



# ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „Машиностроене и уредостроене“

маг. инж. Тихомир Петров Атанасов

## Повишаване на уморната дълготрайност на алуминиева сплав 2024-T3 посредством пластично деформиране в условията на триене при търкаляне

### А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор“

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1. Машинно инженерство

Докторска програма: Приложна механика

Научни ръководители: проф. дн Галя Великова Дунчева  
доц. д-р Ангел Петров Анчев

Рецензенти: проф. дтн Йордан Тодоров Максимов  
проф. д-р Любомир Ванков Димитров

Габрово, 2020 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за официална защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Техническа механика” към факултет „Машиностроене и уредостроене” на Технически университет – Габрово, проведен на 27.03.2020 г.

Дисертационният труд съдържа: Въведение, Съдържание, Приети означения и съкращения, 4 глави, Класификация на приносите, Публикации по дисертацията и Литература в общ обем 143 стр., в които са поместени текст, формули, 83 фигури и графики и 22 таблици. Литературата обхваща 140 заглавия – статии, доклади, книги и интернет-сайтове.

Изследванията по дисертационния труд са извършени в катедри „Техническа механика” и „Машиностроителна техника и технологии” към факултет „Машиностроене и уредостроене” на Технически университет – Габрово, както и в Чешкия технически университет в Прага, Чешка република.

Официалната защита на дисертационния труд ще се състои на ..... г. от ..... ч. в Заседателна зала - Ректорат на Технически университет – Габрово.

Автор: Тихомир Петров Атанасов

Заглавие: Повишаване на уморната дълготрайност на алуминиева сплав 2024-T3 посредством пластично деформиране в условията на триене при търкаляне

Тираж: ..... бр.

Място на отпечатване:

Издавателство „Васил Априлов” на Технически университет Габрово

## ПРИЕТИ ОЗНАЧЕНИЯ

- $A_5$  - Относително удължение
- $a_p$  - Дълбочина на рязане
- $C$  - Начален кинематичен модул
- $D$  - Външен (габаритен) диаметър на тороидалната деформираща ролка
- $d$  - Диаметър на заготовката
- $d_p$  - Дълбочина на проникване на ролката/на пластично деформираната зона
- $d^{res}$  - Остатъчно осово преместване
- $E$  - Модул на Young
- $f$  - Подаване за оборот
- $F_b$  - Деформираща сила
- $n$  - Брой преходи
- $N$  - Брой цикли до разрушение от умора
- $r$  - Радиус на закръгление на тороидалната деформираща ролка
- $R$  - Коефициент на асиметрия на цикъла
- $R_a$  - Получавана грапавост според параметъра  $R_a$
- $R_a^{init}$  - Начална грапавост според параметъра  $R_a$
- $v$  - Скорост на деформиране
- $v_c$  - Скорост на рязане
- $z$  - Напречно свиване
- $\alpha_{ij}$  - Тензор микро-напрежение
- $\varepsilon_{nom}$  - Номинална деформация
- $\varepsilon_{ln}$  - Логаритмична деформация
- $\bar{\varepsilon}_p$  - Еквивалентна пластична деформация
- $\dot{\varepsilon}$  - Скорост на деформация
- $\gamma$  - Коефициент, определящ темпа на намаляване на модула на кинематично уякчаване с увеличаване на  $\bar{\varepsilon}_p$
- $\nu$  - Коефициент на Poisson
- $\sigma_a$  - Амплитуда на нормално напрежение
- $\sigma_{ij}$  - Тензор на напреженията
- $\sigma_{-1}$  - Граница на умора при симетричен цикъл
- $\sigma_u$  - Якост на опън
- $\sigma_Y$  - Граница на провлачване на материала на заготовката
- $\sigma_t^{res}$  - Остатъчно окръжно нормално напрежение
- $\sigma_z^{res}$  - Остатъчно осово нормално напрежение
- $\sigma_{nom}$  - Номинално напрежение
- $\sigma_{true}$  - Истинско напрежение

## ПРИЕТИ СЪКРАЩЕНИЯ

LPB	- Low Plasticity Burnishing
SI	- Surface Integrity
ДС	- Деформираща сфера
ДСНД	- Деформираща сфера с недефинирано движение
ИТТ	- Идеално твърдо тяло
КЕ	- Крайно-елементен (крайни елементи)
КДС	- Конусна деформираща ролка
КММ	- Конститутивен модел на материала
ОН	- Остатъчни напрежения
ППД	- Повърхностно пластично деформиране
ПДС	- Профилна деформираща ролка
ТДР	-Тороидална деформираща ролка
УД	- Уморна дълготрайност
УМ	- Умора на материала
УТ	- Уморни тестове
ХДС	- Хидростатична деформираща сфера
ЦДР	- Цилиндрична деформираща ролка

## ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

### Актуалност на проблема

Според изискванията на съвременния пазар, носещите метални конструкционни и машинни елементи трябва да осигуряват висока надеждност и безопасност при експлоатация в съчетание с минимална маса и размери. Тези изисквания доминират в общото и точно машиностроене и във всички видове транспорт (автомобилостроене, самолетостроене, ж.п. транспорт, корабостроене), където жизненият цикъл на елементите зависи преди всичко от феномена умора на материала и трибологичното поведение. Умората на материалите е процес на зараждане на микро-пукнатини (дължащи се на микро-пластични деформации), прерастващи в макро-пукнатина и развитие на последната, отслабвайки съответното носещо сечение. Този феномен се причинява от динамични (или циклични) натоварвания. Достигането на критичната дължина на макро-пукнатината води до внезапно уморно разрушение, независимо, че максималните напрежения на цикъла са по-малки от границата на провлачване на материала. Този тип разрушения са много опасни, тъй като отслабването на носещото сечение често остава незабелязано. За превенция срещу уморни разрушения и надеждност на конструкциите е необходимо да се прогнозира експлоатационното поведение на отговорните конструкционни елементи в корелация с използваната технология за тяхното изработване.

Определяща роля за експлоатацията на конструкционните елементи има комплексът от свойства на повърхностните слоеве, известен като Surface integrity (SI). В действителност, на етапа на изработване на заготовките, подобряването на SI е практически невъзможно, тъй като не могат да бъдат изключени различните дефекти в микроструктурата на металите. В този аспект, все по-актуални са т.н. Surface Engineering Processes, насочени към модифициране на свойствата на повърхностните слоеве. Съвременни екологосъобразни процеси, характеризирани се с относително малка стойност на отношението цена/качество, са процесите за повърхностно пластично деформиране (ППД) на метални компоненти при температурата на околната среда.

По отношение на ротационни компоненти, от гледна точка на кинематика, процесите за ППД са подобни на струговането, като инструментът е твърда и гладка деформираща сфера/сфери или ролка/ролки. Последните се притискат срещу обработваната грапава повърхност, така, че повърхностните слоеве пластифицират. Значителната локална пластична деформация във върховете на микрограпавините променя повърхностната топография по посока на редуциране на микрограпавините, който ефект (burnishing effect) е присъщ на всички процеси за ППД. Същевременно, следствие от високата плътност на дислокациите, повърхностните и подповърхностните слоеве се уякчават (cold work effect), а микроструктурата се модифицира. Тъй като ППД се осъществява при температурата на околната среда, силовото контактно взаимодействие между деформиращите елементи и обработваната повърхнина доминира в сравнение с температурния ефект. В резултат, в близко разположените до повърхността региони се въвеждат полезни остатъчни напрежения (ОН) на натиск. Обратно, остатъчните напрежения в повърхностните слоеве, въведени чрез рязане, обикновено са опънови. Следователно, модифицирането на повърхностните слоеве след ППД се дължи на четири основни позитивни ефекта – значителна редукция на грапавостта, уякчаване, създаване на зона с полезни ОН на натиск и модифициране на микроструктурата. Тази комбинация SI има доказано благоприятно влияние върху уморното и трибологичното поведение и корозионната устойчивост на конструкционните елементи.

Методите, на основа на които се реализират процесите за ППД, могат да бъдат динамични и статични. При статичните методи ротационен деформиращ елемент се притиска статично към обработваната повърхност, като процесът на деформация е непрекъснат във времето. Статичните методи имат по-широко приложение, тъй като дават възможност за управление на параметрите на съответния процес в корелация със SI.

Обект на изследване в дисертационната работа е процесът ППД с тороидална деформираща ролка (ТДР) с цел да се оценят потенциалните му възможности за повишаване на уморната

дълготрайност на ротационни компоненти от високо-яка алуминиева сплав 2024-T3 в корелация с получените характеристиките на SI.

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

Основната цел на дисертационната работа е да се оцени ефективността на процеса ППД с ТДР върху образци от високо-яка алуминиева сплав 2024-T3 в аспект на SI (получена грапавост, микротвърдост, ОН и микроструктура) и подобряване на УД в корелация с параметрите на процеса.

За постигане на основната цел са формулирани следните *основни задачи*:

- ◆ Проучване и систематизиране на съвременното състояние на изследванията на процеси за ППД, използващи контакт триене при търкаляне;
- ◆ Крайно-елементно изследване на напрегнатото и деформирано състояние на цилиндрични заготовки от алуминиева сплав 2024-T3, подложени на ППД с ТДР;
- ◆ Експериментално изследване, моделиране и оптимизиране на получената грапавост в корелация с параметрите на процеса ППД с ТДР на цилиндрични заготовки от алуминиева сплав 2024-T3;
- ◆ Експериментално изследване на микротвърдостта на цилиндрични заготовки от алуминиева сплав 2024-T3, подложени на ППД с ТДР;
- ◆ X-ray diffraction анализ на осовите и окръжни ОН на цилиндрични заготовки от алуминиева сплав 2024-T3, подложени на ППД с ТДР;
- ◆ Експериментално изследване на УД на циклично огъване на образци от алуминиева сплав 2024-T3, подложени на ППД с ТДР с различни параметри на процеса.

### **Методи на изследване**

Приложени са числени симулации и експериментални изследвания, базирани върху предпланиране и планиране на експеримента, регресионен и дисперсионен анализ, микроструктурен анализ и уморни тестове.

### **Авторът защитава**

- ◆ Конститутивен модел на повърхностния слой на високо-яка алуминиева сплав 2024-T3, използван в крайно-елементни симулации за изследване на напрегнатото и деформирано състояние, получено след ППД с ТДР;
- ◆ 3D крайно-елементни модели на процеса ППД с ТДР за изследване на напрегнатото и деформирано състояние в цилиндрични заготовки от високо-яка алуминиева сплав 2024-T3;
- ◆ Регресионни модели на еквивалентната пластична деформация на повърхността и в дълбочина и дълбочината на уякчения слой, получени на основата на планиран числен експеримент;
- ◆ Регресионни модели на осовите ОН на повърхността, осреднените им стойности в дълбочина, получени на основата на планиран числен експеримент;
- ◆ Крайно-елементни и експериментални зависимости за разпределението на осовите и окръжни ОН в цилиндрични образци от алуминиева сплав 2024-T3, подложени на ППД с ТДР;
- ◆ Математичен модел на получаваната грапавост във функция от основните параметри на процеса ППД с ТДР;
- ◆ База данни за повърхностната микротвърдост и разпределението на микро-твърдостта в дълбочина в цилиндрични образци, подложени на ППД с ТДР;
- ◆ База данни за осовите и окръжни ОН, експериментално определени чрез X-ray diffraction анализ при различни комбинации на радиуса на закръгление на ТДР, деформиращата сила и броя на преходите;
- ◆ Резултати от сравнителен микроструктурен анализ на образци от алуминиева сплав 2024-T3, обработени чрез струговане и такива, подложени на ППД с ТДР;
- ◆ Криви на умора, получени на основата на уморни тестове на циклично огъване на образци от високо-яка алуминиева сплав 2024-T3 за различни стойности на радиуса на закръгление на ТДР, деформиращата сила и броя на преходите;

◆ База данни за ограничената граница на умора и условната граница на умора, определена за базов брой цикли  $2 \times 10^8$ , в зависимост радиуса на закръгление на ТДР, деформиращата сила и броя на преходите;

◆ Оптимални стойности на параметрите на процеса, получени на основа проведени оптимизации по различни критерии – максимизиране на еквивалентната пластична деформация (уякчаването) и осовите ОН на повърхността и в дълбочина; минимизиране на получената грапавост;

◆ На база на проведен морфологичен анализ на съществуващи устройства за ППД с контакт триене при търкаляне е разработено универсално устройство за ППД с ТДР на ротационни повърхнини, с възможност за управляване на геометричните и физични параметри на процеса.

### **Практическа полезност**

Разработеното универсално устройство за ППД, снабдено с комплект ТДР и определените оптимални параметри на процеса по различни критерии практически дефинират различни технологични процеси. Те могат да се използват за практическо приложение в инженерната практика за довършващо обработване на ротационни компоненти от високо-яка алуминиева сплав 2024-T3 в зависимост от конкретното им функционалното предназначение.

### **Апробация на работата**

Дисертационната работа е докладвана и обсъждана на разширено заседание на катедра “Техническа механика” при ТУ – Габрово.

Етапи от дисертационната работа са обсъждани и публикувани в:

Списание „Механика на машините“

15-та Национална конференция по машиностроене и машинознание

Списание „Известия на ТУ-Габрово“

### **Публикуване**

По темата на дисертацията са публикувани четири научни статии и два доклада, от които: четири статии в национално списание с научно рецензиране и два доклада на национална конференция.

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

Дисертационният труд съдържа: Въведение, Съдържание, Приети означения и съкращения, 4 глави, Класификация на приносите, Публикации по дисертацията и Литература в общ обем 143 стр., в които са поместени текст, формули, 83 фигури и графики и 22 таблици. Литературата обхваща 140 заглавия – статии, доклади, книги и интернет-сайтове.

## СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

### Глава 1. СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА ЗА ПОВИШАВАНЕ НА УМОРНАТА ДЪЛГОТРАЙНОСТ НА МЕТАЛИ И СПЛАВИ ПОСРЕДСТВОМ ПОВЪРХНОСТНО ПЛАСТИЧНО ДЕФОРМИРАНЕ С КОНТАКТ ТРИЕНЕ ПРИ ТЪРКАЛЯНЕ

На основата на направения анализ на съвременното състояние на проблема с повишаване на якостта на умора на машинни елементи и конструкционни компоненти посредством ППД с контакт триене при търкаляне, са формулирани целта на дисертационната работа и задачите, които трябва да се решат за постигането ѝ.

### Глава 2. ЧИСЛЕНИ СИМУЛАЦИИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА НАПРЕГНАТОТО И ДЕФОРМИРАНО СЪСТОЯНИЕ НА ОБРАЗЦИ ОТ АЛУМИНИЕВА СПЛАВ 2024-T3, ПОДЛОЖЕНИ НА ППД С ТДР

#### 2.1. Крайно-елементни симулации за изследване на напрегнатото и деформирано състояние в компоненти, подложени на ППД – състояние на проблема

Процесите за ППД произвеждат три основни ефекта в повърхностните слоеве, които са благоприятни за повишаване на УД – заглаждане (burnishing), уякчаване (cold work) и създаване на зона с полезни ОН на натиск. Първият ефект се оценява чрез параметрите на повърхностната топография – най-често чрез параметъра  $R_a$ , който параметър е геометрична характеристика на SI. Другите два ефекта - уякчаване (cold work) и ОН са в пряка корелация с разпределението на еквивалентната пластична деформация и температурното поле в повърхностните слоеве. Следователно, те зависят от напрегнатото и деформирано състояние на повърхностните слоеве, създадено в резултат на конкретния процес за ППД.

За реалистично предсказване на УД е необходимо да се познава в качествен и количествен аспект разпределението на ОН. За оценяване на ОН се използват два основни подхода – експериментален и чрез крайно-елементни (КЕ) симулации. Експерименталният подход се базира най-често на безразрушителния метод X-ray diffraction и полу-разрушителния метод Hole Drilling. Поради факта, че експерименталния подход изисква сериозен ресурс от време и средства се налага да се създаде максимално адекватен крайно-елементен модел за изследване на ОН. Основните фактори в тази посока са: реалистичност на геометрията и взаимодействието между деформиращия елемент и заготовката; реалистичност на граничните условия; използваната стратегия за дискретизиране; приетият конститутивен модел на материала на заготовката.

Прегледът на научните публикации, свързани с КЕ изследвания на различни ППД процеси показва, че се изследват деформиращи въздействия с деформиращи елементи със сферична или цилиндрична форма върху широка номенклатура конструкционни материали. В литературата обаче липсват КЕ изследвания на процеса ППД с ТДР на цилиндрични повърхнини. Интерес представлява създаденото посредством ППД с ТДР напрегнато и деформирано състояние върху цилиндрични образци от изследваната високо-яка алуминиева сплав 2024-T3. Настоящото КЕ изследване на процеса ППД с ТДР включва следните основни задачи:

♦ *Разработване на адекватен КММ на процеса ППД с ТДР на цилиндрични образци от високо-яка алуминиева сплав 2024-T3;*

♦ *3D КЕ моделиране на еквивалентната пластична деформация в повърхностните и подповърхностните слоеве;*

♦ *3D КЕ моделиране и оптимизиране на разпределението на осовите ОН на повърхността и в дълбочина;*

♦ *3D КЕ изследване на разпределението на осовите и окръжни ОН в повърхностните слоеве и в дълбочина.*



## 2.2. Разработване на адекватен КММ на процеса ППД с ТДР на цилиндрични образци от високо-яка алуминиева сплав 2024-T3

### 2.2.1. Материал и метод на изследването

Химичният състав на изследваната алуминиева сплав е показан в табл. 2.1.

Химичен състав на алуминиева сплав 2024-T3

Таблица 2.1

Al %	Si %	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Zn%	Cr%
92.88	0.58	0.38	3.31	0.82	1.53	0.0624	0.0365

Търсеният КММ дефинира зависимостта между тензорите напрежение и деформация в пластичната област. При процеса ППД въздействието се прилага върху повърхностния слой на относително малка дълбочина (до  $0.5\text{ mm}$ ). Поради това поведението на този слой значително се различава от това на основния материал (“bulk material”) вследствие от наличието на големи пластични деформации, определен микро-профил (топография) и други ефекти, повлияни от процеса на изработване на заготовките. Поради това конвенционалните едномерни тестове (едномерен опън или натиск) или циклични тестове (например цикличен опън-натиск с контролирана деформация) са представителни преди всичко за поведението на основния материал. За точките от повърхностния слой зависимостта „напрежение – деформация“ в пластичната област трябва да бъде получена от експеримент, който в най-голяма степен съответства на действителното му натоварване. За тази цел в „burnishing” теорията се използва концепцията “flow stress”. Тя се базира върху комбиниран подход, включващ експериментален тест и последващ инверсен КЕ анализ. Експерименталният тест физически прилича на теста на Brinell за измерване на твърдост. За тази цел сферичен накрайник с диаметър на сферата  $0.75 - 2.5\text{ mm}$  се вбива в челото на ососиметричен образец под действие на осова сила  $P$ , така, че схемата на натоварване е ососиметрична. В резултат се определя зависимостта  $P = P(d^{res})$ , където  $d^{res}$  е дълбочина на сферичния отпечатък. Последващият КЕ анализ има за цел да установи зависимостта в пластичната област, която се представя във вида:

$$\sigma = \sigma_Y \left(1 + \frac{E}{\sigma_Y} \varepsilon_p\right)^n, \quad (2.1)$$

където:  $\sigma$  е напрежение в пластичната област (“flow stress”);  $\sigma_Y$  е граница на провлачване;  $E$  е модул на Young;  $\varepsilon_p$  е пластичната деформация;  $n$  определя деформационното уякчаване за едномерно напрегнато състояние.

### 2.2.2. Експериментален тест (“indentation test”)

Експерименталната установка на проведения „indentation test” е показана на фиг. 2.1.

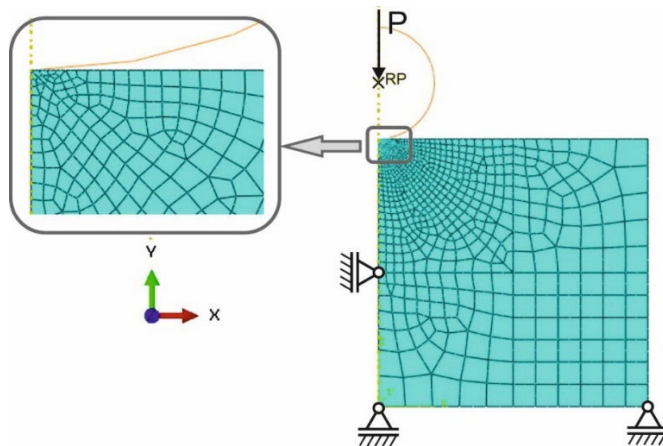
Образецът е цилиндрично тяло с диаметър  $12\text{ mm}$  и височина  $6\text{ mm}$ , а диаметърът на сферата е  $2.5\text{ mm}$ . Приложена е осова сила  $P$  с големина:  $20, 40, 60, 80, 100, 120\text{ kg}$ . На база на измерения диаметър на отпечатъка е получена експерименталната зависимост  $P = P(d^{res})$ , използвана като критерий за дефиниране на неизвестните параметри  $\sigma_Y$  и  $n$  в КММ според зависимост (2.1).

### 2.2.3. КЕ модел на експерименталния тест

За симулиране на експерименталния тест, отчитайки физическата му същност, е разработен ососиметричен „псевдо“ 2D КЕ модел, използвайки Abaqus/CAE 2018 (фиг. 2.2).

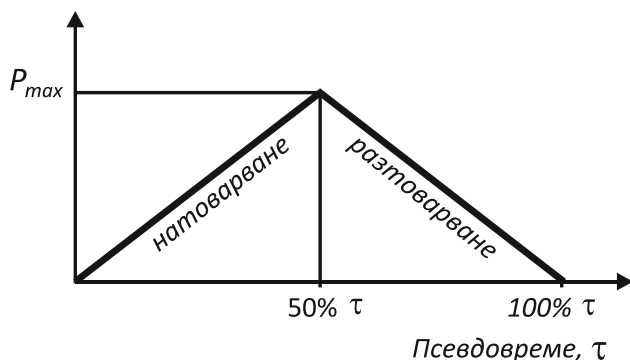


Фиг. 2.1 Експериментална установка за провеждане на "indentation test"



Фиг. 2.2 Псевдо 2D КЕ модел на експерименталния тест

Сферата е моделирана като ИТТ. Размерите на сферата и образца съответстват на тези в механичния тест. Използвана е подходяща стратегия за сгъстяване в зоната на натоварване при дискретизиране на образца (фиг. 2.2). Дефиниран е нормален контакт между сферата и образца с възможност за отделяне. Анализът съдържа две стъпки: натоварване (loading) и разтоварване (unloading). Максималните стойности на силата  $P$  съгласно експеримента са дефинирани по отношение на т.н. Ref. Point на сферата чрез табулирани функции в псевдо-времето  $\tau$  според закона, показан на фиг. 2.3.



Фиг. 2.3 Закон на прилагане на осовата сила  $P$

Моделът на материала на образца е еласто-пластичен. Приети са: модул на Young  $E = 72000 \text{ MPa}$ ; коефициент на Poisson –  $0.33$ . Тъй като влиянието на скоростта на деформация върху ОН е пренебрежимо малко, КММ се приема за независим от скоростта на деформация.

Изборът на адекватен КММ се базира върху следното: многократно се провеждат КЕ симулации, съответстващи на различни комбинации за  $\sigma_y$  и  $n$  в у-ние (2.1);

за всяка комбинация от КЕ резултати се получава зависимостта  $P = P(d^{res})$ ; избира се тази комбинация от параметри, за която получената зависимост е най-близка до експериментално получената.

Уравнение (2.1) дефинира уякчаването в пластичната област за едномерно напрегнато състояние, приемайки, че е валидно за всички възможни напрегнати състояния и пътища на натоварване. В действителност обаче при ППД с деформираща ролка процесът на деформиране е тримерен. Същевременно в околност на точка от повърхностния слой се провокира циклично уякчаване – един цикъл е „натоварване – разтоварване“. Циклично е уякчаването и при ППД с тороидална ролка, тъй като радиусът на закръгление на ролката  $r$  е много по-голям от подаването за оборот  $f$ . Това причинява деформационна анизотропия, свързана с неравномерно преместване на повърхнината на провлачване в пространството на напреженията. За отчитане на този ефект се дефинира модел на нелинейно кинематично уякчаване:

$$\dot{\alpha}_{ij} = \frac{C}{\sigma_0} \sigma_{ij}^a \dot{\epsilon}_p - \gamma \alpha_{ij} \dot{\epsilon}_p, \quad (2.2)$$

където:  $\sigma^0$  е еквивалентно напрежение, дефиниращо размера на повърхнината на провлачване, с начална големина  $\sigma|_0$  - еквивалентно напрежение, дефиниращо размера на повърхнината на провлачване за нулева еквивалентна пластична деформация  $\bar{\varepsilon}_p$  (определя се от едномерен тест, като се приема, че е в сила за всички напрегнати състояния и пътища на натоварване, т.е.  $\sigma|_0 = \sigma_Y$ );  $\sigma_{ij}^a = \sigma_{ij} - \alpha_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  е тензор на напреженията;  $\alpha_{ij}$  е тензор на микро-напреженията;  $C$  е начален модул на кинематично уякчаване,  $\gamma$  е коефициент, определящ темпа на намаляване на модула на кинематично уякчаване с увеличаване на пластичната деформация  $\bar{\varepsilon}_p$ .

От у-ние (2.1) за множество комбинации на  $\sigma_Y$  и  $n$  са изчислени съответните масиви от данни номинално напрежение-номинална деформация ( $\sigma_{nom} - \varepsilon_{nom}$ ) в пластичната област. В Abaqus/CAE се използва „истинско напрежение” (тензор на Cauchy), а мярката на деформацията е „логаритмична деформация”. Масивите от данни ( $\sigma_{true} - \varepsilon_{ln}$ ) се получават на база на масивите ( $\sigma_{nom} - \varepsilon_{nom}$ ) чрез следните зависимости:

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}), \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_{ln} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (2.4)$$

В пластичната област логаритмичната деформация е:

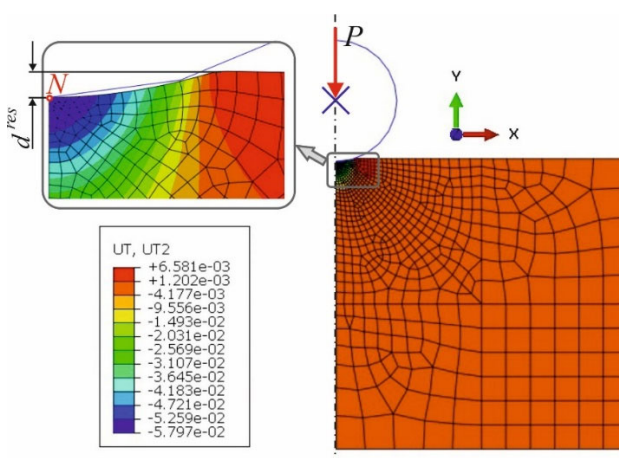
$$\varepsilon_{ln}^p = \varepsilon_{ln} - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (2.5)$$

#### 2.2.4. Избор на КММ

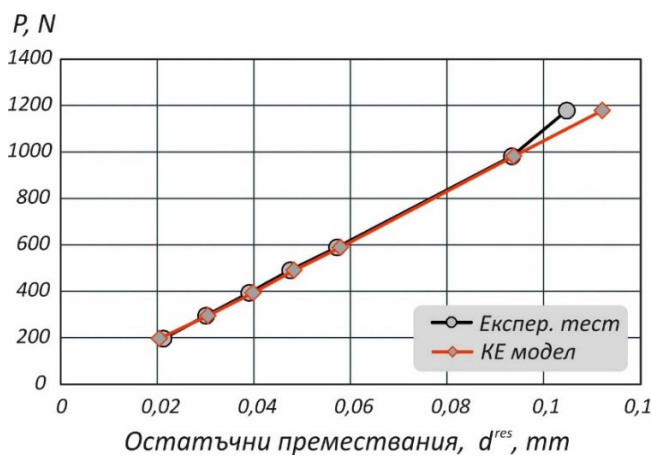
На фиг. 2.4 са показани КЕ резултати за остатъчните премествания  $d_{res}$  в осово направление за избрания КММ за повърхностните слоеве.

Сравнение между максималните остатъчни премествания  $d^{res}$ , получени от КЕ резултати за избрания КММ в централната т.  $N$  от контактната зона (фиг. 2.4) и тези, изчислени на база на механичния тест, е показано на фиг. 2.5. На тази база, параметрите, дефиниращи избраният КММ са:  $\sigma_Y = 310 \text{ MPa}$ ;  $E = 72 \text{ GPa}$ ;  $n = 0.09$ . В съответствие с формула (2.1) е получен следния КММ на повърхностните слоеве:

$$\sigma = 310 \left( 1 + \frac{72000}{310} \varepsilon_p \right)^{0.09} \quad (2.6)$$



Фиг. 2.4 Остатъчни осови премествания за избрания КММ



Фиг. 2.5 Сравнение на остатъчни премествания, получени от механичния тест и избрания КММ

Полученият КММ дава възможност да се провеждат числени симулации за изследване на напрегнатото и деформирано състояние на образци от високо-яка алуминиева сплав 2024-T3, подложени на ППД с ТДР.

### 2.3. 3D КЕ моделиране на еквивалентната пластична деформация в повърхностните и подповърхностните слоеве

#### 2.3.1. Постановка на изследването

Целта на това изследване е да се определят рационалните стойности на геометричните параметри на ДТР и големината на деформиращата сила  $F_b$  от гледна точка на максимално уякчаване на цилиндрични образци от високояка алуминиева сплав 2024-T3. За достигане на целта, последователно са решени следните основни задачи:

- ◆ Планиран числен експеримент на основа на 3D КЕ модел на процеса ППД с ТДР;
- ◆ Регресионен анализ за моделиране на максималната еквивалентна деформация на повърхността и в дълбочина и дълбочината на пластично деформираната зона на основа на КЕ резултати;
- ◆ Многоцелева оптимизация на процеса ППД с ТДР с оглед определяне на рационалните стойности на геометричните параметри на ролката и необходимата деформираща сила.

#### 2.3.2. Планиран числен експеримент

Управляващите фактори са: геометрични параметри - радиус на тороидалната повърхнина  $r$ ; външен диаметър на ТДР  $D$  (фиг. 1.14); големина на деформиращата сила  $F_b$ . Нивата на управляващите фактори в натурални и кодирани стойности са показани в табл. 2.2.

Обект на изследване са следните три целеви функции:

- ◆ Максимална еквивалентна пластична деформация на повърхността  $\max \bar{\epsilon}_{p,s}$ ;
- ◆ Максимална еквивалентна пластична деформация в дълбочина  $\max \bar{\epsilon}_p$ ;
- ◆ Дълбочина на пластично деформираната зона  $d_p$ , mm (табл. 2.3).

Планът на числения експеримент и получените стойности на целевите функции са показани в таблица 2.3.

Нива на управляващите фактори

Таблица 2.2

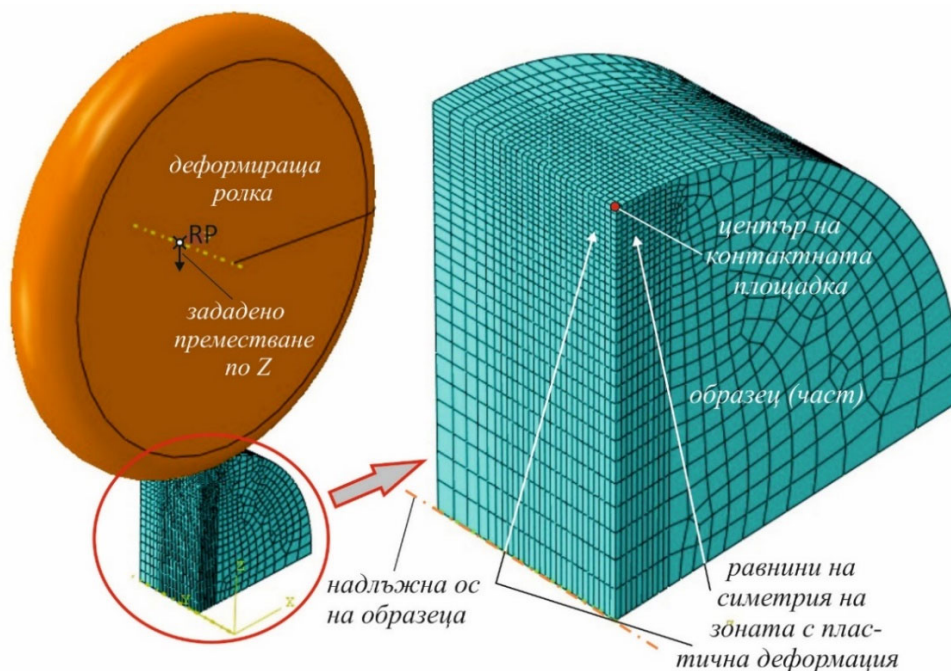
Управляващи фактори	Нива на управляващите фактори	
	Натурални	Кодирани
Радиус на тороидалната повърхнина на ролката, $r$ , mm $x_1$	1	-1
	2	-0.5
	3	0
	4	+0.5
	5	+1
Деформираща сила, $F_b$ , N $x_2$	300	-1
	600	-0.333
	900	+0.333
	1200	+1
Диаметър на ролката, $D$ , mm $x_3$	26	-1
	40	+1

План на числения експеримент

Таблица 2.3

№	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\max \bar{\varepsilon}_{p,s}$	$\max \bar{\varepsilon}_p$	$d_p \times 10^{-1}, \text{mm}$
1	-1	-1	-1	0.1486	0.1486	1.35
2	-1	-0.333	-1	0.2201	0.2273	2.13
3	-1	+0.333	-1	0.3174	0.3284	2.63
4	-1	+1	-1	0.3694	0.3715	3.22
5	-1	-1	+1	0.1348	0.1348	1.35
6	-1	-0.333	+1	0.2132	0.2166	2.13
7	-1	+0.333	+1	0.2895	0.3012	2.63
8	-1	+1	+1	0.3522	0.3536	2.91
9	-0.5	-1	-1	0.0932	0.0958	1.35
10	-0.5	-0.333	-1	0.1282	0.1432	2.13
11	-0.5	+0.333	-1	0.1703	0.1932	2.63
12	-0.5	+1	-1	0.1876	0.2206	3.22
13	-0.5	-1	+1	0.0867	0.0918	1.35
14	-0.5	-0.333	+1	0.1208	0.1355	2.13
15	-0.5	+0.333	+1	0.1628	0.1860	2.63
16	-0.5	+1	+1	0.1852	0.2164	3.22
17	0	-1	-1	0.0683	0.0756	1.35
18	0	-0.333	-1	0.1002	0.1150	2.13
19	0	+0.333	-1	0.1228	0.1453	2.63
20	0	+1	-1	0.1449	0.1728	3.22
21	0	-1	+1	0.0591	0.0667	1.35
22	0	-0.333	+1	0.0919	0.1069	2.13
23	0	+0.333	+1	0.1097	0.1316	2.63
24	0	+1	+1	0.1313	0.1610	3.22
25	+0.5	-1	-1	0.0578	0.0651	1.35
26	+0.5	-0.333	-1	0.0762	0.0918	2.13
27	+0.5	+0.333	-1	0.0945	0.1185	2.63
28	+0.5	+1	-1	0.1157	0.1446	3.22
29	+0.5	-1	+1	0.0535	0.0602	1.35
30	+0.5	-0.333	+1	0.0728	0.0851	1.90
31	+0.5	+0.333	+1	0.0908	0.1121	2.63
32	+0.5	+1	+1	0.1088	0.1353	3.22
33	+1	-1	-1	0.0491	0.0547	1.35
34	+1	-0.333	-1	0.0697	0.0823	2.13
35	+1	+0.333	-1	0.0867	0.1043	2.63
36	+1	+1	-1	0.1017	0.1241	3.22
37	+1	-1	+1	0.0459	0.0514	1.35
38	+1	-0.333	+1	0.0604	0.0742	2.13
39	+1	+0.333	+1	0.0761	0.0960	2.63
40	+1	+1	+1	0.0894	0.1156	3.22

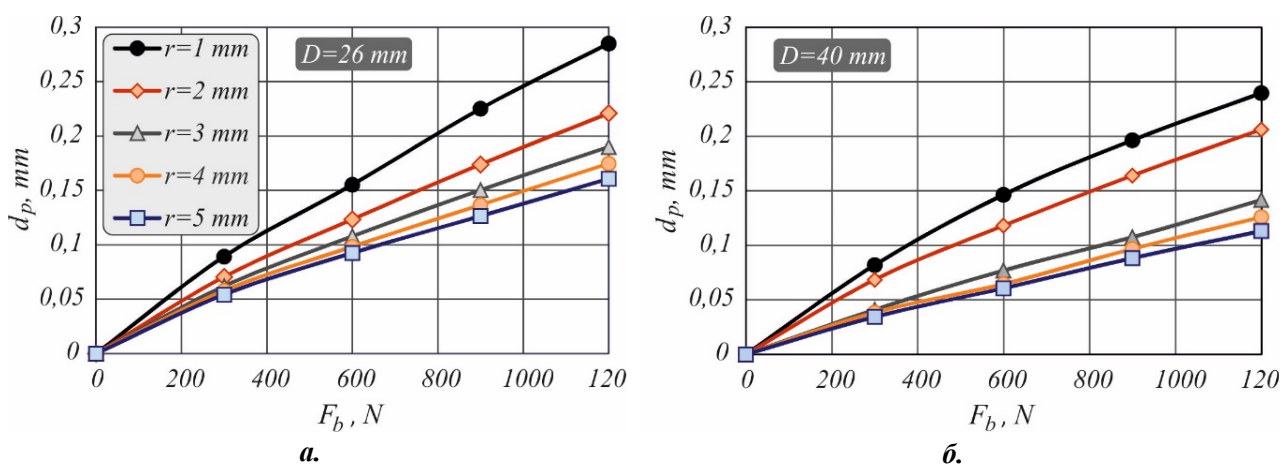
За провеждане на планирания числен експеримент е разработен 3D KE модел на изследвания процес, използвайки Abaqus/CAE 2018. ТДР е приета за ИТТ с различни геометрични параметри съгласно табл. 2.3. Отчитайки двойната симетрия на проблема, е моделирана част от цилиндричен образец с диаметър  $d = 20 \text{ mm}$ , дискретизирана по един и същи начин за всички експериментални точки. 3D KE модел за една комбинация от геометрични параметри на ТДР е показан на фиг. 2.6. За симулиране на взаимодействието със съседните слоеве от образца, за всички повърхнини с изключение на външната цилиндрична повърхнина, е зададена еластична основа с коравина, равна на модула на еластични деформации:  $E = 72 \text{ GPa}$ .



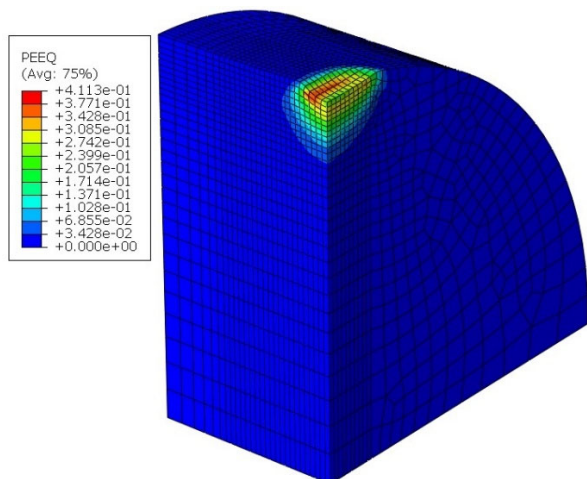
Фиг. 2.6 3D КЕ модел за ТДР с параметри:  $D = 26 \text{ mm}$  и  $r = 3 \text{ mm}$

Материалът на образца е еласто-пластичен, независим от скоростта на деформация. Зададен е коефициент на Poisson:  $\nu = 0.33$ . КММ е зададен в съответствие с описаното в т. 2.2.3. и т. 2.2.4. Между ролката и образца е зададен нормален и тангенциален контакт. Деформиращото въздействие е симулирано, като е използван контрол по преместване, зададен по отношение на т.н. Ref. Point (RP) на ТДР (фиг. 2.6). Проведени са предварителни симулации за определяне на максималната дълбочина на проникване на ролката  $d_p$  в зависимост от управляващите фактори. Резултатите са визуализирани на графиките, показани на фиг. 2.7а, б.

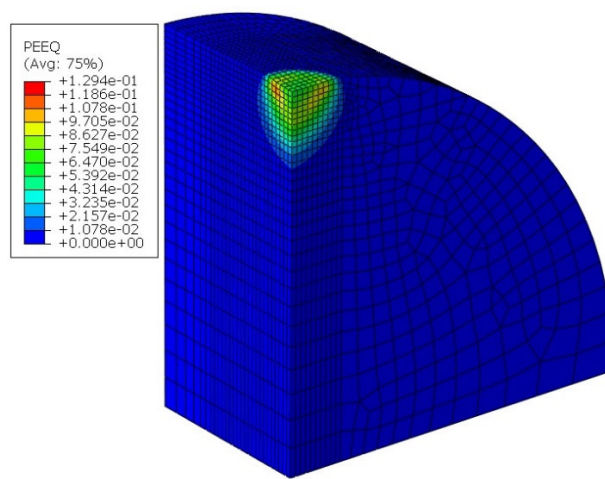
Очаквано, при равни други условия, нарастването на радиуса на закръгление на ТДР  $r$  води до по-голяма контактна площ, а оттам до по-малка дълбочина на проникване  $d_p$ . Същевременно, за един и същи радиус на закръгление  $r$ , дадена деформираща сила  $F_b$  води до по-голяма стойност на  $d_p$ , когато ролката е с по-малък диаметър ( $D = 26 \text{ mm}$ ).



Фиг. 2.7 Графики на функцията  $d_p = d_p(r, D, F_b)$



Фиг. 2.8 Разпределение на  $\bar{\epsilon}_p$  за експ. точка №4  
(  $D = 26 \text{ mm}$ ;  $r = 1 \text{ mm}$ ;  $F_b = 1200 \text{ N}$  )



Фиг. 2.9 Разпределение на  $\bar{\epsilon}_p$  за експ. точка №31  
(  $D = 40 \text{ mm}$ ;  $r = 4 \text{ mm}$ ;  $F_b = 900 \text{ N}$  )

На фиг. 2.8 и фиг. 2.9 са показани КЕ резултати за разпределението на еквивалентната пластична деформация  $\bar{\epsilon}_p$ , съответно за експериментални точки №8 и №31. Максимална стойност на  $\bar{\epsilon}_p$  се наблюдава в сечението, дефинирано от осите на образца и ТДР, но встрани от центъра на контактната зона. Причината е пластичния поток на материала и взаимодействието със съседните слоеве. КЕ показват, че  $\bar{\epsilon}_p$  е максимална в дълбочина, а не на повърхността, с изключение на комбинациите, за които  $r$  и  $D$  едновременно са на долната граница.

### 2.3.3. Регресионен анализ

На база на КЕ резултати, използвайки системата QStatLab е проведен регресионен анализ. Получени са следните регресионни модели в кодиран вид:

◆ Модел на  $\max \bar{\epsilon}_{p,s}$ :

$$F(\max \bar{\epsilon}_{p,s}) = 0.102 - 0.05x_1 + 0.039x_2 - 0.005x_3 + 0.064x_1^2 - 0.005x_2^2 - 0.045x_1^3 - 0.006x_2^3 - 0.039x_1x_2 + 0.002x_1x_3 + 0.034x_1^2x_2 + 0.005x_1x_2^2 \quad (2.7)$$

◆ Модел на  $\max \bar{\epsilon}_p$ :

$$F(\max \bar{\epsilon}_p) = 0.123 - 0.054x_1 + 0.053x_2 - 0.005x_3 + 0.054x_1^2 - 0.008x_2^2 - 0.037x_1^3 - 0.008x_2^3 - 0.037x_1x_2 + 0.02x_1x_3 + 0.028x_1^2x_2 + 0.08x_1x_2^2 \quad (2.8)$$

◆ Модел на  $d_p$ :

$$F(d_p) = 2.381 - 0.071x_1 + 0.791x_2 - 0.014x_3 - 0.111x_2^2 + 0.064x_1^3 + 0.151x_2^3 + 0.031x_1x_2 - 0.011x_2x_3 + 0.011x_1x_3 - 0.045x_1^2x_2 + 0.048x_1x_2^2 + 0.031x_1x_2x_3 \quad (2.9)$$

Съпоставяйки коефициентите в модели (2.7) и (2.8) може да се заключи, че влиянието на факторите показва едни и същи тенденции: най-голямо е влиянието на радиуса на закръгление на ролката ( $x_1$ ), а на-малко е влиянието на третия фактор – диаметърът на ролката ( $x_3$ ). Върху дълбочината на пластично деформирания слой  $d_p$  (модел (2.9)) най-голямо влияние оказва големината на деформиращата сила ( $x_2$ ), а влиянието на другите два фактора е незначително.

Влиянието на факторите върху първата и третата целеви функции е визуализирано посредством сечения на хипер-повърхнините на функциите (2.7) и (2.9) със различни хипер-равнини (фиг. 2.10 а -е).

### 2.3.4. Многоцелева оптимизация

Чрез системата QStatLab е проведена многоцелева оптимизация за определяне на рационалните стойности на управляващите фактори, осигуряващи максимално уякчаване на повърхността и в дълбочина и максимална дълбочина на уякчения слой. За тази цел, използвайки генетичен алгоритъм, едновременно е зададен максимум на трите целеви функции:

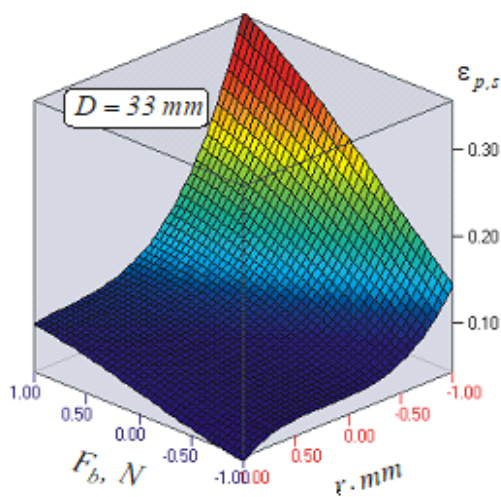
$$F(\max \bar{\varepsilon}_{p,s}) \rightarrow \max; \quad F(\max \bar{\varepsilon}_p) \rightarrow \max; \quad F(\max d_p) \rightarrow \max; \quad (2.10)$$

На база на резултатите, получени от предварителен експеримент за получената грапавост след ППД с ТДР, е зададено ограничение за радиуса на тороидалната повърхнина на ролката  $r, mm$ , т.е. за управляващия фактор  $x_1$ :  $\min x_1 = -0.5$ . В резултат от оптимизацията са получени следните рационални стойности за управляващите фактори в натурални координати (табл. 2.4).

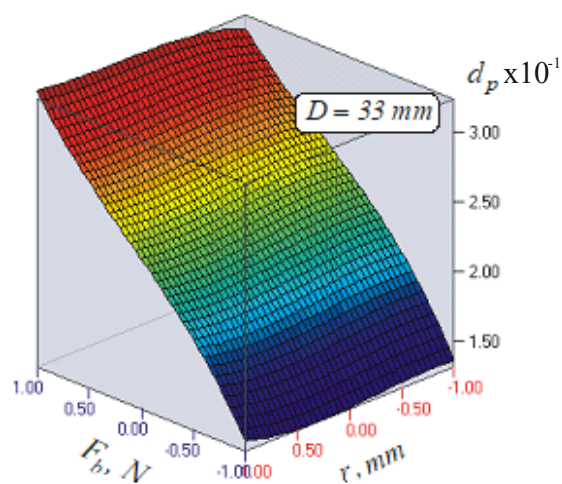
Рационални стойности на управляващите фактори

Таблица 2.4

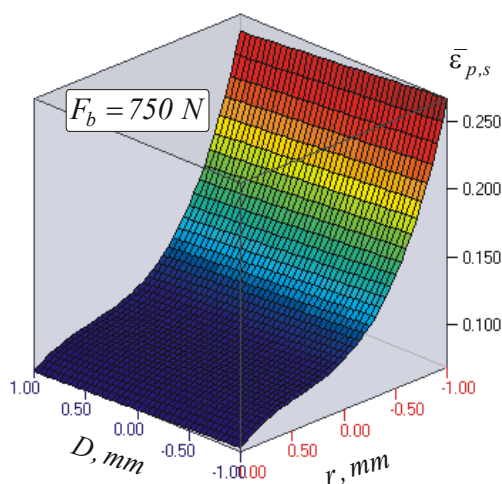
$r, mm$	$F_b, N$	$D, mm$
$r = 2.0014 \text{ mm}$	$F_b = 1199.595 \text{ N}$	$D = 28.0916 \text{ mm}$



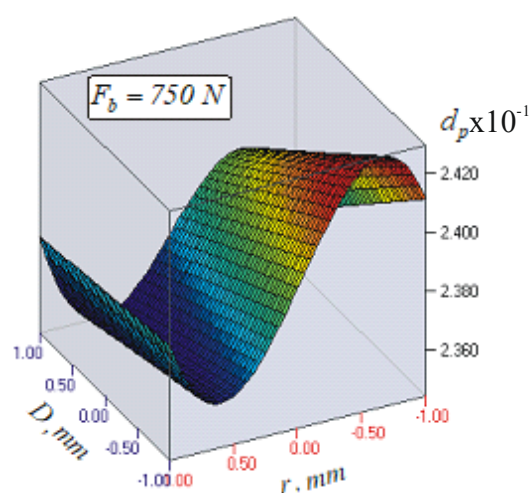
а.



б.

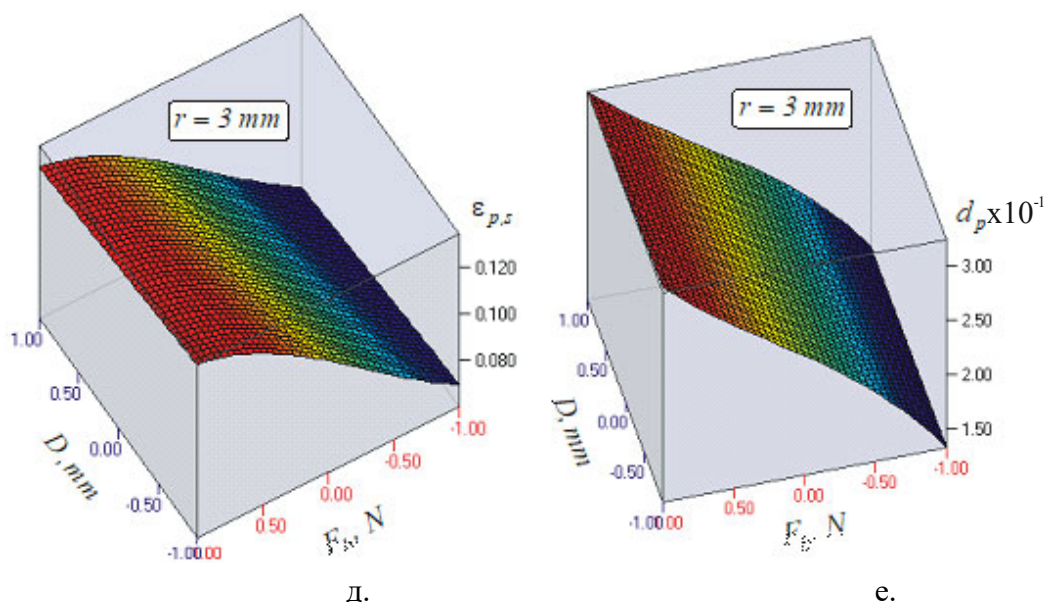


в.



г.





Фиг. 2.10 Сечения на хипер-повърхнината на модели (2.6) и (2.8) с различни хипер-равнини

## 2.4. 3D КЕ моделиране и оптимизиране на разпределението на осовите ОН на повърхността и в дълбочина

### 2.4.1. Цел на изследването

Целта на настоящото изследване е да се определят рационалните стойности на параметрите на процеса ППД с ТДР в цилиндрични образци от високо-яка алуминиева сплав 2024-T3 на основа на 3D КЕ моделиране на разпределението на осовите ОН. Ефективността на даден процес за повишаване на УД на ротационни компоненти в голяма степен зависи от разпределението на осовите ОН на повърхността и в дълбочина. За постигане на посочената цел са решени следните основни задачи:

- ◆ Провеждане на планиран числен експеримент на основа на 3D КЕ модел на изследвания процес;
- ◆ Моделиране на осовите ОН в повърхностните слоеве;
- ◆ Оптимизация на процеса ППД с ТДР от гледна точка на разпределението на осовите ОН на повърхността и в дълбочина.

### 2.4.2. Планиран числен експеримент

#### ► Детайли на планирания числен експеримент

Скоростта на въртене е изключена като управляващ фактор в планирания числен експеримент, поради факта че тя има ограничено влияние върху SI. От друга страна, при процеса ППД с ТДР радиусът на закръгление на външната тороидална повърхнина на ролката  $r, mm$  е много по-голям в сравнение с практически рационалните стойности на подаването  $f, mm/rev$ . Следствие от това, по направление на дадена образуваща от цилиндричната повърхнина на заготовката, се получава ефект на препокриване на контактните зони между ТДР и обработваната повърхнина. В резултат, дори след един преход, точките от повърхностните слоеве са подложени на циклично уякчаване. При равни други условия влиянието на цикличното уякчаване върху разпределението на ОН ще зависи от подаването. На база на горната обосновка са избрани следните управляващи фактори:

- ◆ Радиус на закръгление на тороидалната повърхнина на ролката  $r, mm$ ;
- ◆ Подаване за оборот  $f, mm/rev$ ;
- ◆ Големина на деформиращата сила  $F_b, N$ .

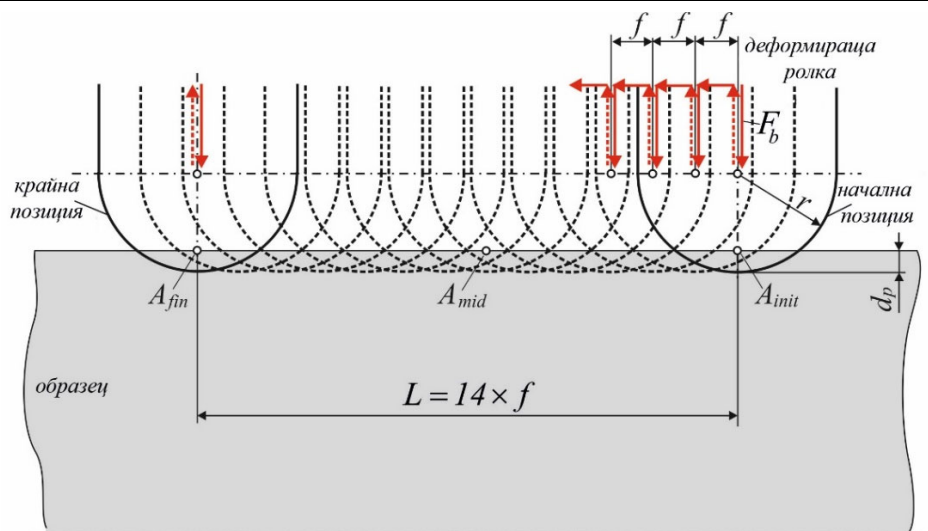
Означенията на управляващите фактори и нивата им в натурални и кодирани координати са показани в таблица 2.5.

Обект на изследване е разпределението на осовите ОН  $\sigma_z^{res}$  по направление на образуваща от цилиндричната повърхнина на заготовката, получено след симулиране на 14 цикъла съгласно схемата, показана на фиг. 2.11.

Управляващи фактори и техните нива

Таблица 2.5

Управляващи фактори	Нива на управляващите фактори	
	Натурални	Кодирани
Радиус на закръгление на тороидалната повърхнина на ролката, $r$ , mm ( $x_1$ )	2	-1
	4	0
	6	+1
Подаване за оборот, $f$ , mm/rev ( $x_2$ )	0.04	-1
	0.08	0
	0.12	+1
Големина на деформиращата сила, $F_b$ , N ( $x_3$ )	600	-1
	900	0
	1200	+1



Фиг. 2.11 Принципна схема за симулиране на взаимодействието между ТДР и заготовката

План на числения експеримент

Таблица 2.6

№	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\sigma_{z,sur}^{res}$ , МПа	$\bar{\sigma}_z^{res}$ , МПа
1	-1	-1	-1	-236.11	-161.52
2	+1	-1	-1	-170.21	-127.91
3	-1	+1	-1	-284.70	-155.71
4	+1	+1	-1	-233.89	-136.91
5	-1	-1	+1	-211.27	-228.35
6	+1	-1	+1	-125.94	-202.12
7	-1	+1	+1	-325.83	-240.41
8	+1	+1	+1	-259.04	-212.56
9	-1	0	0	-302.02	-215.23
10	+1	0	0	-212.80	-182.26
11	0	-1	0	-181.37	-185.11
12	0	+1	0	-275.97	-187.52
13	0	0	-1	-260.77	-154.40
14	0	0	+1	-230.67	-222.36

За провеждане на планирания числен експеримент е избран оптимален композиционен план, показан в табл. 2.6. За всяка точка от плана на експеримента, от КЕ резултати е систематизирана информация за осовите ОН, както следва:

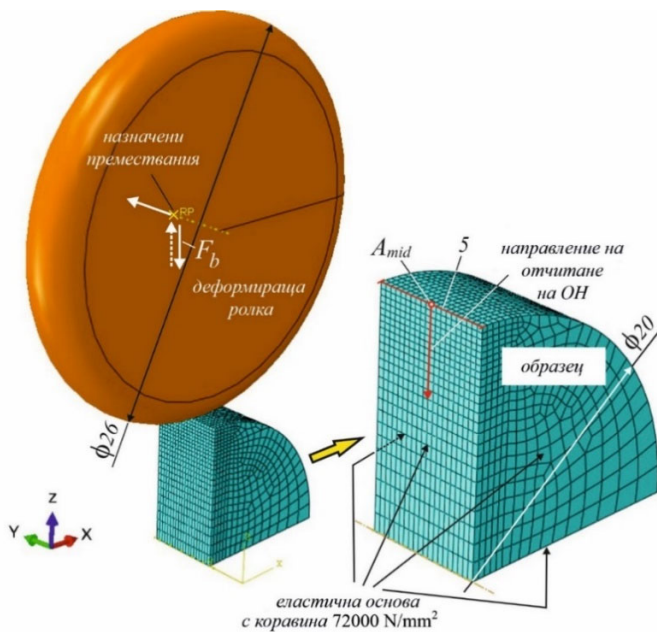
- ◆  $\sigma_{z,sur}^{res}$  е осово ОН на повърхността, отчетено в т.  $A_{mid}$ ;

♦  $\bar{\sigma}_z^{res}$  е изчислената средна стойност на осовите ОН, съответстващи на първите пет възела в дълбочина от повърхностния слой с начало възела, съответстващ на т.  $A_{mid}$ .

Стойностите за  $\sigma_{z,sur}^{res}$  и  $\bar{\sigma}_z^{res}$  формират получените целеви функции в планирания числен експеримент (табл. 2.6).

### ► КЕ моделиране

В действителност при ППД с ТДР процесът на деформиране е тримерен. За получаване на реалистична картина за осовите ОН, е разработен обобщен 3D КЕ модел на изследвания процес, използвайки Abaqus/CAE 2018. На основа на предварителни експерименти, конструктивни ограничения при разработване на устройство за ППД с ТДР и проведеното числено изследване на разпределението на еквивалентната пластична деформация в изследваната алуминиева сплав 2024-T3 (т. 2.3.4), е приет постоянен външен диаметър на ролката  $D=26\text{ mm}$ . В 3D КЕ модел ТДР е приета за ИТТ (фиг. 2.12).



Фиг. 2.12 Обобщен 3D КЕ модел

Изследват се осовите ОН в цилиндрична заготовка с диаметър  $d = 20\text{ mm}$ . Заготовката е симетрично натоварена по отношение на равнина, съдържаща оста ъ. Поради това е моделирана 1/2 част от заготовката. За всички нейни повърхнини, с изключение на външната цилиндрична повърхнина, е зададена еластична основа с коравина, равна на модула на Young на изследваната сплав -  $E = 72000\text{ MPa}$ . По този начин е симулирано взаимодействието със съседните, еластично натоварени слоеве от материала (фиг. 2.12). Избрана е относително малка дължина на заготовката -  $5\text{ mm}$ . Основанията за това са следните. Изследваният процес се характеризира с много голям градиент на деформацията в радиално направление, а размерите на контактната зона са много по-малки в сравнение с размерите на заготовката. Следователно, може да се приеме, че силовото деформиращо въздействие е независимо от външните граници на заготовката. По време на процеса цялата цилиндрична повърхнина на заготовката се обхожда, влизайки в контакт с ТДР. Този контакт се осъществява по идентичен начин във всеки момент от процеса. Следователно, може да се симулира целия процес, като се моделира само част от заготовката. Заготовката е дискретизирана по един и същи начин за всички числени симулации. Използвана е техника за сгъстяване в зоната за контакт (фиг. 2.12). В съответствие с плана на експеримента се променят радиуса на закръгление на ролката  $r$  и големината на деформиращата сила  $F_b$ .

Процесът е симулиран, като е използван контрол по преместване на ТДР. Преместванията на ролката в радиално направление (по ос  $Z$ ) и в осово направление (по ос  $Y$ ) са дефинирани чрез синхронизирани в псевдо-времето табулирани функции по отношение на Ref. Point (RP) на ТДР (фиг. 2.12). За дефиниране на зависимостта между големината на деформиращата сила  $F_b$ ,  $N$  и дълбочината на проникване на ролката  $d_p$ ,  $mm$  са проведени предварителни КЕ симулации. Зависимостта  $F_b = F_b(d_p)$  за трите стойности на радиуса на закръгление на ролката в табулиран вид е показана в табл. 2.7.

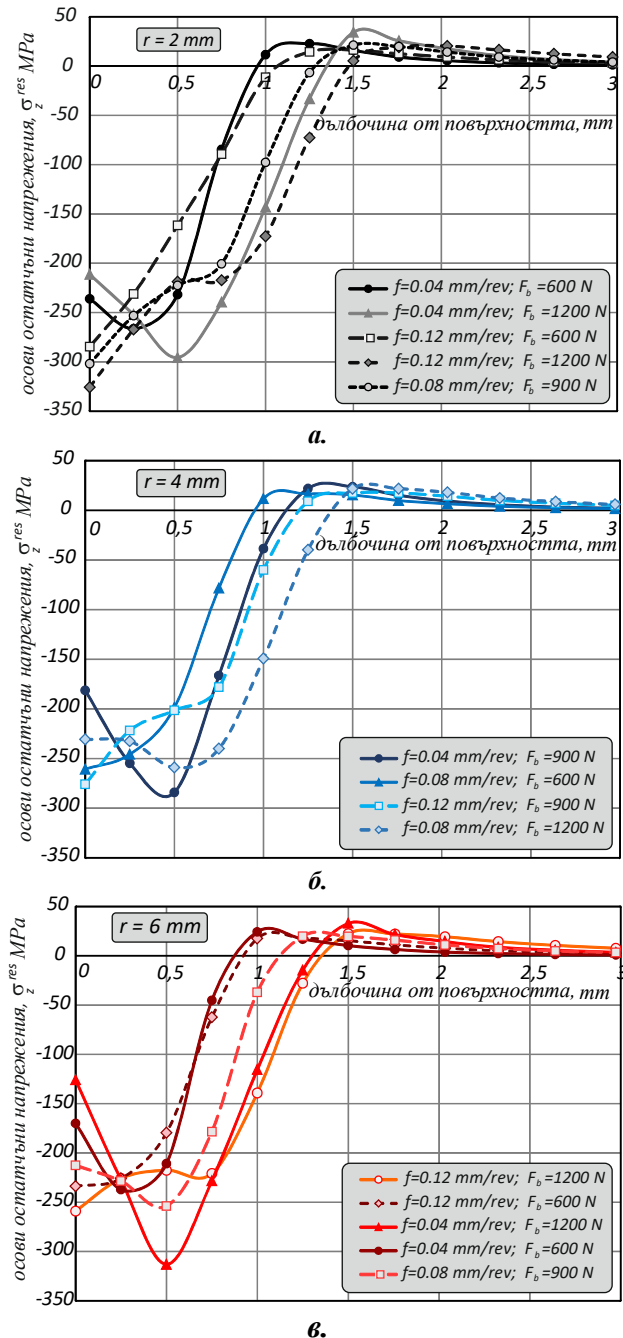
Зависимост  $F_b = F_b(d_p)$  в зависимост от радиуса на закръгление на ролката Таблица 2.7

$r = 2 \text{ mm}$		$r = 4 \text{ mm}$		$r = 6 \text{ mm}$	
$F_b, \text{ N}$	$d_p, \text{ mm}$	$F_b, \text{ N}$	$d_p, \text{ mm}$	$F_b, \text{ N}$	$d_p, \text{ mm}$
600	0.041	600	0.034	600	0.03
900	0.058	900	0.045	900	0.04
1200	0.071	1200	0.0575	1200	0.05

Материалът на образца е еласто-пластичен, независим от скоростта на деформация. Зададен е коефициент на Poisson:  $\nu = 0.33$ . КММ на повърхностния слой на изследваната алуминиева сплав е зададен в съответствие с описанието, направено т. 2.2.4.

За отчитане на характерната за изследвания процес деформационна анизотропия следствие цикличното уякчаване в точките от повърхностния слой, е дефиниран модел на нелинейно кинематично уякчаване в съответствие със зависимост (2.2).

► КЕ резултати и коментари



Фиг. 2.13 Разпределение на ОН  $\sigma_z^{res}$  в дълбочина

От числените симулации се отчитат осовите ОН  $\sigma_z^{res}$  в радиално направление в средата на третирания участък. На фиг. 2.13а,б,в са показани графики, визуализиращи разпределението на  $\sigma_z^{res}$  в дълбочина за трите стойности на радиуса  $r$ , стартирайки от повърхността (т.  $A_{mid}$ ).

Коментари:

- В условията на постоянен радиус на закръгление на ТДР, изменението на подаването  $f$  и деформиращата сила  $F_b$  в изследваните диапазони значително променя профила на разпределение на осовите ОН  $\sigma_z^{res}$ ;

- Радиусът на закръгление на ролката  $r$  и подаването  $f$  силно влияят върху големината на ОН на повърхността  $\sigma_{z,sur}^{res}$ . Изменението на  $f$  в изследвания диапазон причинява разсейване на  $\sigma_{z,sur}^{res}$  около  $230 \text{ MPa}$  за  $r = 2 \text{ mm}$  и около  $270 \text{ MPa}$  за  $r = 6 \text{ mm}$ . Намаляването на подаването редуцира  $\sigma_{z,sur}^{res}$  по абсолютна стойност, като тази редукция е най-голяма, когато процесът се осъществява с минимално подаване и максимална деформираща сила. Следователно, за създаване на максимални по абсолютна стойност осови ОН на повърхността  $\sigma_{z,sur}^{res}$  е целесъобразно процесът да се реализира с минимален радиус, максимално подаване и максимална деформираща сила;

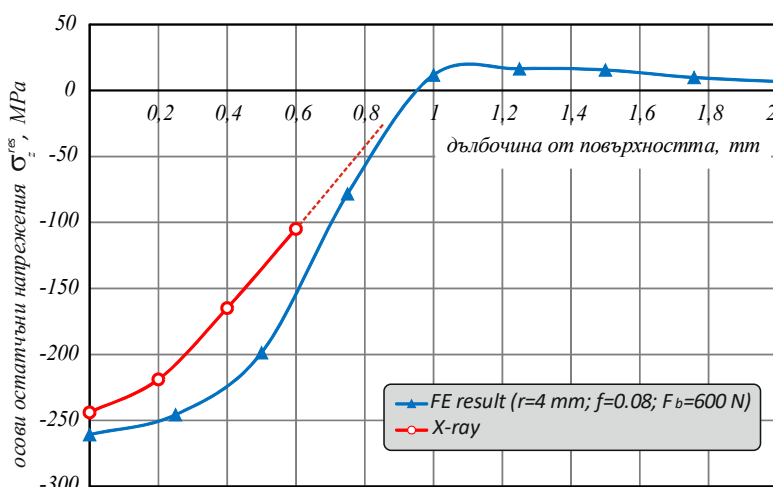
$r = 2 \text{ mm}$ ;  $f = 0.12 \text{ mm/rev}$ ;  $F_b = 1200 \text{ N}$ ;

- За всички изследвани стойности на радиуса на ТДР, комбинацията от минимално подаване и максимална деформираща сила осигурява въвеждане на максимални по абсолютна стойност осови ОН  $\sigma_z^{res}$  в дълбочина  $\approx 0.5 \text{ mm}$  от повърхността.

#### ► Валидиране на КЕ модел

С цел валидиране на КЕ модел е направено сравнение между КЕ резултати за разпределението на осовите ОН и експериментално измерени посредством X-ray diffraction метод. Един цилиндричен образец от алуминиевата сплав с диаметър  $20 \text{ mm}$  и дължина  $30 \text{ mm}$ , беше подложен на ППД с ТДР със следните параметри:  $r = 4 \text{ mm}$ ;  $f = 0,08 \text{ mm/rev}$ ;  $F_b = 600 \text{ N}$ . Тези параметри на процеса съответстват на експериментална точка №13 в плана на числения експеримент (табл. 2.6).

За да се оцени градиента на напрежението под повърхността на образца, слоевете материал последователно са отстранени чрез електрополиране. Осовите ОН напрежения са измерени в Техническият университет в Прага. На фиг. 2.14 е показано сравнение на разпределението на осовите ОН, получено от КЕ модел и чрез X-ray diffraction анализ.



Фиг. 2.14 Сравнение на разпределението на ОН  $\sigma_z^{res}$ , получено от КЕ модел и чрез X-ray diffraction анализ

Фиг. 2.14 показва добро съвпадение между експерименталните и КЕ резултати по отношение на  $\sigma_z^{res}$  в дълбочина до  $0.6 \text{ mm}$  от повърхностния слой. Както често се случва при подобни сравнения, КЕ резултати показват завишени стойности на ОН. Вероятно една от причините е в същността на МКЕ. Всяко деформируемо твърдо тяло има безброй степени на свобода. Ограничаването на тези степени е равностойно на въвеждането на допълнителни връзки, което води до увеличаване на коравината на тялото в сравнение с действителната.

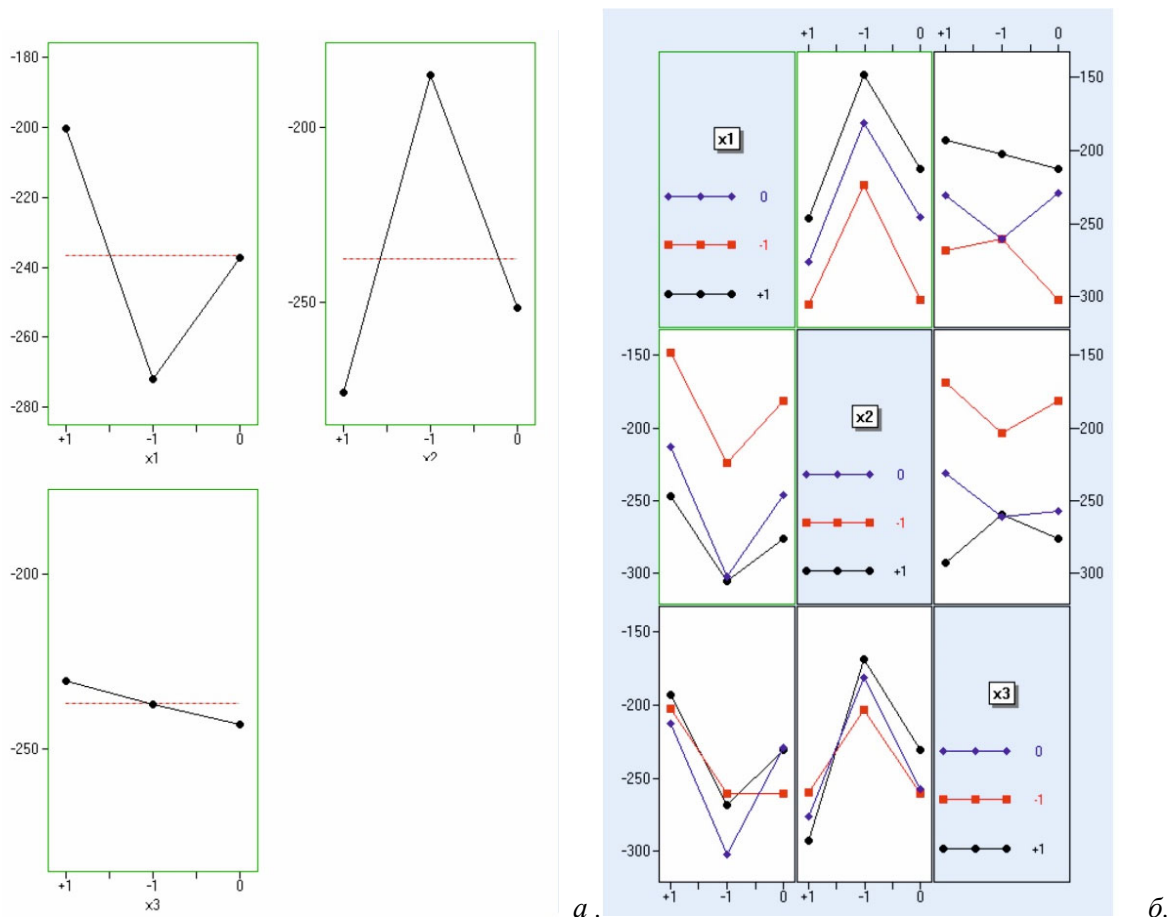
### 2.4.3. Дисперсионен анализ (ANOVA)

За оценка на влиянието на факторите върху двете целеви функции, използвайки QStatLab, е проведен дисперсионен анализ (ANOVA). Фиг. 2.15 и фиг. 2.16 показват главните ефекти и взаимодействията между трите фактора.

- Подаването  $f(x_2)$  е факторът с най-голямо влияние върху разпределението на осовите ОН на повърхността  $\sigma_{z,sur}^{res}$  (фиг. 2.15a). Влиянието на радиуса на закръгление на ТДР  $r(x_1)$  е съизмеримо с това на подаването, тъй като функцията на  $\sigma_{z,sur}^{res}$  в по-малка степен зависи от големината на деформиращата сила  $F_b(x_3)$ . Най-силно е взаимодействието между факторите  $r(x_1)$  и  $f(x_2)$  (фиг. 2.15б).

- Управляващите фактори оказват различно влияние върху разпределението на осовите ОН на дълбочина  $0,5 \text{ mm}$  от повърхността (фиг. 2.16). Функцията на  $\bar{\sigma}_z^{res}$  зависи в най-голяма степен от деформиращата сила  $F_b(x_3)$  и най-малко – от подаването  $f(x_2)$ . Факторите  $F_b(x_3)$  и  $r(x_1)$  имат противоположен ефект върху средната стойност на осовите ОН  $\bar{\sigma}_z^{res}$ , определена на дълбочина  $0,5 \text{ mm}$ .

• Функцията  $\bar{\sigma}_z^{res}$  приема най-голяма абсолютна стойност, когато процесът се реализира с максимална деформираща сила, минимален радиус на закръгление на ролката и средна стойност на подаването:  $F_b = 1200 \text{ N}$ ;  $r = 2 \text{ mm}$ ;  $f = 0.08 \text{ mm/rev}$ . По отношение на  $\bar{\sigma}_z^{res}$  най-силно е взаимодействието между радиуса на закръгление на ролката  $r(x_1)$  и деформиращата сила  $F_b(x_3)$  (фиг. 2.16б).



Фиг. 2.15 Резултати, получени от ANOVA за  $\sigma_{z,sur}^{res}$   
 а. главни ефекти; б. взаимодействие между факторите

#### 2.4.4. Регресионен анализ

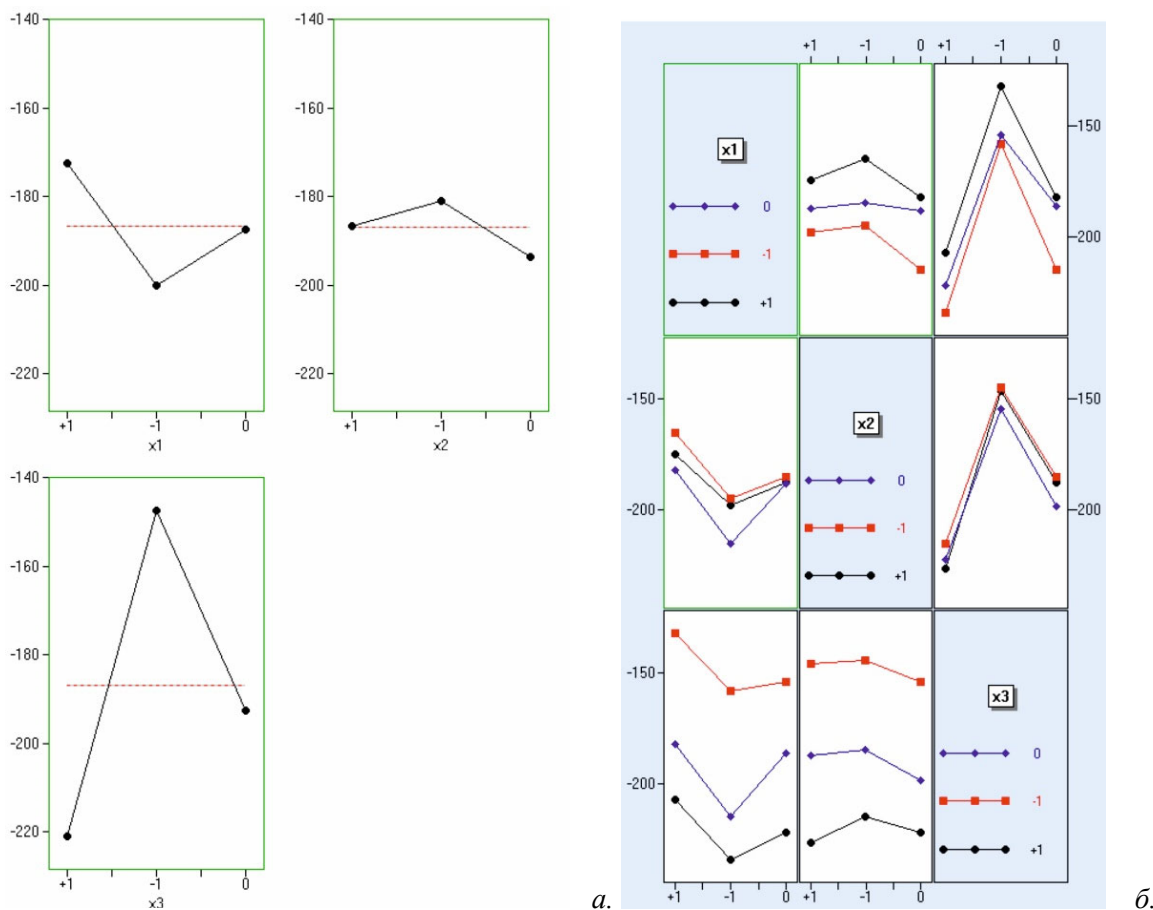
На база на резултатите от табл. 2.6, използвайки системата QStatLab, е проведен регресионен анализ. За двете целеви функции са получени следните регресионни модели в кодиран вид:

♦ Модел на  $\sigma_{z,sur}^{res}$ :

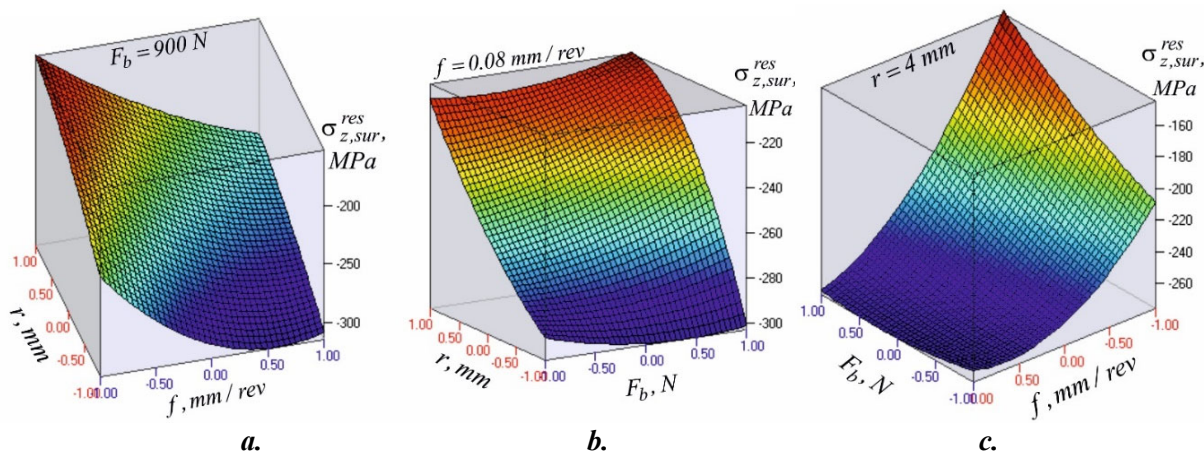
$$F(\sigma_{z,sur}^{res}) = -250.463 + 44.61x_1 - 47.3x_2 + 15.05x_3 - 6.947x_1^2 + 21.793x_2^2 + 4.743x_3^2 - 4.204x_1x_2 - 16.924x_2x_3 + 4.426x_1x_3 - 14.696x_1^2x_3 - 11.006x_1x_2^2 + 2.309x_1^2x_2 \quad (2.11)$$

♦ Модел на  $\bar{\sigma}_z^{res}$ :

$$F(\bar{\sigma}_z^{res}) = -195.127 + 16.458x_1 - 33.98x_3 - 3.618x_1^2 + 8.812x_2^2 + 6.747x_3^2 + 2.054x_1x_2x_3 - 2.414x_2x_3 - 3.211x_2x_3^2 - 1.649x_1x_2 - 3.694x_1^2x_3 - 3.174x_1x_3^2 \quad (2.12)$$



Фиг. 2.16 Резултати, получени от ANOVA за  $\bar{\sigma}_z^{res}$   
 а. главни ефекти; б. взаимодействие между факторите



Фиг. 2.17 Сечения на хипер-повърхната на модела за  $F(\sigma_{z,sur}^{res})$  с различни хипер-равнини

За изследване на регресионните модели (2.11) и (2.12), сечения на техните хипер-повърхнини с различни хипер-равнини са показани съответно на фиг. 2.17 и на фиг. 2.18. Графиките показват вида на функциите  $F(\sigma_{z,sur}^{res})$  и  $F(\bar{\sigma}_z^{res})$ , когато третият фактор е фиксиран на средно ниво.

### 2.4.5. Оптимизация на процеса в аспект на разпределение на осовите ОН

Проведена е двуцелева оптимизация на процеса ППД с ТДР на основа на получените регресионни модели (2.11) и (2.12). За да се осигури максимално интензивна и дълбока

натискова зона с осови ОН  $\sigma_z^{res}$ , оптимизацията е насочена към минимизиране на двете целеви функции:

$$F(\sigma_{z,sur}^{res}) \rightarrow \min; F(\bar{\sigma}_z^{res}) \rightarrow \min \quad (2.13)$$

Оптимизацията е извършена чрез системата QStatLab, използвайки генетичен алгоритъм. Предвид значението на осовите ОН на повърхността, приоритет има функцията  $F(\sigma_{z,sur}^{res})$ . Оптималното решение, което определя стойностите на управляващите фактори и съответстващите стойности на целевите функции, е показано в таблица 2.8. Зависимостта между факторите в кодиран вид  $x_i$  и в естествени координати  $\tilde{x}_i$  е:

$$x_i = (\tilde{x}_i - \tilde{x}_{0,i}) / \lambda_i, \quad (2.14)$$

където:

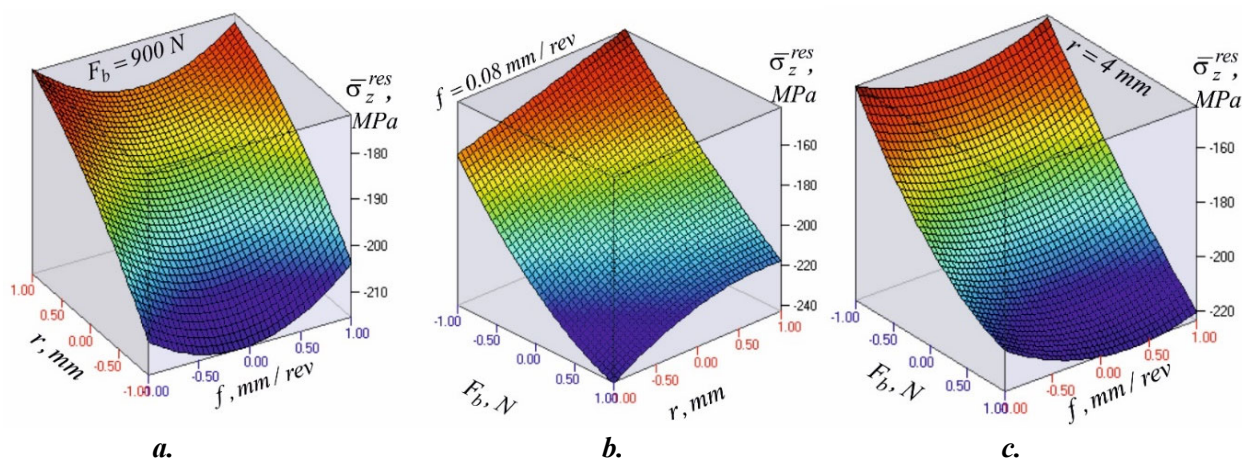
$$\lambda_i = (\tilde{x}_{max,i} - \tilde{x}_{min,i}) / 2, \quad (2.15)$$

а  $\tilde{x}_{0,i}$ ,  $\tilde{x}_{max,i}$  и  $\tilde{x}_{min,i}$  са съответно средно, горно и долно ниво на  $i$ -тия фактор в естествени координати.

Резултати от оптимизацията

Таблица 2.8

$r, \text{ mm } (x_1)$		$f, \text{ mm/rev } (x_2)$		$F_b, \text{ N } (x_3)$		$F(\sigma_{z,sur}^{res}), \text{ MPa}$	$F(\bar{\sigma}_z^{res}), \text{ MPa}$
Код.	Нам.	Код.	Нам.	Код.	Нам.	-326,7267	-241,3709
-0,9999	2	0,8893	0,115	0,9999	1200		



Фиг. 2.18 Сечения на хипер-повърхната на модела за  $F(\bar{\sigma}_z^{res})$  с различни хипер-равнини

## 2.5. 3D КЕ изследване на разпределението на осовите и окръжни ОН в цилиндрични образци от високо-яка алуминиева сплав 2024-Т3, подложени на ППД с ТДР

### 2.5.1. Цел на изследването

Фронтът на уморните пукнатини в ротационни компоненти се развива в произволно направление, което не съвпада с напречните им сечения. Следователно, процесът на развитие на УМ зависи както от разпределението на осовите, така и на окръжните ОН в повърхностните слоеве.

Основната цел на настоящото изследване е да се оцени влиянието на деформиращата сила в корелация с подаването върху разпределението на осовите и окръжни остатъчни напрежения в цилиндрични образци от алуминиева сплав 2024-Т3, подложени на ППД с ТДР. За постигане на целта е развит 3D КЕ модел на изследвания процес, в който е симулирана действителната кинематика на изследвания процес.



### 2.5.2. 3D КЕ модел

#### ► **Обща характеристика**

3D КЕ модел е разработен, използвайки Abaqus CAE 2018 (фиг. 2.18).

В съответствие с резултатите от изследванията, описани в т. 2.3 и т. 2.4 и проведената оптимизация (табл. 2.8), симулациите са проведени при следните постоянни параметри: радиус на закръгление на тороидалната повърхнина на ролката:  $r = 2 \text{ mm}$ ; външен диаметър на деформиращата ролка:  $D = 26 \text{ mm}$ . Диаметърът на заготовката е  $d = 22 \text{ mm}$ . Променливите параметри в съответствие с анализиранияте варианти са показани в табл. 2.9.

*Променливи параметри*

*Таблица 2.9*

<i>№</i>	<i>Деформираща сила <math>F_b, N</math></i>	<i>Дълбочина на проникване <math>d_p, \text{ mm}</math></i>	<i>Подаване <math>f, \text{ mm/ rev}</math></i>
1	800	0.0426	0.05
2	800	0.0426	0.08
3	800	0.0426	0.11
4	1200	0.07	0.05
5	1200	0.07	0.08
6	1200	0.07	0.11

С цел изследване влиянието на осовото подаване  $f$  върху ОН, процесът е симулиран посредством взаимодействие на заготовката с 9 еднакви ТДР, моделирани като ИГТ. Последните са предварително позиционирани в осово направление на разстояния, равни на съответната стойност на  $f$ . Движенията на всяка ролка са идентични, като са дефазирани в общото време за анализ със стойност, съответстваща на продължителността на 1 цикъл. Предвид много малката контактна зона е прието, че деформиращото въздействие е независимо от външните граници на заготовката. Поради това е моделиран сектор от заготовка с относително малка дължина –  $4 \text{ mm}$ . Всички симулации са проведени при една и съща топология на заготовката. Между ролките и заготовката е зададен нормален и тангенциален контакт с коефициент на триене 0.1 с възможност за отделяне.

#### ► **КММ на заготовката**

Материалът на заготовката е еласто-пластичен. КММ на заготовката е зададен съгласно приетия в т. 2.2.4, като е зададено нелинейно кинематично уякчаване съгласно (2.2).

#### ► **Гранични условия**

В КЕ модел е използван методът на инверсията по отношение на системата деформиращи елементи – заготовка. В резултат заготовката е неподвижна, а ролките получават допълнителна ъглова скорост. За целта вътрешната цилиндрична повърхнина от заготовката е фиксирана в радиално направление. Влиянието на отстранената част от нея е отчетено чрез зададена еластична основа за всички останали повърхнини с изключение на външната цилиндрична повърхнина (фиг. 2.18). Траекторията на центъра на контактната зона на деформиращата ролка спрямо заготовката е винтова линия със стъпка, равна на подаването  $f$ . За дефиниране на винтовото движение на ролките, на съответните им Reference Points са зададени три трансляции по трите оси и една ротация около оста на заготовката (ос  $Z$ ). Преместванията по осите  $X$  и  $Y$  са зададени чрез периодични функции:

$$x_{RP} = B \sin \omega t; \quad y_{RP} = -A + A \cos \omega t, \quad (2.16)$$

където амплитудата  $A$  се определя от:

$$A = B = \frac{d}{2} + \frac{D}{2} - d_p, \quad (2.17)$$

$$\omega = \frac{\psi}{t_{step}} = \frac{\psi^o \pi}{t_{step} 180} \quad (2.18)$$

е ъглова скорост, където:

$$\psi^o = \theta + 2\theta^o = 22 + 2.9 = 40^o \quad (2.19)$$

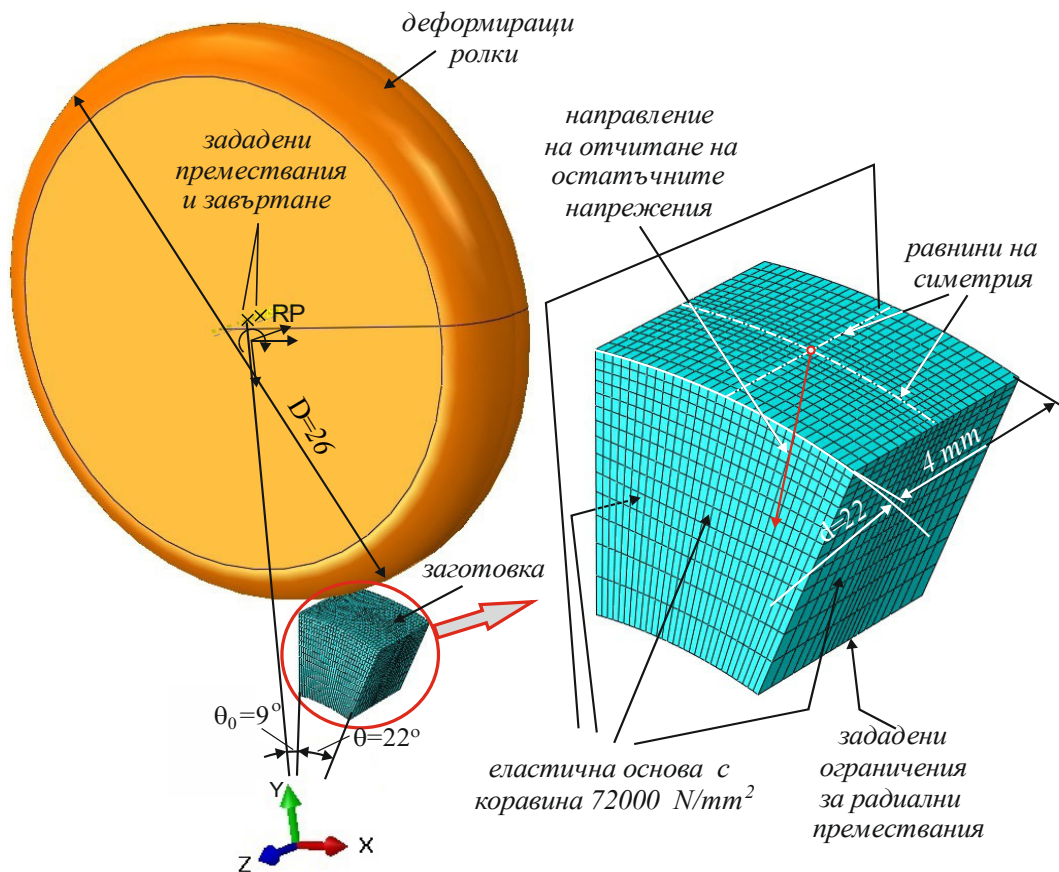
е пълният ъгъл на завъртане около ос  $Z$ ; а времето за 1 цикъл (1 стъпка от анализа) при скорост  $v = 100 \text{ m/min}$  е:

$$t_{step} = \frac{S}{v} = \frac{A \cdot \psi^o \pi}{180} = \frac{A \cdot 40^o \pi}{1666,6666666}, s. \quad (2.20)$$

Въртенето около ос  $Z$  е зададено чрез табулирана функция, пропорционална на  $t_{step}$  с максимална стойност:

$$\varphi = \frac{A}{0,5 D}, rad \quad (2.21)$$

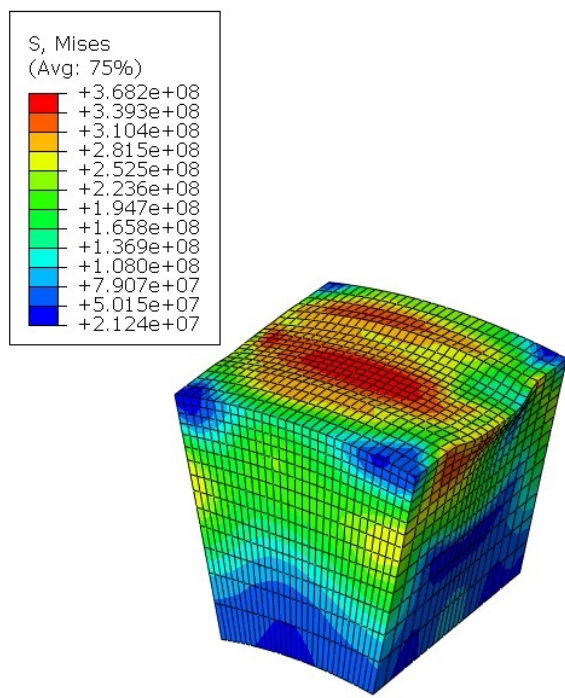
Осовото подаване на ролките (по ос  $Z$ ) е дефинирано чрез табулирана функция, пропорционална на  $t_{step}$  в зависимост от конкретната стойност на  $f$ .



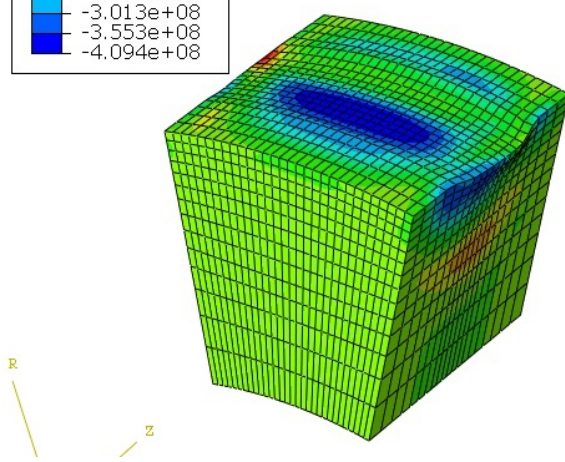
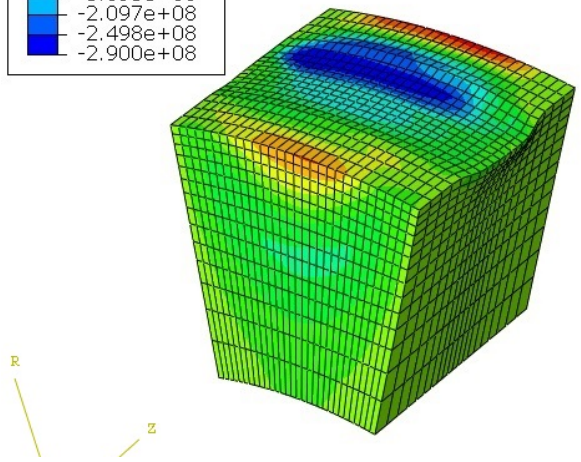
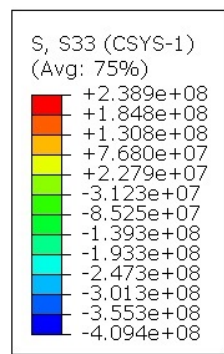
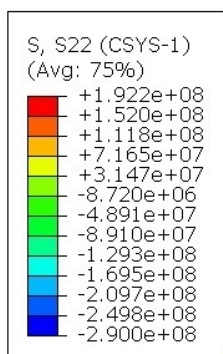
Фиг. 2.18 3D КЕ модел

### 2.5.3. КЕ резултати и коментари

КЕ резултати за разпределението на еквивалентните ОН  $\sigma_{eq}^{res}$ , окръжните  $\sigma_t^{res}$  и осовите  $\sigma_z^{res}$  ОН за един от анализирания варианти са показани на фиг. 2.19 а,б,в.



a.



Фиг. 2.19 Разпределение на ОН, МПа за  $F_b=1200\text{ N}$  и  $f=0.11\text{ mm/rev}$

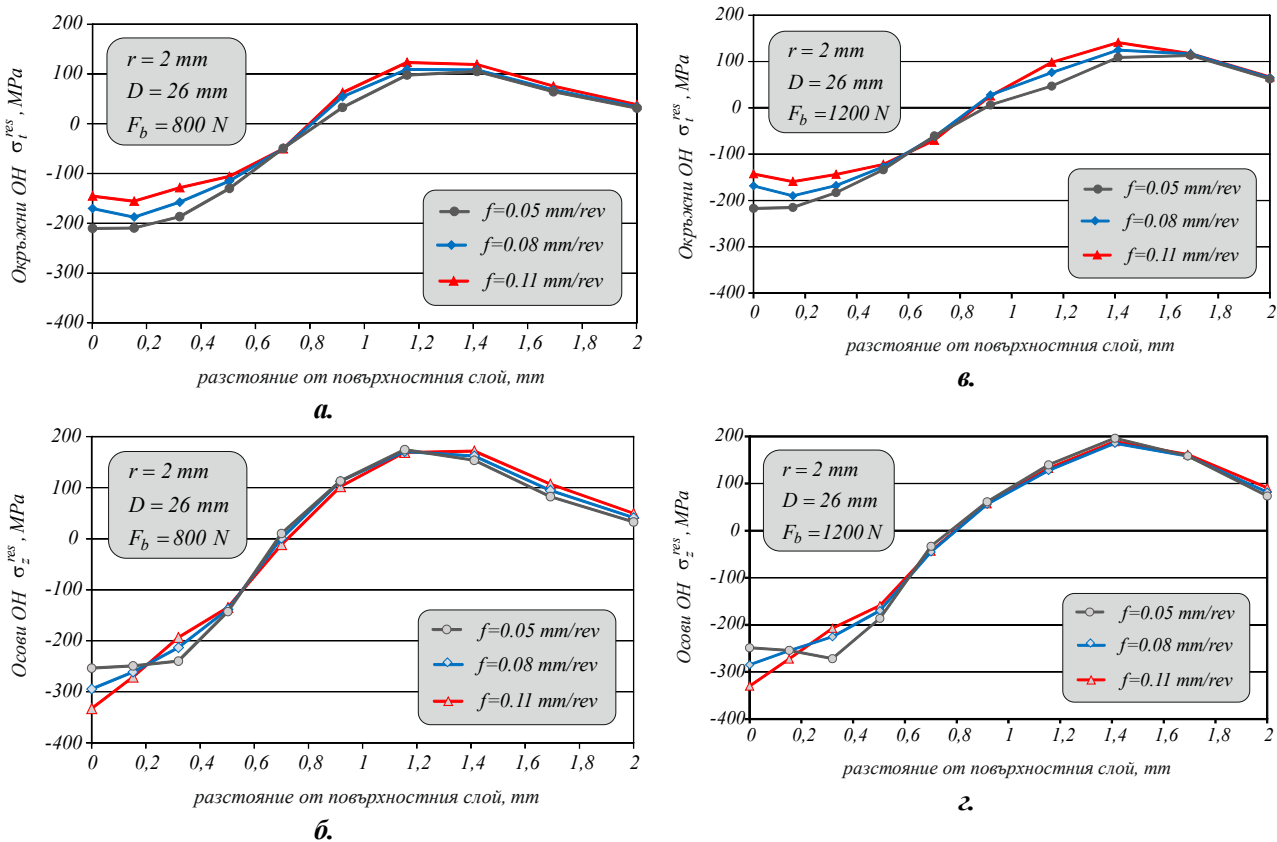
$\sigma_{eq}^{res}$  ; б.  $\sigma_t^{res}$  ; в.  $\sigma_z^{res}$

КЕ резултати за разпределението в дълбочина на окръжните  $\sigma_t^{res}$  и осовите  $\sigma_z^{res}$  ОН са обобщени на фиг. 2.20 а,б,в.

Фиг. 2.20 а,б,в дава основание за следните коментари:

- В условията на една и съща деформираща сила  $F_b$  осовото подаване  $f$  има значително влияние върху характера на разпределение на ОН на повърхността и в дълбочина – окръжни  $\sigma_t^{res}$  и осови  $\sigma_z^{res}$ . В изследвания интервал се наблюдава противоположна тенденция за влияние на подаването върху двата вида ОН: с нарастване на подаването окръжните ОН  $\sigma_t^{res}$  на

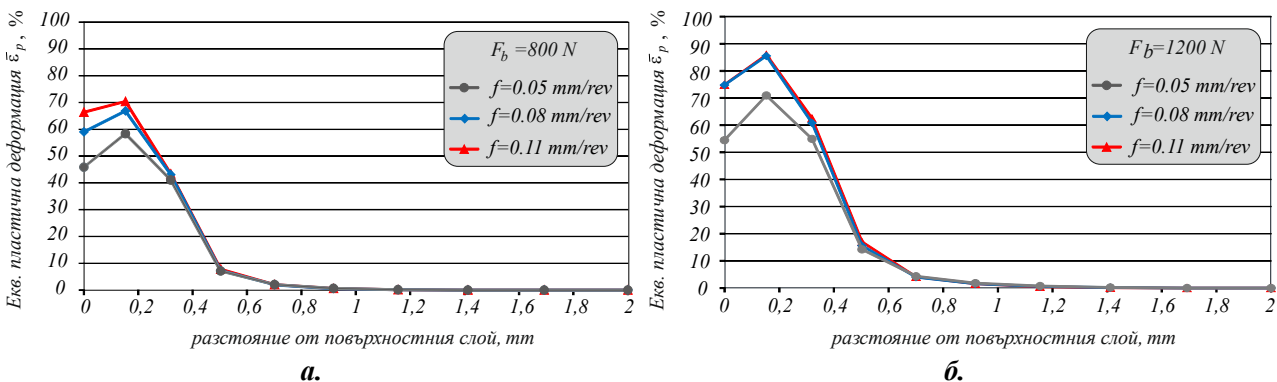
повърхността намаляват, а осовите  $\sigma_z^{res}$  нарастват. За максимизиране на осовите ОН  $\sigma_z^{res}$  е целесъобразно процесът да се осъществява с максимално подаване ( $f = 0.11 \text{ mm/rev}$ ), който резултат се потвърждава от изследването, проведено в т. 2.4;



Фиг. 2.20 KE резултати за разпределението на окръжните и осови ОН в дълбочина

а.  $\sigma_t^{res}$  за  $F_b=800 \text{ N}$ ; б.  $\sigma_z^{res}$  за  $F_b=800 \text{ N}$ ; в.  $\sigma_t^{res}$  за  $F_b=1200 \text{ N}$ ; г.  $\sigma_z^{res}$  за  $F_b=1200 \text{ N}$

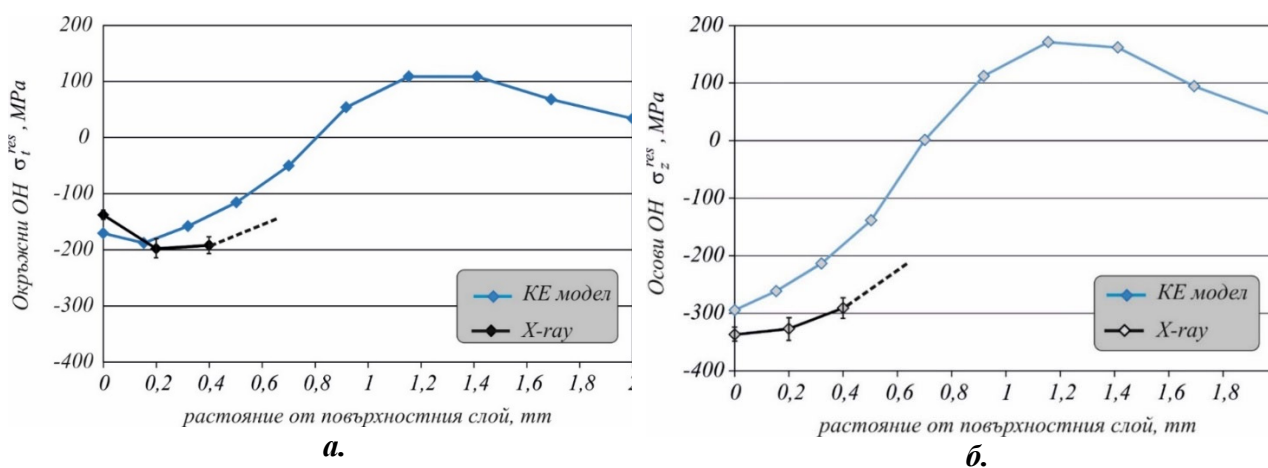
• При едно и също подаване деформиращата сила  $F_b$  в изследвания интервал практически не променя окръжните и осови ОН на повърхността. Същевременно, деформиращата сила  $F_b$  променя преди всичко характера на разпределение на двата типа ОН в дълбочина - увеличаването ѝ води до относително по-голяма дълбочина на натисковата зона. Изключение се наблюдава в разпределението на окръжните ОН на повърхността, когато подаването е най-малко ( $f=0.05 \text{ mm/rev}$ );



Фиг. 2.21 KE резултати за разпределението на еkv. пластична деформация  $\bar{\epsilon}_p, \%$

КЕ резултати за разпределението на еквивалентната пластична деформация  $\bar{\varepsilon}_p$  са показани на фиг. 2.21. Графичните зависимости на фиг. 2.21 потвърждават резултатите за влиянието на деформиращата сила, получени в т. 2.3 - увеличаването на деформиращата сила  $F_b$  води до по-голяма еквивалентната пластична деформация и по-голяма дълбочина на пластично деформираната зона. Реализирането на процеса с деформираща сила  $F_b = 1200\text{ N}$  води до нарастване на максималната еквивалентната пластична деформация с  $\approx 22\%$  и с  $\approx 0.25\text{ mm}$  по-дълбока пластична зона в сравнение със случая, когато  $F_b = 800\text{ N}$ . От друга страна, при една и съща деформираща сила, еквивалентната пластична деформация  $\bar{\varepsilon}_p, \%$  намалява с намаляване на подаването. Фиг. 2.21 показва, че за всички изследвани варианти еквивалентната пластична деформация  $\bar{\varepsilon}_p$  приема максимална стойност на дълбочина  $\approx 0.2\text{ mm}$  от повърхностния слой. Като се отчете корелацията между  $\bar{\varepsilon}_p$  и микротвърдостта, може да се прогнозира максимална микротвърдост на малка дълбочина от повърхностния слой.

#### 2.5.4. Верификация на КЕ модел



Фиг. 2.22. Сравнение на КЕ резултати с експериментални, получени чрез X-ray diffraction  
 а. окръжни ОН; б. осови ОН

За верификация на разработения КЕ модел е направено сравнение на КЕ резултати за окръжните ОН  $\sigma_t^{res}$  и осови ОН  $\sigma_z^{res}$  с експериментално измерени чрез X-ray diffraction анализ и електрополиране на дълбочина до  $0.4\text{ mm}$  от повърхностния слой. За целта цилиндричен образец с диаметър  $22\text{ mm}$  е подложен на ППД с ТДР с параметри на процеса според вариант №2 от табл. 2.9. Измерването е проведено в Чешкия технически университет в Прага. Графична визуализация на КЕ и експериментални резултати е показана на фиг. 2.22. Фиг. 2.22 показва близки резултати.

#### 2.6. Изводи

Резултатите от проведените изследвания могат да бъдат обобщени със следните основни изводи:

♦ В съответствие с концепцията “flow stress”, използвайки комбиниран подход, включващ експеримент (indentation тест) и серия числени симулации на база на осо-симетричен КЕ модел на експерименталния тест, е дефиниран КММ на повърхностните и подповърхностните слоеве на изследваната високо-яка алуминиева сплав 2024-T3. Избраният КММ е дефиниран в разработените 3D КЕ модели на процеса ППД с ТДР за изследване на напрегнатото и деформирано състояние в цилиндрични заготовки;

◆ На база на разработен 3D КЕ модел на процеса ППД с ТДР е проведен планиран числен експеримент за моделиране на еквивалентната пластична деформация на повърхността и дълбочината на пластичната зона в цилиндрични заготовки. Чрез регресионен анализ и многоцелева оптимизация са дефинирани рационалните стойности на геометричните параметри на ТДР и деформираща сила, осигуряващи максимално уякчаване и дълбочина на уякчения слой:  $r = 2.0014 \text{ mm}$  ;  $D = 28.0916 \text{ mm}$  ;  $F_b = 1199.595 \text{ N}$  ;

◆ За моделиране на разпределението на осовите ОН на повърхността и в дълбочина е разработен 3D КЕ модел, в който изследваният процес е симулиран чрез серия циклични радиални премествания на ДТР, осово дефазирани на разстояния, равни на подаването. На тази база посредством планиран числен експеримент, дисперсионен анализ, регресионен анализ и двучелева оптимизация са дефинирани рационалните стойности на параметрите на процеса ППД с ТДР, осигуряващи максимално интензивна и дълбока зона с натискови осови ОН  $\sigma_z^{res}$  :  $r = 2 \text{ mm}$  ;  $f = 0.115 \text{ mm/rev}$  ;  $F_b = 1200 \text{ N}$  ;

◆ Получени са КЕ резултати за разпределението на окръжните ОН  $\sigma_t^{res}$  и осовите ОН  $\sigma_z^{res}$  в корелация с подаването  $f$  и деформиращата сила  $F_b$ . За тази цел е разработен 3D КЕ модел, в който е симулирана действителната кинематика на процеса ППД с ТДР. Установено е, че в условията на постоянна деформираща сила  $F_b$ , осовото подаване оказва противоположно влияние върху двата вида напрежения – в интервала  $f = 0.05 \div 0.11 \text{ mm/rev}$  нарастването на подаването води до намаляване на окръжните ОН  $\sigma_t^{res}$  и нарастване на осовите ОН  $\sigma_z^{res}$  ;

◆ Направено е сравнение между КЕ резултати за разпределението на ОН и експериментално измерени посредством X-ray diffraction анализ. Получените близки резултати потвърждават адекватността на разработените КЕ модели и изборния КММ на изследваната алуминиева сплав.

## Глава 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОЛУЧЕНАТА ГРАПОВОСТ, МИКРОТВЪРДОСТ, ОН И МИКРОСТРУКТУРА В ОБРАЗЦИ ОТ АЛУМИНИЕВА СПЛАВ 2024-T3, ПОДЛОЖЕНИ НА ППД С ТДР

### 3.1. Разработване на устройство за провеждане на експерименталното изследване

#### 3.1.1. Морфологичен анализ

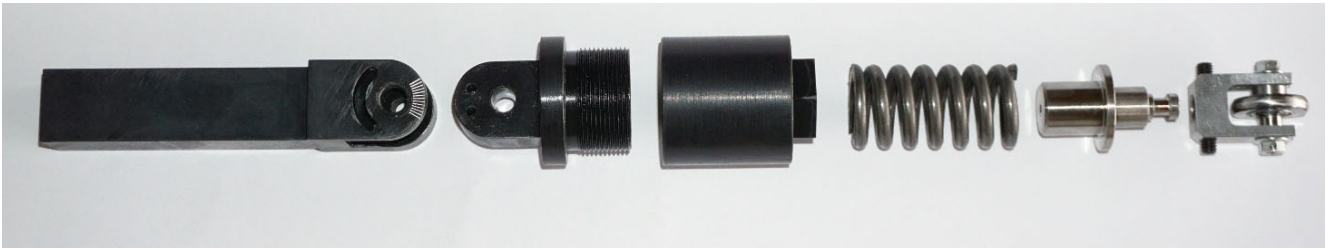
За провеждане на експерименталните изследвания е разработено устройство за ППД на ротационни компоненти с контакт триене при търкаляне, което позволява относително лесно задаване на променливите геометрични и физични параметри на изследвания процес. Изборът на елементите на структурата на устройството и връзките между тях е базиран върху проведен морфологичен анализ на съществуващи устройства за ППД, използващи контакт триене при търкаляне.

#### 3.1.3. Конструкция на устройство за ППД с ТДР на външни ротационни повърхнини

На основа на проведения морфологичен анализ, е избрана следната функционална схема на устройство за провеждане на експерименталните изследвания:

$$\begin{vmatrix} 1.1.1.1 & 1.1.2.1 & 1.2.1.5 & 1.2.2.1 & 1.2.3.1 & 1.3.1.2 & 1.3.2.1.1 & 1.3.2.2.1 & 1.3.2.3.1 & 1.3.3.2 & 1.3.4.2 & 1.3.5.2 & 1.4.2 \\ 2.1.1 & 2.2.1.1 & 2.2.2.1.1 & 2.2.2.2.1 & 2.2.2.3.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (3.3)$$

На фиг. 3.1 са показани елементите на разработената конструкция, а на фиг. 3.2 – общият вид на сглобеното устройство.



**Фиг. 3.1. Елементи на разработената конструкция на устройство за ППД с ТДР**

Разработената конструкция осигурява следните основни предимства:

- Адаптирана е за приложение както върху универсални стругови машини, така и върху стругови обработващи центри;
- Осигурява алтернативна възможност за обработване чрез ППД на външни цилиндрични повърхнини и стъпални повърхнини в ротационни компоненти посредством завъртане на инструменталния държач около ос, перпендикулярна на равнината, определена от осите на заготовката и тялото;



**Фиг. 3.2. Общ вид на разработената конструкция на устройство за ППД с ТДР**

- Посредством винтова цилиндрична пружина осигурява линеен закон на изменение на деформиращата сила в диапазона  $F_b = 400 \div 1400 \text{ N}$  ;
- Позволява подмяна на ТДР и по този начин да се управляват геометричните параметри на процеса.

Устройството е снабдено с комплект ТДР с различен радиус на закръгление на тороидалната работна повърхнина, съответно:  $r = 2, 3, 4, 5, 6 \text{ mm}$  (фиг. 3.3а, б).



*а.*



*б.*

**Фиг. 3.3. Комплект ТДР**

## 3.2. Експериментално изследване на получената грапавост

### 3.2.1. Предварително изследване

#### ► Основна цел

Основната цел на предварителното изследване е сканиране на факторното пространство по критерий получена грапавост, и на тази основа да се определят основните управляващи фактори и диапазоните им на вариране в проведения на по-късен етап пълен факторен експеримент.

#### ► Експериментални образци



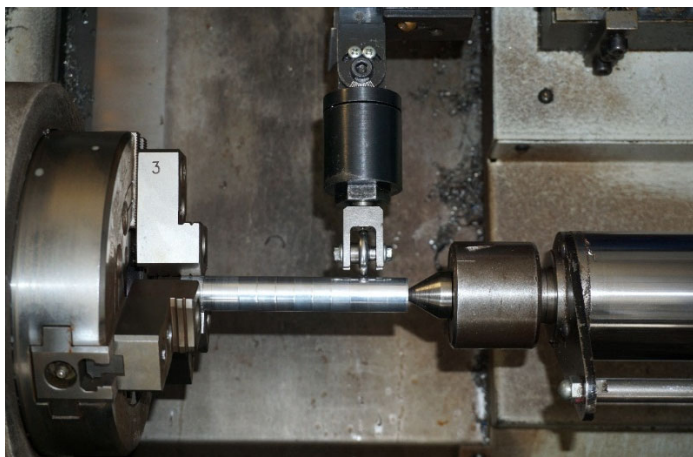
Фиг. 3.4. Експериментални образци

Обект на изследване са цилиндрични образци от високо-яка алуминиева сплав 2024-T3 с химичен състав според табл. 2.1 и с диаметър в диапазона  $d = 22 - 30 \text{ mm}$  (фиг. 3.4).

В лаборатория „Изпитания на металите“ в Технически университет - Габрово са определени следните материалните характеристики на изследваната алуминиева сплав: граница на провлачване  $\sigma_Y = 348 \text{ MPa}$ ; якост на опън  $\sigma_u = 501 \text{ MPa}$ ; относително удължение  $A_5 = 10.4\%$ ; напречно свиване  $z = 33\%$ .

#### ► Постановка на експерименталното изследване

Експериментът е проведен върху струг с ЦПУ – Okuma. Всеки от изпитваните образци се закрепва в патронник и център (фиг. 3.5).



Фиг. 3.5 ППД с ТДР на цилиндрични образци върху струг с ЦПУ

Струговането се извършва по цялата дължина на образеца, а на ППД с ТДР с конкретна комбинация от параметри на процеса се подлага участък с дължина  $12 \text{ mm}$ . По този начин се осигурява еднаква начална грапавост на образците. Струговането на образците е проведено с твърдосплавни пластини ССМТ-120404LF КСР10 при следните технологични параметри: подаване  $f = 0.1 \text{ mm/rev}$ ; скорост на рязане  $v_c = 60 \text{ m/min}$  и дълбочина на рязане  $a_p = 0.5 \text{ mm}$ . През целия експеримент е използвана смазочно-охлаждаща течност – Носcut 795-Н.

Изменението на грапавостта в осово направление е оценена чрез параметъра  $R_a$  върху измервателен уред HUAТЕС SRT-6210. За всеки експеримент крайната стойност за грапавостта е получена като средно аритметична стойност от три измервания по три образувачи, разположени на  $120^\circ$ . Средната стойност на началната грапавост на образците след струговане е  $R_a^{init} = 0.57 \mu\text{m}$ .

Предварителното изследване на получената грапавост след ППД с ТДР е от типа “one factor at the time”, т.е. един от факторите се променя, а останалите фактори се поддържат постоянни. Управляващите фактори и диапазоните им на вариране са показани в табл. 3.3.



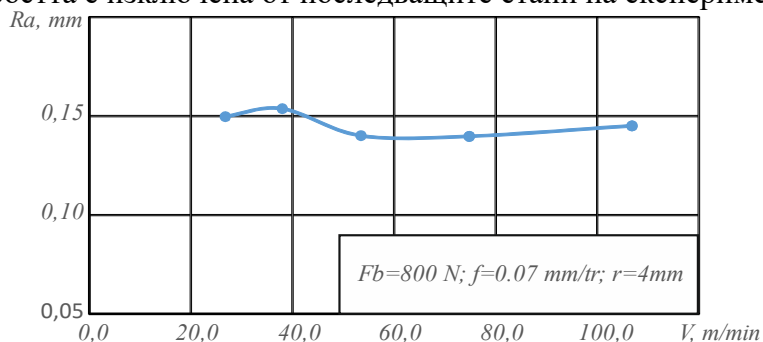
Управляващ фактор	Диапазон на вариране
Радиус на закръгление на тороидалната работна повърхнина на ролката $r$ , $mm$	$1 \div 6$ $mm$
Деформираща сила $F_b$ , $N$	$50 \div 1400$ , $N$
Подаване $f$ , $mm/rev$	$0,03 \div 0,09$ , $mm/rev$
Скорост $v$ , $m/min$	$20 \div 110$ , $m/min$

В съответствие с изводите, направени в Гл. 2, външният диаметър на ТДР е постоянен:  $D = 26$   $mm$ . Експериментът е проведен в два етапа. В първия етап е използвано устройство, което осигурява деформираща сила в диапазона  $F_b = 50 \div 500$   $N$ . Във втория етап е използвано разработеното ново устройство, описано в т. 3.1 (фиг. 3.2), осигуряващо деформираща сила в диапазона  $F_b = 400 \div 1400$   $N$ .

### ► Експериментални резултати

За оценка на влиянието на скоростта върху получаваната грапавост е проведен предварителен експеримент, като всички други фактори са фиксирани на средните нива на вариране. Резултатите са показани на фиг. 3.6.

Фиг. 3.6 потвърждава резултатите, получени от предишни изследвания за влиянието на скоростта на деформиране върху получената грапавост на изследваната алуминиева сплав. Очевидно, скоростта  $v$  влияе незначително върху получената грапавост, тъй като разликата между най-голямата и най-малката получена грапавост е  $\approx 8\%$ . Поради тази причина скоростта е изключена от последващите етапи на експерименталното изследване.



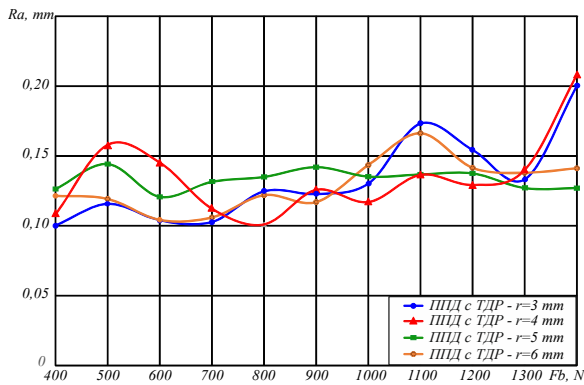
Фиг. 3.6 Влияние на скоростта  $v$  върху получената грапавост

При провеждане на експерименти с големина на деформиращата сила  $F_b < 400$   $N$ , получената грапавост е близка до тази след струговане. Проведените експерименти с радиус на закръгление на тороидалната повърхнина  $r = 1$   $mm$  и  $r = 2$   $mm$  показват влошаване на грапавостта, като при  $r = 1$   $mm$  същата е по-висока от началната такава.

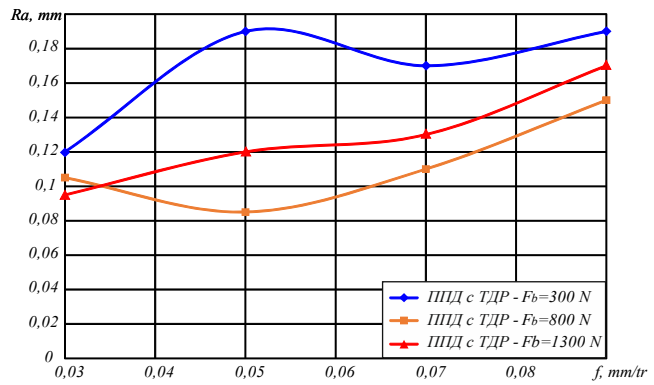
Във втория етап от експеримента е изследвано влиянието на получаваната грапавост при изменение на силата на притискане в диапазона  $F_b = 400 \div 1400$   $N$  и радиуси на закръгление на тороидалната повърхнина на ролката  $r = 3, 4, 5, 6$   $mm$ . Резултатите за получената грапавост от този етап на предварителното изследване, са визуализирани на графиките, показани на фиг. 3.7.

Най-ниска грапавост е получена при радиус на закръгление на ролката  $r = 4$   $mm$  и деформираща сила  $F_b = 800$   $N$ . С тези фиксирани стойности за  $r$  и  $F_b$  са проведени експерименти с цел да се оцени влиянието на подаването  $f$  върху получената грапавост (фиг. 3.8).

В резултат от проведеното предварително експериментално изследване е отчетена минимална стойност за получената грапавост (фиг. 3.7):  $R_a = 0,085$   $\mu m$ , която съответства на следната комбинация от управляващи фактори:  $F_b = 800$   $N$ ;  $r = 4$   $mm$ ;  $f = 0,05$   $mm/rev$ .



Фиг. 3.7. Резултати за получаваната грапавост от проведеня експеримент



Фиг. 3.8. Влияние на подаването върху получената грапавост

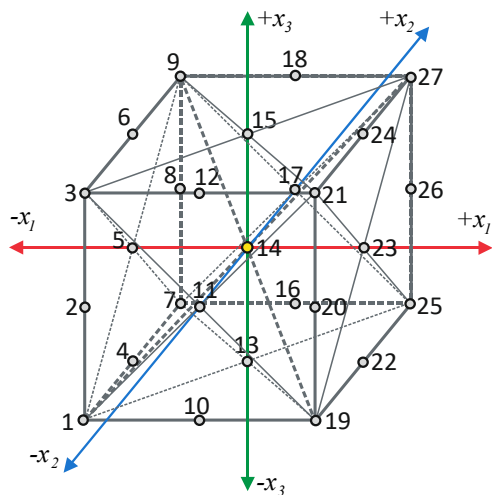
### 3.2.2. Планиран експеримент за изследване на получената грапавост

#### ► Експериментален план и управляващи фактори

Управляващи фактори и техните нива

Таблица 3.4

Управляващи фактори	Нива на управляващите фактори	
	Натурални	Кодирани
Радиус на тороидалната повърхнина на ролката, $r$ , $mm$ $x_1$	2	-1
	4	0
	6	+1
Деформираща сила, $F_b$ , $N$ $x_2$	400	-1
	850	0
	1200	+1
Подаване, $f$ , $mm/rev$ $x_3$	0.05	-1
	0.08	0
	0.11	+1



Фиг. 3.9. Схема на експерименталния план

На база на резултатите, получени от предварителното изследване, е избран планиран експеримент от вида  $3^3$ . Избраните управляващи фактори и техните нива са показани в табл. 3.4. Целевата функция е получената грапавост, оценена чрез параметъра  $R_a, \mu m$ .

Схема, визуализираща експерименталния дизайн, е показана на фиг. 3.9.

За провеждане на планирания експеримент са използвани цилиндрични образци от изследваната алуминиева сплав с диаметър  $d = 22 mm$ . Образците са обработени съгласно описанието, направено в т. 3.2.1.

#### ► Експериментални резултати

За всяка експериментална точка, крайната стойност на целевата функция  $Y_{Ra}, \mu m$  за получената грапавост е получена като средно аритметична стойност от три измервания по три образци, разположени на  $120^\circ$ . Експерименталните резултати за  $Y_{Ra}, \mu m$  са показани в табл. 3.5.

№	$r, mm (x_1)$	$F_b, N (x_2)$	$f, mm/rev (x_3)$	$Y_{Ra}, \mu m$
1	-1	-1	-1	0.442
2	-1	-1	0	0.492
3	-1	-1	+1	0.592
4	-1	0	-1	0.437
5	-1	0	0	0.631
6	-1	0	+1	0.706
7	-1	+1	-1	0.457
8	-1	+1	0	0.465
9	-1	+1	+1	0.692
10	0	-1	-1	0.118
11	0	-1	0	0.134
12	0	-1	+1	0.147
13	0	0	-1	0.113
14	0	0	0	0.172
15	0	0	+1	0.178
16	0	+1	-1	0.451
17	0	+1	0	0.412
18	0	+1	+1	0.370
19	+1	-1	-1	0.162
20	+1	-1	0	0.317
21	+1	-1	+1	0.279
22	+1	0	-1	0.148
23	+1	0	0	0.260
24	+1	0	+1	0.321
25	+1	+1	-1	0.397
26	+1	+1	0	0.463
27	+1	+1	+1	0.557

► **Дисперсионен анализ**

Резултатите от проведения дисперсионен анализ (ANOVA) са показани на фиг. 3.10 а,б.

Радиусът на закръгление на ролката  $r$  е факторът с най-голямо влияние върху получената грапавост, следван от деформиращата сила  $F_b$  (фиг. 3.10 а). За разлика от деформиращата сила и подаването, в изследвания диапазон нарастването на радиуса няма еднозначно влияние върху получената грапавост – в интервала  $2 \leq r \leq 4 mm$  функцията  $Y_{Ra}$  намалява с по-голям темп, докато в интервала  $4 \leq r \leq 6 mm$   $Y_{Ra}$  нараства с по-малък темп.

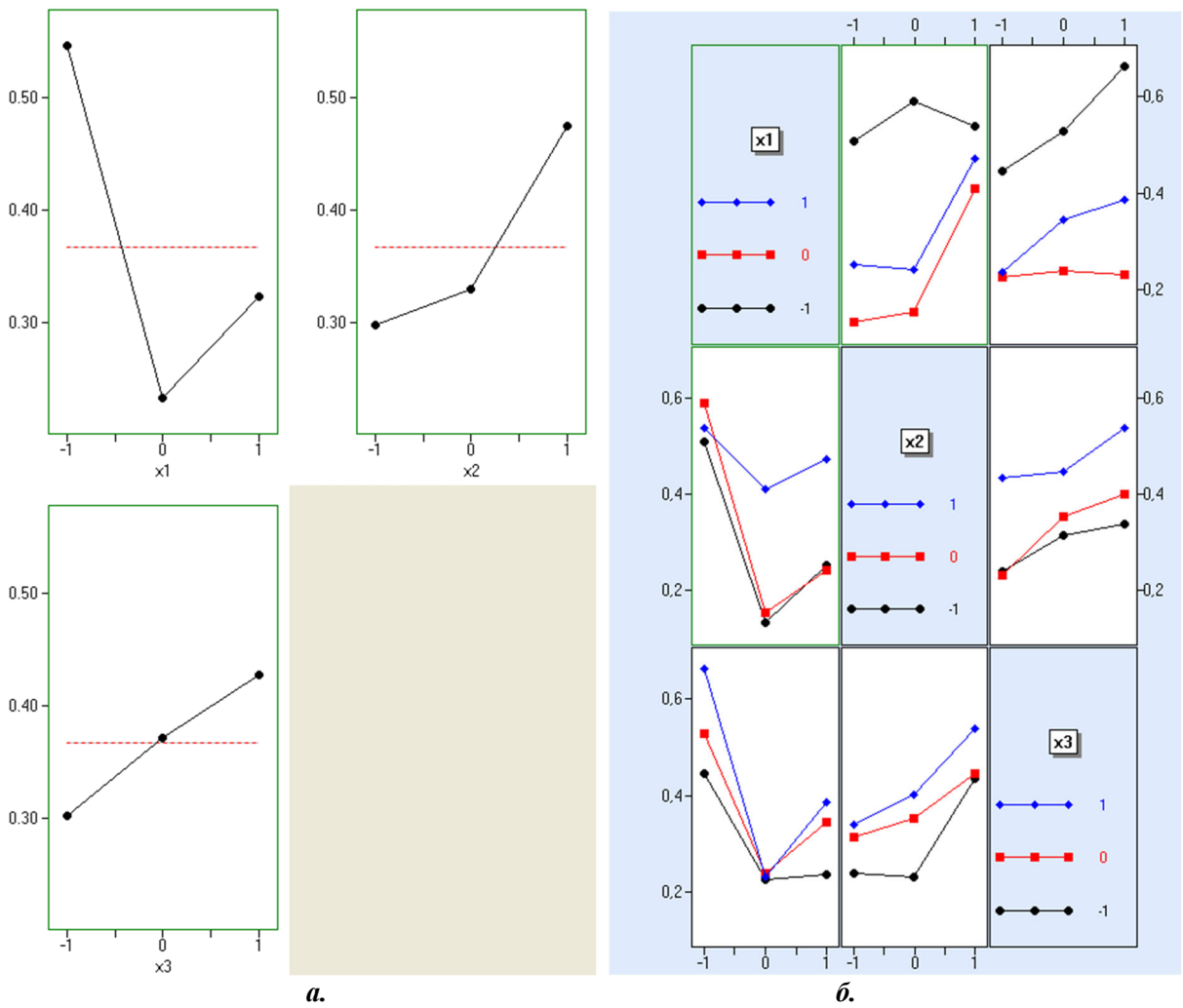
Очаквано, най-силно е взаимодействието между радиуса на закръгление на ролката  $r$  и деформиращата сила  $F_b$  (фиг. 3.10 б), тъй като на дадена комбинация от  $r$  и  $F_b$  съответства определена площ на контактната зона и дълбочина на проникване. От своя страна, площта на контактната зона и дълбочината на проникване на ТДР провокират определено повърхностно налягане.

► **Регресионен анализ**

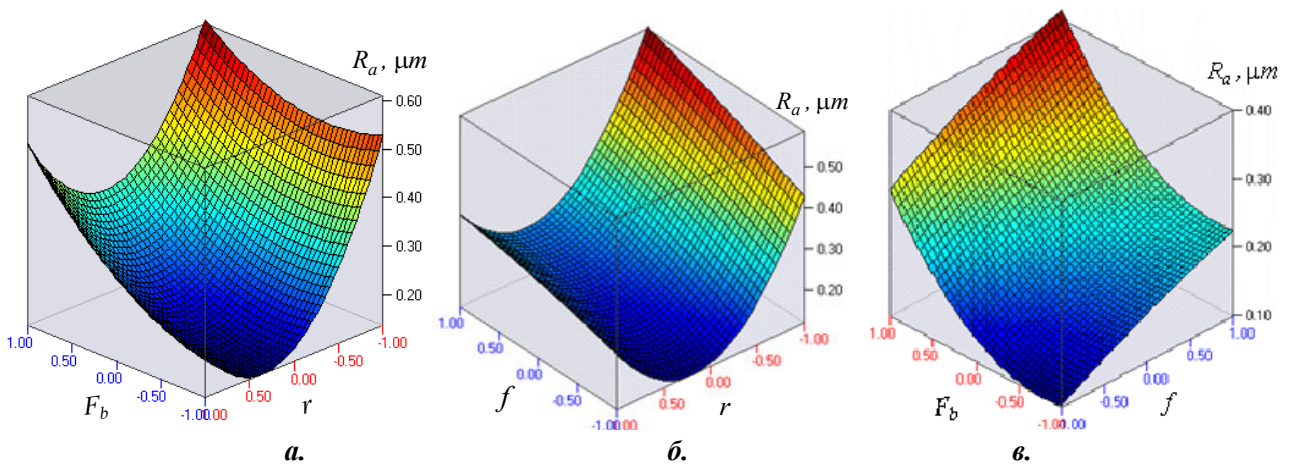
Посредством системата QStatLab е получен следния регресионен модел на целевата функция:

$$F(Y_{Ra}) = 0.200 - 0.112x_1 + 0.088x_2 + 0.062x_3 + 0.202x_1^2 + 0.056x_2^2 - 0.007x_3^2 + 0.048x_1x_2 + 0.002x_2x_3 - 0.017x_1x_3 - 0.005x_1x_2x_3 \quad (3.2)$$

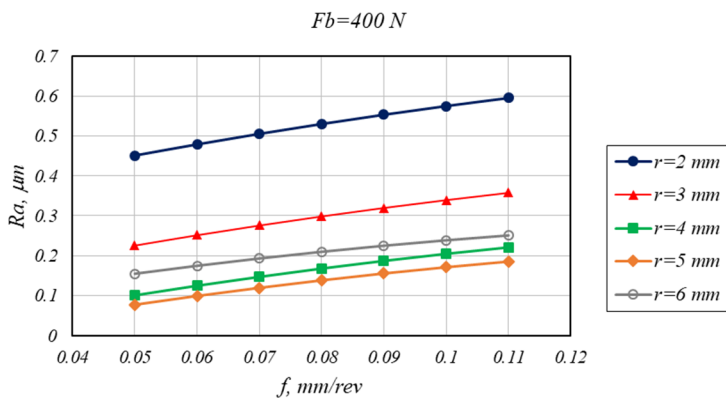
Влиянието на факторите върху функцията  $F(Y_{Ra})$  е визуализирано на 3D графиките, представяващи сечения на хипер-повърхнината на модела с различни хипер-равнини ( фиг. 3.9а,б,в). Графиките показват вида на функцията  $F(Y_{Ra})$ , когато третият фактор е фиксиран на средно ниво.



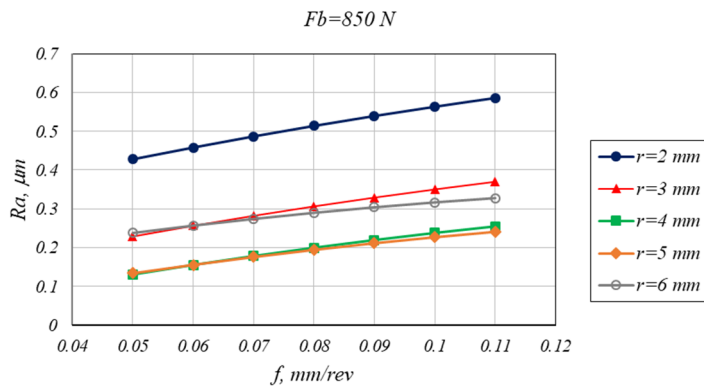
**Фиг. 3.10** Графична визуализация на резултатите от дисперсионния анализ  
*а.* главни ефекти; *б.* взаимодействия между факторите



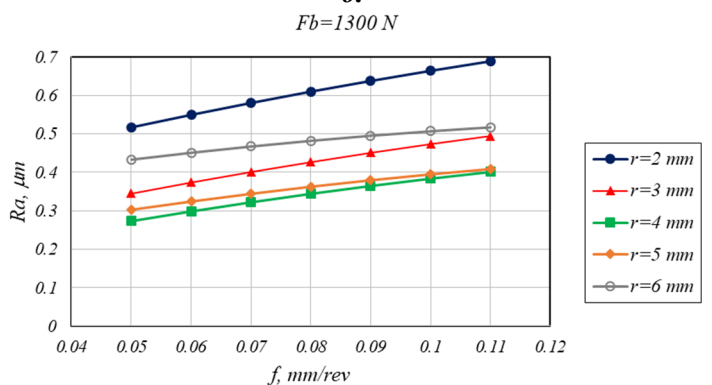
**Фиг. 3.11** Сечения на хипер-повърхнината на модела (3.1) с различни хипер-равнини



**а.**

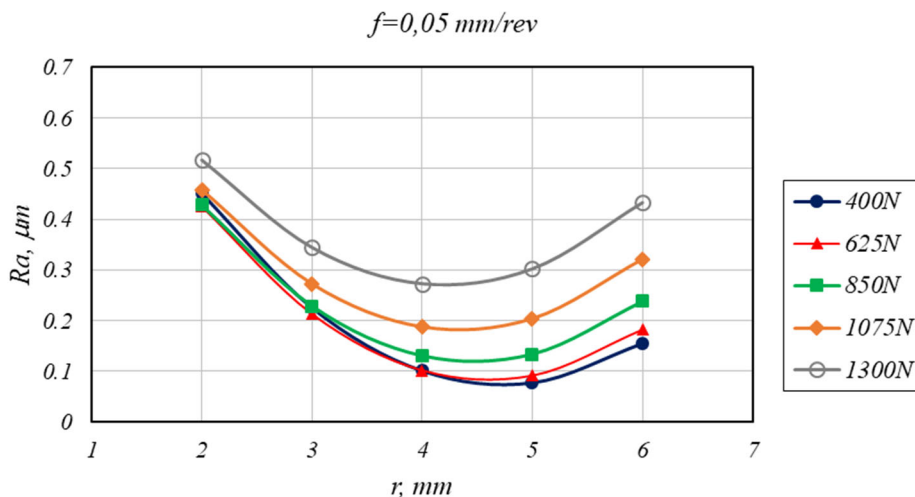


**б.**



**в.**

**Фиг. 3.12** Изменение на получената грапавост за различни стойности на  $r$  и деформиращата сила в зависимост от подаването



Фиг. 3.11 а,б показва, че когато деформиращата сила  $F_b$  и подаването  $f$  са фиксирани на средно ниво, за минимизиране на функцията  $F(Y_{Ra})$  е необходимо радиусът на закръгление на ролката да се поддържа в тесен интервал:  $r = 4 - 5\text{ mm}$ . От друга страна, когато радиусът е на средно ниво, за получаване на минимална грапавост са необходими минимални стойности на деформиращата сила  $F_b$  и подаването (фиг. 3.11 в).

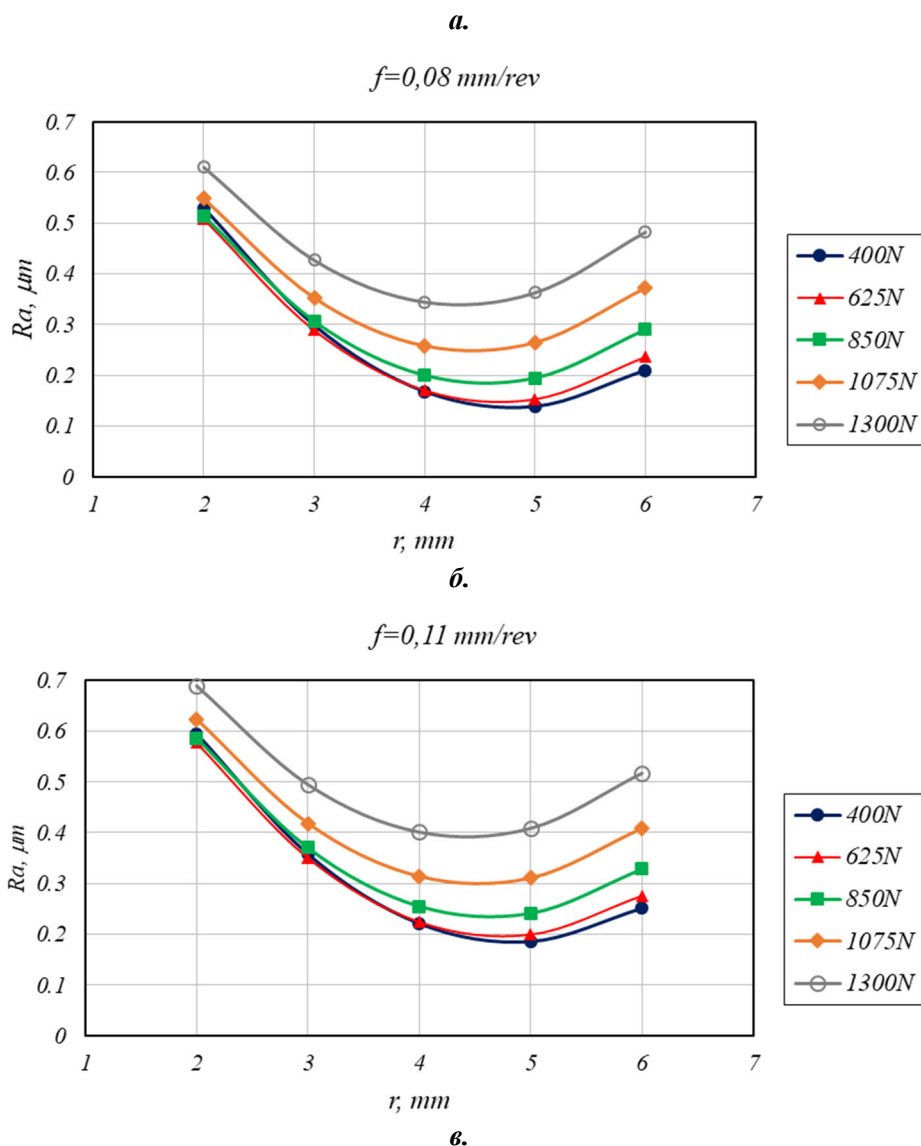
За по-задълбочено изследване на влиянието на управляващите фактори върху предсказаната от модела грапавост, са построени т.н. линии на ниво. На фиг. 3.12 а,б,в е визуализирано изменението на получената грапавост  $R_a$  в зависимост от радиуса на закръгление на ТДР и подаването, когато деформиращата сила е фиксирана съответно на долно, средно и долно ниво.

Фиг. 3.12 дава основание за следните коментари:

- Влиянието на подаването върху грапавостта има един и същи характер за всички стойности на  $r$  и  $F_b$  - увеличаването на подаването води до влошаване на получената грапавост, като тази тенденция е най-силно изразена при най-голямата деформираща сила (фиг. 3.12 в);

Фиг. 3.14 предсказва изменението на получената грапавост за различни стойности на деформиращата сила  $F_b$  и подаването  $f$  в зависимост от радиуса на закръгление на ТДР. Графичните зависимости на фиг. 3.14 показват следните тенденции:

- За всички стойности на деформиращата сила и



**Фиг. 3.14** Изменение на получената грапавост за различни стойности на  $F_b$  и подаването  $f$  в зависимост от радиуса на закръгление

подаването, функцията на получената грапавост в зависимост от радиуса  $r$  на закръгление на ТДР има нелинеен характер. При постоянно подаване, характерът на тези зависимости се променя в зависимост от големината на деформиращата сила  $F_b$  – за  $F_b = 1300 \text{ N}$ , функцията има минимум при  $r \approx 4 \text{ mm}$ , в интервала  $F_b = 850 - 1075 \text{ N}$  - при  $r \approx 4.5 \text{ mm}$ , а при  $F_b = 400 - 625 \text{ N}$  - при  $r \approx 5 \text{ mm}$ ;

• За всички стойности на подаването, разсейването на получената грапавост в изследвания интервал на вариране на деформиращата сила, нараства с нарастване на радиуса на закръгление на ТДР  $r$  – при  $r = 2 \text{ mm}$  разсейването на грапавостта е  $0.1 \mu\text{m}$ , а при  $r = 6 \text{ mm}$  достига  $0.28 \mu\text{m}$ ;

### ► Оптимизация за минимизиране на получената грапавост

В настоящото изследване, на база на получения регресионен модел (3.2), използвайки генетичен алгоритъм, е проведена оптимизация на процеса ППД с ТДР за определяне на управляващите фактори, осигуряващи минимизиране на получената грапавост:

$$F(Y_{Ra}) \rightarrow \min \quad (3.3)$$

На база на полученото оптимално решение са изчислени следните оптималните стойности на параметрите на процеса, осигуряващи минимална грапавост (табл. 3.6):

**Оптимални стойности на управляващите фактори**

**Таблица 3.6**

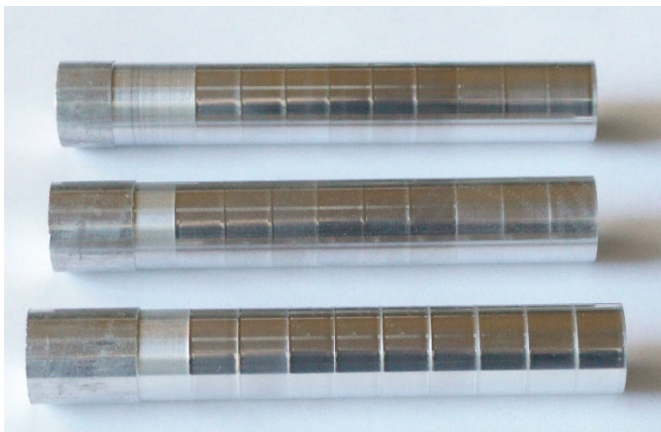
Радиус на закръгление на ТДР		Деформираща сила		Подаване	
Кодирани $x_1$	Натурални $r, \text{ mm}$	Кодирани $x_2$	Натурални $F_b, \text{ N}$	Кодирани $x_3$	Натурални $f, \text{ mm / rev}$
0,3572	4.7144	-0,9342	429,60	-1,0000	0.05

### 3.3. Експериментално изследване на микротвърдостта

#### 3.3.1. Експериментално изследване на повърхностната микротвърдост

##### ► Постановка на експерименталното изследване

За експерименталното изследване на повърхностната микротвърдост е използван същият план на експеримента, както при експерименталното изследване на получената грапавост.



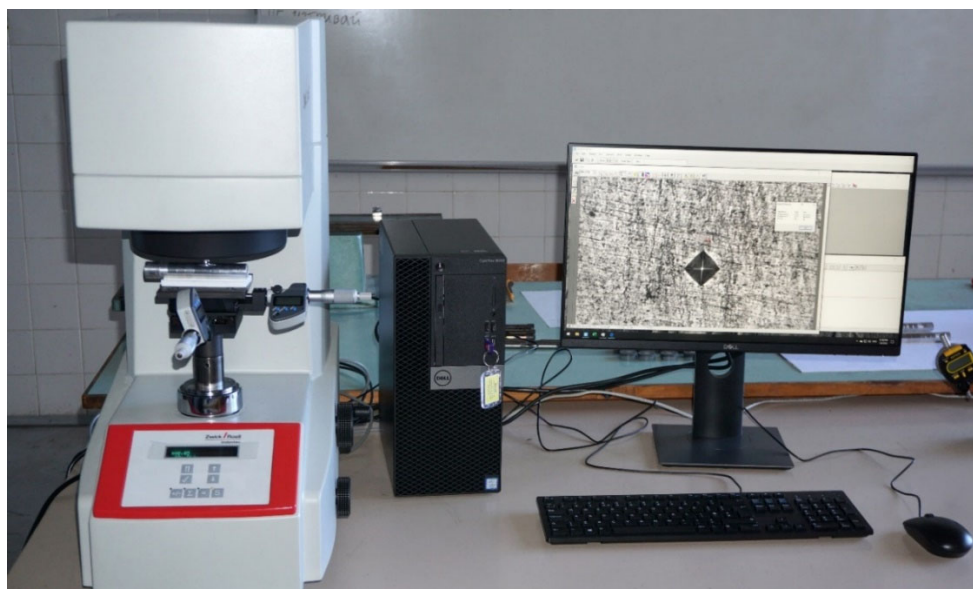
Фиг. 3.15 Експериментални образци

Обект на измерване е микротвърдостта  $HV_{0.05}$  в повърхностните слоеве на 3 броя цилиндрични образци от изследваната алуминиева сплав с диаметър  $d = 19 \text{ mm}$  и дължина  $120 \text{ mm}$  (фиг. 3.15). Всеки от образците е подложен на ППД с различен радиус на закръгление на ТДР съгласно плана на експеримента - съответно  $r = 2 \text{ mm}$ ,  $r = 4 \text{ mm}$  и  $r = 6 \text{ mm}$ .

За обезпечаване на всички експериментални точки, всеки образец съдържа 9 секции, всяка от които с дължина  $10 \text{ mm}$ . Всяка секция от даден образец е подложена на ППД с различна деформираща сила  $F_b$  и подаване  $f$ . По този начин на общо 27 секции съответстват 27 различни комбинации от управляващи фактори в съответствие с експерименталния план.

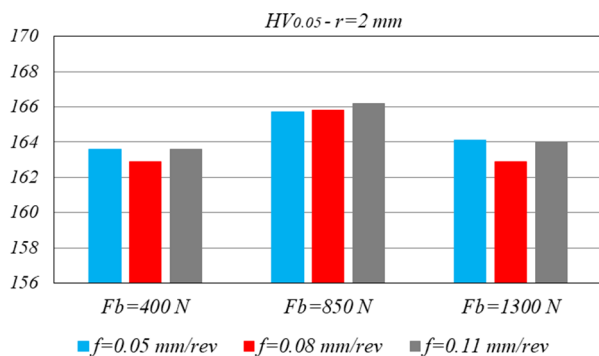
Измерванията на повърхностната микротвърдост  $HV_{0.05}$  са извършени в Технически университет – Габрово посредством микротвърдомер  $ZHV\mu$  Zwick/Roell, с възможност за компютърна обработка на резултатите от измерването (фиг. 3.16).

За всяка експериментална точка повърхностната микротвърдост  $HV_{0.05}$  е получена като средноаритметична стойност от десет измервания в обсега на съответната секция от образците.

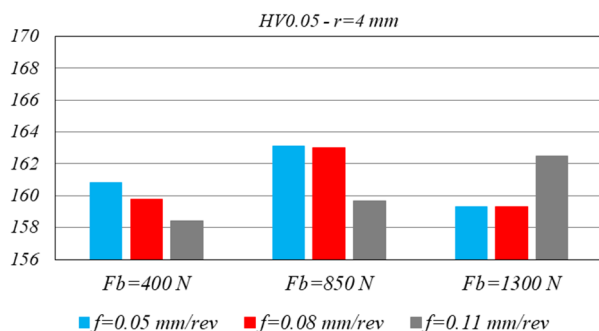


Фиг. 3.16 Експериментална установка за измерване на повърхностната микротвърдост

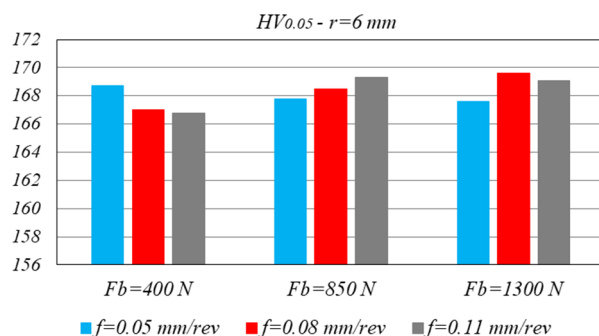
## ► Експериментални резултати



**а.**



**б.**



**в.**

**Фиг. 3.17** Обобщени резултати за повърхностната микротвърдост

### 3.3.2. Експериментално изследване на микротвърдостта в дълбочина

За целите на това изследване, цилиндричен образец с диаметър  $d = 20$  mm и дължина  $30$  mm е подложен на ППД с ТДР със следните параметри: радиус на закръгление  $r = 4$  mm, деформираща сила  $F_b = 1300$  N и брой на преходите  $n = 6$ . Част от образца е отделена и е изработен напречен шлиф (фиг. 3.18).

Обобщените резултати, получени на основа на изчислената средна стойност за повърхностната микротвърдост  $HV_{av}$  са визуализирани на диаграмите, показани на фиг. 3.17 а,б,в.

Фиг. 3.17 дава основание за следните коментари:

- Не се наблюдават ясни тенденции по отношение влиянието на деформиращата сила и подаването върху повърхностната микротвърдост;

- Същевременно, при всеки от образците, респ. за всеки изследван радиус на закръгление на ТДР, повърхностната микротвърдост варира в относително тесни граници – за  $r = 2$  mm разсейването е 3.3 единици, за  $r = 4$  mm разсейването е 4.7 единици, а за  $r = 6$  mm разсейването е 2.8. Тези стойности за разсейването практически съответстват или са близки до статистическата грешка на измерената микротвърдост. Следователно, процесът ППД с ТДР на образци от изследваната алуминиева сплав осигурява хомогенна повърхнина в аспект на повърхностна микротвърдост.

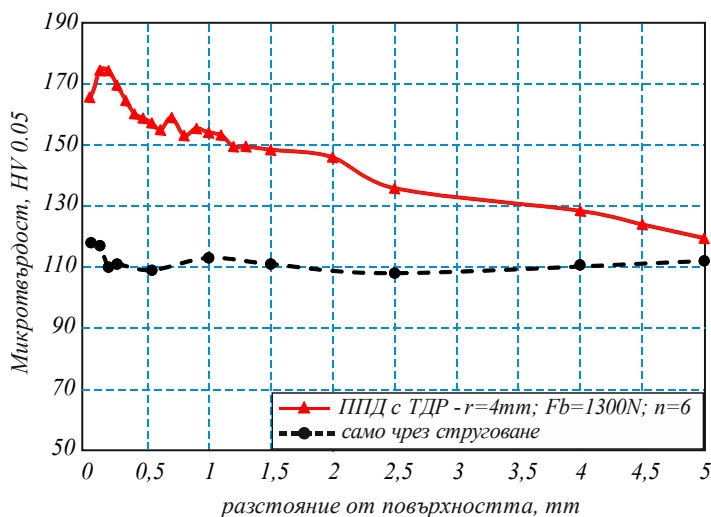




Фиг. 3.18 Напречен илриф

Използвайки микротвърдомер  $ZHV_{\mu}$  Zwick/Roell (фиг. 3.16) е измерена микротвърдостта  $HV_{0.05}$  по 6 радиални направления, стартирайки от повърхностния слой. За дадена дълбочина микротвърдостта е обобщена като средно-аритметична стойност от шестте измервания. С цел да се оцени ефективността на процеса ППД с ТДР по отношение на получената микротвърдост в дълбочина, на фиг. 3.19 са показани графики, визуализиращи профила на микротвърдостта в дълбочина на образца, подложен на ППД с посочените

параметри и на образец (служещ за база), обработен само чрез струговане. За образца, обработен само чрез струговане, микротвърдостта е почти постоянна в дълбочина -  $HV_{0.05} \approx 110$ , с изключение на тънък слой от повърхността (до  $0.2\text{ mm}$ ), в който се наблюдава несъществен градиент – достига се максимална стойност  $HV_{0.05} = 117$ .



Фиг. 3.19 Разпределение на микротвърдостта в дълбочина

Този повърхностен ефект най-вероятно се дължи на валцоването на прътовия материал. В образца, подложен на ППД с ТДР близо до повърхността на разстояние  $\approx 0.2\text{ mm}$  се наблюдава с 48 % по-висока микротвърдост ( $HV_{0.05} = 174$ ). В същото време уякчен слой се наблюдава на голяма дълбочина - практически до  $5\text{ mm}$ .

Полученият профил на микротвърдостта в дълбочина потвърждава в качествен аспект КЕ за разпределението на еквивалентната пластична деформация  $\bar{\epsilon}_p$ , получени в Гл.2, т. 2.5.3.

### 3.4. Експериментално изследване на ОН

#### 3.4.1. Експериментални образци и метод на изследване

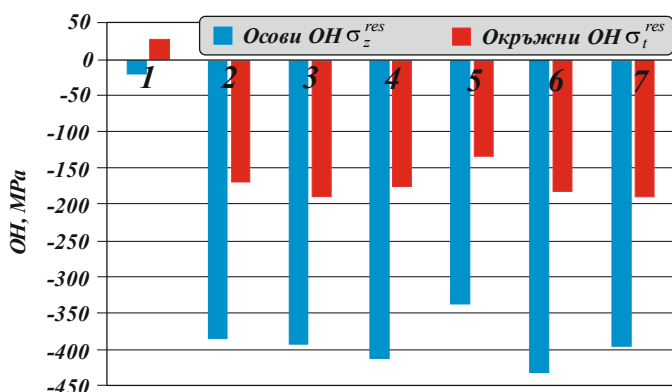
Тази част от експерименталните изследвания има за цел измерване на окръжните ОН  $\sigma_z^{res}$  и осови ОН  $\sigma_t^{res}$  на повърхността в цилиндрични образци от алуминиева сплав 2024-T3 с диаметър  $d = 20\text{ mm}$  и дължина  $30\text{ mm}$ . За да се направи сравнителна оценка на полезния макро-ефект, повърхностните слоеве на образците са третираны по различен начин. В табл. 3.8 е направена спецификация на образците в съответствие с приложеното довършващо обработване. Образец №1 е стругован с технологични параметри според описаните в т. 3.2.1. Образците с номера 2-8 са обработени чрез ППД с ТДР с еднакви технологични параметри: подаване  $f = 0.05\text{ mm / rev}$  и скорост на деформиране  $v = 63\text{ m / min}$ .

№	Довършващо обработване	Радиус на ТДР $r, mm$	Деформираща сила $F_b, N$	Брой на преходите $n$
1	Чисто струговане (база)	-	-	-
2	ППД с ТДР	4	800	1
3	ППД с ТДР	4	400	1
4	ППД с ТДР	4	1300	1
5	ППД с ТДР	2	800	1
6	ППД с ТДР	6	800	1
7	ППД с ТДР	4	800	6

За експериментално определяне на осовите ОН  $\sigma_z^{res}$  и окръжните ОН  $\sigma_t^{res}$  е използван X-ray diffraction анализ, проведен в Лабораторията по рентгеноструктурен анализ в Чешкия Технически Университет в Прага.

### 3.4.2. Резултати от X-ray diffraction анализа

Резултатите от X-ray diffraction анализа за измерените осови  $\sigma_z^{res}$  и окръжните ОН  $\sigma_t^{res}$  на повърхността на образците са показани на фиг. 3.20.



Фиг. 3.20 Резултати от X-ray diffraction анализа за осовите и окръжните ОН

Измерените стойности показват следното:

- Отчитайки грешката при измерване, може да се приеме, че двата вида ОН в образец №1, приет за база (обработен само чрез рязане), са символични. От друга страна, в останалите образци (с номера №2-№8), третирани чрез ППД с ТДР, са измерени значителни осови и окръжни ОН. Тази съществена разлика доказва ефективността на процеса ППД с ТДР по отношение на благоприятния

макро-ефект в изследваната алуминиева сплав;

• Независимо от различните комбинации на  $r$  и  $F_b$ , за всички образци, подложени на ППД с ТДР, измерените осови ОН  $\sigma_z^{res}$  са по-големи от окръжните ОН  $\sigma_t^{res}$ . Тази разлика в двата вида ОН потвърждава резултатите, получени от КЕ симулации и направената верификация на разработения 3D КЕ модел (Гл.2, т. 2.5.3 и т. 2.5.4);

• Образците с номера №2, №3 и №4 са подложени на ППД с ТДР с един и същи радиус на закръгление ( $r = 4 mm$ ), но с различни деформиращи сили. Като се вземат предвид грешките, характерни за техниката X-ray diffraction ( $\Delta \sigma = 2 - 33 MPa$ ), измерените осови и окръжни ОН са близки по стойност и не показват изразена тенденция за влиянието на деформиращата сила. Осовите ОН  $\sigma_z^{res}$  са най-големи в образец №4 ( $\sigma_z^{res} = -411 MPa$ ), обработен с най-голяма деформираща сила ( $F_b = 1300 N$ ), а най-малки – в образец №2 ( $\sigma_z^{res} = -386 MPa$ ), обработен със средна стойност на деформиращата сила ( $F_b = 800 N$ ). В тази група образци най-големи окръжни ОН  $\sigma_t^{res}$  са измерени в образец №3 ( $\sigma_t^{res} = -189 MPa$ ), подложен на ППД с най-малка деформираща сила ( $F_b = 400 N$ );

• Образци с номера №2, №5 и №6 са подложени на ППД с ТДР с една и съща деформираща сила ( $F_b = 800 \text{ N}$ ), но с различни радиуси на закръгление. Измерените осови и окръжни ОН за тази група образци показват изразена тенденция за влиянието на  $r$ . С нарастване на  $r$  и двата вида ОН на повърхността нарастват по абсолютна стойност. Най-големи осови ( $\sigma_z^{res} = -432 \text{ MPa}$ ) и окръжни ОН ( $\sigma_t^{res} = -181 \text{ MPa}$ ) са измерени в образец №6, подложен на ППД с най-голям радиус ( $r = 6 \text{ mm}$ ), а най-малки в образец №5, третиран с най-малък радиус -  $r = 2 \text{ mm}$ .

• Различните комбинации на радиуса на закръгление на ТДР  $r$  и деформиращата сила  $F_b$  водят до различна стойност на т.н. коефициент на циклично натоварване, който коефициент е въведен като количествена мярка за броя на циклите „натоварване-разтоварване“ в рамките на един преход ( $n = 1$ ) за точките от повърхностните слоеве при процеса диамантно заглаждане. В действителност, при всички статични burnishing процеси третирането на цилиндрични елементи се свежда до движещо се по винтова линия контактно въздействие върху съответната цилиндрична повърхнина. За заготовка с конкретен материал и диаметър, коефициента на циклично натоварване зависи от геометрията на деформиращия елемент, подаването и дълбочината на проникване (респ. от деформиращата сила). От друга страна, цикличното натоварване в околност на коя да е точка от повърхностните слоеве в рамките на един преход, не е нито “force/stress controlled” (с контролирано напрежение), нито “strain controlled” (с контролирана деформация). Следователно, различните комбинации от  $r$  и  $F_b$  обуславят различно деформационно уякчаване, ефектът от което се изразява в различно и трудно за прогнозиране разпределение на осовите и окръжните ОН на повърхността и в дълбочина;

• Резултатите за образец №7, който е обработен както образец №2, но с шест прехода ( $n = 6$ ), потвърждават значението на броя на преходите като значим допълнителен фактор за създаване на по-изразена зона с полезни ОН на натиск, и оттам - повишаване на УД.

### **3.5. Експериментално изследване на микроструктурата**

#### **3.5.1. Цел на изследването**

Целта на микроструктурния анализ е да се оценят възможностите на процеса ППД с ТДР за модифициране на микроструктурата на повърхностните слоеве в цилиндрични образци от алуминиева сплав 2024-T3. Обект на сравнителен микроструктурен анализ са два цилиндрични образца с диаметър  $d = 20 \text{ mm}$  и дължина  $30 \text{ mm}$ , обработени, както следва: образец, обработен само чрез чисто струговане; образец, подложен на ППД с ТДР със следните параметри:  $r = 4 \text{ mm}$ ;  $F_b = 1300 \text{ N}$ ;  $f = 0.05 \text{ mm / rev}$ ;  $v = 63 \text{ m / min}$ ;  $n = 6$ .

За микроструктурния анализ е използван Металографски микроскоп НЕОРНОТ 2.

#### **3.5.2. Микроструктурен анализ на образца, обработен само чрез струговане**

Обект на микроструктурен анализ са изработените: напречен шлиф (фиг. 3.21) и надлъжен шлиф (фиг. 3.22).

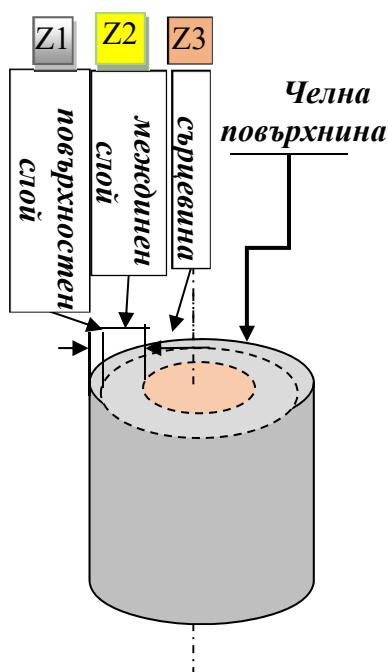


Фиг. 3.21 Напречен шлиф

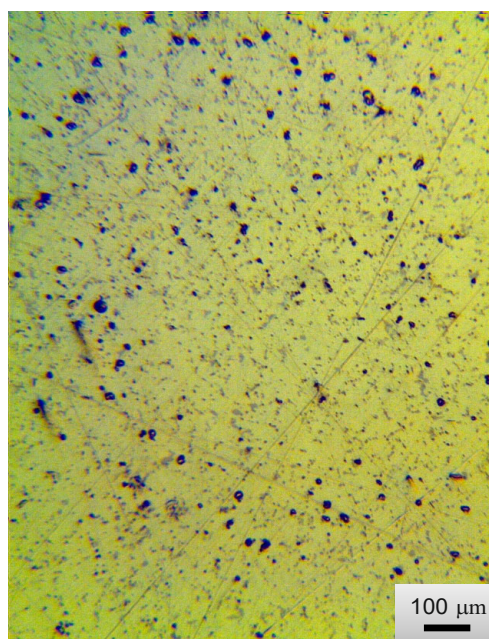


Фиг. 3.22 Надлъжен шлиф

► Микроструктурен анализ на напречния шлиф



Фиг. 3.23 Схема на наблюдаваните зони в напречния шлиф

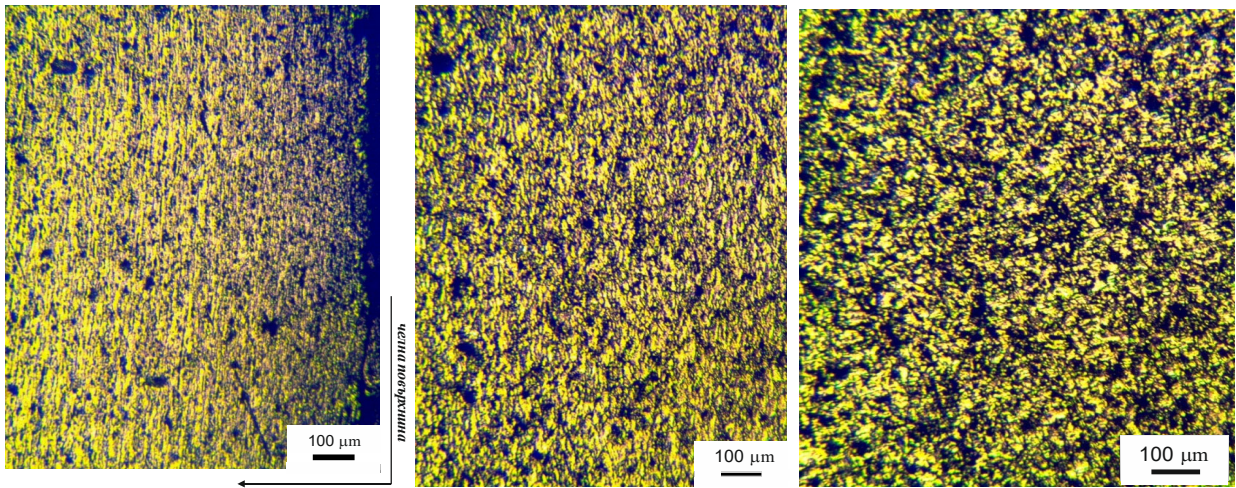


Фиг. 3.24 Микроструктура на непроявена проба за определяне на неметални включения, увеличение X100

На фиг. 3.23 е показана схема, на която са означени наблюдаваните зони в напречния шлиф.

На фиг. 3.24 е разгледана микроструктурата на непроявения образец за определяне на неметални включения. Определянето на бала за неметални включения е по стандарт "ГОСТ Р ISO 4967-2009". По представен еталон е отчетен бал 2 по скала D.

От направените микроструктурни изследвания в дълбочина в напречно направление (по радиуса) на образца, след проявяване на структурата са разгледани трите означени зони (фиг. 3.23) при различни увеличения. На фиг. 3.25 структурите са подредени във възходящ ред от повърхнината към сърцевината на пробата в радиално направление. На повърхнината (фиг. 3.25а), може да се отчете силно изразена влакнеста структура (текстура), с окръжно направление, по посока на разглежданата окръжност. В радиално направление на разглежданата проба степента на влакнестост намалява (фиг. 3.25б), като в сърцевината структурата е равноосна (фиг. 3.25в).



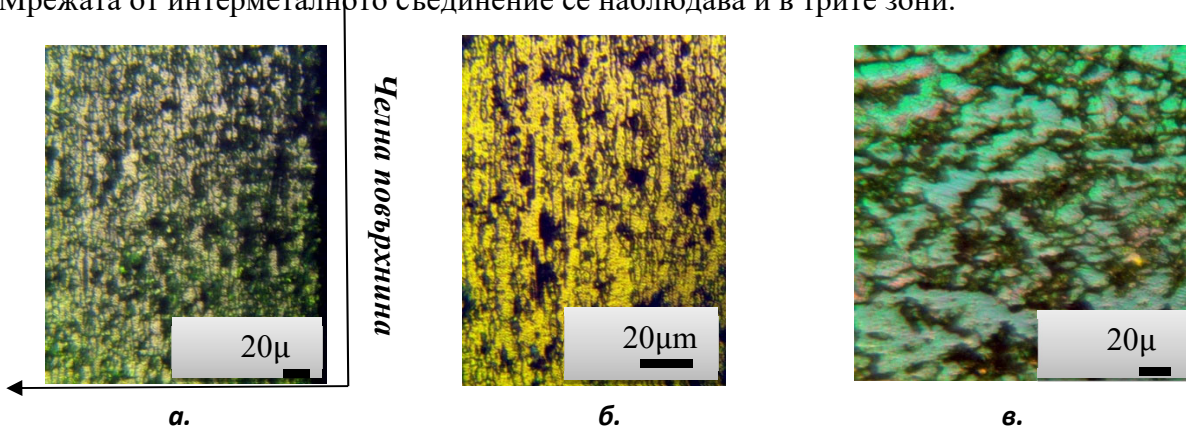
а.

б.

в.

**Фиг. 3.25** Микроструктура на образца (алуминиев прокат от 2024-T3) в напречно направление – увеличение  $X 100$  а. повърхостен слой (Z.1); б. междинен слой (Z.2); в. сърцевина (Z.3)

При същите зони на изследване, на фиг. 3.26 и фиг. 3.27 при по голямо увеличение ясно се очертава мрежа от отделения ( $\text{CuAl}_2$ ). Мрежата е отделена по границите на зърната в разглежданото направление по схемата на фиг. 3.23. Така изградената мрежа рязко понижава ударната жилавост, като благоприятства създаване на фокус, пукнатина и нейното развитие. Мрежата от интерметалното съединение се наблюдава и в трите зони.

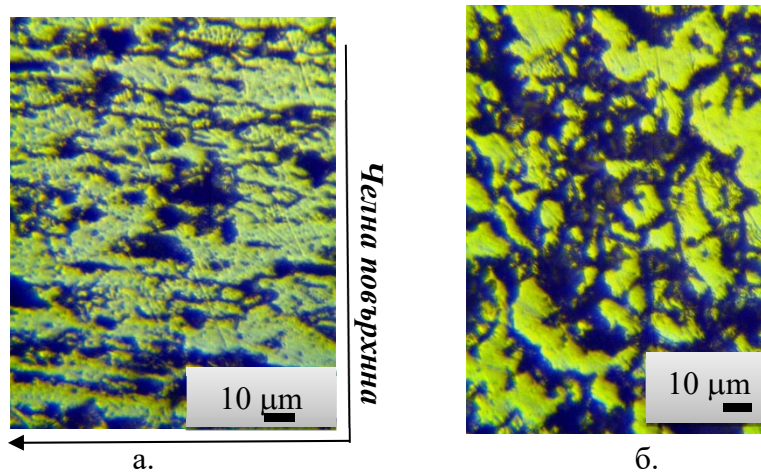


а.

б.

в.

**Фиг. 3.26** Микроструктура на образца (алуминиев прокат от 2024-T3) в напречно направление – увеличение  $X 500$  а. повърхостен слой (Z.1); б. междинен слой (Z.2); в. сърцевина (Z.3)

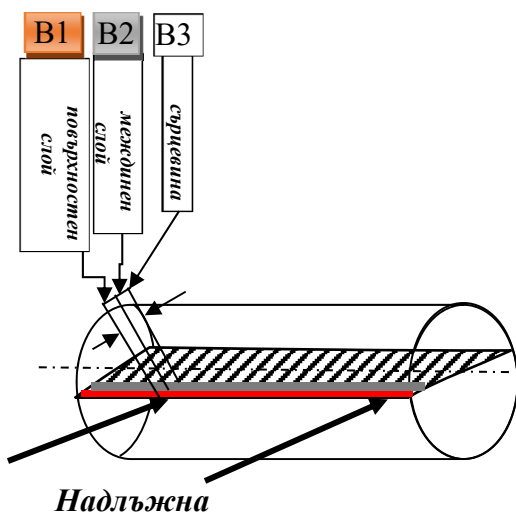


а.

б.

**Фиг. 3.27** Микроструктура на образца (алуминиев прокат от 2024-T3) в напречно направление – увеличение  $X 1000$  а. повърхостен слой (Z.1); б. сърцевина (Z.3)

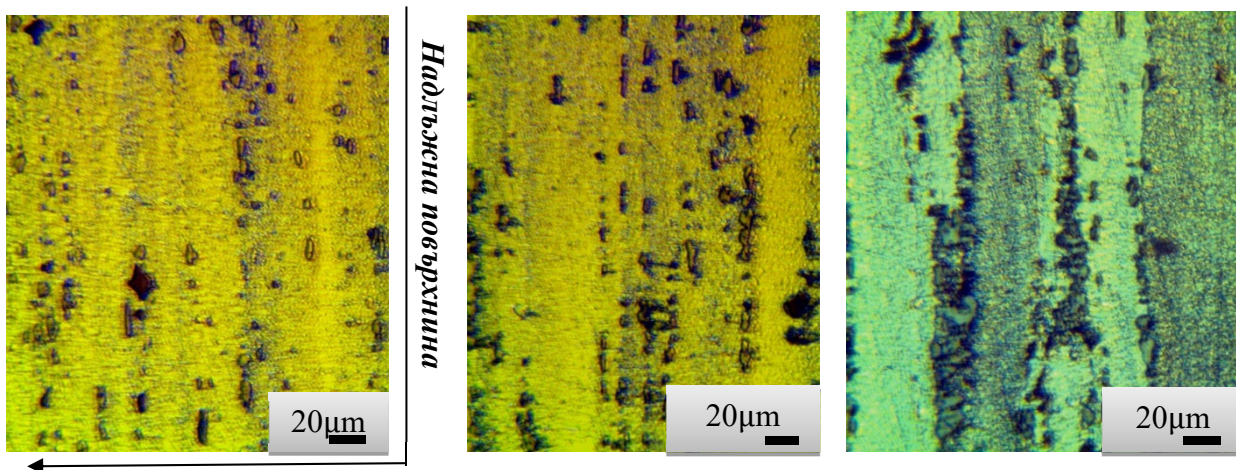
► **Микроструктурен анализ на надлъжния шлиф**



Фиг. 3.28 Схема на наблюдаваните зони в надлъжния шлиф

На фиг. 3.28 е показана схема, на която са означени наблюдаваните зони в надлъжния шлиф.

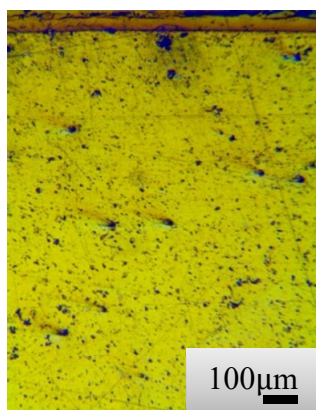
Направено е микроструктурно изследване и в надлъжно направление по схемата на фиг. 3.28. На фиг. 3.29 са представени микроструктурите в дълбочина на описаните зони. И трите зони са със силно изразена ивична структура, като на повърхността ивиците са значително по тесни (фиг. 3.27а,б), от тези в сърцевината (фиг. 3.27в). В зони се наблюдава отделяне на интерметално съединение AlMg<sub>2</sub>. Формата на отделянията на фигури 3.27а,б са удължени в линейно направление.



Фиг. 3.29 Микроструктура на на образца (алуминиев прокат от 2024-T3) в надлъжно направление – увеличение X 500 а. повърхностен слой (B.1); б. междинен слой (B.2); в. сърцевина (B.3)

**3.5.3. Микроструктурен анализ на образца, обработен чрез ППД с ТДР**

► **Микроструктурен анализ на напречния шлиф**



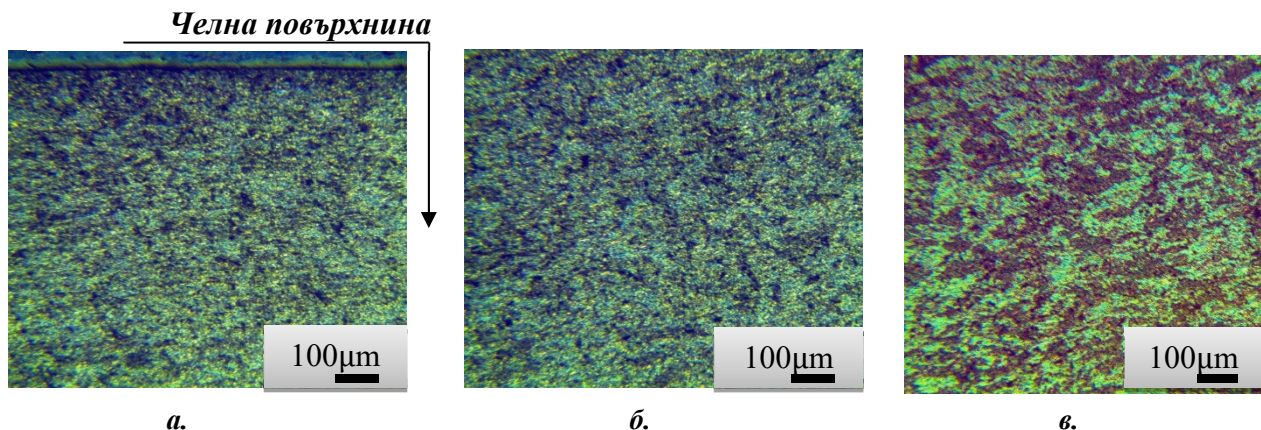
Фиг. 3.30 Микроструктура на непроявена проба за определяне на неметални включвания, увеличение - X100

Наблюдаваните зони и техните означения са същите, както при образца, обработен само чрез струговане (виж фиг. 3.23).

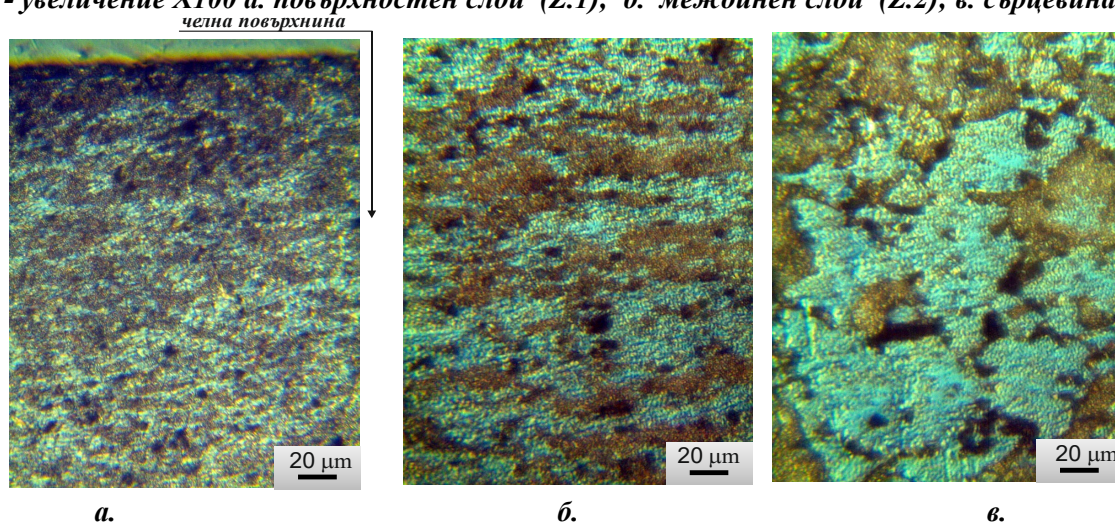
На фиг. 3.30 е разгледана микроструктурата на непроявена проба за определяне на неметални включвания. По представен еталон е отчетен бал 2.5 по скала D.

От направените микроструктурни изследвания в дълбочина в напречно направление (по радиуса) на образца, след проявяване на структурата са разгледани трите зони при различни увеличения. На фиг. 3.31 структурите са подредени във възходящ ред от по-

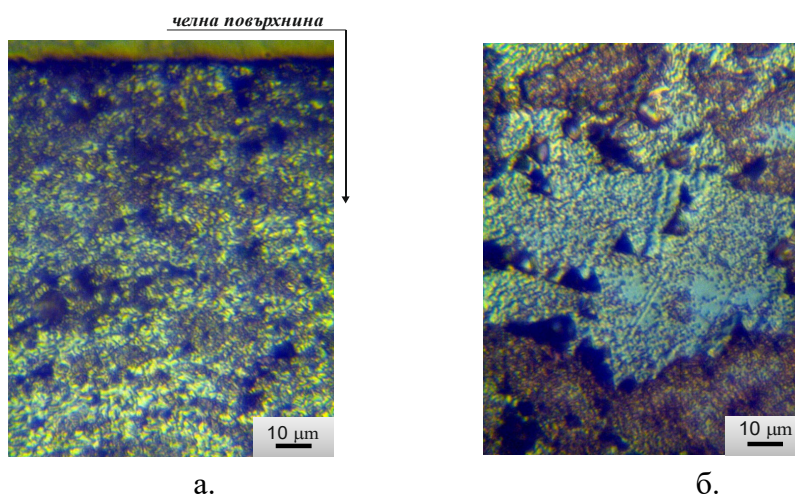
върхнината към сърцевината на пробата в радиално направление. На повърхнината (фиг. 3.31а), не се наблюдава влакнеста структура, която вероятно е раздробена при повърхностното механично въздействие на ТДР. В междинната зона от схемата (зона Z2) се наблюдава по-слабо изразена влакнеста структура (фиг. 3.32б), в сравнение с изходния прокат, респ. образеца, обработен чрез струговане. В радиално направление към сърцевината на разглежданата проба структурата става равноосна (фиг. 3.31в, фиг. 3.32в).



**Фиг. 3.31** Микроструктура на образец, подложен на ППД с ТДР в напречно направление - увеличение X100 а. повърхностен слой (Z.1); б. междинен слой (Z.2); в. сърцевина (Z.3)



**Фиг. 3.32** Микроструктура на образец, подложен на ППД с ТДР в напречно направление - увеличение X 500 а. повърхностен слой (Z.1); б. междинен слой (Z.2); в. сърцевина (Z.3)



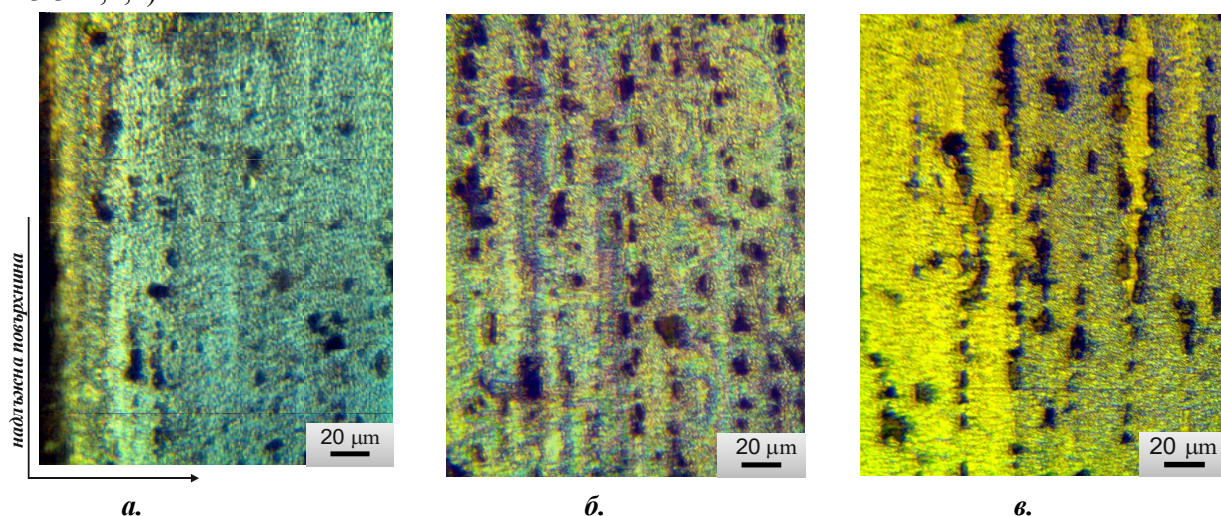
**Фиг. 3.33** Микроструктура на образец, подложен на ППД с ТДР в напречно направление - увеличение X 1000 а. повърхностен слой (Z.1); б. сърцевина (Z.3)

При същите зони на изследване, на фиг. 3.32 и фиг. 3.33 не се наблюдава изграждане на мрежа по границите на зърната, както това се наблюдава при структурите в същите зони на образеца, обработен само чрез струговане. Зърната, особено в повърхностния слой, са издробенени, а отделянията ( $\text{CuAl}_2$ ) които са групирани в мрежа, са раздробени. Липсата на мрежа по границите на зърната в разглежданото направление е предпоставка за повишаване на якостните характеристики, особено на ударната жилавост.

### ► Микроструктурен анализ на надлъжния шлиф

Наблюдаваните зони и приетите им означения са същите, както при образеца, обработен само чрез струговане (виж фиг. 3.28). На фиг. 3.34 са представени микроструктурите в дълбочина на описаните зони в надлъжно направление съгласно схемата, посочена на фиг. 3.28. И в трите зони ивичната структура е издробенена, особено в повърхностната област (фиг. 3.34а,б).

В зоните на разглежданото сечение (надлъжен шлиф) се наблюдава отделяне на интерметално съединение  $\text{CuAl}_2\text{Mg}$ . Формата на отделянията са удължени в линейно направление (фиг. 3.34а,б,в).



Фиг. 3.34 Микроструктура на образец, подложен на ППД с ТДР в надлъжно направление - увеличение  $X 500$  а. повърхностен слой (B.1); б. междинен слой (B.2); в. сърцевина (B.3)

### 3.6. Изводи

На база на резултатите от проведеното експериментално изследване на процеса ППД с ТДР могат да бъдат обобщени следните основни изводи:

- ◆ Използвайки диференциално-морфологичния метод е направен анализ на съществуващите устройства за ППД на външни цилиндрични повърхнини в условията на триене при търкаляне. На тази основа е разработено устройство за ППД с ТДР с възможност за управление на геометричните и физични параметри на процеса;

- ◆ Посредством широко експериментално изследване, включващо предварителен експеримент, планиран експеримент, регресионен анализ и оптимизация на процеса, са определени оптималните параметри на процеса, осигуряващи минимална грапавост:  $r = 4.71 \text{ mm}$ ;  $F_b = 429.6 \text{ N}$ ;  $f = 0.05 \text{ mm / rev}$ ;

- ◆ Експериментално е доказано, че процесът ППД с ТДР осигурява относително хомогенна повърхнина в аспект на повърхностна микротвърдост на цилиндрични образци от високояка алуминиева сплав 2024-T3 – в диапазона  $HV_{0.05} = 158.4 - 169.6$ . Експериментално получените профили за разпределение на микротвърдостта в дълбочина доказват ефективността на изследвания процес по отношение създаване на уякчен слой на значителна дълбочина – практически до  $5 \text{ mm}$ ;



◆ Посредством X-ray diffraction анализ е получена база данни за осовите и окръжни ОН в образци, подложени на ППД с ТДР с различни комбинации на  $r$  и  $F_b$ , която доказва ефективността на процеса от гледна точка на полезния макро-ефект;

◆ На база на сравнителен микроструктурен анализ е установено, че прилагането на процеса ППД с ТДР с 6 прехода ( $n = 6$ ) модифицира микроструктурата в повърхностните слоеве по посока на издребняване на зърната и раздробяване на мрежата от отделяния ( $\text{CuAl}_2$ ) по границата на зърната. Тези микро-ефекти са предпоставка за подобряване на уморното поведение, респ. за повишаване на якостта на умора на алуминиева сплав 2024-T3.

## ГЛАВА 4 ВЛИЯНИЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ПРОЦЕСА ППД С ТДР ВЪРХУ УМОРНАТА ДЪЛГОТРАЙНОСТ ПРИ ЦИКЛИЧНО ОГЪВАНЕ НА ОБРАЗЦИ ОТ АЛУМИНИЕВА СПЛАВ 2024-T3

### 4.1. Постановка на експерименталното изследване

#### 4.1.1. Основна цел

Основната цел на това изследване е да се оценят потенциалните възможности на процеса ППД с ТДР за повишаване на УД при циклично огъване на експериментални образци от алуминиева сплав 2024-T3 в корелация със следните параметри: радиус на закръгление на ТДР  $r$ , деформираща сила  $F_b$  и брой на преходите  $n$ . За количествена оценка на УД и условната граница на умора са използвани  $S - N$  криви, базирани върху УТ на циклично огъване.

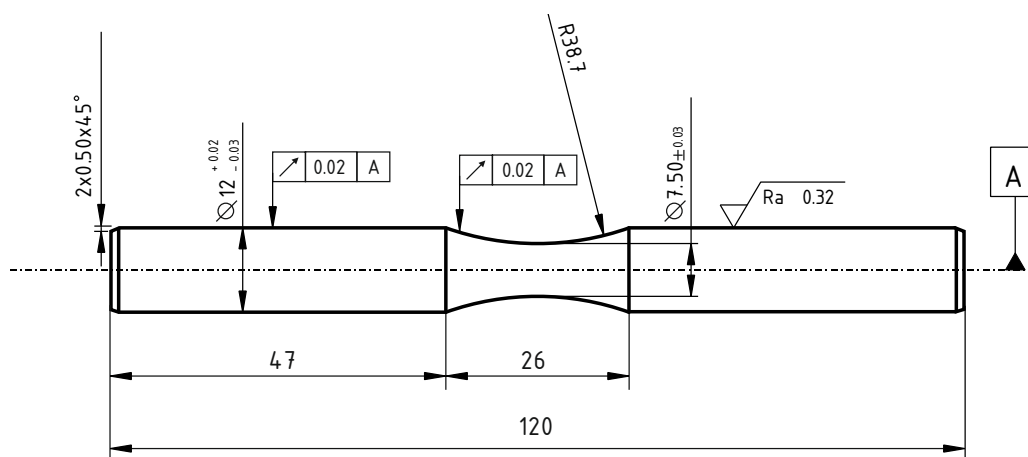
#### 4.1.2. Експериментални образци за УТ

##### ► Материал

Материалът на експерименталните образци за УТ е алуминиева сплав 2024-T3 с химичен състав според табл. 2.1 и материални характеристики, описани в т. 3.2.1.

##### ► Геометрия на образците

Използвани са стандартни уморни образци тип „пясъчен часовник“ с минимален диаметър  $7.5 \text{ mm}$  в съответствие с БДС 5297-83 „Методи за изпитване на умора“. Геометрията на образците е показана на фиг. 4.1 а, а на фиг. 4.1б – общия вид.



а.

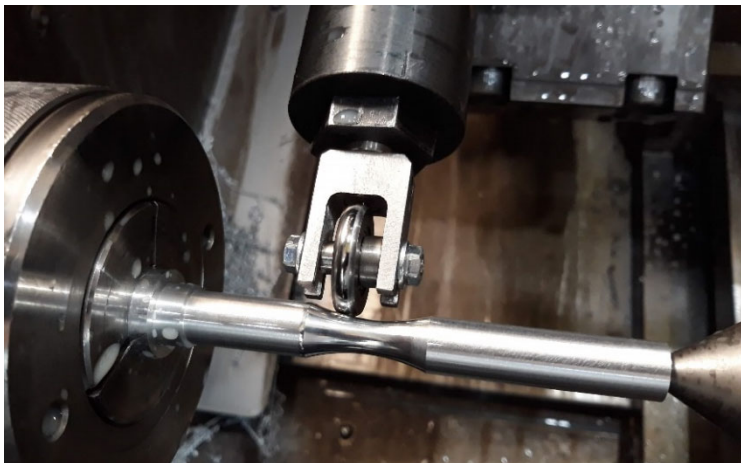


б.

Фиг. 4.1 Образци за УТ на циклично огъване

### ► Подготовка на образците за УТ

Образците за УТ са изработени върху струг с ЦПУ – Okuma. Част от образците са обработени само чрез струговане. Тази група образци служи за база, с която се сравняват група образци, подложени на ППД с ТДР. Уморните образци се закрепват в патронник и център и последователно се струговат и обработват чрез ППД (фиг. 4.2), използвайки разработеното устройство (фиг. 3.2).



Фиг. 4.2 Изработване на образците за УТ Фиг.



4.3 Експериментални образци за УТ

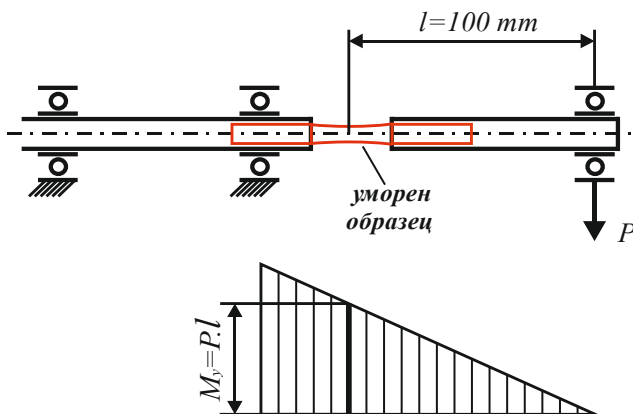
Струговането се извършва по цялата дължина на образците с твърдосплавни пластини SSMT-120404LF KCP10 при следните технологични параметри: подаване  $f = 0.1 \text{ mm / rev}$ ; скорост на рязане  $v_c = 60 \text{ m / min}$  и дълбочина на рязане  $a_p = 0.5 \text{ mm}$ . Централният участък от образците (фиг. 4.1 а) се подлага на ППД с ТДР с различни комбинация на деформиращата сила  $F_b$  и радиуса на закръгление на ТДР  $r$  при постоянни технологични параметри:  $f = 0.05 \text{ mm / rev}$ ;  $v = 63 \text{ m / min}$ . По време на целия технологичен цикъл е използвана смазочно-охлаждаща течност – Носит 795-Н. На фиг. 4.3 е показана част от експерименталните образци за УТ на циклично огъване.

#### 4.1.3. Условия за провеждане на УТ

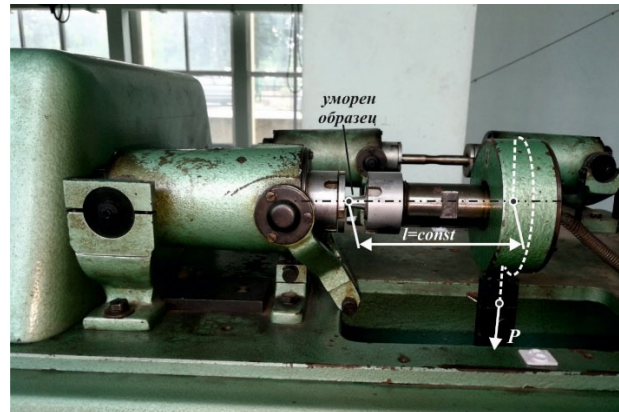
Изследвано е влиянието на следните параметри на процеса ППД с ТДР върху уморното поведение на изследваната алуминиева сплав: деформираща сила  $F_b$ ; радиус на закръгление на ТДР  $r$ ; брой на преходите  $n$ . С оглед на получаване на сравнителна оценка за влиянието на тези параметри върху уморното поведение и границата на умора са построени S-N криви. За целта са проведени УТ на циклично огъване, използвайки конзолна схема на натоварване съгласно фиг. 4.4. УТ са проведени чрез въртящ се товар, осигуряващ симетричен цикъл на натоварване с параметри:  $R = -1$  и честота  $50 \text{ Hz}$ .

УТ са проведени върху изпитвателна машина УВМ при поддържане на постоянна дължина на разстоянието  $l = \text{const} = 100 \text{ mm}$  (фиг. 4.5). За управление на големината на товара  $P$ , респ. големината на огъващия момент  $M_y$  в съответствие с амплитудата на цикъла  $\sigma_a$ , е използвана лостова система. Кривите на умора са построени, като за всяка амплитуда е изпитван по един образец. Всеки УТ приключва при пълно разрушение на съответния образец, с изключение на някои от образците, за които е отчетен максимален брой цикли в диапазона

$N_{max} = (10.1 \div 14.3) \times 10^6$ . При наличие на значителна разлика между получените и очакваните резултати, изпитанията са повторени при съответните амплитуди толкова пъти, колкото е необходимо.



Фиг. 4.4 Схема на закрепване и натоварване на образците за УТ



Фиг. 4.5. Изпитвателна машина UBM за провеждане на УТ

Уморните изпитания съдържат следните основни етапи:

1). Сравнение на кривите на умора, получени на база на образци, обработени само чрез струговане (служещи за база) и такива, подложени на ППД с ТДР в условията на еднопреходна обработка с параметри, близки до тези, осигуряващи минимална получена грапавост:  $F_b = 800 \text{ N}$ ;  $r = 4 \text{ mm}$ ;  $n = 1$ . В Гл. 3., т. 3.2.2. след проведената оптимизация са определени оптималните параметри на процеса по критерий минимална грапавост:  $F_b = 429.6 \text{ N}$  и  $r \approx 4.7 \text{ mm}$ . Тъй като целта в изследването е да се оценят възможностите на изследвания процес в аспект на УД, посочените оптимални стойности за  $F_b$  и  $r$  са изключени поради следните причини: намерената оптимална стойност за деформиращата сила е много близка до долната граница в изследвания интервал и следователно, е нецелесъобразна за такъв тип изпитания; комплектът ТДР са изработени с цели стойности за радиуса на закръгление. Избраните стойности за радиуса на закръгление на ТДР и деформиращата сила съответстват на параметрите, осигуряващи минимална грапавост в предварителното изследване на получената грапавост (Гл. 3, т. 3.2.1);

2). Изследване влиянието на деформиращата сила върху УД и границата на умора при постоянен радиус на закръгление на ТДР:  $r = \text{const} = 4 \text{ mm}$ ;

3). Изследване влиянието на радиуса на закръгление на ТДР върху УД и границата на умора в условията на постоянна деформираща сила:  $F_b = \text{const} = 800 \text{ N}$ ;

4). Изследване влиянието на броя на преходите върху УД и границата на умора. За тази част от изследването от етапи 3) и 4) е определена тази комбинация на  $F_b$  и  $r$ , за която експериментално е получена максимална граница на умора.

## 4.2. Резултати от УТ

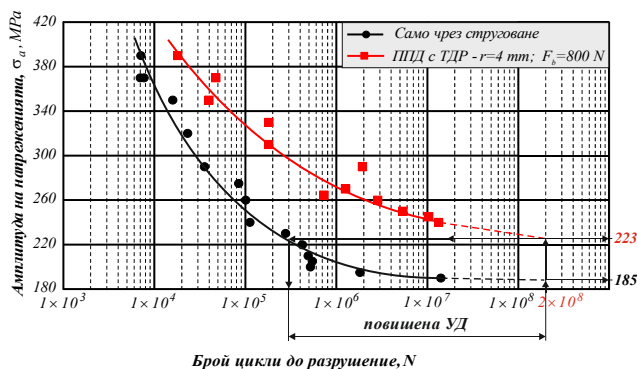
### 4.2.1. Определяне на условната граница на умора

Експериментално получените криви на умора са основани на УТ до достигане на максимален брой цикли в интервала:  $N_{max} = (10.1 \div 14.3) \times 10^6$ . За изследваната алуминиева сплав определената по този начин якост на умора е „ограничена граница на умора“. За цветните сплави е приета „условна граница на умора“, съответстваща на базов брой цикли -  $2 \times 10^8$ . За

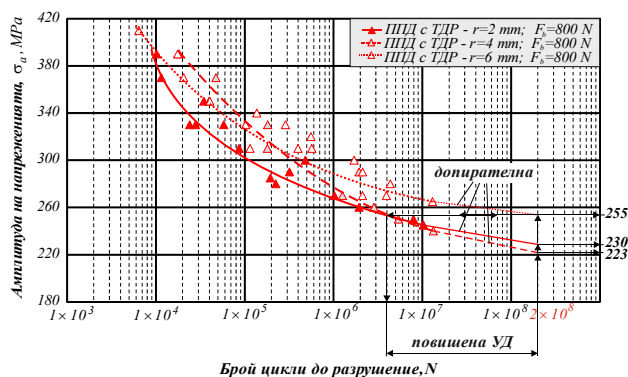
определяне на условната граница на умора е построена допирателна към експериментално получената крива на умора в точката, съответстваща на отчетения максимален брой цикли ( $N_{max} = (10.1 \div 14.3) \times 10^6$ ) до пресичане с права, съответстваща на базовия брой цикли -  $2 \times 10^8$ .

#### 4.2.2. Криви на умора, получени на база на образци, обработени само чрез струговане и чрез на ППД с ТДР с параметри, осигуряващи близка до минималната грапавост

Получените криви на умора са показани на фиг. 4.6. За образците, обработени само чрез рязане (приети за база) е отчетена условна граница на умора  $\sigma_{-1} = 185 \text{ MPa}$ , а за тези, подложени на ППД с посочените параметри ( $r = 4 \text{ mm}$ ;  $F_b = 800 \text{ N}$ ) условната граница на умора е а  $\sigma_{-1} = 223 \text{ MPa}$ . Следователно, прилагането на процеса ППД с ТДР с параметри, осигуряващи близка до минималната грапавост, повишава условната граница на умора с 20.5%, а УД се повишава повече от 600 пъти в сравнение с базата (фиг. 4.6).



Фиг. 4.6 S-N криви, получени за образци, обработени само чрез струговане и чрез ППД с ТДР с параметри, осигуряващи близка до минималната грапавост



Фиг. 4.7 S-N криви, получени за образци, подложени на ППД с ТДР с различни стойности на  $r$

#### 4.2.3. Влияние на радиуса на закръгление на ТДР върху УД и границата на умора

За изследване влиянието на радиуса на деформиране на ТДР  $r$  върху УД и условната граница на умора, са проведени серии УТ за три стойности на  $r$  ( $r = 2, 4, 6 \text{ mm}$ ) при постоянни параметри на процеса:  $F_b = 800 \text{ N}$ ;  $f = 0.05 \text{ mm/rev}$ ;  $v = 63 \text{ m/min}$ ;  $n = 1$ . Получените S-N криви са онагледени на фиг. 4.7. S-N кривите показват, че радиусът на закръгление на ТДР има различно влияние върху якостта на умора в диапазона  $N = 6 \times 10^3 \div 2.5 \times 10^5$  и в диапазона  $N > 2.5 \times 10^5$ . В диапазона  $N = 9 \times 10^3 \div 2.5 \times 10^5$  якостта на умора е най-голяма за средна стойност на радиуса ( $r = 4 \text{ mm}$ ) и най-малка, когато радиусът е най-малък ( $r = 2 \text{ mm}$ ). В този диапазон амплитудите на напреженията  $\sigma_a$  причиняват еласто-пластична деформация, и следователно, може да се прогнозира по-бърза релаксация на полезните ОН на натиск.

Диапазонът  $N = 2.5 \times 10^5 \div N_{max}$  съответства на областта на многоцикловата умора в експериментално получените криви на Вюлер. В този диапазон характерът на кривите на умора се променя – най-малка ограничена граница на умора (съответстваща на  $N_{max}$ ) е получена за образците, подложени на ППД с  $r = 4 \text{ mm}$ , а най-голяма – за  $r = 6 \text{ mm}$ . В резултат са получени следните стойности за условната граница на умора: при  $r = 2 \text{ mm}$  -  $\sigma_{-1} = 230 \text{ MPa}$ ; при  $r = 4 \text{ mm}$  -  $\sigma_{-1} = 223 \text{ MPa}$ ; при  $r = 6 \text{ mm}$  -  $\sigma_{-1} = 255 \text{ MPa}$ . Тези експериментални резултати

показват, че реализирането на процеса с радиус  $r = 6 \text{ mm}$  осигурява 50 пъти по-голяма УД в сравнение с по-малките стойности за  $r$ . Съпоставянето на тези резултати с измерените чрез X-ray diffraction осови и окръжни ОН на повърхността в образци, подложени на ППД с ТДР с една и съща деформираща сила ( $F_b = \text{const} = 800 \text{ N}$ ) и посочените три стойности за  $r$  (Гл.3, т. 3.4.2), потвърждават значението на макро-ефекта върху УД и границата на умора – най-големи осови и окръжни ОН са измерени на повърхността в образеца, третиран с най-големия радиус  $r = 6 \text{ mm}$ .

#### 4.2.4. Влияние на деформиращата сила върху УД и границата на умора

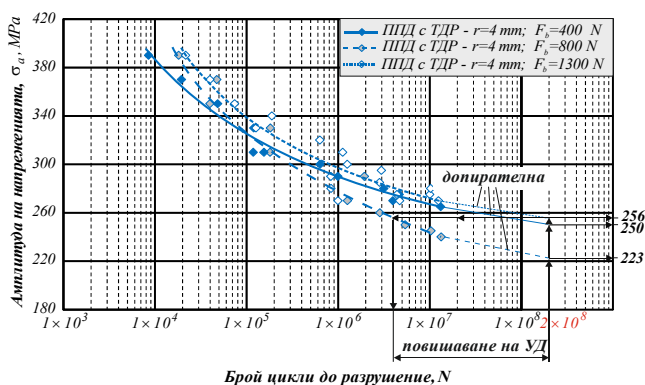
За изследване влиянието на деформиращата сила  $F_b$  върху УД и условната граница на умора, са проведени серии УТ за три стойности на  $F_b$  ( $F_b = 400, 800, 1300 \text{ N}$ ) при постоянни параметри на процеса:  $r = 4 \text{ mm}$ ;  $f = 0.05 \text{ mm / rev}$ ;  $v = 63 \text{ m / min}$ ;  $n = 1$ . Експериментално получените S-N криви имат различен характер в интервала  $N = 8 \times 10^3 \div 1 \times 10^5$  и в интервала  $N = 1 \times 10^5 \div N_{max}$ . В интервала  $N = 8 \times 10^3 \div 1 \times 10^5$  се наблюдава еднозначна тенденция за повишаване на якостта на умора с нарастване на деформиращата сила, като в интервала  $N = 1 \times 10^5 \div N_{max}$  тази тенденция се променя (фиг. 4.8). При достигане на  $N_{max} \approx 1.4 \times 10^7$  цикъла получената ограничена граница на умора е най-голяма ( $270 \text{ MPa}$ ), когато процесът се осъществява с най-голямата деформираща сила ( $F_b = 1300 \text{ N}$ ). Използването на деформираща сила на средно ниво ( $F_b = 800 \text{ N}$ ) намалява ограничената граница на умора с  $\approx 14\%$ . Когато процесът се осъществява с най-малката деформираща сила ( $F_b = 400 \text{ N}$ ) ограничената граница на умора е близка до тази, получена за  $F_b = 1300 \text{ N}$ . Тези резултати определят следните стойности за условната граница на умора: при  $F_b = 400 \text{ N}$  -  $\sigma_{-1} = 250 \text{ MPa}$ ; при  $F_b = 800 \text{ N}$  -  $\sigma_{-1} = 223 \text{ MPa}$ ; при  $F_b = 1300 \text{ N}$  -  $\sigma_{-1} = 256 \text{ MPa}$  (фиг. 4.8).

Съпоставянето на получените криви на умора с експериментално измерените осови и окръжни ОН за образци с номера 3, 2 и 4 (Гл. 3, фиг. 3.20) потвърждават значението на полезния макро-ефект върху уморното поведение в областта на многоцикловата и гигацикловата умора. Най-голяма УД и граница на умора имат образците, третирани с най-голяма деформираща сила ( $F_b = 1300 \text{ N}$ ), което съответства на измерените най-големи по абсолютна стойност осови ОН  $\sigma_z^{res}$  в образец №4, подложен на ППД с ТДР със същата стойност на  $F_b$ . Най-малка УД и граница на умора имат образците, подложени на ППД със средната изследвана стойност на деформираща сила ( $F_b = 800 \text{ N}$ ), което съответства на най-малки по абсолютна стойност измерени осови и окръжни ОН в образец №2 (фиг. 3.20). Уморното поведение на образците, подложени на ППД с най-малката стойност на деформиращата сила ( $F_b = 400 \text{ N}$ ) практически е много близко до това на образците, обработени с  $F_b = 1300 \text{ N}$ . Фактът, че в образец №3 са измерени относително високи осови ОН  $\sigma_z^{res}$  и най-големи окръжни ОН  $\sigma_t^{res}$  в групата образци, третирани с един и същи радиус ( $r = \text{const} = 4 \text{ mm}$ ), показва, че полезният макро-ефект в ротационни елементи зависи и двата вида ОН.

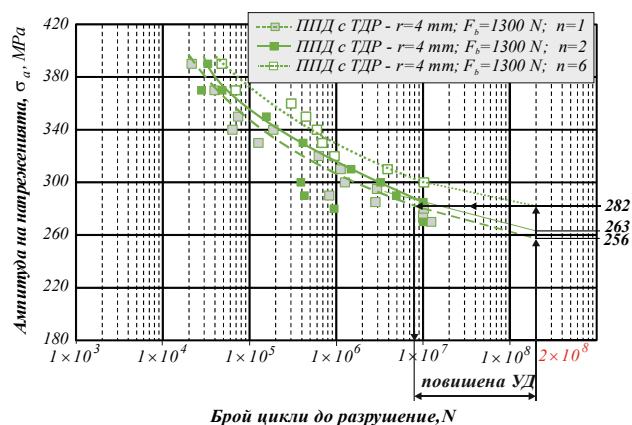
#### 4.2.5. Влияние на броя на преходите върху УД и границата на умора

Влиянието на броя на преходите е изследвано, като допълнително са проведени серии УТ съответно с два и шест прехода ( $n = 2, 6$ ). За целта кривата на умора, получена за образци,

третиран с  $F_b = 1300\text{ N}$  и  $r = 4\text{ mm}$  (за която УД и границата на умора са най-големи) е сравнена с получените криви на умора за  $n = 2$  и  $n = 6$ . Резултатите са показани на фиг. 4.9.



**Фиг. 4.8 S-N криви, получени за образци, подложени на ППД с ТДР с различни стойности на  $F_b$**



**Фиг. 4.9 S-N криви, получени за образци, подложени на ППД с ТДР с различен брой преходи**

Получените S-N криви показват еднозначна тенденция за влиянието на броя на преходите – нарастването на броя преходите повишава УД и границата на умора. Реализирането на процеса с  $n = 2$  и  $n = 6$  повишава условната граница на умора съответно със  $7\text{ MPa}$  и  $26\text{ MPa}$ , респ. с  $2.7\%$  и  $10.1\%$  в сравнение със случая, когато процесът се осъществява с един преход. Осъществяването на процеса с  $n = 6$  повишава УД 25 пъти в сравнение със случая на еднопредходна обработка (фиг. 4.9). Това значително повишаване на УД може да се обясни с модифицирането на микроструктурата, изразяващо се в издробеняване на зърната и раздробяване на мрежата от отделения ( $\text{CuAl}_2$ ) по границата на зърната – микро-ефекти в повърхностните слоеве, които бяха потвърдени в резултат от проведения микроструктурен анализ (Гл. 3, т.3.5.3).

### 4.3. Изводи

Резултатите от проведеното експериментално изследване на циклично огъване на образци от високо-яка алуминиева сплав 2024-T3 дават основание за слените *основни изводи*:

- ◆ Реализирането на процеса ППД с ТДР с параметри, осигуряващи близка до минималната грапавост ( $F_b = 800\text{ N}$ ;  $r = 4\text{ mm}$ ) повишава условната граница на умора с  $20.5\%$ , а УД с повече от 600 пъти, в сравнение със случая, когато образците са обработени само чрез струговане;

- ◆ На база на експериментално получените S-N е доказано, че радиусът на закръгление на ТДР  $r$  и деформиращата сила  $F_b$  са основните параметри на процеса, които имат най-голямо влияние върху уморното поведение. Като цяло, различни комбинации на  $r$  и  $F_b$  водят до различна якост на умора в диапазона  $N = 1 \times 10^4 \div 1 \times 10^6$  и ограничена граница на умора в областта на многоцикловата умора  $N_{max} \geq 1 \times 10^7$ ;

- ◆ Установено е, че реализирането на процеса с радиус  $r = 6\text{ mm}$  осигурява 50 пъти по-голяма УД в сравнение с по-малките изследвани стойности за  $r$ , когато деформиращата сила се поддържа постоянна в средата на изследвания интервал ( $F_b = 800\text{ N}$ ). В този случай получената условна граница на умора  $\sigma_{-1} = 255\text{ MPa}$  е съответно с  $14.8\%$  и  $10.8\%$  по-голяма в сравнение с  $r = 2\text{ mm}$  и  $r = 4\text{ mm}$ ;

- ◆ Установено е, че реализирането на процеса с най-голямата изследвана стойност на деформиращата сила ( $F_b = 1300\text{ N}$ ) в условията на постоянен радиус ( $r = const = 4\text{ mm}$ ) осигурява най-голяма ограничена граница на умора ( $270\text{ MPa}$ ) и условна граница на умора

$\sigma_{-1} = 256 \text{ MPa}$ . Прилагането на деформираща сила в средата на изследвания интервал ( $F_b = 800 \text{ N}$ ) намалява условната граница на умора с  $\approx 15\%$ . Когато процесът се осъществява с най-малката деформираща сила ( $F_b = 400 \text{ N}$ ) ограничената граница на умора и условната граница на умора ( $\sigma_{-1} = 250 \text{ MPa}$ ) са близки до тези, получени за  $F_b = 1300 \text{ N}$ .

♦ Проведените УТ с различен брой преходи ( $n = 1, 2, 6$ ) показват, че нарастването на броя преходите повишава якостта на умора и границата на умора в целия интервал на изменение на амплитудата на цикъла  $\sigma_a$ . Реализирането на процеса с  $n = 6$  повишава условната граница на умора с  $26 \text{ MPa}$ , респ. с  $10.1\%$  в сравнение със случая, когато процесът се осъществява с един преход, който позитивен ефект се дължи на едновременното действие на макро-ефекта и изразения микро-ефект;

♦ На база на съпоставяне на получените криви на умора с експериментално измерените осови и окръжни ОН в цилиндрични образци, третиран с различни комбинации на  $r$  и  $F_b$ , е доказано значението на полезния макро-ефект от създаване на зона с полезни осови и окръжни ОН върху уморното поведение в областта на многоцикловата и гигацикловата умора;

♦ Получените криви на умора показват някои тенденции в уморното поведение при циклично огъване на образци от високо-яка алуминиева сплав 2024-T3, тъй като не покриват всички комбинации от изследваните параметри на процеса ППД с ТДР. В този смисъл може да се очаква по-голяма ефективност на изследвания процес – например когато се комбинират параметрите:  $r = 5 - 6 \text{ mm}$ ,  $F_b = 1300 \text{ N}$  и  $n = 6$ .

## Научно-приложни и приложни приноси

### А. Научно-приложни приноси

- Разработен е конститутивен модел на повърхностния слой на високо-яка алуминиева сплав 2024-T3, използван в крайно-елементни симулации за изследване на напрегнатото и деформирано състояние, получено след ППД с ТДР;
- ♦ Разработени са: 3D крайно-елементен модел за моделиране на еквивалентната пластична деформация при ППД с ТДР, 3D крайно-елементен модел с опростена кинематика, базиран на постъпкови последователни нормални въздействия на ТДР и 3D крайно-елементен модел, симулиращ действителната кинематика на процеса ППД с ТДР;
- ♦ На основата на планиран числен експеримент са получени регресионни модели на еквивалентната пластична деформация на повърхността и в дълбочина и дълбочината на уячения слой в образци от алуминиева сплав 2024-T3, подложени на ППД с ТДР;
- ♦ На основата на планиран числен експеримент са получени регресионни модели на осовите ОН на повърхността и осреднените им стойности в дълбочина в образци от алуминиева сплав 2024-T3, подложени на ППД с ТДР;
- ♦ Получени са крайно-елементни и експериментални зависимости за разпределението на осовите и окръжни ОН в цилиндрични образци от алуминиева сплав 2024-T3, подложени на ППД с ТДР;
- ♦ Получен е математичен модел на получаваната грапавост във функция от основните параметри на процеса ППД с ТДР;
- ♦ Експериментално е получена база данни за повърхностната микротвърдост и разпределението на микротвърдостта в дълбочина в цилиндрични образци, подложени на ППД с ТДР;
- ♦ Чрез X-ray diffraction анализ е получена база данни за осовите и окръжни ОН за различни комбинации на радиуса на закръгление на ТДР, деформиращата сила и броя на преходите;
- ♦ На основата на микроструктурен анализ на образци от алуминиева сплав 2024-T3 е доказан полезния микро-ефект след ППД с ТДР в сравнение с конвенционалния случай;

- ◆ На основата на уморни тестове на циклично огъване са получени криви на умора на образци от алуминиева сплав 2024-T3 за различни стойности на радиуса на закръгление на ТДР, деформиращата сила и броя на преходите;
- ◆ Експериментално е получена база данни за ограничената граница на умора и условната граница на умора при ППД с ТДР, определена за базов брой цикли  $2 \times 10^8$ , в зависимост от радиуса на закръгление на ТДР, деформиращата сила и броя на преходите;
- ◆ Получена е морфологична матрица на съществуващи устройства за ППД с контакт триене при търкаляне.

## **Б. Приложни приноси**

- ◆ Оптимални стойности на параметрите на процеса ППД с ТДР, получени на основа проведени оптимизации по различни критерии – максимизиране на еквивалентната пластична деформация (уякчаването) и осовите ОН на повърхността и в дълбочина; минимизиране на получената грапавост;
- ◆ Разработено е универсално устройство за ППД с ТДР на ротационни повърхнини, с възможност за управление на геометричните и физични параметри на процеса.

## **Публикации по дисертацията**

А. Анчев, Т. Атанасов, Г. Дунчева. Конститутивен модел на повърхностния слой на алуминиева сплав 2024-T3, подложена на ППД. *Механика на машините*. 123 (2019) 88-93.

Г. Дунчева, Т. Атанасов, А. Анчев. Крайно-елементно моделиране на деформираното състояние на повърхностния слой на алуминиева сплав 2024-T3, подложена на ППД с деформиращи ролки. *Механика на машините*. 123 (2019) 94-99.

Г. В. Дунчева, А. П. Анчев, Т. П. Атанасов, Jiri Sarek. 3D крайно-елементно изследване на остатъчните напрежения в образци от алуминиева сплав 2024-T3 подложена на ППД с тороидална ролка. *Машиностроене и машинознание*. 30 (2020) 39-43.

Т. П. Атанасов, А. П. Анчев, Вл. П. Дунчев. Експериментално изследване на получената грапавост в образци от алуминиева сплав 2024-T3, подложени на ППД с тороидална ролка. *Машиностроене и машинознание*. 30 (2020) 44-48.

Duncheva G. V., T. Atanasov. Finite-element modeling and optimization of the deep rolling process with a toroidal roller in aluminum alloy 2024-T3. *Journal of Technical University Gabrovo*. 60 (2020) 3-13.

Атанасов Т., Приложение на диференциално-морфологичния метод за разработване на устройство за ППД с тороидална ролка. *Известия на ТУ-Габрово*. 60 (2020) 70-78.