	1,19	4,48	9,06	13,7
A_{q2}, mm^2	1,21	4,77	10,37	17,96
A_{q2}/A_{q1}	1,07	1,06	1,14	1,31

Получените резултати показват, че натоварването на двата зъба от двузъбата фреза, при наличието на кръгова асиметрия в разположението на зъбите в рамките на контактният ъгъл и при нарастване на асиметрията до

60° , което отговаря на съотношение в диапазона от $180^\circ/180^\circ$ до $100^\circ/260^\circ$, се наблюдава претоварване на първия зъб до 14%. Това може да се приеме като напълно допустимо от гледна точка на силовото натоварване, което достига стойности от порядъка на 50%, получаващо се в резултат от естественото износване на зъбите на фрезата при рязане.

При използване на формулите 2.4 и 2.5 в дисертацията е отчетен особеността на разпределение на прибавката между асиметрично разположените зъби на двузъба фреза. Получените резултати показват в теоретичен план, че варирането с δ_e може да се направи в рамките на диапазона:

$$\delta_e \in \{(0,11 \div 0,33) \cdot \delta_{\max}\} \quad (2.6)$$

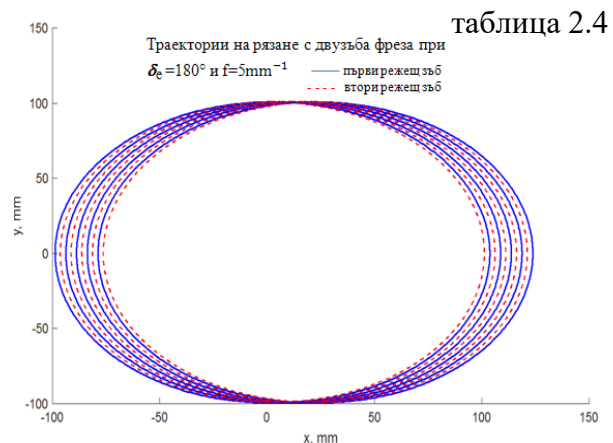
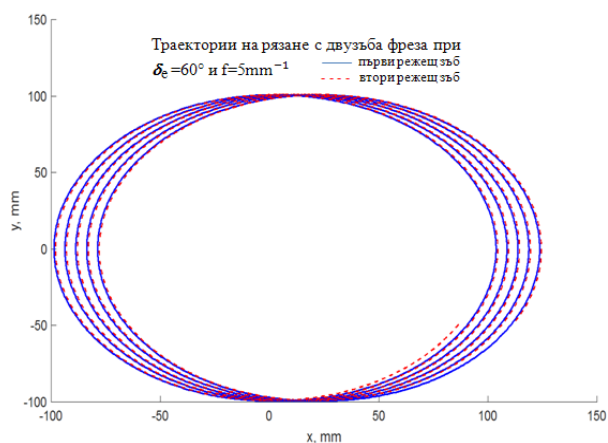
Този диапазон има практическа стойност, свързана с конструирането на инструменти с „диференциално делене“. Разбира се, този извод се отнася за схемата на пълно симетрично фрезозане, при която $\delta_{\max}=180^\circ$.

2.3 Симулационни изследвания на двузъба фреза с помощта на уравненията на скъсената циклоида

С помощта на програмния продукт Matlab е извършена симулация на динамичното поведение на двузъба фреза с неравномерна периферна стъпка. За целта са използвани уравненията на скъсената циклоида (трохоида):

$$x = f \cdot n - r \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot n - \delta_e) \quad (2.9) \quad \text{и} \quad y = f - r \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot n - \delta_e) \quad (2.10),$$

и стойностите от таблица 2.3, за да бъдат графично представени траекториите на двата зъба. Такива два резултата от симулациите са илюстрирани в извадка от табл. 2.4



при променлив контактен ъгъл δ_c . В дисертацията са илюстрирани различни статични картини на скъсените циклоиди за съответните два зъба.

Доказано е, че при увеличаване на неравномерността в разположението на зъбите по периферията на инструмента се увеличава неравномерността на разпределението на следите от върховете на зъбите върху обработваната повърхнина в рамките на един оборот. Установено е, че увеличаване на δ_c намалява неравномерността, като при $\delta_1 = \delta_2 = 180^\circ$ разположението на двете циклоиди е максимално равномерно.

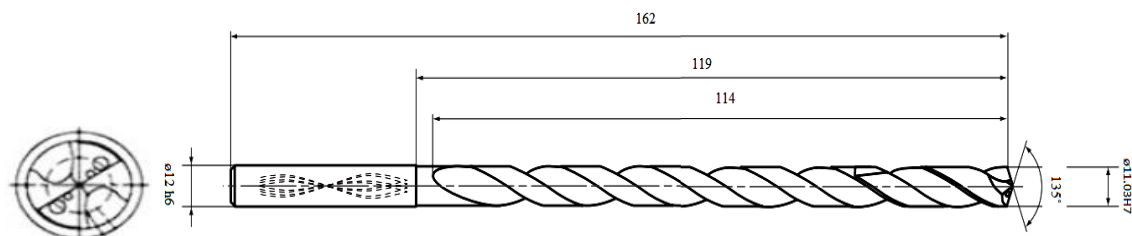
2.4 Изводи и констатации от глава втора

Постигнатите теоретични резултати във втората глава на настоящия дисертационен труд могат да бъдат обобщени със следните изводи:

1. Потвърдени са по различен аналитичен подход редица известни зависимости, свързани с експлоатацията на двузъба фреза, явяваща се представител на гамата многозъби фрези с минимален брой зъби.
2. Изведени са доказателства за качеството на обработваната повърхнина при фрезование. Доказано е, че влияние оказват редица фактори като: подавателната скорост, (разглеждана в нейните разновидности, като подаване за оборот, за минута и за зъб), радиусът при върха между двата режещи ръба в основната равнина, установъчната геометрия в същата равнина, радиалното и аксиално биене, както и съчетанието от всички изброени.
3. Изследвани са аналитично случаите при неравномерно радиално разположение на зъбите на двузъба фреза, като е проведено изследване върху неравномерността на рязане.
4. Въведен е нов критерий за оценка на неравномерността на рязане при фрезование с двузъба фреза с радиално неравномерна стъпка, с който се оценява отношението между срязваните площи от двата режещи зъба, при вариране с неравномерния характер на взаимното разположение на зъбите.
5. С помощта на изведените зависимости 2.5 ÷ 2.8 е възможно да се проектират и конструират фрези с неравномерна кръгова (периферна) стъпка при отчитане на минималната неравномерност.
6. С помощта на програмен алгоритъм и при използване на уравненията на скъсената циклоида са построени графики на динамичното поведение на двузъба фреза с варираща неравномерна стъпка. Доказано е аналитично, че с намаляване на неравномерността се постига по-равномерно разпределение на следите от траекториите на зъбите.

фактори (машина, приспособления, MOT) са едни и същи, както при експеримента с немските свредла. Необходимо е да се обърне внимание върху факта, че свредлата на фирма SAU имат двойни за всяко перо канали за MOT или общо четири, а тези на MK Tools имат само по един канал на перо или общо два канала.

В таблица 3.1 са отразени резултатите от този експеримент. На фиг. 3.5 е показана скица на свредлото на фирма SAU.



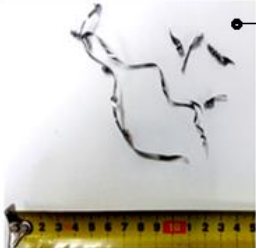
Фиг. 3.5 Скица на свредлото на SAU

В този случай може да се посочат подходящи стойности за елементите на режима: $V_c = 66$ m/min, $V_f = 270$ mm/min ($f = 0,142$ mm/rev, $f_z = 0,071$ mm/z), при които трайността на инструмента е най-голяма (55 m), а несъосността на отворите - минимална (0,001 mm). Стружките са малки, подходящи за транспортиране в стружкоотвеждащите канали.

Таблица 3.1

Режим на рязане:						Резултати:			Бележки:
	n [rpm]	V_c [m/min]	V_f [mm/min]	f [mm/rev]	f_z [mm/tooth]	Ø [mm]	несъосност	трайност	
	2100	73	220	0.105	0.052	11.035	0.003	5 метра	неравномерно износване, лошо стружкочупене
	2000	69	240	0.12	0.06	11.033	0.002	35-40 метра	нормално стружкочупене
	1900	66	270	0.142	0.071	11.032	0.001	55 метра	равномерно износване, добро стружкочупене





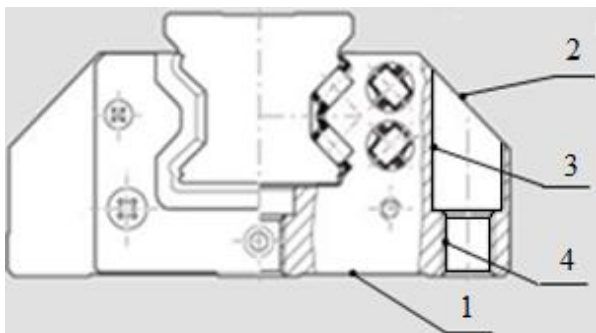


В резултат на направените експерименти във фирма „Петров технолоджи“ ЕООД има създадена алтернативна възможност за избор между двете свредла с близки икономически параметри.

3.2 Избор на технологична схема и инструменти за обработване на отвори за скрепителни болтове със скрита глава в наклонени повърхнини на ролкови танкети

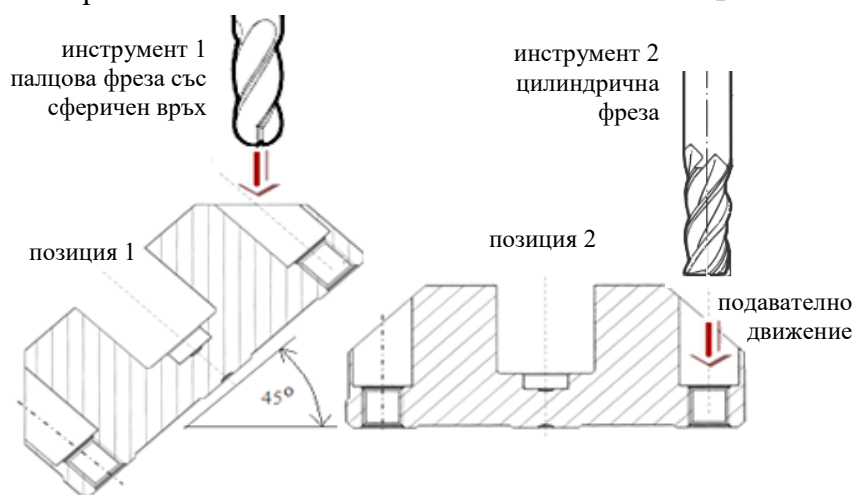
Фиг. 3.6 илюстрира детайла-танкета в поглед отстрани, с частичен разрез на отворите за скрепителните болтове. Тези отвори са стъпални с две

цилиндрични повърхнини, поз. 3 и поз. 4. В началото на обработването се свредлова по наклонената равнина, поз. 2, разположена под 45° спрямо основата. Танкетата се базира в приспособление по главната база, поз. 1.



Фиг. 3.6 Разрез през стъпалния отвор за скрепителните болтове на танкетата

При търсенето на оптимално технологично решение бяха изпитани *четири технологични подхода*. Резултатите от направените тестове при четвъртия технологичен подход (фиг. 3.7) удовлетвориха изискванията по отношение на постигнатата максимална производителност, точност на формата, размерите на стъпалото и грапавост на обработената повърхнина.



Фиг. 3.7 Илюстрация на четвъртия технологичен подход

Установи се, че последователното двупозиционно фрезозване, със сферична фреза и с размерна челно-цилиндрична фреза е най-подходящото технологично решение за постигане на висока точност на формата и размерите на стъпалните скрепителни отвори,

както и за постигането на ниска грапавост.

3.3 Изводи и констатации от глава трета

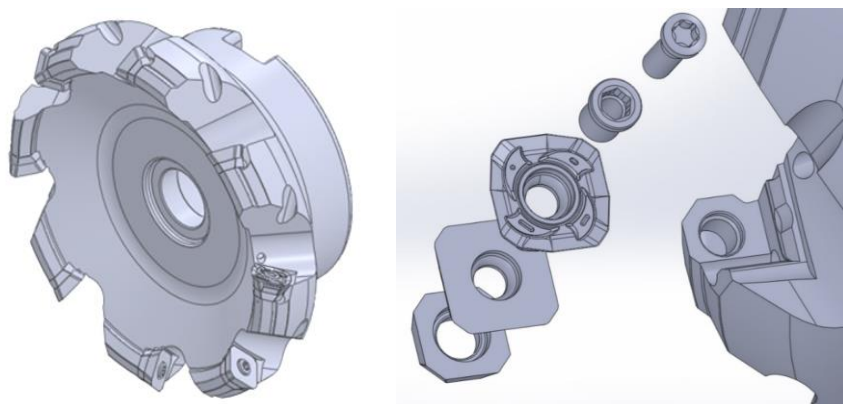
1. В резултат на проведените експерименти при обработване на стъпални отвори в наклонени под 45° повърхнини на ролкови танкети, при изследваните различни схеми на позиционно разположение на инструментите спрямо заготовката и при използване на подходящи цикли за обработване, се установи, че последователното двупозиционно фрезозване с радиусна фреза и с размерен челно-цилиндричен инструмент е най-подходящото технологично решение за постигане на изискваната грапавост и висока точност на формата и размерите на отворите.

2. При проведените сравнителни експерименти със свредла на фирмите MK TOOLS и SAU се установи, че с инструментите на фирма SAU се постигат изискванията на възложителя, фирма Bosch Rexroth GmbH за осигуряване на предписаната точност на размерите, формата и грапавостта на обработените рециркуляционни отвори на ролкови танкети при осигуряване на висока производителност и ниска себестойност на операцията.

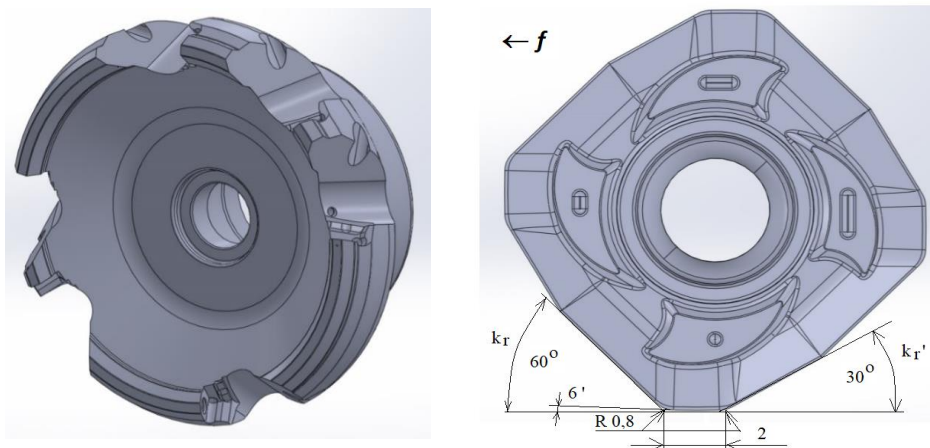
ГЛАВА ЧЕТВЪРТА: ТЕХНОЛОГИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА НОВА СХЕМА ЗА ЧЕЛНО ФРЕЗОВАНЕ

4.1 Конструирание и изработване на челно-цилиндрични фрези с равномерно и неравномерно ъглово разположение на режещите пластини

В съответствие с направения обзор и поставените задачи, следващи целта на настоящия дисертационен труд, беше разработена документацията на три реални конструкции челно-цилиндрични фрези. В рамките на договор № 131ПД002-05/ 2015 г. за подпомагане на темата на дисертацията, сключен с Научно-изследователския сектор (НИС) към Техническия университет - София, беше финансирано конструирането и изработването на тези инструменти. При проектирането авторът е ползвал консултациите на специалисти от италианската фирма SAU за уточняване на редица конструктивни параметри като: брой зъби (8), външен диаметър ($\varnothing 125$), избор на режещи пластини, конструкция на гнездата за пластините и редица други. Последователно на следващите фигури са представени проектираните фрези, като за стандартната конструкция, тази с равномерната стъпка, са илюстрирани повече на брой изображения. При първата фреза, № 1 на фиг. 4.1, зъбите са равномерно кръгово разположени по периферията на инструмента. При втората фреза, № 2 зъбите са неравномерно разположени и с малки отклонения (до 5^0) в периферната стъпка. Точните стойности на ъгловото разположение на зъбите са конфиденциална информация и те съзнателно не са нанесени на фигурата, (поради изричното изискване на фирмата производител.) При третата фреза, № 3 на фиг. 4.3 отклонението в окръжната стъпка е значително - до 30^0 . При конструирането на фреза № 3 са взети предвид, както подходите, така и резултатите от работата на редица автори, чиито разработки са били обект на анализ в предходните глави. Поради споменатата причина стойностите на ъгловите стъпки на разположението на режещите зъби не са нанесени на следващите фигури. Инструментът е съзнателно представен в аксонометрия.



Фиг. 4.1 Пространствен 3D-проект на стандартната фреза, № 1 с равномерна окръжна стъпка (8×45^0)



Фиг. 4.3 3D-изображение на нестандартната фреза № 3 с големи (до 30°) отклонения в окръжните стъпки на режещите пластини

На фиг. 4.4 са показани в сравнителен план снимки на трите фрези, изработени от италианския производител на режещи инструменти SAU.



фреза № 1

фреза № 2

фреза № 3

Фиг. 4.4 Снимки на трите конструкции фрези в сравнителен план

4.2 Изследване на влиянието на отклонението от перпендикулярност на оста на фрезата спрямо обработваната повърхнина върху нейната грапавост

Фиг. 4.5 сравнява позиционното разположение на инструмента и заготовката при класическата схема за фрезование и при нова схема, обект на технологичните изследвания в настоящата дисертация. При традиционното разположение, илюстрирано на схема №1, фрезата започва и завършва обработването със своята периферия. Нейната ос е наклонена под малък ъгъл θ така, че челото на фрезата не докосва обработената повърхнина. При втората авторска схема № 2, челото на фрезата е в непрекъснат контакт с обработваната повърхнина. Това се осигурява поради наличието на противоположния малък наклон θ на оста на фрезата в посока, обратна на подавателната скорост.

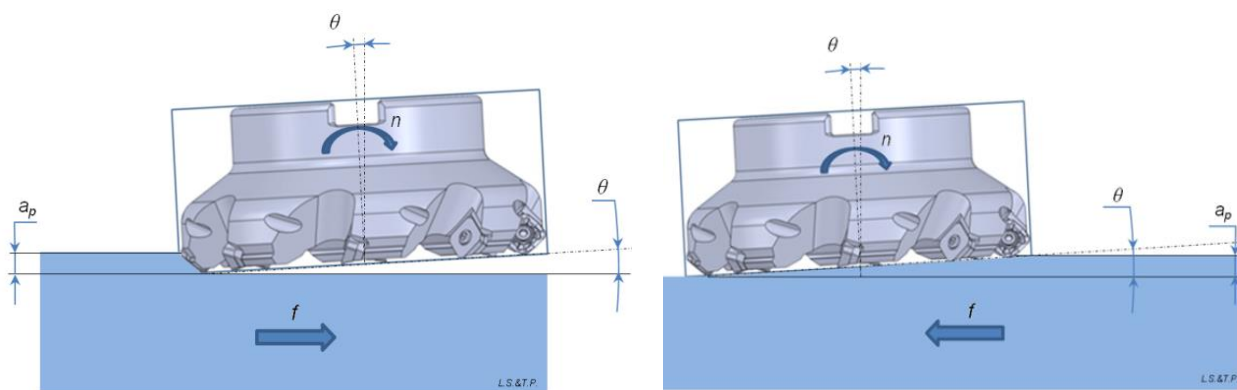


схема № 1

схема № 2

Фиг. 4.5 Две схеми на фрезование: с периферията на фрезата (схема № 1) и едновременно с периферията и с челото (схема № 2)

Проведени бяха експерименти по двете технологични схеми и в резултат от направените изследвания се определи влиянието на посоката на подаването f и на ъгъла на установяване на оста на фрезата θ , спрямо повърхнината на фрезование, върху грапавостта Ra на обработените повърхнини. Опитите с трите инструмента са проведени при еднакви режими на рязане върху обработващ център Rais M650 в условията на фирма “Петров технолоджи” ЕООД, както и върху универсална фрезова машина ФУ 321 в лабораторията на катедра ТМММ в ТУ-София.

Експерименти в лабораторията на катедра ТМММ

При схема № 1 от фиг. 4.5 фрезата реже само с по-ниско разположената си „предна страна“. „Задната“ страна на инструмента не е в контакт със заготовката. В резултат от това се получава известна вдлъбнатост на фрезованата повърхнина. Всеки зъб оставя следа от своята траектория-циклоида *еднократно* върху фрезованата повърхнина.

При схема № 2 от фиг. 4.5 рязането започва с „предната страна“ на фрезата, но с навлизането на цялото чело на инструмента в материала режат всички зъби и от противоположната задна страна. Зъбите от атакуващата страна на фрезата режат със своите главни режещи ръбове, а същите тези зъби от „обратната“ „задна“ страна на инструмента калиброват повърхнината със своите спомагателни режещи ръбове. По този начин веднъж зъбите са режещи в зоната на тяхното връзване по посоката на подавателната скорост и втори път същите тези зъби изпълняват ролята на калибровачи и загладящи повърхнината на фрезование.

В таблица 4.1 е показана матрицата на експерименти, реализирани *при схема № 1* върху стоманени заготовки за ролкови танкети при непълно симетрично фрезование. При съпоставяне на стойностите от таблицата се вижда, че използването на фреза № 1 осигурява по-добра грапавост в пет от осемте случая. Този резултат може да се обясни с това, че при фрезование само с „атакуващата“ страна на инструмента и без участието на

спомагателните режещи ръбове в ролята на калибровачи, стандартната фреза оформя от началото до края на процеса на рязане относително по-равномерна грапавост, в сравнение с инструментите № 2 и № 3.

Таблица 4.1

№ на опита	n min^{-1}		f mm/min		a_p mm		$Ra_{cp.}$ за фреза № 1	$Ra_{cp.}$ за фреза № 2	$Ra_{cp.}$ за фреза № 3
1	-1	400	+1	100	-1	1,5	0.35 μm	0.37 μm	0.40 μm
2	-1	400	-1	80	-1	1,5	0.33 μm	0.30 μm	0.35 μm
3	-1	400	-1	80	+1	2,25	0.35 μm	0.34 μm	0.39 μm
4	-1	400	+1	100	+1	2,25	0.37 μm	0.40 μm	0.47 μm
5	+1	630	-1	80	-1	1,5	0.22 μm	0.25 μm	0.27 μm
6	+1	630	-1	80	+1	2,25	0.23 μm	0.30 μm	0.32 μm
7	+1	630	+1	100	-1	1,5	0.24 μm	0.22 μm	0.26 μm
8	+1	630	+1	100	+1	2,25	0.26 μm	0.28 μm	0.30 μm

В таблица 4.2 е показана матрицата на други експерименти, реализирана при схема № 2 върху аналогични стоманени заготовки.

Таблица 4.2

№ на опита	n , min^{-1}		f , mm/min		a_p , mm		$Ra_{cp.}$ за фреза № 1	$Ra_{cp.}$ за фреза № 2	$Ra_{cp.}$ за фреза № 3
1	-1	400	+1	100	-1	1,5	0.85 μm	0.67 μm	0.67 μm
2	-1	400	-1	80	-1	1,5	0.87 μm	0.80 μm	0.73 μm
3	-1	400	-1	80	+1	2,25	0.88 μm	0.71 μm	0.67 μm
4	-1	400	+1	100	+1	2,25	0.77 μm	0.66 μm	0.68 μm
5	+1	630	-1	80	-1	1,5	0.51 μm	0.33 μm	0.29 μm
6	+1	630	-1	80	+1	2,25	0.76 μm	0.35 μm	0.28 μm
7	+1	630	+1	100	-1	1,5	0.42 μm	0.44 μm	0.29 μm
8	+1	630	+1	100	+1	2,25	0.36 μm	0.37 μm	0.20 μm

При съпоставяне на получените опитни данни в таблица 4.2 се вижда, че при всичките 8 опита средната грапавост $Ra_{cp.}$ на детайлите е по-ниска при използване на нестандартните фрези с неравномерно разположение на твърдосплавните пластини по тяхната периферия. Причината за осигуряваната по-добра грапавост на фрезованите детайли от специализираните инструменти се корени в неравномерната ъглова стъпка на разположението на режещите им пластини, които допълнително загладват следите на челните зъби. Другият фактор за успеха на схема № 2 се основава на увеличеното разсейване на енергията при триенето по челото, водещо до намаляване на амплитудата на принудените трептения. Налага се изводът, че инструментите с неравномерна стъпка осигуряват по-висока

производителност за постигането на една и съща грапавост, в сравнение със стандартните фрези - тези с равномерно разположените зъби по периферията.

Експерименти в условията на фирма “Петров технолоджи” ЕООД

Проведени бяха експерименти с трите фрези за изследване на влиянието на елементите на режима на рязане върху грапавостта на обработваните заготовки за ролкови танкети при челното им фрезование по схема № 2 на трикоординатен обработващ център Rais M650 в условията на фирма “Петров технолоджи” ЕООД. В таблица 4.3 са показани резултатите от този експеримент. Установи се, че при пет от осемте възможни комбинации на елементите на режима на рязане е постигната по-добра грапавост на обработените повърхнини с фреза № 2, в сравнение със стандартния инструмент № 1. При фреза № 3 се получава само в три от случаите по-добра грапавост, в сравнение с инструмент № 1. Това дава основание да се препоръча използването на фреза № 2, с която е постигната и най-ниската грапавост $Ra_{cp.} = 0,22 \mu m$ при най-тежкия режим.

Таблица 4.3

№ на опита	n min^{-1}		f mm/min		a_p Mm		$Ra_{cp.}$ за фреза № 1	$Ra_{cp.}$ за фреза № 2	$Ra_{cp.}$ за фреза № 3
1.	-1	400	+1	100	-1	1,5	0.30 μm	0.66 μm	0.50 μm
2.	-1	400	-1	80	-1	1,5	0.31 μm	0.68 μm	0.69 μm
3.	-1	400	-1	80	+1	2,25	0.41 μm	0.38 μm	0.33 μm
4.	-1	400	+1	100	+1	2,25	0.27 μm	0.26 μm	0.41 μm
5.	+1	630	-1	80	-1	1,5	0.39 μm	0.33 μm	0.27 μm
6.	+1	630	-1	80	+1	2,25	0.21 μm	0.22 μm	0.42 μm
7.	+1	630	+1	100	-1	1,5	0.37 μm	0.34 μm	0.31 μm
8.	+1	630	+1	100	+1	2,25	0.30 μm	0.22 μm	0.41 μm

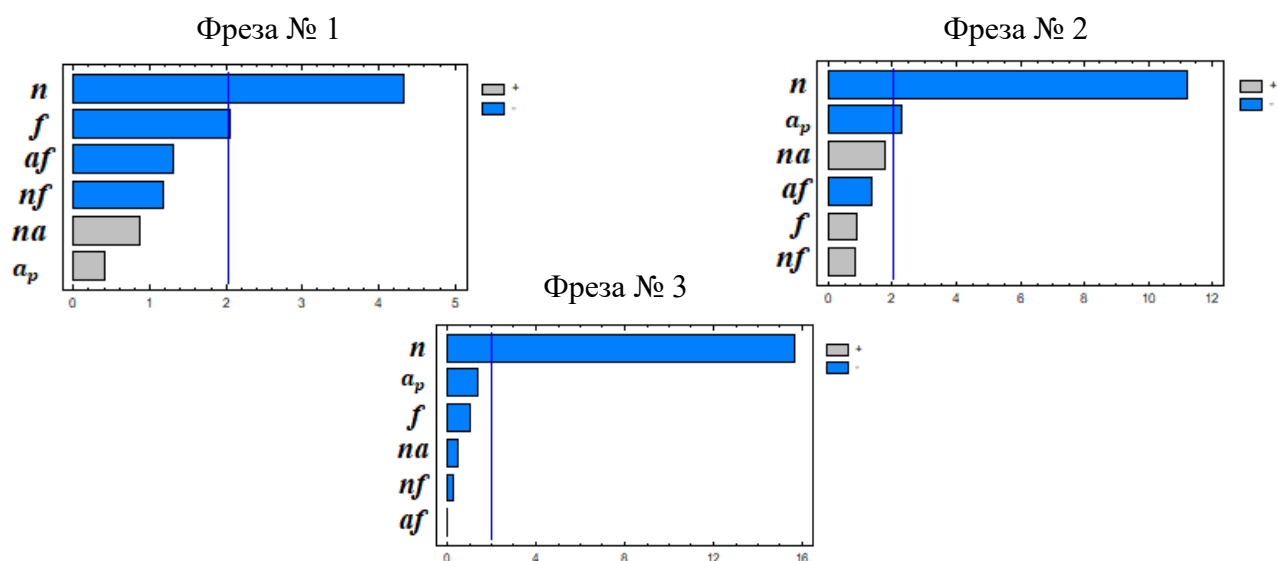
Тези резултати ни дадоха основание за провеждане на следващите оптимизационни изследвания.

4.3 Оптимизация на елементите на режима на рязане с трите конструирани и изработени фрези

В настоящия раздел е приложена само малка извадка от подбрани анализи за количествено определяне на влиянието на елементите на режима на рязане при челно фрезование върху грапавостта Ra на обработените детайли с трите вида инструменти по схема № 2. Тази сложна задача е решена с многокритериална Парето-оптимизация и продукта Stat Graphics.

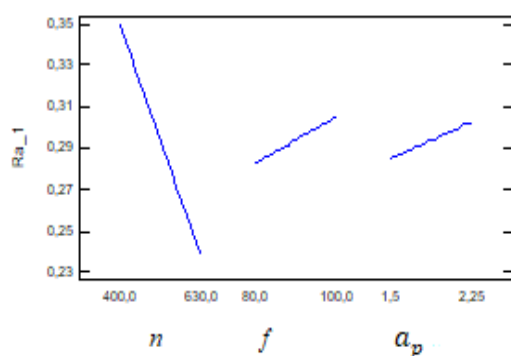
На фиг. 4.12 са отразени Парето-диаграмите за определяне на значимите фактори за условията на схема № 2 (от фиг. 4.5), като данните са от таблица 4.2. Допълнително е въведена т.нар. „граница на значимост” на

факторите на влияние върху грапавостта Ra на фрезованите детайли върху универсална машина ФУ 321.

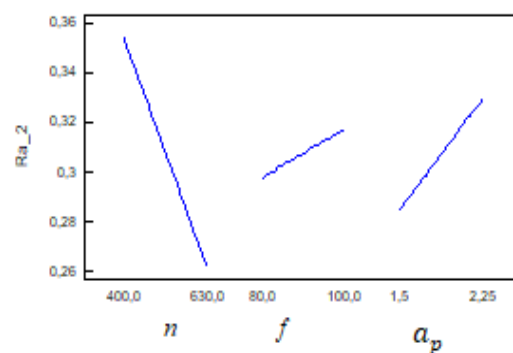


Фиг. 4.12 Парето-диаграми за оценяване на влиянието на елементите на режима на рязане върху грапавостта Ra на повърхнините на детайлите при фрезоване с инструменти № 1, 2 и 3 по схема № 2 (фиг. 4.5) върху машина ФУ 321

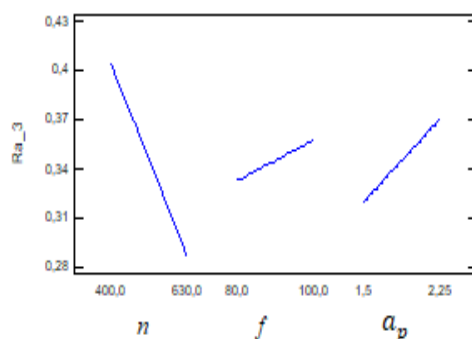
Графиките на „главните въздействия” на факторите n , f и a_p върху Ra на детайлите при фрезоване с трите инструмента са показани на фиг. 4.13.



а) $Ra_1 \rightarrow n$, $Ra_1 \rightarrow f$, $Ra_1 \rightarrow a_p$
при фрезоване с инструмент № 1



б) $Ra_2 \rightarrow n$, $Ra_2 \rightarrow f$, $Ra_2 \rightarrow a_p$
при фрезоване с инструмент № 2



в) $Ra_3 \rightarrow n$, $Ra_3 \rightarrow f$, $Ra_3 \rightarrow a_p$
при фрезоване с инструмент № 3

Фиг. 4.13 Главни въздействия на факторите n , f и a_p върху Ra на заготовките при фрезоване с инструменти № 1, 2 и 3 по схема № 2 върху машина ФУ 321

С помощта на софтуерния продукт Stat Graphics са изведени уравненията за определяне на влиянието на факторите n , a_p и f върху изходния параметър Ra_i при изследваната схема № 2 на фрезозане, както следва:

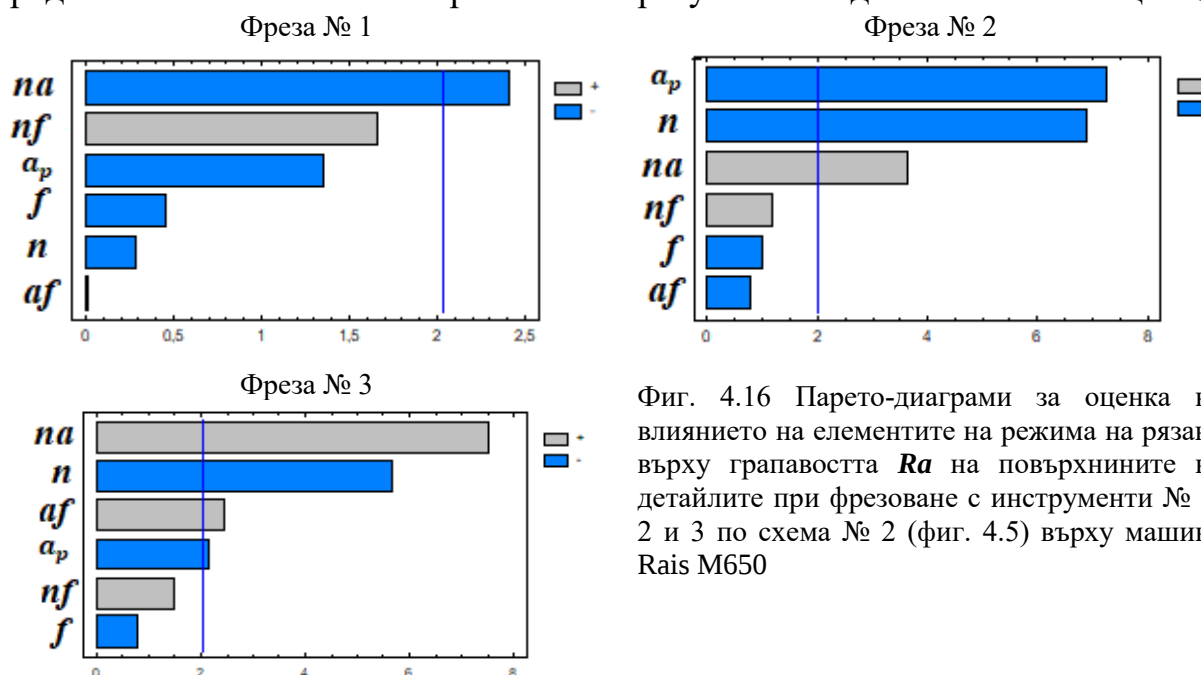
$$Ra_1 = -1,28587 + 0,000652174.n + 0,0373522.f + 0,84858.a_p - 0,0000391304.n.f + 0,000765217.n.a_p - 0,0133333.f.a_p \quad (3.4)$$

$$Ra_2 = 1,705 - 0,0042.n + 0,00688261.f + 0,0991304.a_p + 0,0000130435.n.f + 0,000718841.n.a_p - 0,0064.f.a_p \quad (3.5)$$

$$Ra_3 = 1,29376 - 0,00119565.n + 0,000815217.f + 0,0402899.a_p - 0,00000391304.n.f - 0,000150725.n.a_p - 0,000133333.f.a_p \quad (3.6)$$

Резултатите от оптимизацията показват, че при фрезозане на заготовките, с калиброване на обработваната повърхнина по изследваната нова схема № 2, инструментът № 3, с най-голямата променлива ъглова стъпка на разположените по неговата периферия твърдосплавни пластини, постига най-ниската грапавост на обработените детайли при горни нива на факторите на влияние $f_{max} = 100 \text{ mm/min}$, $a_{pmax} = 2,25 \text{ mm}$ и $n_{max} = 630 \text{ min}^{-1}$, т. е. при най-производителния режим с високи стойности на подаването и дълбочината на рязане. Това доказва, че една и съща грапавост на фрезозаните повърхнини, с трите различни като конструкция инструмента, може да се постигне с нестандартната фреза № 3 при много по-производителни режими на рязане, в сравнение с останалите две фрези.

На фиг. 4.16 са илюстрирани Парето-диаграми за оценяване на влиянието на елементите на режима на рязане върху грапавостта Ra на детайлите при непълно симетрично челно фрезозане с трите фрези № 1 (стандартна), № 2 и № 3 по схемата № 2 от фиг. 4.5 с калиброване на обработаната повърхнина на обработващ център Rais M650. Диаграмите представят статистически обработените резултати на данните от таблица 4.3.



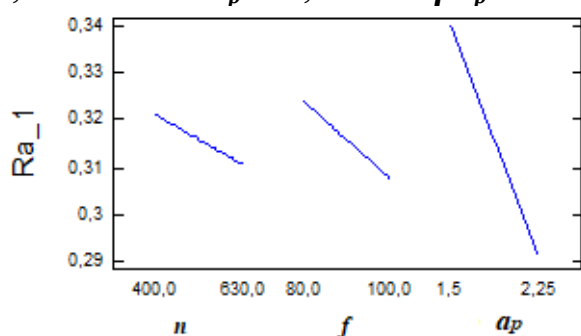
Фиг. 4.16 Парето-диаграми за оценка на влиянието на елементите на режима на рязане върху грапавостта Ra на повърхнините на детайлите при фрезозане с инструменти № 1, 2 и 3 по схема № 2 (фиг. 4.5) върху машина Rais M650

На фиг. 4.18 са представени графиките, определящи степента на влияние на n , f и a_p върху Ra . С помощта на софтуерния продукт Stat Graphics са изведени уравненията за определяне на влиянието на факторите n , a_p и f върху изходния параметър Ra_i при изследваната схема на челно фрезозане, както следва:

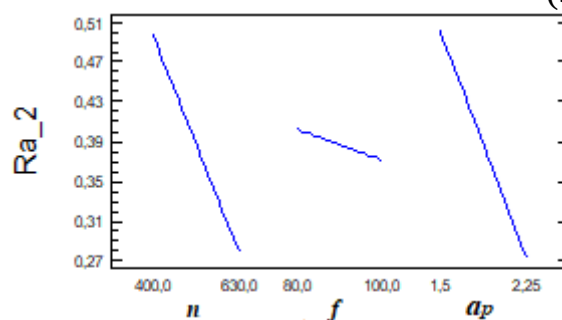
$$Ra_1 = 0,754141 - 0,000493478.n - 0,0140228.f + 0,457826.a_p + 0,0000258696.n.f - 0,0010029.n.a_p - 0,0000666667.f.a_p \quad (3.7)$$

$$Ra_2 = 3,09785 - 0,00496087.n - 0,0038587.f - 0,699304.a_p + 0,0000165217.n.f + 0,00134493.n.a_p - 0,003333.f.a_p \quad (3.8)$$

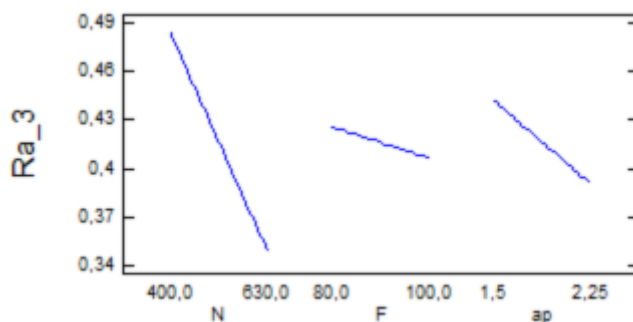
$$Ra_3 = 4,921 - 0,0058.n - 0,023287.f - 1,82087.a_p + 0,0000152174.n.f + 0,00205217.n.a_p + 0,007733.f.a_p \quad (3.9)$$



а) $Ra_1 \rightarrow n$, $Ra_1 \rightarrow f$, $Ra_1 \rightarrow a_p$
при фрезозане с инструмент № 1



б) $Ra_2 \rightarrow n$, $Ra_2 \rightarrow f$, $Ra_2 \rightarrow a_p$
при фрезозане с инструмент № 2



в) $Ra_3 \rightarrow n$, $Ra_3 \rightarrow f$, $Ra_3 \rightarrow a_p$
при фрезозане с инструмент № 3

Фиг. 4.18 Главни въздействия на факторите n , f и a_p върху Ra на заготовките при фрезозане с инструменти № 1, 2 и 3 по схема № 2 върху машина Rais M650

Тези резултати показват, че при фрезозане на заготовките върху обработващ център Rais M650, с калиброване на обработваната повърхнина по схема № 2 от фиг. 4.5, инструмент № 2, с малката променлива ъглова стъпка на разположените твърдосплавни пластини по периферията, постига най-ниската грапавост на обработените детайли при горни нива на факторите на влияние $f_{max} = 100 \text{ mm/min}$, $a_{pmax} = 2,25 \text{ mm}$ и $n_{max} = 630 \text{ min}^{-1}$, т. е. при производителен режим с високи стойности на надлъжното подаване и дълбочината на рязане. Изчислената оптимална грапавост $Ra_2 = 0,2105 \text{ }\mu\text{m}$

е приблизително еднаква със стойността $Ra_1 = 0,22175 \mu m$, която може да бъде постигната при използване на стандартната фреза № 1, но при **долно ниво** на надлъжното подаване f_{min} и a_{pmax} , т.е. при по-ниска производителност.

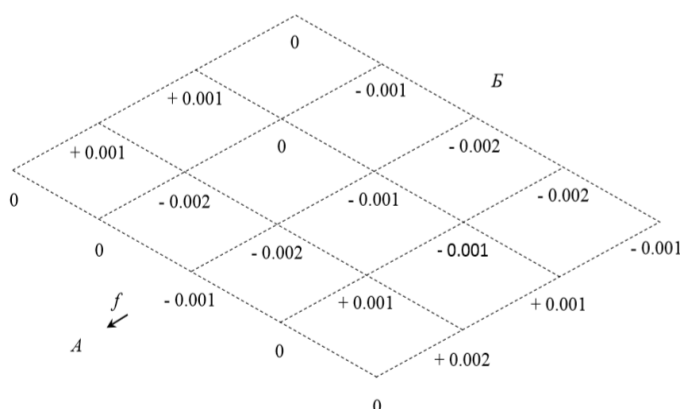
4.4 Изследване на отклоненията от равнинност на фрезованите повърхнини на ролкови танкети обработени с трите нови конструкции фрези

В настоящия раздел на дисертационния труд са представени и анализирани резултатите от проведени експерименти за определяне на отклоненията от равнинност Δp на фрезовани заготовки за ролкови танкети с трите вида фрези, в зависимост от елементите на режима на рязане. Експериментите са проведени в условията на фирма „Петров технолоджи“ ЕООД на обработващ център Rais M650. Заготовките са фрезовани по схемата № 2 от фиг. 4.5.

На фиг. 4.22 е показана снимка от процеса на измерване върху тази машина за контрол на Δp . Контролът е извършен за всеки фрезован детайл в 20 равноотдалечени една от друга точки по примерната растерна схема, показана на фиг. 4.23.



Фиг.4.22 Опитна установка за измерване на отклоненията от равнинност Δp



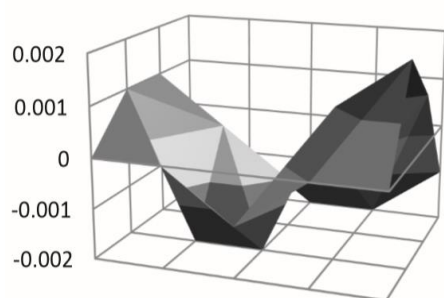
Фиг. 4.23 Растерна схема на точките за контрол на Δp с обозначени примерни стойности

Измервателната машина определя автоматично в коя точка от повърхнината на измерване по вертикалната ос Z отклонението от равнинност е с нулева стойност. Над тази стойност, със знак „+“ на схемата, са обозначени стойностите на отклоненията за изпъкналост, а със знак „-“ съответно за вдлъбнатост на повърхнината. В таблица 4.4 са нанесени стойностите от проведените експерименти. При анализа на отклоненията от равнинност за фрези № 1 и № 2 в таблица 4.4 се установи, че за повечето от случаите при силово натоварените режими на рязане, при които сечението на срязвания слой от всеки зъб е по-голямо, са регистрирани малки стойности за Δp .

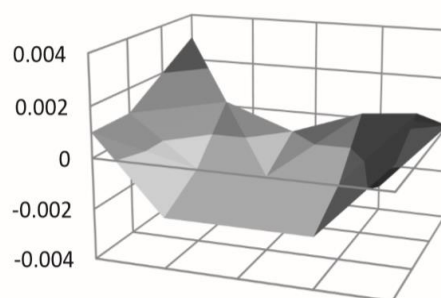
Таблица 4.4

№ на опита	n min^{-1}		f mm/min		a_p Mm		$\Delta p_{\text{№ 1}}$ за фреза № 1	$\Delta p_{\text{№ 2}}$ за фреза № 2	$\Delta p_{\text{№ 3}}$ за фреза № 3
1.	-1	400	+1	100	-1	1,5	0.004	0.005	0.006
2.	-1	400	-1	80	-1	1,5	0.006	0.005	0.006
3.	-1	400	-1	80	+1	2,25	0.006	0.004	0.017
4.	-1	400	+1	100	+1	2,25	0.006	0.004	0.004
5.	+1	630	-1	80	-1	1,5	0.007	0.004	0.010
6.	+1	630	-1	80	+1	2,25	0.006	0.005	0.006
7.	+1	630	+1	100	-1	1,5	0.007	0.005	0.008
8.	+1	630	+1	100	+1	2,25	0.006	0.006	0.003

На фиг. 4.24 и фиг. 4.25 са представени 3D-графики на измерените отклонения от равнинност на фрезованите повърхнини на детайлите, обработени с инструменти № 1 и № 2, които в таблица 4.4 са оцветени в различен цвят. В случая визуално се възприемат много добре отклоненията от равнинност в диапазона на изменение на Δp от $0 \div \Delta p_{\text{max}}$.



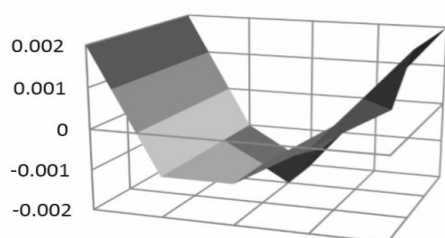
$$\Delta p_{\text{№1 min}} = 0,004 \mu\text{m}$$



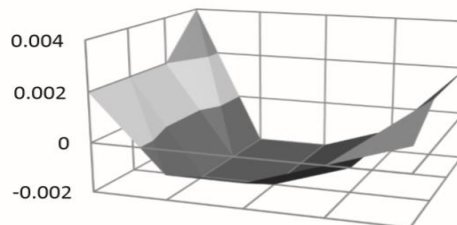
$$\Delta p_{\text{№1 max}} = 0,007 \mu\text{m}$$

Фиг. 4.24 3D-графика за визуализация на минималното и максимално отклонение от равнинност на фрезовани детайли с инструмент № 1

На фиг. 4.25 са показани 3D-графики на измерените отклонения от равнинност на фрезованите повърхнини на детайли с инструмент № 2.



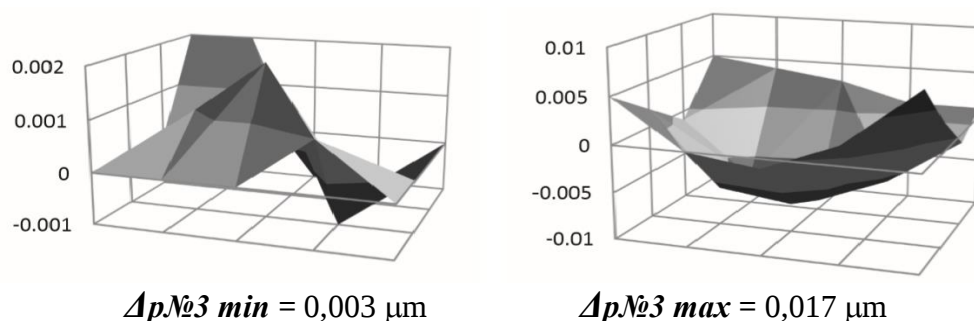
$$\Delta p_{\text{№2 min}} = 0,004 \mu\text{m}$$



$$\Delta p_{\text{№2 max}} = 0,006 \mu\text{m}$$

Фиг. 4.25 3D-графика за визуализация на минималното и максимално отклонение от равнинност на фрезовани детайли с инструмент № 2

По аналогичен начин е извършено графичното 3D-представяне на Δp за фреза № 3. На фиг. 4.26 е показан релефът на повърхнините в диапазоните $0 \div 0,003 \mu\text{m}$ и $0 \div 0,017 \mu\text{m}$.

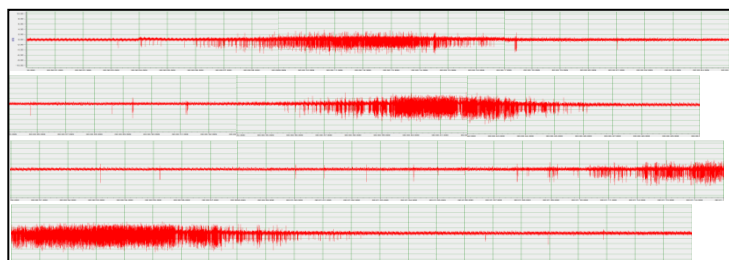


Фиг. 4.26 Графично изобразяване на отклонението от равнинност на фрезовани повърхнини с фреза № 3

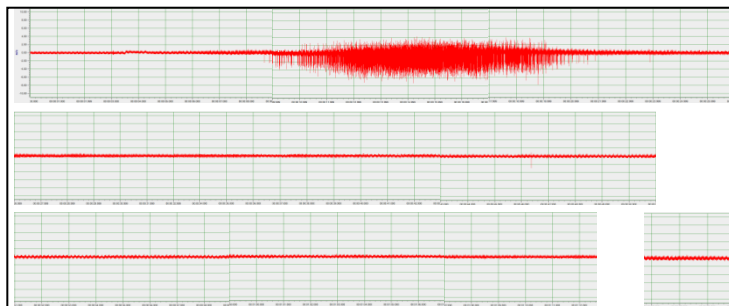
Независимо от високата стабилност на машината Rais M650, (в сравнение с ФУ 321), най-малките стойности за отклонението от равнинност са получени с инструмент № 3 при интензивен и производителен режим на рязане. Обяснението на този факт е, че при тази комбинация на интензивен режим на рязане и стабилност на машината практически се постига почти нулев динамичен ъгъл $\theta_{\text{ст}}$ и челната повърхнина на фрезата заема положение успоредно на обработваната.

4.5 Влияние на ъгловото разположение на режещите пластини по периферията на инструментите върху гасенето на принудените трептения

В този раздел са приложени характерни записи на изменението на виброскоростта на надлъжните принудени трептения при непълно симетрично челно фрезоване по схема № 1 (от фиг. 4.5) на заготовки за ролкови танкети със стандартна фреза № 1 и инструмент № 2 с „диференциално делене“. При вариране на елементите на режимите на рязане при пълните факторни експерименти, са измерени надлъжните и напречните трептения на обработваните заготовки. Приложени са само два подбрани записа от сравнителните експерименти, извършени на машина ФУ 321 (с по-ниска стабилност, в сравнение с Rais M650) с двата инструмента, но при еднакви условия и режими на фрезоване. На фиг. 4.27 и фиг. 4.28 е илюстрирано изменението на виброскоростта на принудените трептения на две заготовки при обработването им, съответно със стандартна фреза № 1 и фреза № 2 с малка променлива ъглова стъпка на разположените по нейната периферия режещи пластини.



Фиг. 4.27 Запис на принудените трептения на заготовка при фрезоването ѝ с инструмент № 1 и режим на рязане: $n = 400 \text{ min}^{-1}$, $f = 80 \text{ mm/min}$, $a_p = 1.5 \text{ mm}$



Фиг. 4.28 Запис на принудените трептения на заготовка при фрезоването ѝ с инструмент № 2 и режим на рязане: $n = 400 \text{ min}^{-1}$, $f = 80 \text{ mm/min}$, $a_p = 1.5 \text{ mm}$

При фрезоване с инструмент № 2 не се появяват самовъзбудени трептения след първоначалното врязване на фрезата. Системата не изпада в резонанс поради гасенето на вибрациите, вследствие на ацикличното врязване на зъбите на инструмента в обработвания материал, предопределено от неравномерното им разположение по периферията на фрезата.

4.7 Изводи и констатации от глава четвърта

В резултат на анализа на описаните в глава трета технологични изследвания могат да бъдат формулирани следните по-съществени изводи:

1. Конструирани и изработени в метал са специализирани инструменти за фрезоване на равнинни повърхнини с неравномерно разположение на режещите пластини по тяхната периферия.

2. Изследвана е нова схема за фрезоване на равнинни повърхнини с „противоположен“ наклон на инструмента спрямо посоката на надлъжното подаване. При проведените сравнителни експерименти с класическата схема за фрезоване се установи, че:

- при изследваната нова схема зъбите на инструмента първоначално се врязват в материала с главните си режещи ръбове и след (приблизително) половин оборот същите тези зъби калиброват обработената повърхнина със спомагателните си ръбове. Това води до чувствително намаляване на грапавостта, в сравнение с класическата схема, при която инструментите фрезоват материала само с главните си режещи зъби в „предната“ страна на инструмента;

- при новата схема, след пълно навлизане на челната повърхнина на фрезата в обработвания материал, в контакт със заготовката са зъби от „предната“ и „задната“ ѝ страна, вследствие на което се повишава стабилността на инструмента и се гасят принудените трептения.

(За сравнение, при класическата схема за фрезоване в контакт с материала са само зъбите от „предната“ страна на инструмента);

- при фрезоване с инструментите с „диференциално делене“ технологичната система не изпада в резонанс, поради гасенето на трептенията, вследствие на ациклично врязване на зъбите в обработвания материал;

- при новата схема за фрезоване с „противоположен“ наклон на инструмента, в сравнение с класическата схема, се подобрява равнинността на детайлите, вследствие на намаляване на динамичния ъгъл на

разположение между челната повърхнина на фрезата и обработваната, поради благоприятното въздействие на подавателната сила.

(При класическата схема на фрезозане този ъгъл се увеличава и това води до увеличаване на вдлъбнатостта на повърхнината при еднакви условия);

➤ използването на новата схема има особено голям ефект при фрезови машини с по-ниска стабилност.

3. При проведените сравнителни пълни факторни експерименти със стандартна фреза и инструменти с „диференциално делене“ по новата схема се доказва, че грапавостта на обработената повърхнина намалява при фрезозане с инструментите с неравномерно разположение на режещите зъби, поради допълнителното подрязване на върховете на грапавините в „задната“ страна на инструмента от спомагателните режещи ръбове. (За сравнение при класическата схема такова подрязване отсъства).

4. В резултат на анализирани статистически обработени опитни данни от проведените сравнителни експериментални изследвания при непълно симетрично челно фрезозане са изведени регресионните зависимости $Ra = f(n, f, a_p)$. Представени са Pareto-диаграми за оценяване на значимостта на изследваните фактори върху грапавостта Ra за трите вида инструмента. Извършена е и параметрична оптимизация при целева функция - минимизиране на Ra . Установено е, че формирането на грапавостта на челно фрезозаните детайли, с инструменти с променлива ъглова стъпка на разположените твърдосплавни пластини по тяхната периферия, се подчинява в някои случаи на нови закономерности, различни от класическите.

Общи изводи, формулирани в резултат от цялостната работа по дисертационния труд

При анализа на получените резултати от изследванията в дисертационния труд могат да бъдат дефинирани следните обобщени изводи:

1. В настоящия дисертационен труд е доказано, че точната стойност на малкия статичен ъгъл на установяване $\theta_{ст.}$ на оста на челно-цилиндричната фреза при изследваната нова схема за фрезозане, в посока обратна на подавателна скорост, може прецизно да бъде определена след установяване на деформацията на конкретната технологичната система, породена от използваните режими на рязане, в резултат на което, след установяване на общата деформация на системата, челната повърхнина на инструмента ще бъде успоредна на обработваната, при ъгъл $\theta_{дин.} = 0$.

2. Доказано е, че при изследваната нова схема за фрезозане спомагателните режещи ръбове калиброват обработената повърхнина, при което се постига по-ниска грапавост, в сравнение с класическата схема за фрезозане при еднакви режими на рязане.

3. Установено е, че новата схема за челно-цилиндрично фрезозане, с едновременно рязане на главните режещи ръбове, съпроводено с

калибровачната роля на спомагателните режещи ръбове, води до по-малки отклонения от равнинност на фрезованата повърхнина.

4. Установено е, че трептенията на технологичната система при челно фрезоване могат да бъдат чувствително намалени при съчетано използване на новата изследвана схема за фрезоване и инструменти с „диференциално делене“.

5. В дисертационния труд е дадена комплексна оценка на технологичните възможности на фрезите с неравномерно кръгово, радиално и аксиално изместване на зъбите, при отчитане на тяхното радиално и аксиално биене, за определяне по аналитичен път на височината на микрограпавините на обработената повърхнина.

Авторска справка за приносите на дисертацията

В резултат от направените изследвания в настоящия дисертационен труд могат да бъдат формулирани следните научно-приложни и приложни приноси:

Научно-приложни приноси:

1. За целите на дисертацията е извършено графично моделиране на микрограпавините при фрезоване със стандартни инструменти и фрези с „диференциално делене“, при отчитане на радиалното и аксиално биене на зъбите.

2. Направена е динамична симулация на процеса фрезоване с двузъба фреза, с равномерно и неравномерно разположени зъби по периферията на инструмента, при използване на параметричните уравнения на скъсената циклоида.

3. При проведеното експериментално сравнително изследване на класическия метод с нова схема за челно фрезоване, с „противоположен“ наклон на инструмента спрямо посоката на надлъжното подаване, се доказва, че при прилагането ѝ на машини с различна стабилност, се получава по-ниска грапавост на фрезованите повърхнини на детайлите.

4. Проведено е опитно изследване на процеса челно фрезоване с „противоположен“ ъгъл на наклона на инструментите от $0,5^\circ$ на обработващ център Rais M650, за определяне на влиянието на режимите на рязане върху отклоненията от равнинност на обработените повърхнини. При проведените пълни факторни експерименти се установи, че *при горни нива* на надлъжното подаване ($f=100\text{mm/min}$) и на дълбочината на рязане ($a_p = 2,25\text{ mm}$) се постигат минимални отклонения от равнинност на обработените детайли при висока производителност, с което се осигурява минимална и равномерна прибавка за шлифоване.

5. Изведени са математически модели, получени с помощта на Парето-оптимизации, за определяне на грапавостта ***Ra*** на фрезованите повърхнини, при отчитане на значимите елементи на режима на рязане и в зависимост от вида на инструмента. При проведените пълни факторни

експерименти се установи, че инструментите с неравномерно разположение на режещите пластини осигуряват по-ниска грапавост на обработените детайли при *горни нива* на надлъжното подаване и дълбочината на рязане.

6. Установено е, че при изследваната нова схема на позиционно разположение на инструмента спрямо заготовката, под малък наклон срещу посоката на надлъжното подаване, повече режещи зъби са в контакт с материала, вследствие на което се повишава неговата стабилност и се гасят принудените трептения.

Приложни приноси:

7. Конструирани и изработени в метал са специализирани инструменти за челно фрезозане на равнинни повърхнини с неравномерно разположение на режещите пластини по тяхната периферия.

8. Анализирани са различни технологични схеми за повишаване на качеството и производителността при обработване на стъпални отвори за болтове със скрита глава в наклонени повърхнини на ролкови танкети. Установено е, че най-добри резултати са получени при предложената и изследвана технологична схема за последователно двупозиционно фрезозане на отворите с палцова фреза с радиусно закръгление и с размерна челно-цилиндрична фреза. Доказано е, че при тази схема се отстранява до голяма степен прекъснатото рязане и едностранното радиално натоварване на инструментите, с което се постига висока точност на формата и размерите на стъпалните отвори, при удовлетворяване на изискванията на фирмата възложител - Bosch Rexroth GmbH. Новата технологична схема е внедрена в производствените условия на фирма „Петров технолоджи” ЕООД.

9. Проведено е опитно сравнително изследване за установяване на влиянието на режимите на рязане при свредловане на рециркуляционни отвори на ролкови танкети с два вида дълбокопробивни свредла, произведени от фирмите MK Tools и Sau върху точността на диаметрите, формата и грапавостта на обработените отвори. Доказано е, че при използване на твърдосплавно свредло на фирма Sau и при оптимизиран режим на рязане се удовлетворяват изискванията на възложителя, по отношение на предписаните точност на диаметъра, форма и грапавост на обработените отвори, при едновременно повишаване на производителността и намаляване на себестойността на операцията. Оптимизираните режими на рязане и свредлата на фирма Sau са внедрени в производствените условия на фирма „Петров технолоджи” ЕООД.

Списък с публикации по дисертационния труд

1. **Попов Т.** *Фрезови инструменти с диференциално делене*, сп. „Машиностроене и електротехника“, ISSN 0025-455X брой 10-11, 2018, част Технологии, стр. 39-47
2. **Попов Т.,** Стоев Л., Гарабитов Ст. *Изследване на отклоненията от равнинност при челно фрезоване*, сп. „Машиностроене и електротехника“, ISSN 0025-455X, 2015, брой 7-8, стр. 26-31
3. Стоев Л., **Попов Т.** *Обработване на стъпални отвори в наклонени повърхнини*, сп. „Машиностроене и електротехника“, ISSN 0025-455X, 2015, брой 9, стр. 48-52
4. Стоев Л., **Попов Т.** *Свредловане на рециркуляционни отвори на ролкови танкети*, сп. „Машиностроене и електротехника“, ISSN 0025-455X, 2015, брой 9, стр. 41-46
5. Стоев Л., **Попов Т.,** Гарабитов Ст., Ралев Я. *Изследване на процеса челно фрезоване с инструменти с постоянна или променлива ъглова стъпка на режещите пластини по тяхната периферия - част 1*, Международна научна конференция „70 години МТФ“, 11-13 септември 2015, Созопол, сборник с доклади, ISBN 978-619-167-178-6, стр. 279 – 284
6. Стоев Л., **Попов Т.,** Гарабитов Ст., Ралев Я. *Изследване на процеса челно фрезоване с инструменти с постоянна или променлива ъглова стъпка на режещите пластини по тяхната периферия - част 2*, Международна научна конференция „70 години МТФ“, 11-13 септември 2015, Созопол, сборник с доклади, ISBN 978-619-167-178-6, стр. 285 – 290
7. Данаилов П., Стоев Л., **Попов Т.,** Гарабитов Ст., Ралев Я. *Статистически анализ на данни от изследване на процеса челно фрезоване с инструменти с постоянна или променлива ъглова стъпка на режещите пластини по тяхната периферия - част 1*, Международна научна конференция „70 години МТФ“, 11-13 септември 2015, Созопол, сборник с доклади, ISBN 978-619-167-178-6, стр. 315 – 320
8. Стоев Л., Данаилов П., **Попов Т.,** Гарабитов Ст., Ралев Я. *Статистически анализ на данни от изследване на процеса челно фрезоване с инструменти с постоянна или променлива ъглова стъпка на режещите пластини по тяхната периферия - част 2*, Международна научна конференция „70 години МТФ“, 11-13 септември 2015, Созопол, сборник с доклади, ISBN 978-619-167-178-6, стр. 321 – 326
9. Гарабитов Ст., Стоев Л., **Попов Т.** *Влияние на трептенията при челно фрезоване върху грапавостта на обработените детайли*, сп. „Машиностроене и електротехника“, ISSN 0025-455X, 2015, брой 5-6, стр. 28-33

SUMMARY

The subject of this dissertation thesis is a series „**Surveying the effectiveness of operation drilling and milling of roller runner blocks**” of studies related to the milling process and related to the reduction of the unevenness of the cutting process with milling tools with irregular angular placement of inserts along their periphery. They were conducted, because of the necessity to improve the quality of a particular detail considered as a production site in the conditions of a company - "Petrov technology" Ltd. - Sofia, where the author of the dissertation works as a technologist. This prismatic part has six sides, two of which are disposed at an angle of 45° at its base. In this configuration, the detail known as runner block acts as an intermediate element in the process of linear displacement of various machine tool assemblies and the friction between them is carried out by rolling. The runner block contains a set of rolling balls or rolls, or a combination of them, plus separators that roll on straight chisels with a prismatic section, returning to deliberately shaped recirculation holes.

The runner block is produced by the Bulgarian manufacturer "Petrov technology" Ltd. - Sofia as a result of a contract with the German client Bosh Rexroth GmbH - Germany. The terms of this contract have specific confidentiality conditions for design and technology documentation. In this sense, this thesis does not present a constructive drawing of the runner block, the solution of the specific technological-production problems related to the improvement of the flatness and roughness of the cut surfaces, as well as the precision of the drill holes, with increased productivity, will be considered from a scientific point of view as tasks of a more general nature.

In the dissertation, the indications of the individual dimensions are preserved in their authentic form in the first chapter, whereas in the next two – the theoretical second and the practical third chapters, the indications of the magnitudes are used in line with those adopted in the official literature. They can be found in the table in the previous list.

In the dissertation, concrete positive results have been achieved related to the improved flatness and reduced roughness of the cut surfaces resulting from the choice of an uneven peripheral step of the teeth of the tool, taking into account the specification of the processing material - high strength and hardened bearing steel, brand 100CrMo7-3 according to DIN 50602 and within the requirements of ISO 3763.