



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

маг. инж. Илиян Величков Илиев

НОВ ПОДХОД ЗА ФОРМИРАНЕ НА РЕГУЛЯРНИ РЕЛЕФИ ПО СЛОЖНИ ФУНКЦИОНАЛНИ ПОВЪРХНИНИ ЧРЕЗ ПРОЦЕС ЗА ПЕТОСНО ПОВЪРХНОСТНО ПЛАСТИЧНО ДЕФОРМИРАНЕ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и научна
степен „Доктор”

Варна,
2019 г.

Дисертационният труд съдържа 134 страници, включително 92 фигури, 24 таблици, 19 математични зависимости и 8 приложения, оформени в увод, 4 глави, приноси и списък на използваната литература от 117 заглавия, от които 51 на кирилица и 66 на латиница.

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

ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Голям брой от детайлите, намиращи приложение в съвременното машиностроително производство, производството на пластмасови изделия, енергетиката, отоплителната и вентилационна техника, както и в различните средства за транспорт, за да изпълняват своето функционално предназначение, е необходимо да имат повърхнини със сложна форма. Примери за такива детайли са матриците за шприц форми, работните колела на помпи, лопатки на турбини, гребни винтове на плавателни съдове, елементи от конструкцията на двигатели и на автомобили, влакове, самолети, и т.н. Често пъти подобни детайли се налага да работят при екстремни температури, повишени усилия, наличие на висока запрашеност или във високо абразивни среди. Експлоатационните им характеристики зависят до голяма степен от макро формата, която конструктивно е заложено да имат и материала от който са изработени. Съществено влияние оказва и състоянието на повърхностния им слой, чрез параметрите на качеството.

В технологичната практика съществуват множество примери за изследвания, които показват, че микрорелефите, получени посредством процес за Вибрационно Повърхностно Пластично Деформиране (ВППД), както върху плоски, така и върху цилиндрични функционални повърхнини, в значителна степен оптимизират експлоатационните характеристики. Разработени са множество различни кинематични схеми на ВППД, както за плоски така и за цилиндрични повърхнини, а също и за някои сложни повърхнини от втора степен. Общото при тези схеми е, че деформиращ елемент се движи по сложна (близка до синусоидална) траектория, притискайки се с определена сила в обработваната повърхнина. В резултат се получават насложени една върху друга следи от пластично деформиран материал като така се формират „регулярни релефи“ (РР), които имат специфични качествени характеристики.

Почти всички съществуващи схеми за обработване чрез ВППД обаче са създадени да се изпълняват или върху металорежещи машини с ръчно управление, което налага наличие на допълнителни приспособления или на специализирани машини. Това усложнява и

оскъпява практическото прилагане на процеса, поради което той все още не намира широко приложение в практиката.

Настоящия дисертационен труд е част от реализиран докторантски проект с № ПД15/2016 г. на тема: „**Изследване на изменението на деформиращата сила при повърхностно пластично деформиране на функционални повърхнини от детайли**“. Това още веднъж потвърждава актуалността на настоящата дисертация.

Проблем

Да се съчетаят предимствата на РР (от IV-ти вид) получавани чрез класическия процес на ВППД с възможностите на ММ с ЦПУ и CAD-CAM софтуерни средства за програмиране на операции за получаването им, с цел да се подобрят параметрите на качество на функционални повърхнини със сложна форма от детайли.

Цел и задачи на изследването

Да се разработи модел на технологична операция за довършващо обработване чрез ППД на сложни функционални повърхнини, реализирана по подходяща кинематична схема с използване на съвременни многоосни фрезови центри с ЦПУ и да се изследват възможностите за формиране на РР от IV-ти тип по тях чрез нея.

Обект и предмет на изследването

Формиране на РР чрез ППД върху детайли със сложни повърхнини с помощта на металорежещи машини с цифрово програмно управление и използване на подходящ CAD/CAM софтуер.

Методи на изследване

Методите на изследването включват анализ и оценка на положителния ефект на РР получени чрез процес за петосно ППД по функционални повърхнини на детайли. Създаване на теоретико-математични модели и алгоритъм за генериране на инструментални пътища на деформиращия елемент с оптимална дължина. При експерименталните изследвания са използвани методи за провеждане на планирани факторни изследвания, изготвяне на графове на ефекта, Парето хистограми, както и дисперсионен анализ (ANOVA) за статистическо разграничаване на значимо влияещите режимни параметри.

Място на изследване

Проведените в дисертацията изследвания имат теоретичен и експериментален характер. Теоретичните изследвания са извършвани в условията на катедра „Технология на машиностроенето и металорежещи машини” на ТУ-Варна, а експерименталните изследвания са проведени в завод „Черно Море“ АД, гр. Варна.

Научна новост на изследването

- Разработена е и практически е тествана методология за формиране на регулярни релефи от IV-ти вид чрез процес на ППД с помощта на пет-осни фрезови центри с ЦПУ.
- Идентифицирани са и е изследвано приложението на набор от технологични компоненти от CAD-CAM софтуерни продукти за изпълнение на за пет-осно ППД на неравнинни повърхнини.
- Предложен е математичен модел за изчисляване на инструменталния път по който трябва да се движи деформиращия елемент, така че да се образува РР от IV-ти вид.
- Разработена е методика за определяне на габаритните размери и формата на получаващите се клетки от РР чрез пет-осно ППД с помощта на диаметъра на вписана в границите на клетката окръжност и ъгъла, заключен между две съседни образуващи стени на клетката, на база на микроскопски изображения с висока резолюция.
- Предложен е подход за сравнителна оценка на променливостта на деформиращата сила на деформиращия елемент по време на пет-осно ППД, а също и на изменението на габаритите и формата на клетките от РР от IV-ти вид.

Практическа ценност на изследването

Изработен е инструмент за ППД на неравнинни повърхнини на детайли, който може да се установява и работи с най-разпространените ММ с ЦПУ, от вида на обработващи фрезови центри, който има възможност за измерване на деформиращата сила на деформиращия елемент в реално време. Разработен е и е използван в изследванията специализиран софтуер за четене на информацията от силовия преобразувател на инструмента за ППД, визуализацията ѝ на компютърен дисплей и записването ѝ под формата на файл с данни за статистическа обработване.

Предложен е алгоритъм за математическо генериране на полилинии с оптимална дължина и форма, съобразно габаритните размери на обработваната чрез пет-осно ППД сложна повърхнина.

Разработен е типов модел в САМ модула на системата NX (Siemens) съдържащ набор от компоненти за последователно изпълнение на операции за грубо и чисто фрезозане на сложни повърхнини от детайли и пет-осна довършителна операция за обработването им чрез ППД. Настроен е постпроцесор за генериране на NC-програми за пет-осно обработване чрез ППД на сложни повърхнини, осигуряващ по-висока плавност на движението чрез използване на режим на изчисляване на подавателните скорости - G93.

Апробация на изследването

Дисертационния труд е докладван и обсъден на разширено заседание на катедра „Технология на Машиностроенето и Металорежещи Машини“ при ТУ-Варна.

Основни положения и резултати от определени етапи от дисертационния труд също са докладвани и публикувани на следните места:

- Доклад на XIII Международен технически конгрес "MTM" Боровец, 2016 год.;
- Публикация в международно списание *Fiability & Durability/Fiabilitate*, Румъния през 2016 г.;
- Доклад пред международната конференция „Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Conference“ (IManEE) през 2017, Румъния, (индексирана в SCOPUS)
- Публикации в (е)Годишник на ТУ-Варна през 2017 и 2019 г.

Публикации по дисертационния труд

Направени са общо пет публикации по дисертацията. Една от тях е самостоятелна, а останалите четири са в съавторство. Една е на български език, а останалите четири са на английски език. Една от тях е докладвана на конференция, която е индексирана в базата данни SCOPUS. Две от публикациите са в резултат на реализиран докторантски проект, в който участва и работи авторът на дисертацията.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА I. ОБЗОР И АНАЛИЗ НА ПУБЛИКУВАНИТЕ МАТЕРИАЛИ

Дисертацията започва с Глава I. Обзор и анализ на публикуваните материали, чиято цел е да разгледа публикуваната информация в литературните източници свързани с разглеждания в труда проблеми. Направен е анализ на експлоатационните характеристики на различни видове детайли притежаващи функционални повърхнини със сложна форма. Разгледани са процеси за довършващо обработване на повърхнини от детайли чрез повърхностно пластично деформиране и вибрационно повърхностно пластично деформиране, както и особеностите при формирането на РР от IV вид по функционални повърхнини.

От проучената и анализирана информация от литературните източници са направени следните изводи:

1. Условието на работа на много от изделията, притежаващи неравнинни повърхнини от вида на лопатки на гребни винтове, компресори, такива на турбини и вентилатори са свързани с големи по стойност циклични натоварвания, висока запрашеност и работа в корозионно и абразивно агресивни среди. Това поставя завишени изисквания към контактните им повърхнини, които традиционните процеси за тяхното обработване не покриват напълно, по отношение на текстурата и физико-механичните характеристики на повърхностния слой. Това налага търсенето на нови подходи за тяхната оптимизация, с цел повишаване на експлоатационния им ресурс. Един от тези подходи може да бъде прилагането на процеса ППД (и неговите разновидности), чрез който в повърхностния слой на контактните повърхнини се формира специфичен РР и физико-механични характеристики, които съществено могат да подобрят експлоатационните характеристики на обработени по този метод детайли в сравнение с алтернативните методи за довършващо обработване чрез стружко отнемане.

2. Независимо че процесите за ППД и ВППД са разработени и се прилагат в машиностроителната практика от отдавна за подобряване на експлоатационните характеристики на различни видове детайли, включително и на такива притежаващи сферични, параболични и други видове профилни повърхнини, схемите по които се реализират обработките не предлагат оптимални условия от технологична гледна точка. Често те са базирани на универсални и ръчно-управляеми машини, и изискват наличието на допълнителни скъпоструващи приспособления, които се конструират специално за обработване на даден вид повърхнина. Освен това съществуват и множество допълнителни ограничения на този вид оборудване, които не позволява гъвкаво да се променят режимните параметри на процеса, и следователно да се постигат оптимални условия на обработване.

3. Възможностите на съвременните ММ с ЦПУ, в съчетание с наличните алгоритми за параметрично програмиране на сложни (многоосни) обработки, залагани в съвременните CAD-CAM софтуерни продукти от среден и висок клас, създават предпоставки за реализиране на процеса на ППД по нови и далеч по-ефективни кинематични схеми. Това позволява да се опрости значително технологичната система за реализиране на процеса ВППД, тъй като тук отпада необходимостта от прилагане на допълнителни приспособления за осигуряване на принудени осцилации на инструмента за реализиране на необходимата синусоидална траектория (използвани при класическите схеми за ВППД). Гъвкавостта на настройване на режимните параметри на процеса ППД е завишена чрез възможността за безстепенно изменение на скоростта на главните и подавателните движения на работните органи на ММ с ЦПУ и възможността, която осигуряват САМ софтуерните продукти за изглаждане на инструменталния път.

4. При многоосните ММ с ЦПУ е възможно да се реализират и т. нар. многоосни едновременни фрезови обработки, което позволява да се задават допълнителни условия на оптимално разположение на работната част на инструмента и обработваната сложна повърхнина на детайла. Това значително разширява възможностите на процеса ППД за формиране на еднородни по форма, габарити и физикомеханични характеристики РР и по този начин оптимално управление на функционалните характеристики на такъв тип повърхнинни.

5. Процеса за довършващо обработване чрез ППД може да се съчетае лесно с предшестващите го технологични операции за обработване чрез рязане, без да има необходимост детайла да бъде преместван на друга специализирана машина, което повишава степента на концентрация на операциите от технологичния процес и позволява минимизиране на времето за изпълнение на цикъла за производство на единица изделие.

На база анализа на публикуваните в литературата материали, имащи връзка с темата на дисертацията са изведени следните цел и задачи, които трябва да се постигнат и решат при разработването на дисертационния труд:

✓ **Цел:**

Да се разработи модел на технологична операция за довършващо обработване чрез ППД на сложни функционални повърхнини, реализирана по подходяща кинематична схема с използване на съвременни многоосни фрезови центри с ЦПУ и да се изследват възможностите за формиране на РР от IV-ти тип по тях чрез нея.

✓ **Задачи:**

1. Технологично осигуряване на формирането на РР от IV-ти вид по неравнинни функционални повърхнини. Тази задача включва следните подзадачи:

1.1 Моделиране на траекторията на движение на деформиращия елемент при ППД на неравнинни повърхнини, включващо:

1.1.1 Разработване на математически модел за дефиниране на необходимата сложна траектория на движение на деформиращия инструмент за формиране на РР от IV-ти вид по обработваните повърхнини.

1.1.2 Създаване на алгоритъм за генериране на траекторията на инструмента и съхранението ѝ във вид на полилиния.

1.2 Конструирание и изработване на подходящ инструмент за ППД на сложни неравнинни повърхнини, който да може да се установява и работи върху съвременни ММ с ЦПУ, включващо:

1.2.1 Определяне на принципа на работа на инструмента и изискванията към него;

1.2.2 Конструирание на инструмента за ППД, който да позволява обработване на сложни повърхнини и да предлага възможност за измерване на изменението на деформиращата сила по време на обработване;

1.2.3 Оптимизиране на конструкцията и осигуряване на необходимото допълнително оборудване, екипировка и софтуерни средства за отчитане на променливостта на силата на деформиране;

2. Програмиране в САМ на операциите за едновременно петосно ППД и получаване на управляващата програма, включващо:

2.1 Избор на подходящ САМ-софтуер, притежаващ необходимите технологични компоненти, даващи възможност за програмиране и настройване на операциите и параметрите на процеса за ППД на сложни повърхнини с цел получаване на РР от IV-ти вид;

2.2 Избор на подходящо технологично оборудване - машина и допълнително необходими приспособления за реализиране на многоосни обработки, на които ще се реализира процеса ППД ;

2.3 Създаване на 3D модел на опитен образец със сложни повърхнини, имащи вид близък до този на разгледаните в обзора детайли;

2.4 Моделиране на необходимите операции в САМ, конфигуриране на постпроцесора за пет-осна обработка и извеждане на съответни управляващи програми за изпълнение на операциите за ППД върху избраното технологично оборудване с ЦПУ;

3. Планиране, подготовка, извършване и обработване на получените резултати от експериментални изследвания на получаващите се РР от IV-ти вид по сложни повърхнини чрез пет-осно ППД на ММ с ЦПУ, включващо:

3.1 Определяне на границите на вариране на силата на деформиране по време на изпълнение на операцията за пет-осно ППД на сложни повърхнини, както и определяне на най-значимо влияещите режимни параметри на процеса, които влияят на променливостта ѝ;

3.2 Определяне на характера на влияние и подреждане по степен на значимост на режимните параметри на процеса ППД върху формата и размерите на получаващите се клетки от РР от IV-ти вид;

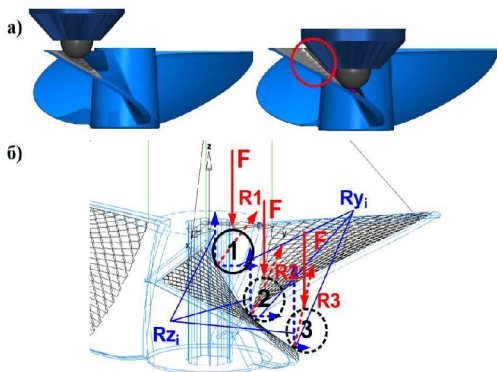
3.3 Определяне на границите на вариране на формата и размерите на клетките от РР от IV-ти вид, формирани по неравнинните повърхнини, както и определяне на най-значимо влияещите режимни параметри на процеса ППД върху тяхната променливост.

ГЛАВА II. ТЕХНОЛОГИЧНО ОСИГУРЯВАНЕ НА ФОРМИРАНЕТО НА РР ОТ IV ВИД ПО НЕРАВНИННИ ФУНКЦИОНЛНИ ПОВЪРХНИНИ

2.1 Особенности на приложението на процеса ППД за формиране на РР от IV-ти вид по неравнинни сложни повърхнини

Първата особеност е показана на Фиг. 2.1, а, от която се вижда че при движението на деформиращия инструмент, ако диаметърът му е по-голям е възможно да възникне нежелан контакт между неговите „не работни“ части при върха и обработваната неравнинна повърхнина. Това ще изисква конструкцията на върха на инструмента в конкретния случай да е с по-малък диаметър, отколкото при използваните инструменти за равнинно или цилиндрично ППД.

Втората особеност е илюстрирана на Фиг. 2.1, б, на която са показани три последователни положения на деформиращия елемент, движейки се по неравнинна повърхнина. Тъй-като ъгъла на образуващата на повърхнината е променлив, контакта ѝ със сферичния деформиращ елемент също ще се променя постоянно изменяйки положението си от позиция 1 до позиция 3. Това ще доведе до постоянна промяна на проекциите R_x , R_y и R_z на вектора на реакцията R , която уравнирява деформиращата сила F , което от своя страна ще доведе до постоянна промяна (неравномерност) на степента на деформация на повърхностния слой от обработваната повърхнина. Тази неравномерност ще се проявява толкова по-силно, колкото ъгъла между векторите на деформиращата сила F и реакцията R е по-голям. Освен това, компонентите R_x , и R_y ще породят и променлив огъващ момент на инструмента за ППД. Колкото е по-голяма деформиращата сила F , толкова по-голям ще бъде и получаващия се огъващ момент, което ще доведе до по-голяма деформация на инструмента и респективно отклоняване на деформиращия елемент от зададената му траектория на движение.



Фиг. 2.1. Схема на ППД на лопатката на пропелер, осъществявана само по 3-оси: а) зона с опасност от колизия между инструмента и детайла; б) изменение на реакцията R при промяна на кривината на лопатката и зададената деформираща сила F на деформиращия елемент.

В резултат получаващия се РР ще бъде с променливи размери на клетките си, което е нежелан ефект.

За да се избегнат тези недостатъци, освен че деформирания инструмент трябва да се движи по необходимата сложна траектория, характерна за всички схеми на ВППД и ППД, тук възниква и необходимостта от осигуряване на перпендикулярност на оста му, спрямо обработваемата сложна повърхнина във всеки един момент от обработването. Ето защо използването на само три едновременно движещи се праволинейни оси не е достатъчно за постигане на изискванията за получаване на РР с достатъчно висока степен на повтаряемост на параметрите си.

Поради това, че в общия случай сложната повърхнина може да бъде със свободна форма, в допълнение на трите праволинейни движения ще са необходими поне още две въртеливи движения, осигурени от кръгови оси, като и петте движения трябва да могат да се осъществяват едновременно, с цел да се осигури оста на инструмента за ППД да е нормално насочена спрямо обработваемата повърхнина във всеки един момент. Конкретния избор на типоразмер и конфигурация на ММ с ЦПУ и въртящи се оси се определя от спецификите на обработвания детайл, неговата конфигурация, габарити, маса и физикомеханични характеристики на материала от който е изработен. Препоръчително е ротационната ос на масата да може да се върти безконечно, а наклоняващата се ос трябва да може да се накланя в диапазона на поне $\pm 90^\circ$.

2.2 Изисквания към CAD-CAM софтуера за програмиране на необходимата многоосна траектория на движение при ППД на сложни повърхнини.

Основавайки се на поставените изисквания към кинематиката на многоосната ММ с ЦПУ е необходимо да се избере и подходящ CAD-CAM софтуер за програмиране на необходимата многоосна траектория на движение при ППД на сложни повърхнини и генериране на съответната управляваща програма. CAM системата трябва да може да осигурява както водене на инструмента по предварително изчислената сложна синусоидална траектория, така и същевременно оста му на симетрия трябва да бъде перпендикулярна спрямо обработваната повърхнина през цялото време, независимо от променливата и кривина.

2.3 Инструмент за формиране на РР от IV-ти вид чрез пет-осно ППД по сложни неравнинни повърхнини с възможност за измерване на моментната стойност на деформиращата сила.

2.3.1 *Особености и изисквания към конструкцията на инструмента*

Реализацията на процеса за пет-осно ППД по сложни неравнинни повърхнини с помощта на съвременни ММ с ЦПУ не налага наличието на допълнителни механизми, които да осигуряват необходимата сложна траектория на движение на деформиращия елемент. Поради това, конструкцията на инструмента значително се опростява, в сравнение с конструкциите на подобни инструменти (за ВППД), които се използват за работа с универсалните ММ.

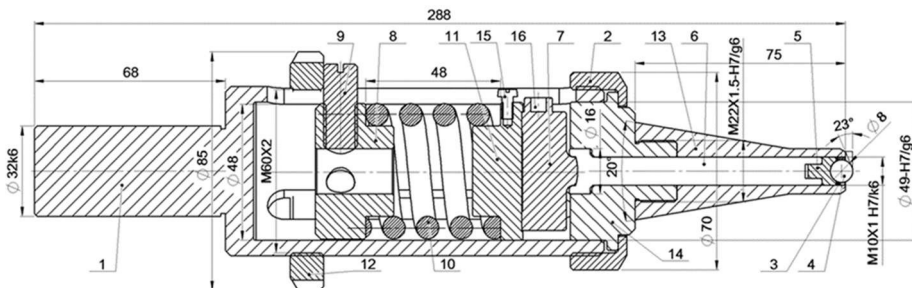
Същевременно обаче, тя трябва да позволява надеждна реализация на процеса и известна универсалност по отношение на използваното технологично оборудване. Например да може да се установява на различни модели ММ с ЦПУ, както и предлага възможност за пренастройване на режимните параметри, като например използване на деформиращи елементи с различен диаметър, пренастройване на големината на деформиращата сила и т.н.

От гледна точка на избягването на колизии между неработните части на инструмента и обработваната чрез ППД повърхнина, диаметъра му при върха трябва да бъде възможно най-малък, но същевременно корпуса трябва да може да уравнива възникващите усилия по време на изпълнение на процеса. Инструмента трябва да осигурява минимално радиално биене на деформиращия елемент, за постигане на по-близка до изчислената траектория на движение, а оттам и на минимално отклонение във формата и размерите на клетките на получаващите се РР.

2.3.2 *Конструкция на инструмент за многоосно ППД на сложни неравнинни повърхнини*

Общият вид на инструмента, съобразен с изискванията за 5-осно обработване чрез ППД на неравнинни повърхнини е показан на Фиг. 2.5. Съставен е от основно тяло (поз.1), който чрез опашка с диаметър ($\varnothing 32\text{к6}$) се установява в стандартни държачи - типоразмер ISO 40 с конусни опашки по DIN 2080 или DIN 69871. По външният диаметър на тялото на инструмента е нарязана метрична резба М60х2, на която са захванати задната гайка (поз.12) и предната капачка (поз. 2). В задната вътрешна част на инструмента се намира задния фланец (поз. 8), по периферията, на който са монтирани радиално три болта М12 (поз. 9) под ъгъл 120° . Те се водят в 3 канала по дължината на тялото на инструмента (поз.

1), като по този начин задния фланец може да се движи аксиално по дължината на инструмента.



Фиг. 2.5. Конструкция на специализиран инструмент за ППД на неравнинни повърхнини с възможност за измерване на деформиращата сила .

Фланеца е в контакт с пружина (поз. 10), чрез който се осигурява еластичен контакт между сачмата (поз.4) и обработваната повърхнина и необходимата сила на натиск. В конструкцията на инструмента се използва стандартна пружина с външен диаметър 48, mm и дължина 65, mm, направена от пружинна стомана (DIN 2076). Пружината натиска предния фланец (поз. 11) върху, който е монтиран миниатюрен силов преобразувател (FCM, SIKA) - поз. 7. Предната част на сензора контактува с плунжера (поз. 6), който чрез бронзовата опорна втулка предава силата от пружината върху сачмата (поз. 4). Сачмата е от високоякостна стомана 100C6 с твърдост 60 ÷ 65 HRC и може да бъде с диаметър 6 или 8, mm. Конусното тяло (поз. 13) заедно с водещата втулка (поз.14) са свързани чрез резбово съединение M22 × 1.5 и имат за цел да подвеждат осево плунжера (поз. 6), като не позволяват наличието радиална хлабина на сачмата. За тази цел се използва и бронзовата втулка (поз.3), която може да се сменя в зависимост от диаметъра на използваната сачма. Притискащата сила на пружината може да се регулира чрез завъртане на задната гайка (поз.12) и може да бъде измерена чрез FCM преобразувателя за сила (поз. 7), на който изходния кабел (поз. 16) е изнесен през един от страничните канали на инструмента, а неговото завъртане се предотвратява чрез болта M4 (поз.15).

За да се отчита моментната стойност на деформиращата сила е изработено електронно устройство за обработване на сигнала от тензометричния преобразувател. Устройството измерва входния сигнал от 0 до 20, mV при изменение на силата на натиск в обхвата от 0 до 5, kN. Сигнала се конвертира от аналогов в цифров вид от вграден аналогово-цифров-преобразувател. След това, цифровия сигнал се подава за преобразуването му в стандартен набор от последователни битове за предаването му към (преносим) компютър по стандарта за комуникация RS232C.

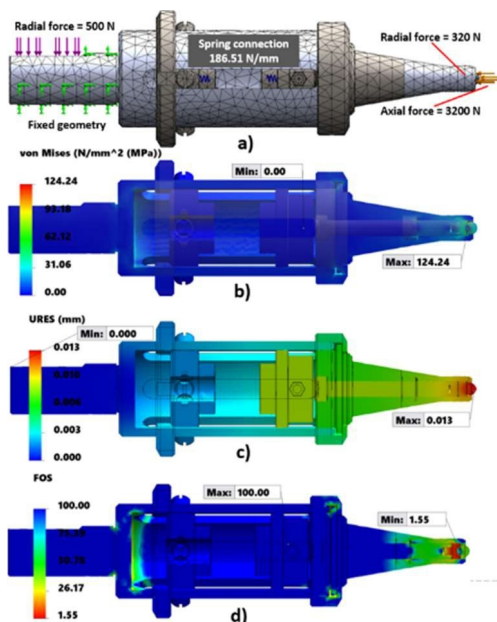
2.3.3 Силев и деформационен анализ на разработения инструмент за многоосно ППД.

За да се провери гореописаната конструкция на инструмента за ППД на неравнинни повърхнини е изготвен 3D CAD модел в SOLIDWORKS (DS, Solidworks, USA) и е извършен силово-деформационен симулационен анализ по метода на крайните елементи .

Целите на този анализ са да се определят максималните напрежения и деформации и коефициента на безопасност на конструкцията на гореописания инструмент. Всички компоненти на устройството са изработени от стомана марка 41Cr4 (BS EN 10083-1: 2006), с изключение на детайлите (позиции 3 и 5) от Фиг. 2.5, които са направени от фосфорен бронз RG5 (DIN 1705) .

Последователността от стъпки за извършване на анализа, използвайки SOLIDWORKS, е както следва:

1. Извършена е предварителна подготовка на геометричния модел на инструмента в удобна форма за извършване на анализ в SolidWorks: опростен е модела чрез изключване на определени елементи като характеристики на резбата, малки отвори и фаски, спиралната пружина и др., които не са от съществено значение.



➤ *Омрежен MKE модел на инструмента със зададени външни силови натоварвания.*

➤ *Резултати от анализа на получаващите се напрежения von Mises, MPa.*

➤ *Резултати от анализа на получаващите се деформации, mm.*

➤ *Резултати от анализа на фактора на сигурност (определящ възможността за поява на пластични деформации).*

Фиг. 2.6. Резултати от силовия и деформационен анализ на инструмента за многоосно ППД

2. Настроени са връзките, граничните условия, начините на закрепване и външните силови натоварвания:

- Фиксирана геометрия: неподвижно е фиксирана цилиндричната повърхност на опашката на инструмента;

- Зададена е еластична връзка (само за натиск) между задната и предната втулки със стойност 186.51, N/mm и дължина 48, mm, което съответства на максимално възможното свиЗ. Генерирана е мрежа от крайни елементи. Използва се контрол за генериране на крайни елементи с по-малки размери в критични области на модела. Броят на възлите е 52085, а броят на крайните елементи е 29291. Използва се мрежа с криволинейни елементи Jacobian 16 точки. Максималният размер на елемента е 7.36, mm, а минималният размер на елемента е 1.47, mm.

След приключване на симулацията са получени следните резултати (виж Фиг. 2.6): Максимално напрежение VonMises е 105.9, МПа и е при върха на инструмента; Максимална деформация URES не по-голяма от 0,012, mm; Минималната изчислена стойност на коефициента на безопасност (FOS) на инструмента е 1.24, което е с 55% по-високо от минималните стойности за това съотношение.

2.4 Математическо описание на необходимата траектория на движение на инструмента при ППД с използване на фрезови машини с ЦПУ

Математическо описание на необходимата траектория на инструмента се задава чрез следната система уравнения:

$$\begin{cases} X_{m,n} = \left(e \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{p}\right)_m + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{D_0^2 + 4 \cdot e^2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{p}\right)_m^2} \right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi n}{p} + i_p \cdot m\right) + d_{fn} \cdot m \\ Y_{m,n} = \left(e \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{p}\right)_m + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{D_0^2 + 4 \cdot e^2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{p}\right)_m^2} \right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{p} + i_p \cdot m\right) \end{cases} \quad (2.2)$$

където: p е предварително зададеният брой точки от полилинията, n е индексът на текущата точка от полилиния ($n = 0, 1, 2, \dots, p$), m е индексът на текущия пълен оборот на сачмата - ($m = 0, 1, 2, \dots, q$), q е броят на необходимите обороти и i_p е само дробната част от съотношението $i = (\omega_1 / \omega_0)$, i_p определя фазовото отместване на траекторията след всяко завъртане на механизма за вибрационно ППД. Дробната част на параметъра i може да бъде изменяна в диапазон от 0 до 0,5.

Броят на необходимите пълни обороти може да се изчисли, като се използва следната формула:

$$q = L(D)/d_{fn} \quad (2.3)$$

където: L (D), mm е дължината (или диаметърът) на деформираната повърхност от обработената заготовка и d_{fm} , mm е линейното разстояние между последователните кръгови траектории на сферичния инструмент.

Ако q се получава дробно число, то трябва да бъде закръглено до следващата най-висока стойност. Използвайки системата от уравнения (2.2), е възможно да се изчислят координатите X и Y на всички точки от полилинията, която задава пътя на деформиращия инструмент. Все пак това не решава проблема с намирането на оптималната дължина на пътя на инструмента спрямо формата и размерите на обработваната повърхнина.

2.4.1 Определяне на ограничителните условия

За да се постигне оптимална траектория се използват допълнителни ограничения, за да се лимитира работата на инструмента

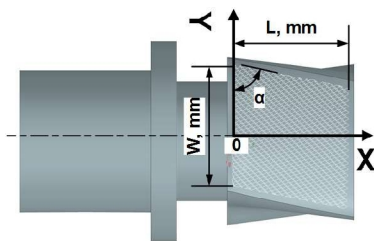
само в границите на необходимата зона на обработване. За целта се използват логически оператори за сравнение като условия за прекратяване на действието на цикли от вида "For –Do" и „While-Do" и условно разклоняване "If-Then-Else" за "отрязване" на онези части от траекторията на инструмента, които попадат извън рамките на повърхнината за обработване.

В случай на ромбоидна форма (виж Фиг. 2.14), ограниченията се определят от дължината L , mm, ширината W , mm, моментната стойност x на координатата X и ъгъла α на равнинната проекция на траекторията върху сложната повърхност, която ще се обработва. Чрез тях могат да се изчислят координатите X_{min} и X_{max} по оста X и Y_{min} и Y_{max} по оста Y на зоната за обработване чрез ППД, като се използват следните формули:

$$L = X_{max} - X_{min}, \text{ mm} \quad (2.4)$$

$$W(x) = (Y_{max} \pm x \cdot \tan(\alpha)) - (Y_{min} \pm x \cdot \tan(\alpha)), \text{ mm} \quad (2.5)$$

Трябва да се вземат под внимание знаците на координатите Y_{min} и Y_{max} и местоположението на началото на координатната система XY . С промяна на знака пред члена $\pm x \cdot \tan(\alpha)$ се задава посоката на изместване на границата, като при знак „+“ посоката е нагоре, а при знак „-“ надолу.



Фиг.2.14. Определяне на границите на зоната на вибрационно ППД в случаите на: а) зона с правоъгълна форма; б) зона с кръгла форма.

2.4.2 *Общ алгоритъм за генериране на оптимални траектории за инструмента*

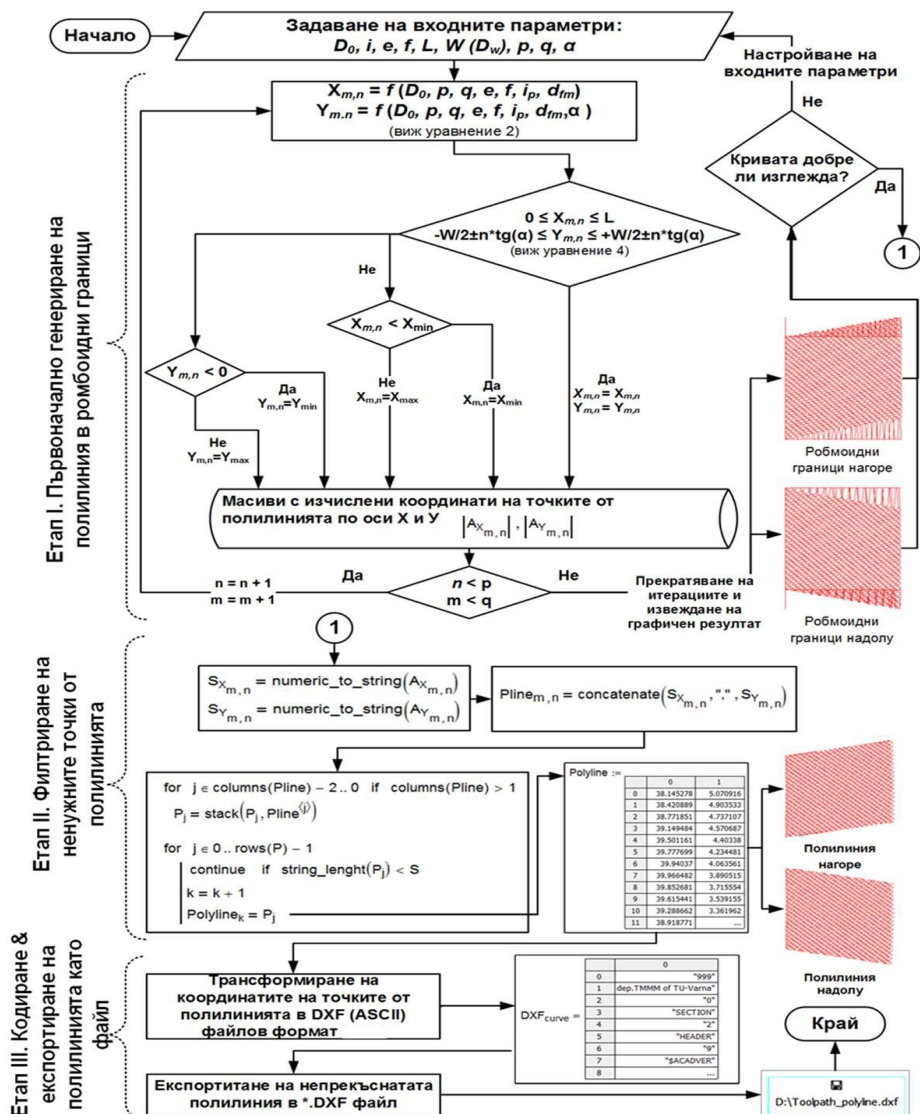
Общият алгоритъм за генериране на последователни полилинии е показан на Фигура 2.15. Тези линии могат да бъдат използвани като траектории за инструмента за ППД с оптимална дължина. Предложеният алгоритъм има три основни стъпки:

1. След първоначалната настройка на входните параметри в Етап I, използвайки уравнения (2.2), (2.4) и (2.5), се изчисляват координатите на всички точки от полилинията. Онези точки, които не попадат в границите на правоъгълната (или кръгова) обработваема област, получават съответна комбинация от стойности на техните координати: X_{min} или X_{max} и Y_{min} или Y_{max} . По този начин "ненужните" точки от траекторията са насложени върху границите на региона. Ако те са включени като елементи на полилинията, общата дължина на траекторията на инструмента няма да бъде оптимална, т.е. операцията по ППД ще бъде ненужно удължена във времето. Освен това деформиращия елемент ще преминава многократно по границите на обработваната област, което може да доведе до по-голямо от допустимото уякчаване на повърхностния слой и влошаване на неговите физико-механични свойства. Следователно те трябва да бъдат отстранени от другите точки на полилинията.

2. В етап II на алгоритъма се премахват ненужни точки от траекторията на инструмента, а оставащите части вътре в зоната се свързват помежду си с прави линии, за да се получи в резултат една единствена непрекъсната полилиния. За тази цел първоначално координатите в двуизмерните масиви S_X и S_Y (с размери $p \times q$) се преобразуват от числена форма в текстов низ (стринг). След това в двуизмерен масив P_{line} стринговете се обединяват и получават формат (" $\pm X$ координатна стойност" + "," + " $\pm Y$ координатна стойност") за всички филтрирани точки от полилинията. Тогава редовете на всички колони на матрицата P_{line} се пренареждат в една под друга, премахвайки онези от тях, където струните имат по-малка дължина от 31 символа. От съществено значение за филтрирането на ненужните точки на полилинията е разликата в дължината на низовете, представляващи координатите на точките, които са вътре в зоната и тези, които се намират в нейните граници.

След трансформация в текстови низове (стрингове) и обединяването им, най-малката дължина на низ от символи на точките, които са вътре в обработваната чрез ППД област, е не по-малък от 31 символа (включително запетаи, десетични знаци и знаци преди цифрите). За сравнение, дължината на низовете с координати на точките, които лежат по границите на обработваната област, не надвишава 9-10 символа. След премахването

на ненужните елементи, получената полилиния има оптимална дължина (виж графиката на инструменталния път в Етап II, показана на фигура 2.15).



Фиг.2.15. Алгоритъм за генериране на полилинии, които могат да се използват за оптимални траектории на инструмента при многоосно ППД.

3. В Етап III на алгоритъма координатите на точките от оптималната полилиния се превръщат в DXF файлова структура, след което се експортират в компютърен файл. След това DXF файла, съдържащ генерираната по описания начин полилиния, може да бъде зареден в подходящ САМ софтуер за дефиниране на пътя на инструмента и генериране на УП за изпълнение на операцията за ППД на подходяща ММ с ЦПУ.

Изводи от Глава II

1. Поради това, че представения подход за формиране на РР по сложни повърхнини не е обвързан с конкретни конструктивно-технологични ограничения на дадено приспособление за ВППД, границите на вариране на отделните параметри на процеса могат да бъдат по-широки, в сравнение с класическите схеми за ВППД, което от своя страна позволява по-прецизно управление на формата и геометричните характеристики на формиращите се РР в по-широки граници;

2. Възможностите на съвременните системи за ЦПУ за многоосови обработки, елиминира необходимостта от използване на допълнителни приспособления, както и характерното за процеса ВППД вибриране на деформиращия елемент, което подобрява условията за обработване, точността на формата и размерите на клетките от РР;

3. Времето за реализация на обработването чрез ППД на сложни повърхнини върху многоосни фрезови центри с ЦПУ съществено се оптимизира, в следствие на ограничаването на работата на инструмента в рамките на обработваните зони – т.е. не се налага да се „обработва въздух“, както при някои съществуващи схеми на ВППД.

4. Времето за технологична подготовка на обработването чрез ППД (включващо моделирането на РР, програмирането на траекторията на движение на деформиращия елемент, извеждането на управляваща програма за машината с ЦПУ и документирането) се съкращава, чрез използването на подходящи САД/САМ системи, като същевременно позволява въвеждането на специфични настройки на всеки един етап от подготовката на управляващата програма;

5. Предложената конструкция на инструмент за изпълнение на петосно обработване чрез ППД позволява безстепенно настройване на деформиращата сила на деформиращия елемент в обработваната повърхнина до 3200, N, както и предлага възможност за отчитане на моментната стойност на деформиращата сила по време на изпълнение на процеса.

6. Резултатите от проведения статичен анализ на модифицирания инструмент за ППД по метода на крайните елементи с модула Simulation на

SolidWorks, показват, че стойностите на максималните напрежения, премествания и на фактора на сигурност са в границите на допустимите. Това гарантира надеждна работа на инструмента за пет-осно ППД без опасност от възникване на пластични деформации в неговите съставни елементи.

7. Предимство на предлаганото решение е сравнително опростената конструкция с минимално необходимия брой детайли. С негова помощ могат да се формират разнообразни видове РР, благодарение на използването му съвместно със съвременни фрезови центри с ЦПУ.

8. Съставения алгоритъм за генериране на полилини може да бъде използван за създаване на необходимия специфичен инструментален път на деформация елемент при ППД на сложни повърхнини, чрез записването им като DXF CAD файл и последващо вмъкване в подходящ CAD-CAM софтуер.

9. Алгоритъма може да бъде реализиран както чрез директно използване на различни математически софтуерни продукти като Mathcad, S-Math, Matlab и т.н., но също така и под формата на макрос(и) (написан на Visual Basic for Applications например), тъй като такива ресурси са интегрирани в много от днешните CAD-CAM софтуерни продукти. Това го прави лесно приложим за различни видове софтуер, използван от разработчиците на NC програми.

ГЛАВА III. ПРОГРАМИРАНЕ В САМ НА ОПЕРАЦИИТЕ ЗА ЕДНОВРЕМЕННО ПЕТОСНО ППД И ПОЛУЧАВАНЕ НА УПРАВЛЯВАЩАТА ПРОГРАМА

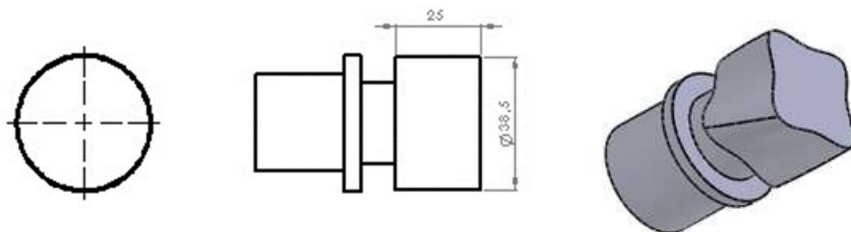
За целите на поставената задача е използван модула САМ Manufacturing на NX (Siemens, Германия), който представлява цялостно решение за компютърно програмиране на металорежещи машини, включително постпроцесориране, проверка на пригодността на производството, симулация и визуализация на обработването и др. За програмиране на операциите за 5-осно едновременно ППД в NX САМ е използван компонента 5-axis Milling – който дава възможност за фрезова обработка на детайли със сложни повърхнини.

3.1. Описание на използваното оборудване.

Използвана е металорежеща машина с програмно управление, която дава възможност за едновременна интерполация по пет оси. За целите на поставената цел в дисертацията е използван вертикален обработващ център HAAS VF-3 в комбинация с двуосна въртяща маса HAAS, модел TR-110.

3.2. Моделиране на експерименталния образец.

За да се реализира ППД върху сложни повърхнини е моделиран опитен образец с форма, която наподобява турбинна лопатка или горната част на пропелер. Формата на страничните повърхнини на опитният образец е избрана така, че да е максимално близка до тази на реални сложни повърхнини, като е съобразена и с възможностите на въртящата се маса и на инструмента. Заготовката на експерименталният образец представлява цилиндър с размери - диаметър $\varnothing 42.0$, mm, и дължина 65, mm, както е показана на Фиг.3.3.



Фиг.3.3 Форма и размери на примерния модел на опитните образци.

3.3. Избор на материал за опитните образци.

Материалът на образците е дуралуминий, марка 2024-T3 (БДС EN 754-3:2008). Характеристиките на този материал позволяват използването

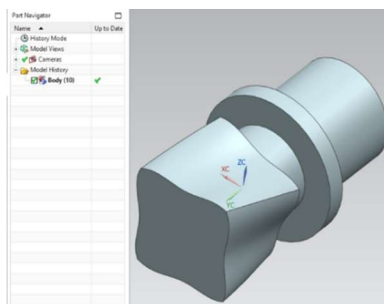
му в много и най-различни приложения и индустрии, тъй като физико-механичните му свойства са добри при относително ниско тегло, и добра корозионна устойчивост. Също така този материал се отличава с повишена пластичност и лесно се поддава на механично обработване.

3.4. Методика за моделиране на обработване на експерименталните образци в CAM продукт.

Създадения 3D модел се импортира в NX, като се ориентира така, че оста на симетрия на детайла да съвпада с ос Y на координатната система на модела. Важно е ос Z да бъде перпендикулярна на обработваните повърхнини (виж Фиг.3.4).

След като бъде правилно ориентирана работната координатна система се задават съответните повърхнини, който ще бъдат обработвани. Задават се и зони за ограничение, т.е. програмата възприема, че на тези места има препятствия (закрепващи приспособления и др.) и ги заобикаля при програмирането на дадена операция.

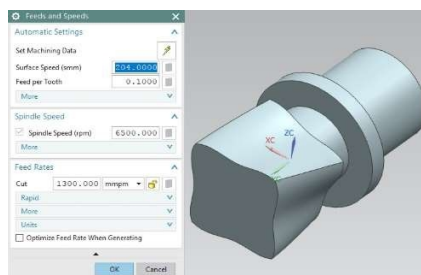
NX CAM модула притежава подробна библиотека със стандартизирани режещи инструменти. Освен това, продукта предлага възможност както да се редактират съществуващите в базата данни инструменти, така и да се създават нови такива, които да са подходящ за съответната операция.



Фиг.3.4 Ориентиране на 3D модела спрямо работната координатната система.

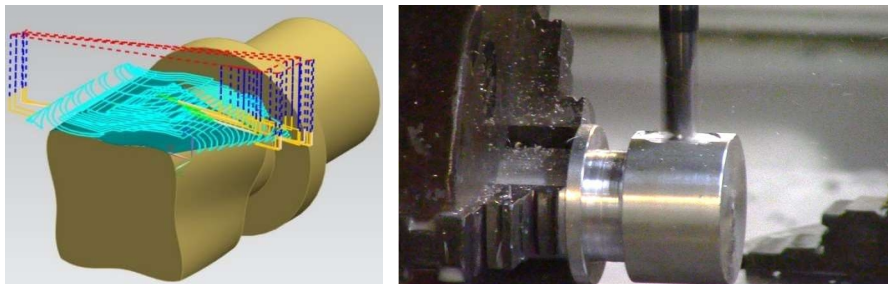
Операция за грубо фрезование.

Програмира се операцията за грубо фрезование на заготовката, като се използва компонента **Cavity Mill**. В диалоговият прозорец се задават режимните параметри (виж Фиг.3.8): подавателна скорост и обороти на вретеното. Задава се повърхнината на обработване и равнината от която започва движението на инструмента. В подменютата може да се определи метода на обхождане на инструмента, посоката на рязане, броят на преходите и т.н.



Фиг.3.8. Панел за избор на режимни параметри.

На Фиг. 3.8 е показан избора на режимни параметри, като се задават: V_c , подавателна скорост 0.1 mm един режещ ръб от инструмента, скорост на въртене на вретено $6500, \text{ min}^{-1}$, скорост на рязане $1300, \text{ mm/min}$. Тези калкулации системата ги прави автоматично на базата на характеристиките на детайла и тези на зададения материал - дуралуминий марка 2024-T3. След това се прави визуализационна симулация на операцията за грубо фрезование, с цел проверка на правилното настройване на компонента Cavity Mill.

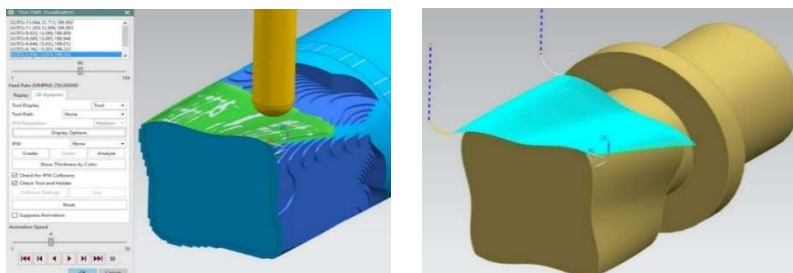


Фиг.3.9 Траектория на инструмента и изображение на операцията.

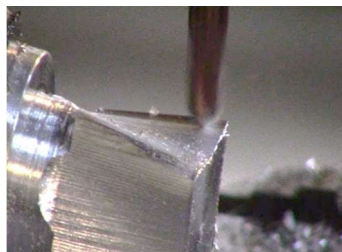
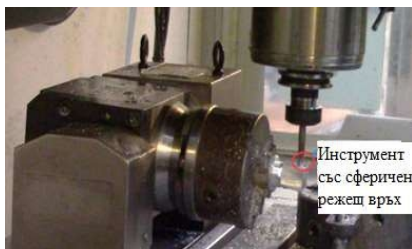
На Фиг. 3.9 са показани траекторията на инструмента, като резултат от грубата фрезова операция и изображение на реалното изпълнение на операцията на ММ с ЦПУ. Операцията се повтаря за всяка от четирите страни на образца (виж фиг. 3.3).

Операция за чистово фрезование.

Операцията за чистово фрезование на сложната повърхнина използва компонента **Contour Area**. Важното при тази операция е да се избере от подменното режещият инструмент да работи с периферията си защото скоростта на рязане близо до оста му на симетрия е близка до **нула**. Това налага едновременно използване на 5-те оси на машината за наклоняване на инструмента. По този начин се гарантира че грапавостта след чистовата фрезова операция ще бъде еднородна по цялата сложна повърхнина. Операцията се повтаря четирикратно за четирите страни на образца.



Фиг.3.12 Траектория на инструмента при компонента- contour Area.



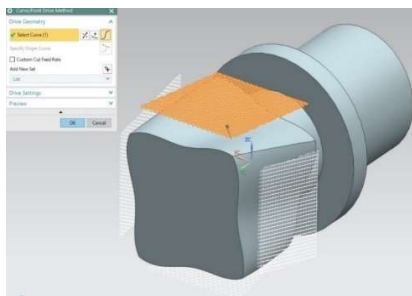
Фиг.3.13 Изпълнение на операцията за чистово фрезование на ММ с ЦПУ.

На Фиг.3.12 е показана визуализация на траекторията на инструмента, като симулация на чистовата фрезова операция, а на Фиг.3.13 е показано изображение на реалното изпълнение на операцията за чистово обработване на металорежещата машина.

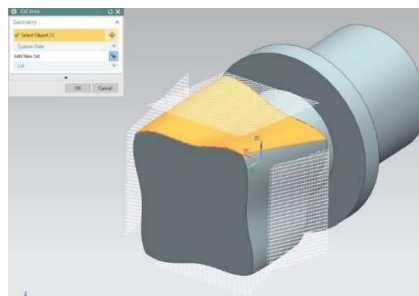
Операция за 5-осно ППД на неравнинните повърхнини.

Генерираните полилинии които имат трапецевидна форма в DXF формат, чиито характеристики се определят на базата на планиран факторен експеримент (виж Глава IV) се импортират в модула Manufacturing на NX. С помощта на вградени инструменти за пространствени трансформации тези полилинии се ориентират така, че да бъдат успоредни на четирите страни на заготовката виж Фиг.3.17.

Полилиниите се задават в компонента Variable contour на NX и се посочват като крива по която да се води инструмента - Фиг. 3.16 и се задава повърхнината на обработване на заготовката по начина показан на Фиг. 3.17.

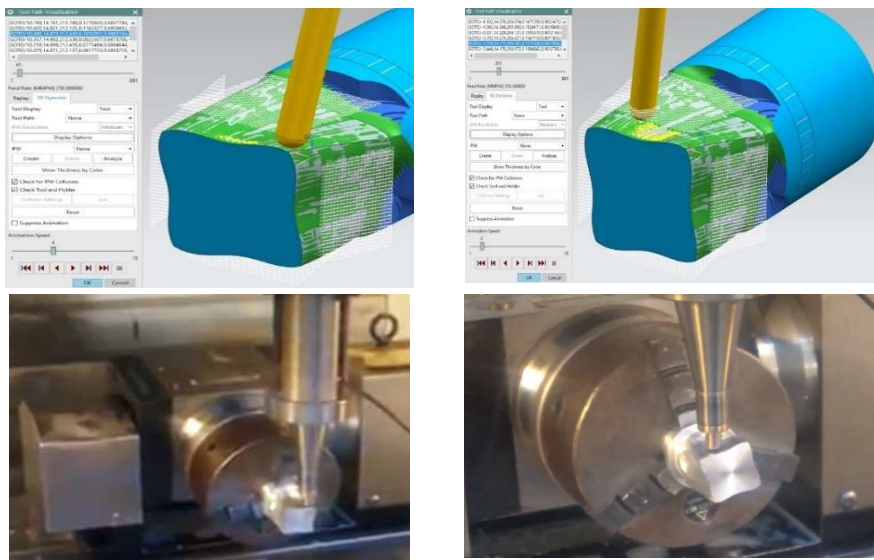


Фиг.3.16 Задаване на водеща крива за обработване.



Фиг.3.17 Избор на повърхнина за обработване.

При тази операция з разлика от предишната се задава оста на инструмента да бъде винаги нормална спрямо моментната кривина на обработваната повърхност, с цел да се запази постоянна деформиращата сила във всяка една точка от обработваната неравнинна повърхнина, както е показано на Фиг 3.18.



Фиг.3.18 Положения на оста на инструмента спрямо моментната кривина на сложната обработваема повърхнина.

Както се вижда от Фиг. 3.18 в компонента е избран инструмент с полусферичен връх с диаметър 6, mm, колкото е и диаметъра на по-малката сачма от инструмента за ППД. При моделирането на траекторията в NX CAM не се налага да се използва 3D модел на реалния инструмент за ППД в симулациите, тъй като това само би усложнило процеса. Неговата дължина се задава в системата за управление на ММ с ЦПУ на етапа на реланото изпълнение на процеса.

Настройване на постпроцесора за пет осно обработване за HAAS VF-3 с помощта на приложението Post Builder.

За да се осъществи реално обработване на образците на фрезовия център VN-3 трябва преди да се генерира управляваща програма от съответния CAM модул да се избере подходящ постпроцесор. Той трябва да отговаря на типа и модела на системата за цифрово програмно управление на машината за да може коректно да „преведе“ информацията за сложната траектория на върха на инструмента за 5-осно ППД в „разбираем“ за системата с ЦПУ код. CAM софтуерните продукти съдържат библиотеки с типови постпроцесори за различни видове и модели ММ с ЦПУ, но за да може те да бъдат настроени за конкретна машина, NX-Seimens предлага отделно приложение Post Builder, чрез който се дава възможност както за редакция така и за създаване на напълно нови постпроцесори.

За да се гарантира плавност на траекторията на движение на инструмента при пет-осно ППД (а по принципи и за многоосни фрезови опера-

ции) се настройва постпроцесора да е с активиран режим на работа на машината при който подавателната скорост на движение или завъртане на осите се изчислява за всеки отделен сегмент от траекторията на движение на инструмента. Това се задава чрез активиране на команда G93 и добавяне на числена стойност след думата за работно подаване F в края на всяко изречение от управляващата програма.

При генерирането на управляваща програма, чрез използването на добавеният редактиран постпроцесор ще се включи команда G93 и работно подаване за всеки ред F, така като е показано на Фиг.3.31. При настройването на пост-процесора е важно да се определи и зададе разстоянието между челото на вретеното на машината и пресечницата на въртящите се оси на масата тип TR-110. Използва се стандартна методиката за засичане на координати и определяне на разстоянието до пресечницата на осите на двуосната въртяща маса с помощта на еталон с фиксирана дължина, влизащ в комплекта на масата - TR-110.

```

1  *
2  O6545 (SSL-MODEL-KOREGIRAN)
3
4  (ТОЧКА 1)
5  (TOOL: R6 D=6.00 r1=3.00)
6  N3 T17 M06
7  N3 G57 G40 G80 G90 G0 X10.599 Y-216.095
8  N3 G0 A97.158 B-7.352
9  N4 G43 Z45. H17
10 N8 M11
11 N10 M13
12 N8 G01 X10.534 Y-216.022 Z-8.256 F250.
13 N9 X10.336 Y-215.804 Z-8.981
14 N10 X10.018 Y-215.454 Z-9.606
15 N11 X9.602 Y-214.996 Z-10.086
16 N12 X9.117 Y-214.462 Z-10.39
17 N13 X8.595 Y-213.887 Z-10.498
18 N14 G93 X8.727 Y-213.698 Z-11.017 A97.259 B-6.393 F1215.584
19 N15 X8.873 Y-213.346 Z-11.573 A97.366 B-5.368 F734.225
20 N16 X9.005 Y-212.981 Z-12.096 A97.465 B-4.382 F706.714
21 N17 X9.103 Y-212.758 Z-12.52 A97.543 B-3.513 F1067.158
22 N18 X9.165 Y-212.766 Z-12.825 A97.594 B-2.781 F1783.393
23 N19 X9.199 Y-212.989 Z-13.045 A97.626 B-2.157 F899.803
24 N20 X9.223 Y-213.313 Z-13.246 A97.656 B-1.58 F681.153
25 N21 X9.25 Y-213.578 Z-13.472 A97.691 B-.983 F795.081

```

Фиг.3.31 Управляваща CNC програма с включена команда G93 и F.

Измерването е извършено с помощта на три координатна измервателна глава Renishaw, модел OP-040 (Wotton-under-Edge, UK) и е определено разстоянието от челото на вретеното до центъра. Това разстояние се задава като отместване Z в работната координатна система G54 (G57), и по този начин се гарантира че координатите на траекторията на движение на инструмента в генерираната чрез редактирания пост-процесор управляваща програма ще съвпадат с реално заеманото положение на експерименталния образец по време на 5-осната операция за ППД.

Поради големият размер на управляващата CNC програма обработването на детайла се извършва в режим DNC, като се използва CIMCO Edit за трансфер на програмата от компютър към ММ с ЦПУ.

3.5 Изводи от Глава III

1 Чрез описаните в началото на главата елементи на технологичната система, а именно фрезови център HAAS VF-3, със система за ЦПУ, комплектувана с въртяща маса марка HAAS, модел TR-110, изграждат система за 5-осна едновременно обработване на сложни повърхнини. Чрез използването ѝ е напълно възможно да се постигне необходимата сложна траектория на движение на върха на инструмента за обработване чрез ППД на сложни пространствени повърхнини от опитните образци.

2 Създаден е опитен образец (виж Фиг. 3.3), притежаващ сложни пространствени повърхнини. Конфигурацията му е такава, че сложната пространствен повърхнина се повтаря четирикратно през 90^0 , което позволява да се извършат ППД обработки от четирите страни на един и същ образец, като по този начин се съкращава броят им и се облекчава провеждането на експерименталните изследвания за определяне повторемостта (формата) на регулярния микрорелеф, както и натисковото деформационно усилие.

3 Използвания 5-осен САМ модул на специализирания софтуер NX, Siemens предоставя необходимия набор от технологични компоненти и настройки за да бъдат програмирани всички операции от обработването на опитните образци на една установка, съществен елемент от което е програмирането на оста на инструмента за ППД да бъде винаги перпендикулярна спрямо моментната кривина на сложната обработвана повърхнина.

4 Предшестващите подготвителни операции, а именно грубо и чисто фрезование на сложните повърхнини от опитните образци е възможно да се изпълнят непосредствено преди операцията за петосно ППД. По този начин те се съвместяват в единна операционна последователност: груба, чиста и довършителна операции изпълнени на една и съща установка, но при различни позиции (ъглови положения) на опитния образец;

5 Идентифицирано е положението на началото на работната координатна система в точката на пресичане на въртящите се оси на масата TR-110 и същото е настроено в САМ за коректно изчисляване на координатите на траекторията на движение на инструментите при 5-осните чистова фрезова операция и тази за ППД.

6 Редактиран и конфигуриран е пет-осния пост-процесор на САМ модула на специализирания софтуер NX така, че при петосната операция за ППД, в управляващата програма да се генерира команда G93 (или обратно инверсно подаване) и подавателна скорост на всеки сегмент от траекторията, което гарантира плавност на траекторията на деформиращия елемент.

7 С помощта на изготвения CAD-CAM модел в NX и конфигурирания постпроцесор е генерирана необходимата управляваща програма обработване чрез пет-осно ППД на експерименталните образци.

генерираната от описания в Глава 2 алгоритъм крива, която определя траекторията на движение на върха на инструмента за ППД спрямо обработваната повърхнина.

В настоящите изследвания, подавателната скорост на движение на деформиращия елемент не е заложена като фактор в експерименталния план, тъй като в режим на едновременно пет-осна работа на фрезовата машина с обратно инверсно подаване (т.е. при активирана команда G93) същата се изчислява от постпроцесора и се задава с различна стойност за всеки ред от управляващата програма, като големината ѝ може да варира значително. Поради тази причина този характерен режимен параметър на процеса ППД не може да се използва с фиксирано ниско и високо ниво в планираните факторни експерименти.

Таблица 4.1. План на пълния факторен експеримент

№	Пълен факторен план с кодирани стойности на факторите				Пълен факторен план с действителни (натурални) стойности на факторите			
	$d_b, (mm)$	$F, (N)$	$e, (mm)$	i	$d_b, (mm)$	$F, (N)$	$e, (mm)$	i
1	-1	-1	-1	-1	6	250	0.5	1650.15
2	-1	-1	-1	1	6	250	0.5	2500.15
3	-1	-1	1	-1	6	250	1	1650.15
4	-1	-1	1	1	6	250	1	2500.15
5	-1	1	-1	-1	6	380	0.5	1650.15
6	-1	1	-1	1	6	380	0.5	2500.15
7	-1	1	1	-1	6	380	1	1650.15
8	-1	1	1	1	6	380	1	2500.15
9	1	-1	-1	-1	8	250	0.5	1650.15
10	1	-1	-1	1	8	250	0.5	2500.15
11	1	-1	1	-1	8	250	1	1650.15
12	1	-1	1	1	8	250	1	2500.15
13	1	1	-1	-1	8	380	0.5	1650.15
14	1	1	-1	1	8	380	0.5	2500.15
15	1	1	1	-1	8	380	1	1650.15
16	1	1	1	1	8	380	1	2500.15

С цел да се осигури гарантирано търкаляне на деформиращия елемент по обработваната повърхнина (а не плъзгане) преди всяка операция за пет-осно ППД, обработваните повърхнини от всички страни на експерименталните образци се омасляват с масло Mobil DT-25. Съобразно гореизложените съображения, при провеждането на изследванията се използва пълен план на факторен експеримент от вида 2^4 , т.е. четири фактора, които се изменят в две нива – ниско и високо. Този експериментален план е ор-

тогонален и има 16 на брой уникални комбинации между ниските и високите нива на участващите фактори. Комбинациите от стойности в кодиран и натурален вид са показани в таблица 4.1.

4.1.2. *Определяне на ниски и високи стойности на вариране на факторите*

Стойностите на ниските и високи нива на първите два основни фактора d_b и F са подбрани съобразно конструктивните ограничения на инструмента за ППД по отношение на диаметъра на използвания деформиращ елемент (т.е. на лагерните сачми), които в случая са съответно 6 и 8 mm. Двата диаметъра на сачмите са избрани така, че при обработването на сложната повърхнина да бъде гарантиран контакт само между деформиращия елемент и сложната повърхнина, независимо от моментната ѝ кривина, като се избягват колизии с други „не работни“ части от конструкцията на инструмента за ППД.

Следващо ограничение се явява максималното натоварване, което може да понесе хидравличната система, която задвижва въртящата се маса НААС TR110. При този модел максималното усилие, което може да бъде приложено спрямо въртящата се маса е ограничено до 400, N, в режим на работа с изключена спирачна система. Спирачната система трябва да е изключена по време на едновременното пет-осно ППД довършващо обработване, тъй като в противен случай това би довело до изключване на спирачката при започване на всяко следващо (елементарно) преместване по траекторията на движение на инструмента и респективно включването ѝ при завършване на движението. Поради тази причина, високото ниво на зададената деформираща сила на деформиращия инструмент е зададена да бъде 380, N или с 20, N по-ниска от пределно допустимото натоварване на въртящата се маса (400 N).

При определянето на стойностите на ниските и високи нива на останалите фактори e и i от експерименталния план от Таблица 4.1., се изхожда от условието, те да бъдат подбрани така, че при всички комбинации от стойности да се получава гарантирано регулярен релеф от IV-ти вид), т.е. по обработваната сложна повърхнина да няма участъци (или „островчета“) с изходна грапавост, които да не са обработени чрез ППД.

За определяне на ширината на следата от деформиращия елемент чрез диаметъра на отпечатъка d_0 , mm се използва известната формула за определяне на твърдост по метода на Бринел,

При зададени ниски и високи стойности на величините F и d_c съгласно експерименталния план, а също и за твърдостта на обработвания материал ВН са изчислени диаметрите на отпечатъка d_o . Стойностите са показани в таблица 4.2.

Таблица 4.2. Изчислени стойности на диаметъра на отпечатъка d_o .

Твърдост по Бринел за алуминий А2024 ВН = 120, (kgf/mm ²)	Диаметър на деформиращия елемент	
	$d_c = 6$, (mm)	$d_c = 8$, (mm)
Приложена натискава сила	Диаметър на отпечатъка от деформиращия елемент	
$F = 250$, (N) ≈ 25.49 (kgf)	$d_o = 0.5196$, (mm)	$d_o = 0.5198$, (mm)
$F = 380$, (N) ≈ 38.75 (kgf)	$d_o = 0.6403$, (mm)	$d_o = 0.6407$, (mm)

В съответствие с това, за експерименталния фактор e , mm , е избрано минималното ниво да бъде 0.5 mm, като по-този начин се очаква следите от деформиращия елемент да се наслагват плътно една до друга и да не остават необработени участъци от обработваната повърхнина.

Стойностите на параметъра i , се определят от заложената дължина на траекторията $\pi \cdot D_o$, mm и дължината на периода l , mm на една синусоида от траекторията на върха на инструмента за ППД, както е показано на фигура 4.1. Отношението им задава стойността на експерименталния фактор i от таблица 4.1. Както се вижда от таблицата на плана на експеримента, фактора i има цяла и дробна част. Цялата част показва колко цели периоди l се вместиат по дължината $\pi \cdot D_o$, а дробната част задава дефазирането между съседните траектории (виж Фиг. 4.1.) При стойности на дробната част около 0.15 се получават клетки от регулярния релеф от IV-ти вид с шестоъгълна форма.

4.2. Изследване на променливостта на деформиращата сила при петосно ППД

Преди започване на изследването, показанията от миниатюрния тензOMETричен силов преобразувател, вграден в инструмента за многоосно ППД се калибрират в обхвата 0 – 400, N с помощта на машина за изпитване на опън-натиск HECKERT ZD 10/90.

4.2.1. Обработване на измерените данни за определяне на променливостта на деформиращата сила при петосно ППД

След извършване на петосните обработки на неравнинните повърхнини от експерименталните образци от планирания факторен експеримент (виж Таблица 4.1) записаните във файлове (тип CSV) моментни стойности на деформиращата сила се импортират в MS Excel (Microsoft Inc.).

Измерените данни се изобразяват графично по начина показан на Фиг. 4.3 (кривите в син цвят).

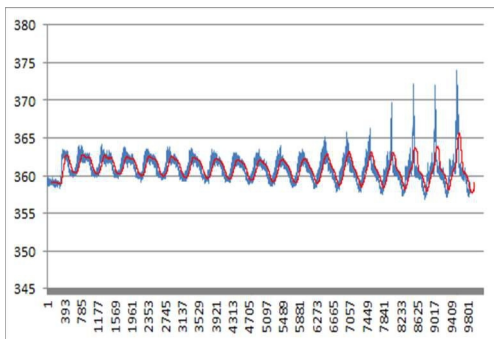
За да бъде по-адекватно оценена променливостта на деформиращата сила за всеки записан сигнал, а не само на базата на гранични максимални и минимални записани стойности, се преминава през следните последователните действия с вмъкнатите в MS Excel данни:

А) **Филтриране на пикови стойности в записаната извадка от данни** – прави се с цел да се премахнат единичните пикови стойности, получени от индуцирани смущения от външни източници и такива, дължащи се на хлабини между деформирания се елемент и върха на инструмента за многоосно ППД, които могат да повлияят значимо на резултатите.

За целта се използва статическата функция опростена „пълзяща средна стойност“ (Simple Moving Average - SMA). Броят на стойностите влизайщи в прозореца при настоящото изследване са определени на $n = 10$, като тази стойност е опитно подбрана, с цел да се премахнат само пиковите от сигнала, но не и той да загуби характера на променливостта си. Филтрираните по описания начин стойности на деформиращата сила се изобразяват графично (виж графиката в червен цвят на Фиг. 4.3), насложени върху данните от записания от тензометричния преобразовател изходни стойности. Поради естеството на метода „пълзяща средна стойност“, общия брой на стойностите на филтрирания сигнал се намалява с $n = 10$, но тъй като дори и при най-краткия записан сигнал те са около 10 000, това не се отразява при определяне на статистическите показатели.

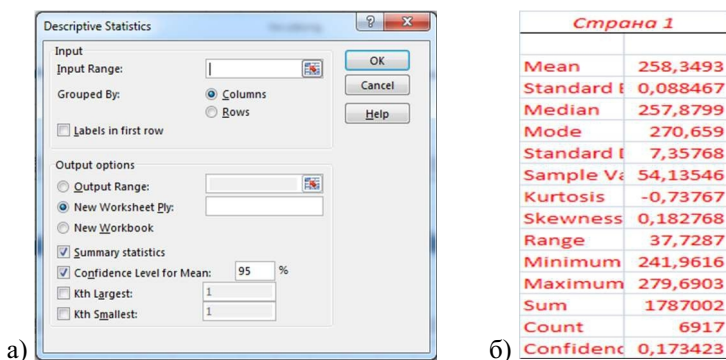
Б) **Определяне на основни статистически показатели за характера на разпределение на стойностите от филтрирания чрез SMA сигнал**

За целите на определянето на променливостта на деформиращата сила на деформирания елемент е необходимо да се изчислят стандартното отклонение (σ) и средноаритметичната стойност ($\bar{X}$) на записаните данни за деформиращата сила. Те лесно могат да бъдат определени чрез добре



Фиг.4.3 Вид на записания изходен сигнал (в синьо) и филтрирания му чрез SMA вариант (в червено) за изменението на деформиращата сила по време на процеса петосно ППД.

известните в т.нар. „описателна статистика“ формули, но в конкретния случай са използвани възможностите на вградения компонент в MS Excel наречен Analysis ToolPak (виж Фиг. 4.4, а). Той предлага множество вградени алгоритми за различни статистически обработки на данни, като една от тях е автоматизираното изчисляване на стойностите на критерии от описателната статистика, включително и необходимите критерии: стандартното отклонение (σ) (Standard Deviation) и средно-аритметична стойност ($\bar{X}$) (Mean) както е показано на Фиг. 4.4, б).



Фиг.4.4 а) Интерфейс на Descriptive Statistic модула на Data Analysis пакета на MS Excel; б) Резултати за статистическите критерии, изчислени с Descriptive Statistic модула на MS Excel

В) Количествено определяне на променливостта на деформиращата сила при петосно ППД

За всеки от 16-те опитни образца (т.е. реда от експерименталния план) броя на стойностите от записаните сигнали е различен, тъй като дължината на траекторията е различна заради различните стойности на режимните параметри e и i . Затова е необходимо да бъде използван по-интегрален критерии за оценяване на променливостта на деформиращата сила, който да не зависи от броя на стойностите на съответната извадка. В съответствие с това, подходящ за оценяване е коефициента на вариация (Coefficient of Variation CV). Той се изчислява като съотношение между стандартното отклонение (σ) и средноаритметичната стойност ($\bar{X}$), като се използва следната формула:

$$CV = (\sigma/\bar{X}).100 \quad (4.4)$$

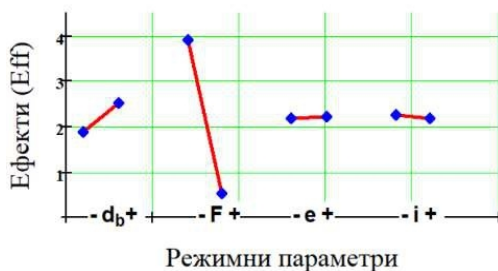
Стойностите за стандартното отклонение (σ) и средноаритметичната стойност ($\bar{X}$) се вземат от изчислените чрез модула за описателна статистика (Descriptive Statistic) в MS Excel на всеки записан сигнал за деформиращата сила.

4.2.2. Резултати за променливостта на деформиращата сила при петосно ППД

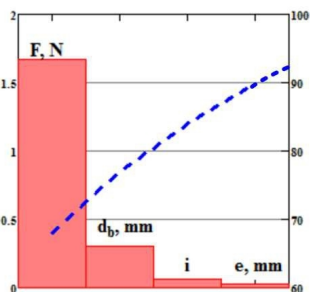
След обработване по гореописания начин на всички записани сигнали (общо 64 на брой) за 16-те експериментални образца всеки с 4 неравнинни страни, се изчисляват коефициентите на вариация по формула 4.4. Резултатите са показани в таблица 4.3.

Таблица 4.3. Резултати за коефициента на вариация CV на деформиращата сила при петосно ППД

Опит	Експериментален план				Експериментални резултати			
	d_b , mm	F, N	e, mm	i	CV, % (Страна 1)	CV, % (Страна 2)	CV, % (Страна 3)	CV, % (Страна 4)
1	6	250	0.5	1650.15	4.351	4.307	4.263	4.229
2	6	250	0.5	2500.15	2.550	2.867	3.046	2.809
3	6	250	1	1650.15	2.848	2.858	3.149	3.078
4	6	250	1	2500.15	3.512	3.635	3.719	3.721
5	6	380	0.5	1650.15	0.178	0.177	0.179	0.172
6	6	380	0.5	2500.15	0.362	0.357	0.355	0.353
7	6	380	1	1650.15	0.324	0.533	0.327	0.321
8	6	380	1	2500.15	0.461	0.461	0.441	0.422
9	8	250	0.5	1650.15	4.086	4.074	4.095	4.274
10	8	250	0.5	2500.15	3.946	3.982	3.972	4.154
11	8	250	1	1650.15	4.385	4.455	4.398	4.441
12	8	250	1	2500.15	4.875	4.928	4.919	4.897
13	8	380	0.5	1650.15	1.148	1.138	1.100	1.035
14	8	380	0.5	2500.15	0.571	0.670	0.653	0.669
15	8	380	1	1650.15	0.508	0.550	0.597	0.574
16	8	380	1	2500.15	0.372	0.435	0.484	0.491



Фиг. 4.5. Графична интерпретация на ефектите на режимните параметри



Фиг. 4.6. Хистограма на под-редените ефекти на режимните параметри по степен на значимост

За да се определи какво влияние указват изследваните режимни параметри на процеса за пет-осно ППД върху променливостта на деформи-

ращата сила, изразена чрез коефициента на вариация, са изчислени съответните ефекти. Изготвена е съответна графична интерпретация, която е показана на Фиг. 4.5.

От получените резултати става ясно че предварително настроената номинална стойност на деформиращата сила F приложена върху деформиращия елемент, както и диаметъра му d_b оказват по-значимо влияние върху променливостта на тази сила в процеса на обработване чрез петосно ППД на сложната повърхнина, докато параметрите e и i значително по-слабо влияние.

За да се ранжират по степен на значимост режимните параметри на процеса се построява Парето-хистограма (в червено) и кумулативна крива (в синьо), показани на Фигура 4.6 с подредени в низходящ ред по степен на значимост режимни параметри.

За потвърждаване на получените резултати е извършен и дисперсионен анализ (ANOVA), като при зададено ниво на доверие $p=(1 - \alpha) * 100 = 95\%$, и степени на свобода $df_A = 1$ и $df_{Er} = 59$, за критичната стойност на Фишер се получава $F\alpha = 4.004$. Изчислените F-тест стойности (F-тест(F) = 1078.52 и F-тест (db) = 38.61) на режимните параметри номинална деформираща сила - F, N и диаметър на деформиращия елемент- db, mm, при 95% ниво на статистическо доверие надвишават значително определената критична $F\alpha$ стойност която е определена на 4.004. Поради това, нулевата хипотеза за тях може да бъде отхвърлена и те могат да бъдат счетени за значимо влияещи на променливостта на силата на деформиране по време на петосно ППД на неравнинните повърхнини.

4.3. Експериментално изследване на получаващата се форма и габарити на клетките от PP обработени по неравнинни повърхнини с различни параметри на режима на петосно ППД.

4.3.1. Методика на експериментално определяне на формата и размерите на клетките от PP

С цел да се опростят експерименталните изследвания се използват същите алуминиеви образци от изследването за определяне на променливостта на силата на деформиране, като тук отново се реализира пълен факторен планиран експеримент от типа 2^4 . Той съдържа същите избрани режимни параметри на процеса (db , F , e и i), варирани на две нива със същите ниски и високи стойности (виж. Таблица 4.1) с четирикратно повторение.

На Фиг. 4.8 е показана измервателната установка за определяне на геометричните параметри на клетките от PP, формирани по обработените повърхнини. Като измервателно средство за изследване на формата и габаритите на клетките от получаващия се PP по неравнинната повърхнина се използва DigiMicro Lab 5.0+ дигитален микроскоп (dnt, Германия) за

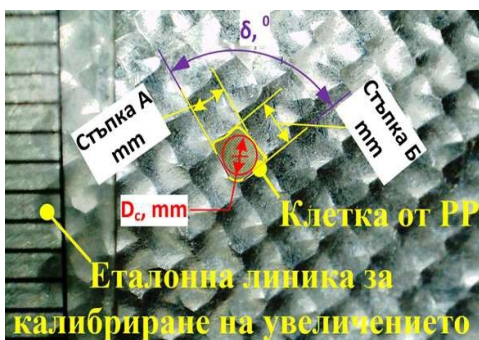
получаване на дигитални изображения на обработените чрез пет-осно ППД повърхнини с висока резолюция (5 MPix) и специализиран софтуер, позволяващ измерване на габаритните размери и параметри на формата на клетките от РР.

Чрез описаната установка се получават дигитални изображения на РР от вида, показан на фигура 4.9.

За целите на настоящото изследване се измерват следните параметри на габарита на клетките от РР (показани на Фиг. 4.9):



Фиг. 4.8. Изглед на дигитален микроскоп Digilab5.0+ свързан с компютър за получаване на дигитални изображения на РР с висока резолюция.



Фиг.4.9. Заснето дигитално изображение на РР с клетки с правоъгълна форма чрез дигитален микроскоп DigiMicro Lab 5.0+ с означени параметри на клетката подлежащи на измерване.

- **Стъпка А, mm**, която е разстоянието между съседните образуващи на клетката във възходяща посока на подреждането им по обработваната повърхнина;

- **Стъпка Б, mm**, която е разстоянието между съседните образуващи на клетката в низходяща посока на подреждането им по обработваната повърхнина;

- **Диаметър Dc, mm**, на вписаната в границите на клетката окръжност ;

- **Ъгъл δ , °**, между две съседни образуващи на клетката, чрез който се следи за изкривяването на формата ѝ.

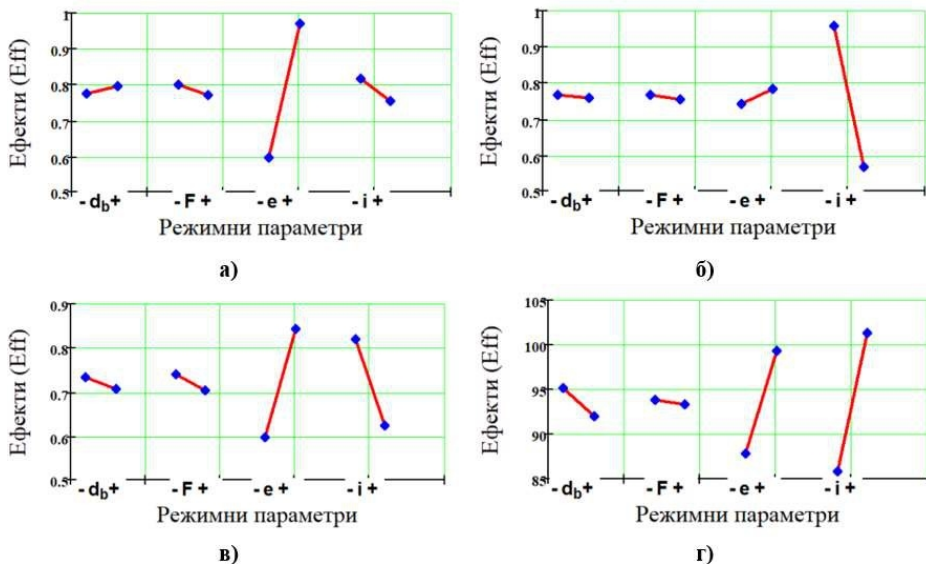
4.3.2. Обработка на получените резултати

Получени са средноаритметични стойности за параметрите на клетките стъпки А и Б, диаметър Dc и ъгъл δ с четирикратно повторение на всеки ред от факторния план.

Тъй като и при това изследване има четирикратно повторение на получените резултати се вземат средноаритметичните стойности изчислени

за съответните редове на планирания факторен експеримент. По изчислените данни за получаващите се ефекти са изготвени съответстващи графични интерпретации, които са показани на Фиг. 4.10, а-г. От получените резултати, а-г става ясно че:

• **Върху стъпката А** на клетките от РР най-голямо влияние оказва режимния параметър на процеса ППД – e , mm, като с увеличаването му от 0.5 на 1 mm, стъпката също се увеличава. Анализирайки резултатите се вижда, че измерените стъпки А имат близки размери със зададените ниски и високи нива на e (0.5 и 1,mm). Останалите режимни параметри не оказват голям ефект върху стъпката А;



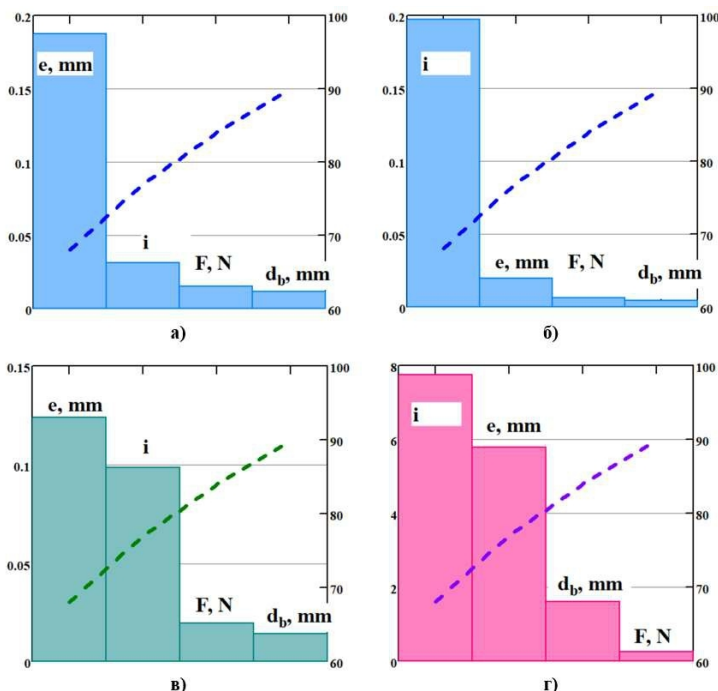
Фиг. 4.10. Графична интерпретация на ефектите на режимните параметри на процеса пет-осно ППД върху: а) Стъпка А; б) Стъпка Б; в) Диаметър Dc; г) Ъгъл δ .

• **Върху стъпката Б** на клетките от РР най-голямо влияние оказва режимния параметър на процеса ППД – i , като с увеличаването му от 1650.15 до 2500.15, стъпката намалява. Анализирайки резултатите се вижда, че измерените стъпки Б си кореспондират с ниските и високи нива на i . Това е логично, тъй като колкото е по-голяма стойността на параметъра i , толкова по-нагъсто се разполагат синусоидите от траекторията на движение на деформиращия елемент (виж. Фиг. 4.1) и следователно и тази стъпка ще се получава с по-малка стойност. Останалите режимни параметри не оказват голям ефект върху стъпката Б.

• **Диаметъра на вписаните окръжности Dc**, mm в клетките от РР се явява интегрален критерий за измерване на габаритите им в сравнение със

стъпки А и Б. Както се вижда от Фиг. 4.10, в, значим ефект върху него оказват и двата параметъра на режима e и i , като посоката на влиянието им се запазва както и при стъпките А и Б (виж Фиг. 4.10, а, б). При по-ниски стойности на e и при по-високи стойности на i , клетките от РР се получават с по-малки размери и обратно. Останалите два режимни параметри F и db не оказват голям ефект върху диаметъра D_c .

• **Ъгъл δ** между две съседни образуващи на клетка от РР може да се използва за характеризиране на формата на клетките от получаващия се релеф по обработваната повърхнина. Той приема стойности в две области: първа област, в която се изменя в рамките на $80 - 95^\circ$ и втора област в която приема стойности $105 - 150^\circ$. Ако се сравнят тези резултати с кореспондентите изображения на РР от Приложение 5 на дисертацията, става ясно че при ъгъл $\delta = 80 - 95^\circ$ се получават клетки с близка до правоъгълната форма, а при $\delta = 105 - 150^\circ$ те са с близка до хексагонална (или шестоъгълна) форма.



Фиг. 4.11. Парето-хистограми на ефектите на режимните параметри на процеса пет-осно ППД върху: а) Стъпка А; б) Стъпка Б; в) Диаметър D_c ; г) Ъгъл δ .

За да се ранжират по степен на значимост режимните параметри на процеса се построяват Парето-хистограми като се използват половинките

на абсолютните стойности на ефектите Eff_j . В резултат се получават Парето-хистограми (в червено) и кумулативни криви (в синьо), показани на Фиг. 4.11 а – г, с подредени в низходящ ред по степен на значимост режимни параметри.

Аналогично на първото експериментално изследване и тук е извършена допълнителна статистическа проверка за определяне на т. нар. „прагова“ стойност на ефекта, която разграничава значимо влияещите от незначимите фактори на експеримента чрез Дисперсионен (ANOVA) анализ. Използва се същата методика за изчисляването като се използва и изчислителната процедура в MathCAD 15.0(PTC) показана в Приложение 4 от дисертацията.

Тъй като при настоящото изследване плана на експеримента е същия както и за определянето на променливостта на деформиращата сила, за дадено ниво на доверие $p=(1 - \alpha)*100 = 95\%$, и степени на свобода $df_A = 1$ и $df_{Er} = 59$ критичната стойност на Фишер отново е $F_\alpha = 4.004$.

От получените резултати за критерия на Фишер (F-тест) от дисперсионните анализи става ясно че:

- **Върху стъпката А** на клетките от РР значимо влияние оказва режимния параметър „Амплитуда на синусоидите – e , mm“ на процеса ППД чийто F-тест = 245.061. Тук Фишер стойността F-тест = 5.733 на режимния параметър „Брой на синусоидите – i “ също надвишава определената прагова стойност $F_\alpha = 4.004$, което макар и с доста по-ниско влияние от e също го определя като значим. Фишер стойностите на останалите два режимни параметри не надвишават праговата стойност, поради което могат да се считат за незначимо влияещи;

- **Върху стъпката Б** на клетките от РР значимо влияние оказва режимния параметър „Брой на синусоидите – i “ на процеса ППД, чийто F-тест = 196.207. Тук обаче Фишер стойностите на останалите три режимни параметри не надвишават праговата стойност, поради което могат да се считат за незначимо влияещи;

- **Върху диаметъра Дс** на клетките от РР основно влияние оказват двата режимни параметри: „Амплитуда на синусоидите – e , mm“ с F-тест = 224.59 и „Брой на синусоидите – i “ с F-тест = 141.605, но също така Фишер F-тест = 5.394 за „Номинална деформираща сила – F , N“ надвишава с малко прага на значимост. Режимния параметър „Диаметър на сачмата – d_s , mm“ не надвишава праговата стойност, поради което се счита за незначим;

- **Върху ъгъла δ** на клетките от РР значимо влияние отново оказват двата режимни параметри: „Амплитуда на синусоидите – e , mm“ с F-тест = 11.798 и „Брой на синусоидите – i “ с F-тест = 21.056, като втория е доминиращ. Фишер стойностите на останалите два режимни параметри не

надвишават праговата стойност, поради което могат да се считат за незначимо влияещи.

Обобщавайки получените резултати може да се направи заключението че се потвърждава предположението че върху формата и габаритните размери на клетките от РР при пет-осно ППД по предлаганата схема основно влияние ще оказват онези параметри на процеса (т.е. e и i), които са свързани със задаването на формата и характеристиките на поли-линията, определяща траекторията на движение на инструмента по неравнинната повърхнина.

4.4. Експериментално изследване на променливостта на получаващата се форма и габарити на клетките от РР в зависимост от различните параметри на режима на пет-осно ППД.

4.4.1. Резултати за степента на еднородност размерите на клетките от РР

В таблица 4.18 са показани изчислените стойности на коефициента на вариация CV за параметъра Dc на клетките от РР.

Таблица 4.18. Резултати за коефициента на вариация CV на диаметъра на вписаната окръжност Dc в клетките от РР в експерименталния план

Опит	Експериментален план				Експериментални резултати			
	d_b , mm	F, N	e , mm	i	CV, % (Страна 1)	CV, % (Страна 2)	CV, % (Страна 3)	CV, % (Страна 4)
1	6	250	0.5	1650.15	4.518	1.363	4.392	2.020
2	6	250	0.5	2500.15	4.753	1.850	4.536	3.804
3	6	250	1	1650.15	3.209	2.809	4.863	2.362
4	6	250	1	2500.15	6.369	2.969	5.094	3.241
5	6	380	0.5	1650.15	6.588	7.148	2.905	6.454
6	6	380	0.5	2500.15	6.065	6.357	3.226	6.272
7	6	380	1	1650.15	1.041	5.168	2.939	0.936
8	6	380	1	2500.15	3.499	6.414	6.061	3.827
9	8	250	0.5	1650.15	3.340	1.863	2.080	5.388
10	8	250	0.5	2500.15	1.775	4.793	3.987	2.967
11	8	250	1	1650.15	4.284	5.656	3.753	4.667
12	8	250	1	2500.15	6.061	3.413	2.156	5.980
13	8	380	0.5	1650.15	2.598	4.141	5.441	2.716
14	8	380	0.5	2500.15	5.082	5.257	6.934	6.165
15	8	380	1	1650.15	1.109	1.773	4.796	2.728
16	8	380	1	2500.15	5.250	3.393	4.337	3.704

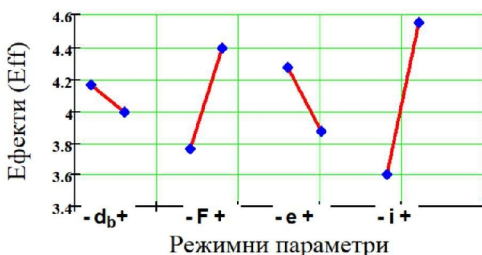
Коефициентите на вариация на диаметъра на вписаната в клетките от РР окръжност се изменя от минимум $CV_{\min} = 0.936$ до максимум $CV_{\max} = 7.148$, или променливостта на размерите е в рамките на 7.15 %. От това може да се направи заключението, че макар в случая обработваните чрез пет-осно ППД повърхнини от експерименталните образци да са неравнинни, което предполага променливост на размерите на клетките в РР тя е

в рамките на максимум 7.15 %. Следователно получаващите се релефи могат да се считат за достатъчно еднородни по отношение на габаритните им размери за практическото им приложение.

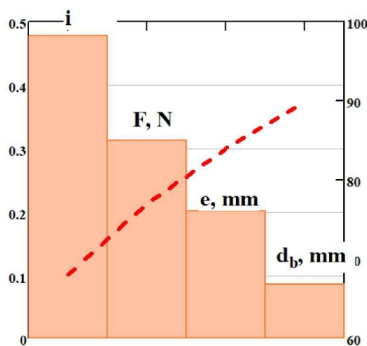
По отношение на влиянието на изследваните параметри на режима на пет-осно ППД върху коефициента на вариация CV на диаметъра на вписаната окръжност D_s са определени ефектите на четирите режимни параметъра на процеса. По изчислените данни е изготвено съответно графично представяне на ефектите, което е показано на Фиг. 4.12.

От получените резултати от Таблица 4.18. и Фиг. 4.12 става ясно че предварително настроената номинална стойност на деформиращата сила F на деформиращия елемент в обработваната сложна повърхнина, както и броя на синусоидите i оказват по-значимо влияние върху променливостта на габаритните размери на клетките от РР на сложната повърхнина, докато параметрите e и dc по-слабо влияние. Парето-хистограмата е показана на Фигура 4.13 с подредени в низходящ ред по степен на значимост режимни параметри.

За избраното ниво на доверие $p = (1 - \alpha) * 100 = 95\%$, и степени на свобода на факторите $df_A = 1$ и на остатъците $df_{Er} = 59$ критичната стойност на Фишер се запазва $F_{\alpha} = 4.004$. Отчитайки това, и получените стойности за критерия на Фишер на режимните параметри на процеса пет-осно ППД става ясно че статистически значимо влияние върху променливостта на габаритите на клетките от РР оказва само режимния параметър: Брой на синусоидите, i , като по-голяма променливост се наблюдава при по-високите му стойности.



Фиг. 4.12. Графична интерпретация на ефектите на режимните параметри.



Фиг. 4.13. Хистограма на подредените ефекти на режимните параметри по степен на значимост

4.4.2. Резултати за степента на еднородност формата на клетките от PP

В таблица 4.21 са показани изчислените стойности на коефициента на вариация CV за параметъра ъгъл δ (виж Фиг. 4.9) между съседните образуващи на клетките от PP.

Таблица 4.21. Резултати за коефициента на вариация CV на ъгъла δ между съседните образуващи на клетките от PP в експерименталния план

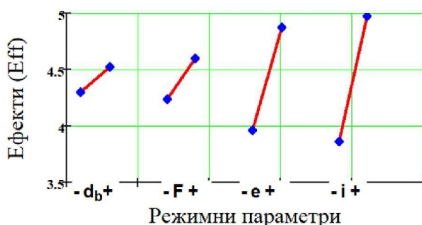
Опит	Експериментален план				Експериментални резултати			
	d_b , mm	F, N	e , mm	i	CV, % (Страна 1)	CV, % (Страна 2)	CV, % (Страна 3)	CV, % (Страна 4)
1	6	250	0.5	1650.15	4.487	3.371	3.556	2.921
2	6	250	0.5	2500.15	0.356	3.408	5.755	2.121
3	6	250	1	1650.15	7.261	1.985	4.172	2.799
4	6	250	1	2500.15	7.388	6.130	7.282	6.557
5	6	380	0.5	1650.15	5.514	5.424	3.672	2.219
6	6	380	0.5	2500.15	3.071	5.042	5.438	4.960
7	6	380	1	1650.15	6.759	0.780	5.884	2.028
8	6	380	1	2500.15	6.267	3.078	4.275	3.726
9	8	250	0.5	1650.15	3.966	2.037	2.642	3.459
10	8	250	0.5	2500.15	6.282	2.471	3.428	5.785
11	8	250	1	1650.15	1.180	3.175	2.062	5.500
12	8	250	1	2500.15	5.207	5.947	6.275	6.661
13	8	380	0.5	1650.15	3.429	5.612	4.470	2.166
14	8	380	0.5	2500.15	5.461	3.596	6.451	4.084
15	8	380	1	1650.15	6.840	4.639	5.496	3.989
16	8	380	1	2500.15	4.451	7.832	3.544	6.827

Както се вижда от таблицата коефициентите на вариация на ъгъла δ между съседните образуващи на клетките от PP се изменя от минимум $CV_{\min} = 0.356$ до максимум $CV_{\max} = 7.832$, или променливостта във формата на клетките е в рамките на 7.83 %. Тук трябва да се има предвид че върху променливостта на формата на клетките от PP освен параметрите на режима на ППД влияние оказва и кривината на обработваната неравнинна повърхнина. Отчитайки това, тя е в рамките на максимум 7.83 %, следователно получаващите се PP могат да се считат за достатъчно еднородни по отношение на формата на клетките.

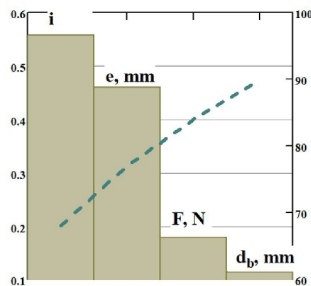
По отношение на влиянието на изследваните параметри на режима на пет-осно ППД върху коефициента на вариация CV на ъгъла δ между съседните образуващи на клетките от PP, са определени ефектите на четирите режимни параметъра на процеса.

Изготвено съответно графично представяне на ефектите, което е показано на Фиг. 4.14. Амплитудата на синусоидите e , както и броят им i оказват по-значимо влияние върху променливостта на формата на клетките от PP на сложната повърхнина, докато параметрите F и dc по-

слабо влияние. Парето-хистограмата е показана на Фигура 4.15 с подредени в низходящ ред по степен на значимост режимни параметри. За избраното ниво на доверие $p = (1 - \alpha) * 100 = 95\%$, и степени на свобода на факторите $df_A = 1$ и на остатъците $df_{Er} = 59$ критичната стойност на Фишер е $F\alpha = 4.004$. Отчитайки това, и получените стойности за критерия на Фишер на режимните параметри на процеса пет-осно ППД в Табл. 4.23 се вижда че статистически значимо влияние върху променливостта на формата на клетките от РР оказват режимните параметри: Брой на синусоидите i и амплитудата на синусоидите e като по-голяма променливост във формата се наблюдава при по-високите им стойности.



Фиг. 4.14. Графична интерпретация на ефектите на режимните параметри



Фиг. 4.15. Хистограма на подредените ефекти на режимните параметри по степен на значимост.

4.5. Изводи от Глава IV

1. Съставени са и са апробирани методики за експериментално измерване и обработване на получените резултати, за определяне на:

- Границите на изменение на деформиращата сила на деформиращия елемент в процеса на пет-осно ППД;
- Влиянието на режимните параметри на процеса пет-осно ППД върху променливостта на деформиращата сила на деформиращия елемент;
- Влиянието на режимните параметри на процеса пет-осно ППД върху формата и габаритните размери на клетките от получаващите се РР;
- Променливостта на размерите и формата на клетките от РР при пет-осно ППД.

2. Получените резултати от експерименталните изследвания показват че:

- По отношение на променливостта на силата на деформиране при пет-осно ППД:

- Най-малки стойности на коефициента на вариация $CV = 0.17\%$ се получават при комбинацията от стойности на режимните параметри съответно $d_c = 6, \text{ mm}$, $F = 380$, $N_e = 0.5, \text{ mm}$ и $i = 1650.15$, а най-

големи стойности за $CV = 4.93\%$ се получават при $d_s = 8, \text{ mm}$, $F = 250, \text{ N}$ и $e = 1, \text{ mm}$ и $i = 2500.15$. Всички коефициенти на вариация са в рамките на максимум до 5% , което предполага че степента на уякчаване на повърхностния слой няма да се различава значително в границите на обработваната повърхнина.

- Установено бе че режимните параметри на процеса за пет-осно ППД: номинална деформираща сила на деформирания елемент- $F, \text{ N}$ и диаметър на деформирания елемент- $d_b, \text{ mm}$, при 95% ниво на статистическо доверие оказват значимо влияние на променливостта на силата на деформиране.

b. По отношение на формата и размерите на получаващите се клетки от РР:

- Стъпката A на клетките от РР основно се влияе от режимния параметър „Амплитуда на синусоидите – $e, \text{ mm}$ “ на процеса ППД и в по-малка степен от режимния параметър „Брой на синусоидите – i “;

- Върху стъпката B на клетките от РР значимо влияние оказва режимния параметър „Брой на синусоидите – i “ а за останалите три режимни параметри е установено че са незначимо влияещи;

- Върху диаметъра D_s на клетките от РР основно влияние оказват двата режимни параметри: „Амплитуда на синусоидите – $e, \text{ mm}$ “ и „Брой на синусоидите – i “. Режимния параметър „Номинална деформираща сила - $F, \text{ N}$ “ макар и да надвишава с малко прага на значимост може да се причисли заедно с режимния параметър „Диаметър на сачмата – $d_s, \text{ mm}$ “ към незначимо влияещите параметри;

- На ъгъла δ между две съседни образуващи на клетките от РР значимо влияние отново оказват двата режимни параметри: „Амплитуда на синусоидите – $e, \text{ mm}$ “ и „Брой на синусоидите – i “, като втория е доминиращ. Фишер стойностите на останалите два режимни параметри не надвишават праговата стойност, поради което могат да се считат за незначимо влияещи.

c. По отношение на променливостта на формата и размерите на получаващите се клетки от РР:

- Максималния коефициент на вариация на диаметъра D_s на вписаната в клетките от РР окръжност е изчислен че е в рамките на 7.15% , което предполага променливост на размерите на клетките в РР да е в рамките на този процент. Следователно получаващите се релефи могат да се считат за достатъчно еднородни по отношение на габаритните им размери за практическото им приложение;

- Статистически значимо влияние върху променливостта на габаритите на клетките от РР оказва само режимния параметър: Брой на синусоидите i , като по-голяма променливост се наблюдава при по-високите му стойности;

- Максималния коефициент на вариация на ъгъла δ между съседните образуващи на клетките от РР е в рамките на 7.83 от което следва че получаващите се релефи са с достатъчна за практически цели степен на еднородност.

- Значимо влияние върху променливостта на формата на клетките от РР оказват режимните параметри брой на синусоидите i и амплитудата на синусоидите e , като по-голяма променливост се наблюдава при по-високите им стойности.

ОБЩИ ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисертационният труд е насочен към приложението на процеса за довършващо обработване чрез ППД на сложни – неравнинни функционални повърхнини от детайли и формиране на РР от IV-ти вид по тях за да се подобрят техните експлоатационни характеристики с помощта на съвременни софтуерни и технически средства. Поставената цел е постигната а задачите са изпълнени в пълен обем. Изследванията направени в тази работа дават увереност че процеса ППД реализиран на ММ с ЦПУ е напълно приложим и за други видове детайли, които могат да се установят и обработят на многоосно технологично оборудване. Предложения подход е особено подходящ, когато се изисква формиране на РР от IV-ти вид на специфични детайли със сложни повърхнини, които са обект на специални производства от дребно и средно-сериен тип. Това е така поради това, че при използването на инструмент с единичен деформиращ елемент (който е единствено възможно в случая) не може да се постига много висока производителност на процеса ППД в сравнение с други довършващи технологични операции.

ПРИНОСИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Анализът на получените при теоретико-експерименталните изследвания резултати дава възможност да се формулират следните приноси:

✓ Научно-приложни приноси

- Разкрит и обоснован е технологичен проблем във връзка с получаването на РР чрез ППД на сложни неравнинни функционални повърхнини на детайлите чрез ММ с ЦПУ.
- Разработен е метод за определяне на габаритните размери и формата на получаващите клетки от РР на сложни неравнинни повърхнини, както и

CAD CAM софтуерни продукти за подготовка на технологичното оборудване.

➤ Предложен е математичен модел за изчисляване на траекторията на инструменталния път на деформирация елемент.

➤ Създадена е методика за сравнителна оценка за промяната на силата на деформиране и на изменението на габаритите и формата на РР.

✓ Приложни приноси

➤ Създадена е конструкция на инструмент за ППД за обработване на сложни равнинни повърхнини с възможност за измерване на силата на деформиране.

➤ Предложен е специализиран софтуер за четене на информацията от силовия преобразувател на инструмента за ППД, визуализацията ѝ на компютърен дисплей и записването ѝ под формата на файл.

➤ Експериментално е доказана възможността на създаване на РР само чрез ППД, без вибрации на деформирация елемент.

➤ Разработен е типов модел в САМ модула на системата NX(Siemens), съдържащ набор от компоненти за последователно изпълнение на операциите.

➤ Отражено е влиянието на елементите на режима на обработване чрез ППД върху силата на деформиране и формата и габаритите на клетките от РР.

Настроен е постпроцесор за генериране на NC програми за обработване чрез ППД на сложни повърхнини, позволяващ плавност на подавателните ходове.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Славов, С. Д., **Илиев, И. В.** "Нова схема за формиране на регулярни релефи по повърхнини със сложна макроформа чрез повърхностно пластично деформиране" Сб. докл. от XIII МНТК "МТМ" Боровец, кн. 1 2016 ISSN 1310-3946 стр. 69-72

2. Slavov S., **Iliev I.** Design and fem static analysis of an instrument for surface plastic deformation of non-planar functional surfaces of machine parts. Fiability & Durability/Fiabilitate si Durabilitate. 2016 Nov 1(2) Academica Brancusi, Targu Jiu, Romania, p. 3-9

3. Slavov S, **Iliev I.** A study on the variability of the pressing force during processing of regular shaped roughness by using new kinematical scheme for ball burnishing process. In MATEC Web of Conferences 2017 (Vol. 112, p. 02006). EDP Sciences. (indexed in SCOPUS)

4. Slavov S. D., **Илев I. V.** Research on the variability of the burnishing force during processing surfaces with 3D shape by using simultaneous 5-axis ball-burnishing process implemented on CNC milling machine. Annual Journal of Technical University of Varna, Bulgaria. 2017 Dec 28;1(1):6-12.

5. **Илев I. V.** Research on the influence of the five-axis ball-burnishing process regime parameters of the cells properties from regularly shaped roughness. Annual Journal of Technical University of Varna, Bulgaria. 2019 June 30; 3(1):21-35.

НОВЫЙ ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ РЕГУЛЯРНЫХ РЕЛЬЕФОВ НА СЛОЖНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОВРЕМЕННОГО ПЯТИОСЕВОГО ОПЕРАЦИЯ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

маг. инж. Илиян Величков Илиев

**Диссертация
на соискание ученой и образовательной степени доктора**

РЕЗЮМЕ

Настоящая диссертационная работа представляет собой комплексное теоретическое и экспериментальное исследование возможностей получения регулярных рельефов по методом поверхностное пластическое деформирования (ППД) на сложных функциональных поверхностях деталей с использованием современных возможностей многоосных станков с ЧПУ и CAD / CAM программные продукты.

В главах второй и третьей настоящей работы описаны все важные элементы технологического оборудования. Они включают информацию о: проектировании соответствующего шарикового инструмента (с возможностью измерения силы нажатия в реальном времени), трехосного фрезерного центра с двухосевым поворотным столом, математической модели и алгоритма генерации необходимый путь инструмента с оптимальной длиной, используемое программное обеспечение CAD / CAM для программирования ППД-операции и получения подходящей ЧПУ-программы и т. д.

В четвертой главе диссертации представлены результаты двух проведенных экспериментальных исследований. Эти исследования

направлены на то, чтобы определить влияние параметров 5-осевого режима ППД-процесса на: изменчивость силы нажатия при обработке сложной поверхности, а также изменение формы и размера ячеек от регулярных рельефов.

Предложенные методики экспериментов, основанные на методах экспериментов по факториальному проектированию, графике эффектов и ANOVA, дают возможность изучить режимные факторы, оказывающие существенное влияние на некоторые качественные параметры сложных поверхностей, обрабатываемых 5-осевым ППД, и могут быть успешно внедрены в практику.

Научная новизна диссертации связана с разработкой инструмента для 5-осевого ППД, который может в реальном времени измерять силу нажатия, алгоритма для генерации траекторий инструмента с оптимальной длиной и адаптации некоторых фрезерных компонентов САМ для создания управляющая программ для 5-осевых операций ППД.

A NEW APPROACH FOR PROCESSING SPECIFIC ROUGHNESS ON COMPLEX FUNCTIONAL SURFACES USING SIMULTANEOUS FIVE-AXIS BALL-BURNISHING PROCESS

by Eng. Iliyan Velichkov Iliev, MSc.

Thesis for acquiring academic and educational degree “Doctor”

SUMMARY

This thesis is a complex theoretical and empirical study on the possibilities for obtaining regularly distributed reliefs (RR) by ball burnishing (BB) method on complex functional surfaces of the parts using the contemporary capabilities of CNC-controlled multi-axis machines and CAD/CAM software products.

In the chapters two and three of the current work, all important technological equipment elements are described. They include information about: design of the appropriate ball burnishing tool (with ability for real time measuring the pressing force), a three-axis milling centre with two-axis rotary table, the mathematical model and algorithm for generating the needed tool-path with optimal length, the used CAD/CAM software for programing the BB-operation and obtaining suitable NC-program, etc.

In the chapter four of the thesis, the obtained results from conducted two experimental investigations are presented. These investigations are focused to determine the influence of the 5-axis BB-process regime parameters over the

variability of the pressing force during processing the complex surface, and the shape and size variation of the cells from regularly distributed reliefs.

The proposed experimental methodologies, based on the factorial design experiments techniques, effects graph, and ANOVA, provide an opportunity to study the regime factors having significant impact on some quality parameters of the complex surfaces processed by 5-axis BB and can be successfully implemented in practice.

The scientific novelty of the thesis is related to the development of an instrument for 5-axis BB, which can measure in real time the pressing force, an algorithm for generating tool-paths with optimal length, and adapting some milling components of the CAM for generating the NC-programs for 5-axis BB operations.

БЛАГОДАРНОСТИ

Изказвам благодарности на своя научен ръководител доц. д-р инж. Стоян Славов за неговите съвети и компетентно ръководство, както и на всички колеги от катедра ТМММ, които ме подкрепиха и ми помогнаха със своя опит и съвети да реализирам този дисертационен труд.

Благодаря на маг. инж. Петьо Милков, Изпълнителен Директор на фирма „Черно Море“ АД за голямата подкрепа с време, специализирано фирмено оборудване и ресурси, оказана по време на работата ми по дисертацията.

Благодаря и на семейството си за съдействието и проявеното безгранично търпение в периода на работата ми по дисертацията.