



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „Машиностроене и уредостроене“

Кенан Фариев Селимов

Повишаване на уморната дълготрайност на образци от високо-яки алуминиеви сплави, подложени на циклично огъване, посредством диамантно заглаждане

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: Технически науки

Професионално направление: Машинно инженерство

Докторска програма: Строителна механика и съпротивление на материалите

Научни ръководители: проф. д-р Йордан Тодоров Максимов
доц. д-р Иван Маринов Амуджев

Рецензенти: доц. д-р Пепо Иванов Йорданов
доц. д-р Мирослав Симеонов Петров

Габрово, 2019 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 03.04.2019 г.

Дисертационният труд съдържа: увод, съдържание, номенклатура, 5 глави, класификация на приносите, публикации по дисертацията и литература в общ обем 107 страници, в които са поместени текст, формули, 58 фигури и графики, 6 таблици. Литературата обхваща 79 заглавия – статии, доклади и книги.

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: Кенан Фариев Селимов

Заглавие: Повишаване на уморната дълготрайност на образци от високо-яки алуминиеви сплави, подложени на циклично огъване, посредством диамантно заглаждане

Тираж: бр.

Място на отпечатване:

Издателство „Васил Априлов” на Технически университет Габрово

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Повърхностните слоеве са най-натоварени по време на експлоатацията, поради факта че те осъществяват контакта с повърхностите на другите компоненти и са подложени на непосредствено въздействие. Състоянието на повърхностните слоеве от гледна точка на микроструктура, ОН и тяхното разпределение в дълбочина, микротвърдост и грапавост, е определящо за якостта и дълготрайността на умора на конструкционните елементи. Контролирането на тези свойства, по време на обработването на повърхностните слоеве, е от решаващо значение за намаляване на риска от уморно разрушение. Повишаването на якостта на умора на конструкционните елементи се постига с подходяща технология, която осигурява необходимият комплекс от качества: издробенна микроструктура, ОН на натиск, максимална дълбочина на зоната с натискови напрежения, повишена микротвърдост и минимална грапавост. ОН въведени чрез рязане по принцип са опъновни. Освен това то е съпроводено със създаването на локални дефекти по обработваната повърхност. За пластични материали те се предшества от значителни пластични деформации, а за крехки материали от типично крехко разрушаване. Следователно, повърхностите обработени чрез рязане съдържат множество микродефекти. Множеството дефекти водят до появата на микро-пукнатини, дължащи се на пластични деформации на микро ниво и големи микро-напрежения. Под въздействието на външно натоварване тези микро-пукнатини се сливат и се образува единична макро-пукнатина с относителна големина 100 μm . При статично натоварване се постига изравняване на напреженията в съседните зърна (настъпва преразпределение на напрежението) и разрушаването е жилаво-пластично при продължаващо нарастване на товара. Когато напреженията са променливи, такова изравняване не настъпва и макро-пукнатината нараства до пълното разрушаване на съответния компонент. Този процес е изключително опасен, поради факта че намаляването на носещото сечение остава скрито. Разрушаването, дължащо се на умора на материала, е най-често случващо се при тези условия. За да се подобри уморното и трибологично поведение, както и корозионната устойчивост на конструкционните елементи, е необходимо да се модифицират комплекс от механични, химични и топографски характеристики на повърхностните слоеве. Ефективен процес осигуряващ този комплекс от свойства е повърхностно пластично деформиране (ППД). Получаването на тези свойства е актуална инженерна задача, за чието решение (в многобройните частни приложения) работят научни колективи от цял свят. В настоящата дисертация ППД се реализира посредством статичен метод, какъвто е диамантното заглаждане (ДЗ).

Цел и задачи на дисертационния труд

Основна цел на дисертационната работа е да се изследва влиянието на основните и допълнителни управляващи фактори на процеса ДЗ върху уморната дълготрайност на образци, изработени от високо-яка алуминиева сплав 2024-T3, обработени чрез ДЗ и подложени на циклично огъване и да се намерят оптимални комбинации от параметри, максимизиращи съответно малоцикловото и многоцикловото им уморно поведение.

В настоящото изследване са решени следните основни задачи:

- Конструирани и изработени са универсално устройство за ДЗ на външни цилиндрични повърхнини, с цел дефиниране на различни нормални сили на притискане на деформиращия елемент в обработваната повърхнина.
- Изследван е процесът ДЗ на високо-яка алуминиева сплав 2024-T3 в аспект на получавана грапавост, микротвърдост и остатъчни напрежения, и е намерена оптимална комбинация, обезпечаваща минимална грапавост.

- Изследвано е влиянието на основните параметри на процеса ДЗ върху уморната дълготрайност на образци, подложени на циклично огъване.
- Изследвано е влиянието на допълнителните параметри на процеса ДЗ върху уморната дълготрайност на образци, подложени на циклично огъване.
- Намерени са оптималните комбинации от основни и допълнителни параметри на процеса ДЗ, максимизиращи броя на циклите до разрушение от умора съответно в малоцикловата и в многоцикловата област.

Методи на изследване

Приложени са експериментални изследвания и числени симулации.

Авторът защитава

- Математичен модел на получаваната грапавост във функция от основните параметри на процеса ДЗ.
- Експериментални зависимости на микротвърдостта в дълбочина от повърхностния слой във функция от параметрите на процеса ДЗ.
- Експериментални и крайно-елементни зависимости за разпределение в дълбочина от повърхностния слой на въведените остатъчни осови нормални напрежения във функция от параметрите на процеса ДЗ.
- Методика за получаване на конститутивния модел на повърхностния слой на високо-яка алуминиева сплав 2024-T3, който модел е приложен в крайно-елементен модел на процеса ДЗ.
- Експериментални зависимости на границата на умора при циклични огъване във функция от параметрите на процеса ДЗ.
- За образци, подложени на ДЗ, формиралата се уморна макро-пукнатината, следствие на циклично огъване, е локализирана на границата между въведената чрез ДЗ натискова зона и основния материал; за образци, получени само чрез рязане, процесът на зараждането на уморни микро-пукнатини, сливането им в една уморна макро-пукнатина и развитие на последната, следствие на циклично огъване, стартира от повърхностния слой.
- Модифициран метод на Locati за определяне на границата на умора на база 2×10^8 цикъла на високо-яка алуминиева сплав 2024-T3.
- ДЗ забавя формирането на уморната макро-пукнатина, но веднъж формирана тази пукнатина много бързо се развива до пълно разрушение на съответния образец, независимо от комбинацията от управляващи фактори на процеса ДЗ.
- Механизъм за увеличаване на уморната дълготрайност на подложените на циклично огъване образци, предварително обработени чрез ДЗ
- Универсално устройство за ДЗ на външни ротационни повърхнини, позволяващо бързо и лесно задаване на геометричните и физични параметри на процеса ДЗ.
- Оптимални параметри на процеса ДЗ по различни критерии: „минимална грапавост” и „поведение на умора”, съответно в малоцикловата и многоцикловата области.

Приложимост

Устройството за ДЗ и намерените оптимални параметри по различни критерии могат да се използват в инженерната практика за обработване на детайли от високо-яка алуминиева сплав 2024-T3, в зависимост от конкретното им функционално приложение.

Апробация на дисертационния труд

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

Етапи от дисертационната работа са обсъждани на, и публикувани в:

- Международна научна конференция UNITECH'16, Габрово;

- Международна научна конференция UNITECH'18, Габрово;
- XLIV Национален семинар по Динамика на механични системи;
- Международното научно списание с импакт фактор, издавано от SPRINGER, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering;
- Международното научно списание с импакт фактор, издавано от Wiley, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures.

Публикуване

По темата на дисертацията са публикувани четири научни статии и два доклада, от които: три научни статии в международни научни списания с импакт фактор, една научна статия в национално списание.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд съдържа: увод, съдържание, номенклатура, 5 глави, класификация на приносите, публикации по дисертацията и литература в общ обем 107 стр., в които са поместени текст, формули, 58 фигури и графики и 6 таблици. Литературата обхваща 79 заглавия – статии, доклади и книги.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Гл. 1. Повишаване на уморната дълготрайност на метали и сплави посредством повърхностно пластично деформиране – състояние на проблема

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

Гл. 2. Синтез на универсално устройство за ДЗ

За задълбочено изследване на процеса ДЗ е необходимо универсално устройство, позволяващо лесно и бързо задаване на геометричните и физични параметри на процеса ДЗ. Целта е морфологичен анализ на съществуващите конструкции устройства за ДЗ и на тази основа синтез на устройство, предназначено за изследване на процеса ДЗ на външни цилиндрични повърхнини, позволяващо лесно управление на геометричните и физични параметри на процеса.

2.1. Морфологичен анализ

2.1.1. Морфологична схема

За достигане на поставената цел е приложен диференциално-морфологичния метод, разработен от акад. Ю. Н. Кузнецов. В съответствие с този метод от определящо значение са основните морфологични признаци. Те от своя страна, могат да се разделят на подпризнаци, характеризиращи специфичните особености на конкретния основен морфологичен признак. С оглед на поставената цел, от определящо значение за експлоатацията и управлението на устройствата за ДЗ са основните морфологични признаци, показани на ниво „В” в морфологичната схема на фиг. 2.1. В ниво „С” са показани съответни варианти (подпризнаци).

2.1.2. Елементи на структурата

За елементи на структурата на устройство за ДЗ са избрани: деформиращи елементи; тяло; еластичен елемент (фиг. 2.2).

Матрицата на елементите има вида (2.1).

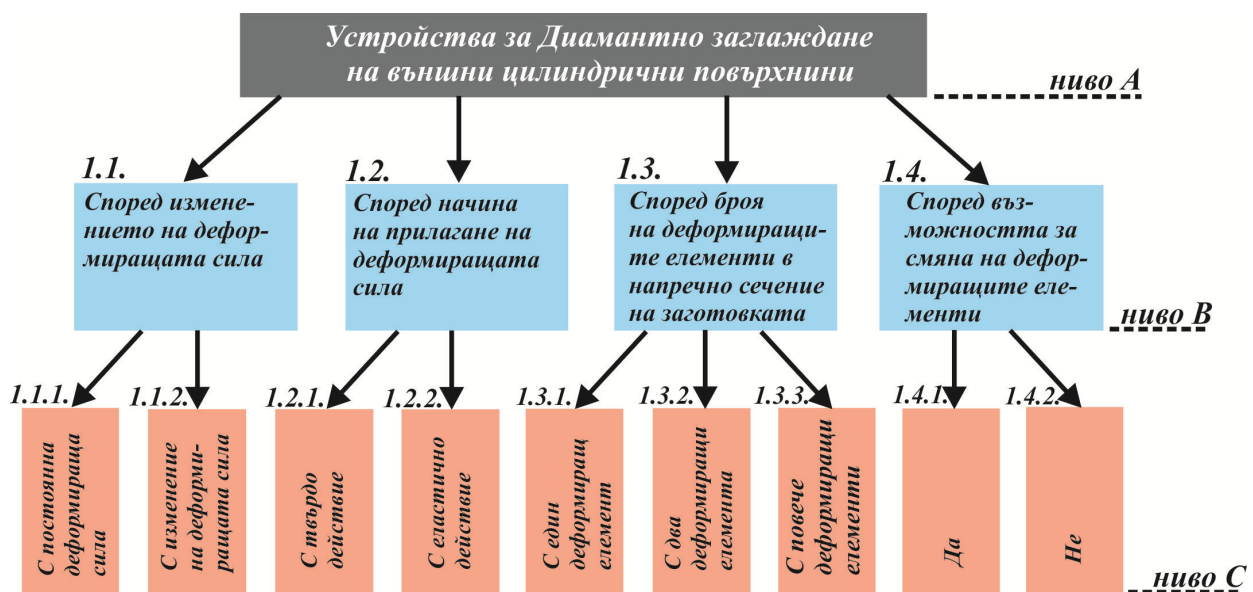
2.1.3. Връзки между елементите на структурата

Връзките между елементите схематично са показани на фиг. 2.3.

Матрицата на връзките между елементите има вида (2.2).

$$M_{ел} = \begin{vmatrix} 1.1.1.1 & 1.1.2.1 & 1.2.1 & 1.3.1 \\ 1.1.1.2 & 1.1.2.2 & 1.2.2 & 1.3.2.1 \\ 1.1.1.3 & 0 & 1.2.3 & 1.3.2.2 \end{vmatrix} \quad (2.1)$$

$$M_{вр} = \begin{vmatrix} 2.1.1 & 2.2.1 & & 2.2.2.2.1.1 \\ 2.1.2 & 2.2.2.1.1.1 & & 2.2.2.2.1.2 \\ 0 & 2.2.2.1.1.2 & & 2.2.2.2.1.3 \\ 0 & 2.2.2.1.2 & & 2.2.2.2.2.1 \\ 0 & 0 & & 2.2.2.2.2.2 \\ 0 & 0 & & 2.2.2.2.3.1 \\ 0 & 0 & & 2.2.2.2.3.2 \end{vmatrix} \quad (2.2)$$

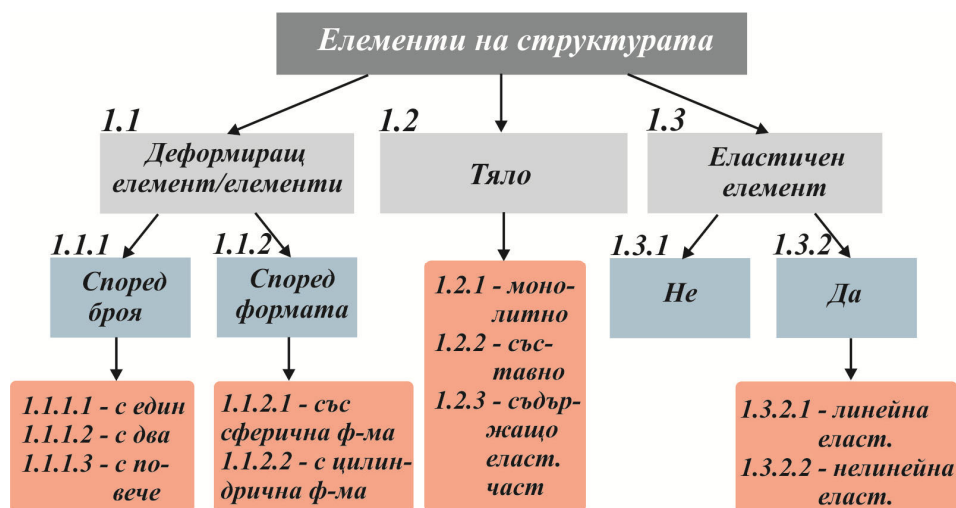


Фиг. 2.1. Морфологична схема на устройства за ДЗ

2.1.4. Функционална схема на устройство за ДЗ

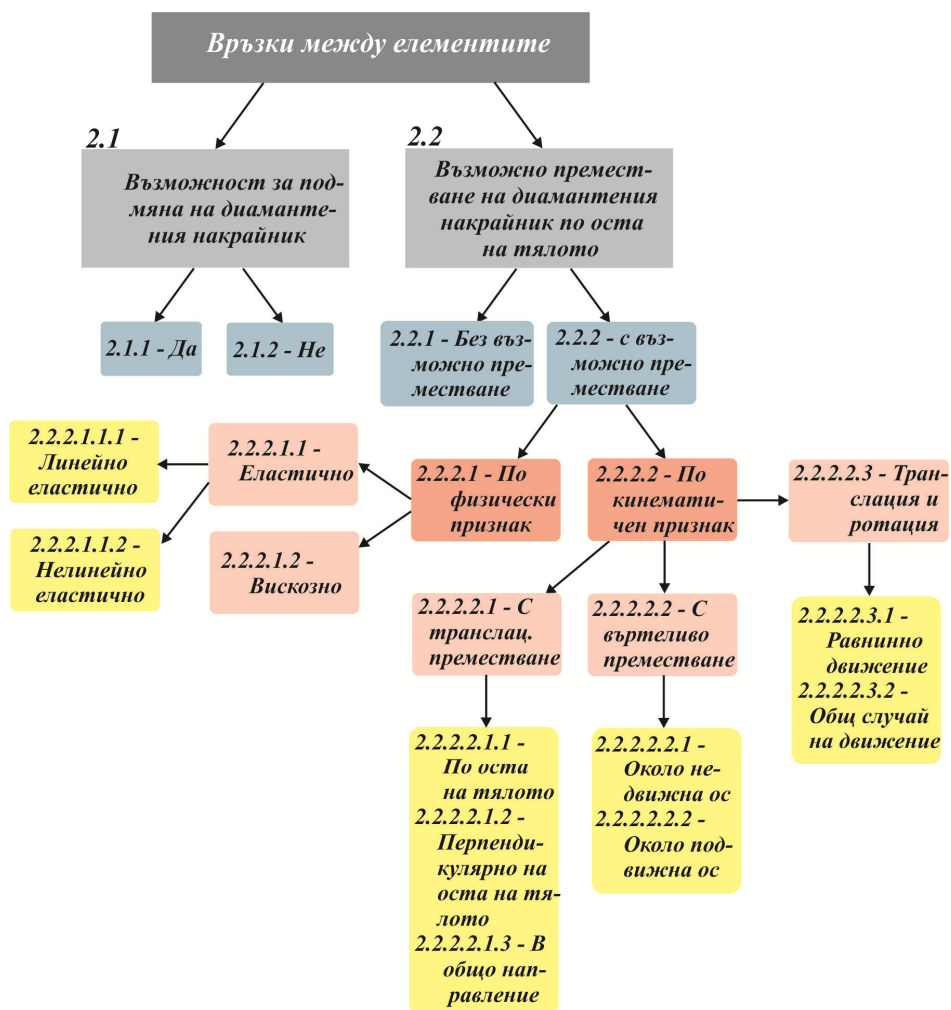
Функционалната схема на устройство за ДЗ се получава от двете матрици (2.1) и (2.2), като се комбинира по един елемент от всяка колона на двете матрици. Наличието на нула в комбинацията не води до функционална схема.

По-долу са показани функционални схеми на известните устройства за ДЗ.



Фиг. 2.2. Елементи на структурата на устройство за ДЗ

2.2. Конструкция на устройство за ДЗ на външни цилиндрични повърхнини

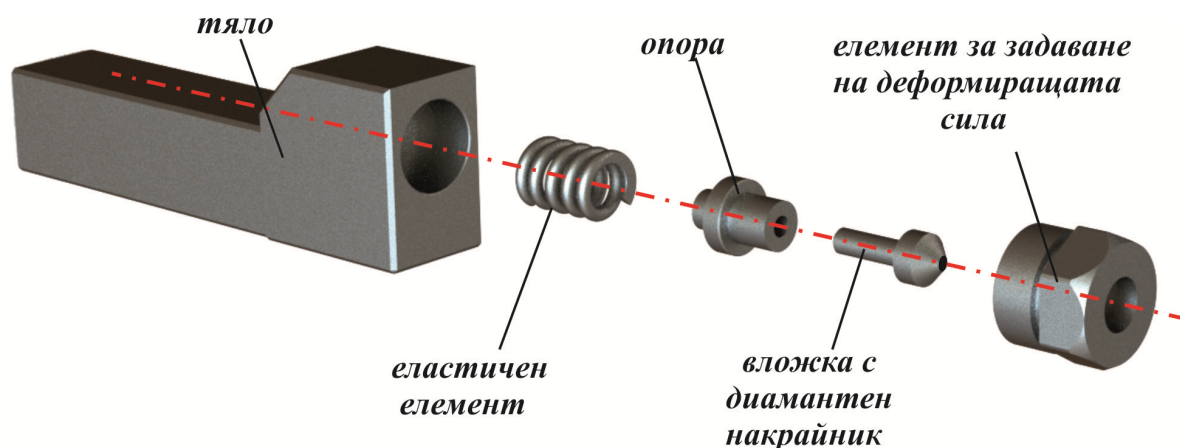


Фиг. 2.3. Връзки между елементите

На база на направения анализ е избрана функционална схема на устройство за ДЗ, описана от матрицата (2.4):

$$\begin{vmatrix} 1.1.1.1 & 1.1.2.1 & 1.2.2 & 1.3.2.1 \\ 2.1.2 & 2.2.2.1.1.1 & 2.2.2.2.1.1 & 0 \end{vmatrix} \quad (2.4)$$

Елементите на структурата на устройството са показани на фиг. 2.9. В съответствие с нея е изработено устройство, чиято конструкция е адаптирана за приложение върху универсални машини и стругови обработващи центри. Фиг. 3.1 показва реализация на метода ДЗ върху струг със цифрово програмно управление, посредством разработеното устройство (фиг. 3.2).



Фиг. 2.9 Елементи на структурата на разработеното устройство за ДЗ

2.3. Извод

Проведен е морфологичен анализ на съществуващите конструкции устройства за ДЗ. На тази основа е синтезирано и изработено устройство, предназначено за изследване на процеса ДЗ на външни цилиндрични повърхнини. Устройството позволява лесно управление на геометричните и физични параметри на процеса.

Гл. 3. Влияние на параметрите на процеса диамантно заглаждане върху получаваната грапавост, микро-твърдост и остатъчни напрежения при довършващо обработване на алуминиева сплав 2024-T3

3.1. Формулиране на експеримента

3.1.1. Управляващи фактори

Управляващите фактори на процеса ДЗ са следните: основни – радиус на диаманта r, mm ; сила на притискане F_b, N ; подаване $f, mm/rev$; скорост $v, m/min$ и допълнителни – брой преминавания N ; употреба на смазочно охлаждаща течност.

3.1.2. Същност на експеримента

Проведен е разширен експеримент за определяне на получаваната грапавост при процеса ДЗ. Експеримента се провежда в три етапа. В първият етап са установени значимите основни фактори и техните нива. Във вторият етап е проведен планиран експеримент със значителен брой експериментални точки и повече от три нива на вариране на факторите. Чрез регресионен анализ е получен математичен модел на получаваната грапавост. Хипер повърхнината на модела е изследвана чрез сечения с хипер равнини и е установена областта от стойностите на управляващите фактори при които се получава минимална грапавост. В третият етап, чрез допълнителни експерименти са установени комбинацията от оптимални стойности на управлява-

щите фактори, при които се получава минимална грапавост. С така намерените стойности са проведени експерименти изследващи влиянието на допълнителните фактори върху получаваната грапавост, микро-твърдост и остатъчни напрежения.

3.2. Детайли на експеримента

3.2.1. Машина и устройство

Експеримента е проведен върху струг с ЦПУ – T200. Устройството за ДЗ е монтирано на позиция в револверната глава на струга. Инструментът е изкуствен диамант със сферичен връх. Необходимата сила на притискане се осигурява чрез деформирането на пружина с линейна характеристика, поставена в основата на устройството. Върха на диаманта влиза в контакт с образеца по неговата централна линия и нормално на обработваната повърхнина. За осигуряване на необходимия контакт на инструмента се задава допълнително осово преместване от 0.05mm . Използва се смазочно-охлаждаща течност - Nосut 795-Н.

3.2.2. Образци

Изпитанията са проведени върху образци от алуминиева сплав 2024-T3. Образец с диаметър $d = 6\text{mm}$ и базова дължина $\ell = 6d$ показва следните механични характеристики: модул на Young $E = 0.7 \times 10^5 \text{MPa}$; граница на провлачване $\sigma_y = 348 \text{MPa}$; граница на якост $\sigma_u = 501 \text{MPa}$; удължение $A_5 = 10.4\%$; напречно свиване $z = 33\%$. На образеца е измерена твърдост 110HV .

Изпитваните образци имат дължина от 200mm и диаметър 32mm . Струговането се извършва по цялата дължина на образеца. По този начин се осигурява еднаква начална грапавост на обработваните образци. Струговането на образците е изпълнено с твърдосплавни пластини DNMG 50608 – RF, с радиус при върха $r_c = 0.8\text{mm}$ и технологични параметри, подаване $f = 0.1\text{mm/rev}$, скорост на рязане $v_c = 90\text{m/min}$ и дълбочина на рязане $a_p = 0.25\text{mm}$.

Грапавостта е измерена по критерий R_a чрез Mitutoyo SurfTest – 4. Всяка експериментална стойност за грапавост е получена, като средно аритметична стойност от три измервания по образуващи разположени на 120° всяка.

Микротвърдостта е измерена в напречно сечение от повърхността към центъра на образците с уред RMT-3.

Най-голям принос за увеличената уморна дълготрайност на оси и валове подложени на циклично огъване имат остатъчните осови напрежения въведени в повърхностния слой посредством ДЗ. Тези напрежения са измерени чрез метода X-ray diffraction, проведени са върху вертикален дифрактометър θ/θ X'Pert PRO MPD с точков колиматор $0.5 \times 1.0 \text{mm}^2$. Позиционирането на измервания образец се извършва посредством комбинация от гъвкава система за позициониране, притежаваща шест степени на свобода и лазерна система за триангулация, гарантираща точност от около $5 \mu\text{m}$. За определянето на големината на остатъчните напрежения е използван методът „ $\sin^2\psi$ “ и последващо прилагане на процедура на най-малките квадрати, като са отчетени следните особености: ефективната дълбочина на проникване на използваното $\text{CrK}\alpha$ лъчение в изследвания образец е приблизително $8 \mu\text{m}$, прието е двумерно напрегнато състояние. Измерения дифракционен профил на равнина Al {311} за използваното $\text{CrK}\alpha$ лъчение има максимум при $2\theta \approx 139.5^\circ$. Дифракционните профили са получени посредством функцията Pearson VII и на тяхна база е изчислена деформацията на кристалната решетка. В обобщения закон на Нооке са приети следните стойности за еластичните константи – $s_1 = 4.89 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$ и $1/2s_2 = 19.05 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$. Освен това дифракционния профил на Al {311} равнините, успоредни на повърхността се охарактеризира посредством FWHM параметър на профила,

който може да се интерпретира като „степен на пластична деформация“. Разширения дифракционен профил се отнася до такива материални характеристики, като големина на зърната, микроскопични остатъчни напрежения или плътност на дислокациите, които са тясно свързани с пластичната деформация.

3.3. Експериментални резултати

3.3.1. Грапавост

Планът на експеримента е синтезиран чрез софтуера QstatLab на базата на предварителни изследвания. Състои се от 76 експериментални точки, като 16 от тях са върховете на хиперкуба на факторното пространство. Управляващите параметри и техните нива са показани в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Управляващи фактори и техните нива

Управляващи фактори Натурални координати \tilde{x}_i	Кодиран вид x_i	Нива на факторите				
		Кодиране на първия фактор				
		-1	-0.333	+0.333		+1
		Кодиране на останалите фактори				
		-1	-0.5	0	+0.5	+1
Натурални координати						
радиус при върха на диаманта r, mm	x_1	2	3	4		5
сила на притискане F_b, N	x_2	50	100	150	200	250
подаване $f, mm/rev$	x_3	0.05	0.075	0.1	0.125	0.15
скорост $v, m/min$	x_4	50	75	100	125	150

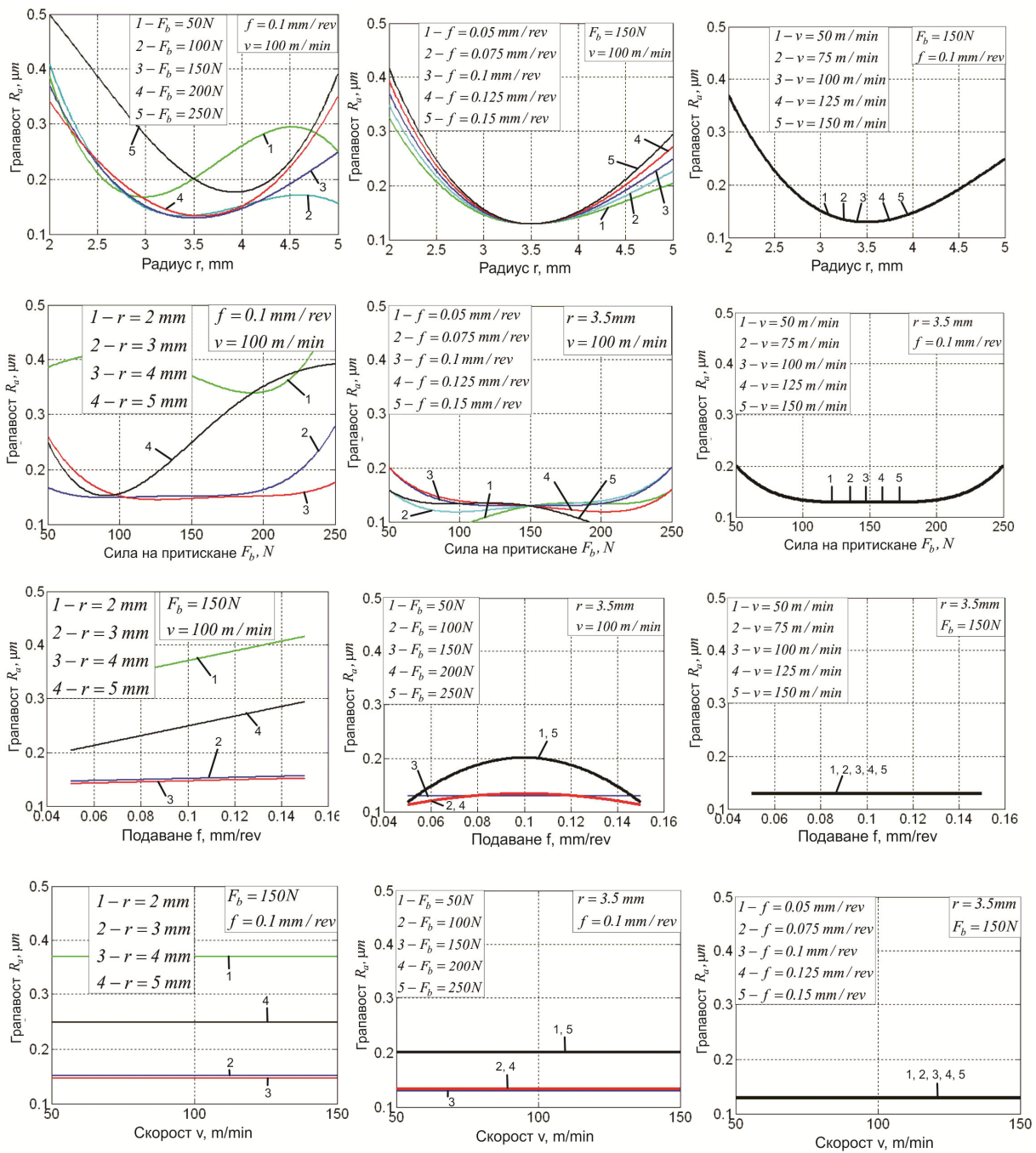
Чрез QstatLab е извършен регресионен анализ на получените експериментални резултати за грапавостта след ДЗ. Получен е следния полином от четвърти ред:

$$R_a = 0.12893 + 0.18112x_1^2 - 0.06085x_1^3 + 0.07208x_2^4 + 0.04537x_1^2x_3 - 0.04081x_2x_3x_4^2 + 0.06381x_1^2x_2 + 0.17363x_1^3x_2 - 0.16635x_1x_2^3 - 0.10057x_1x_3x_4^2 - 0.08353x_2^2x_3^2 \quad (3.2)$$

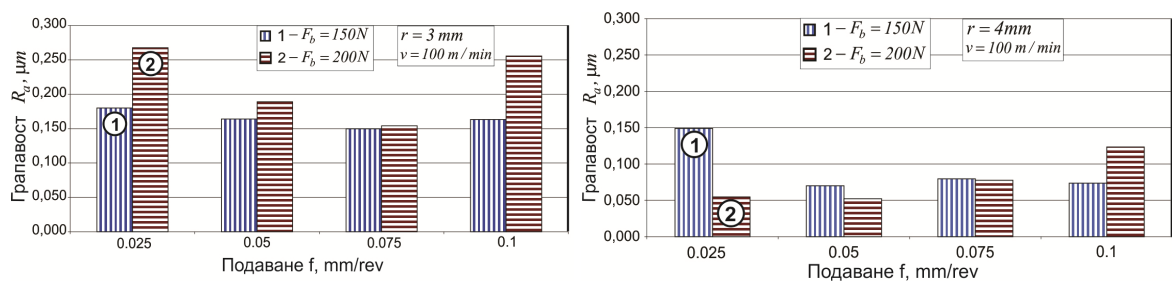
Фиг. 3.4 показва сеченията на хипер-повърхнината на модела на получаваната грапавост с различни хипер-равнини. В заключение е потвърдено че влиянието на радиуса r на върха на диаманта има най-голямо влияние върху грапавостта, а скоростта v - най-малко.

От резултатите представени на фиг. 3.4 се вижда, че минимална грапавост се получава при следната комбинация от стойности на управляващите фактори: $r = 3 \div 4mm$, $F_b = 150 \div 200N$, $f = 0.05mm/rev$, $v = 100m/min$. Чрез допълнителни експерименти, са определени оптималните стойности за r и F_b (фиг.3 5). Посредством генетичен алгоритъм в QstatLab е установено, че минимална грапавост се получава за следните стойности на факторите $r = 4mm$, $F_b = 200N$, $f = 0.05mm/rev$, $v = 100m/min$.

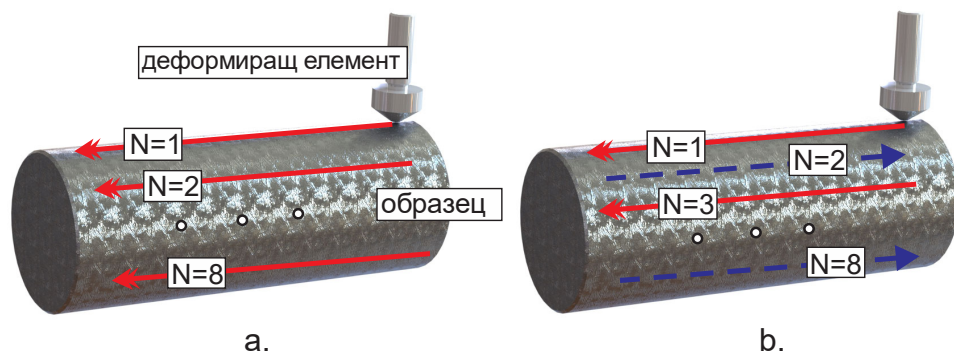
С оптималните стойности на основните управляващи фактори са направени експерименти за влиянието на допълнителните фактори – броя на преходите и схемата на обработване (фиг. 3.6): еднопосочна и разнопосочна. Както показват резултатите на фиг. 3.7а, първата схема осигурява по-малка грапавост. С увеличаване на броя на преходите, се наблюдава монотонно намаляване на грапавостта. В случая на разнопосочната схема, тенденцията е различна: след втория преход грапавостта леко намалява, след това рязко нараства.



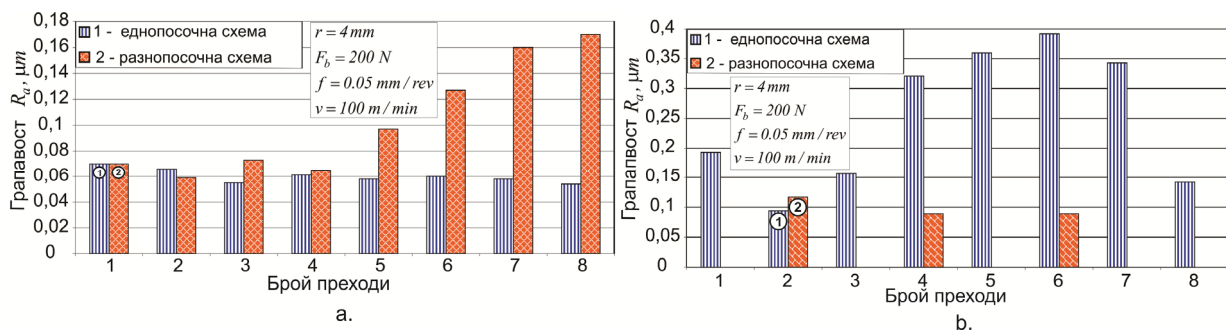
Фиг. 3.4. Сечения на хипер-повърхнината получена чрез сечения с хипер-равнини



Фиг. 3.5. Влияние на радиуса на диаманта и силата на притискане върху получаваната грапавост



Фиг. 3.6. Работна схема на процеса: а. еднопосочна; б. разнопосочна



Фиг. 3.7. Ефект от броя на преходите и работната схема върху получаваната грапавост: а. с мазане; б. без мазане

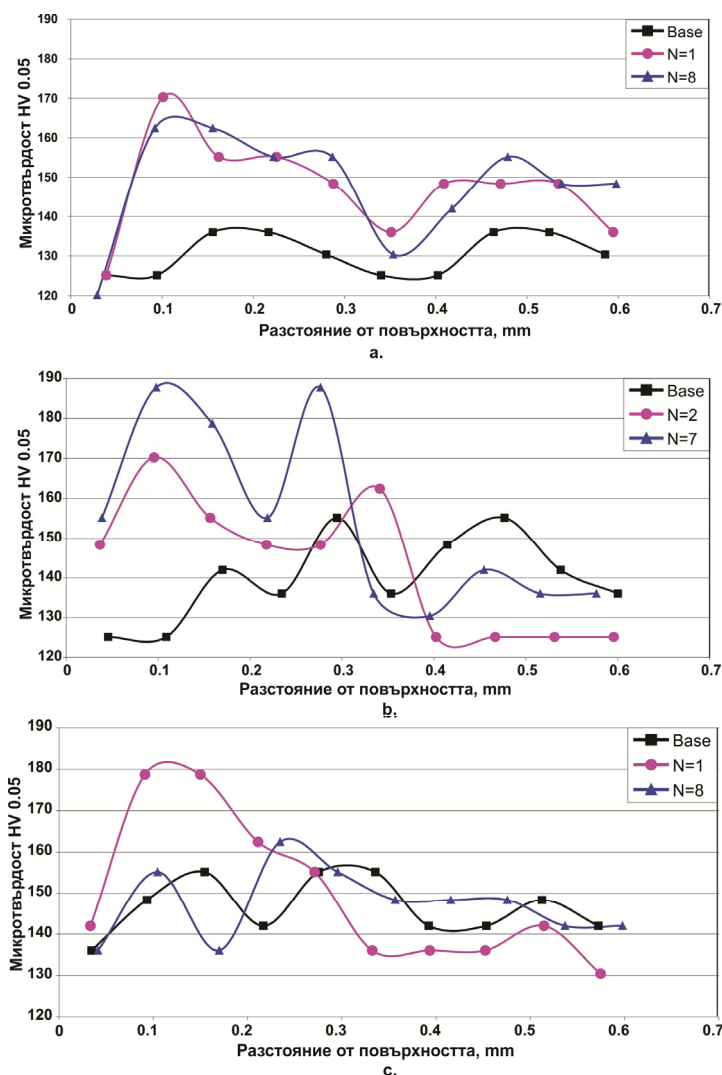
Фиг. 3.7б представя резултати за получаваната грапавост без употребата на смазочно охлаждаща течност (ДЗ на сухо). Както може и да се очаква, грапавостта е по-голяма в сравнение с тази от фиг. 3.7а. След втория и осмия преход, грапавостта намалява в случая на еднопосочна схема. Като цяло разнопосочната схема осигурява значително намалена грапавост.

Резултатите за грапавостта представени на фиг. 3.7 повдигат въпроса за влиянието на броя на преходите върху микротвърдостта и остатъчните напрежения в повърхностните слоеве.

3.3.2. Микротвърдост

3.3.2.1. Експериментални резултати

Ефектът от различните работни схеми и брой на преходите на процеса ДЗ върху микротвърдостта в дълбочина от повърхността на образеца е показан на фиг. 3.8. При двете работни схеми е използвана смазочно охлаждаща течност. Максимална микротвърдост е измерена на дълбочина около $100 \mu m$. Тази стойност може да бъде обяснена посредством механизма на ППД. В повърхностния слой металът „изтича“ в посока от върховете към падините, запълвайки последните. Пластична деформация се наблюдава тогава, когато слоеве метал намиращ се непосредствено под падините достигне максималното си възможно деформационно уякчаване. При комбинацията еднопосочна схема със смазване, максималната стойност на микротвърдостта се наблюдават след първия преход (фиг. 3.8а). Повишението е от 125 до 170 единици по Викерс. С увеличаване на броя на преходите се наблюдава незначително намаляване на микротвърдостта. Противоположна е тенденцията при разнопосочната схема (фиг. 3.8б). С повишаване на броя на преходите микротвърдостта нараства, като измерената максимална стойност е 188 HV, т.е. увеличението на база 125 HV е 50.4%. ДЗ на сухо (фиг. 3.8с) показва аналогична тенденция, каквато се наблюдава при ДЗ със смазване. При варианта еднопосочна схема ефекта на смекчаване е значително изразен. При варианта разнопосочна схема (не е показан на фиг. 3.8), е забелязано незначително повишение на микротвърдостта с повишаване на броя на преходите.



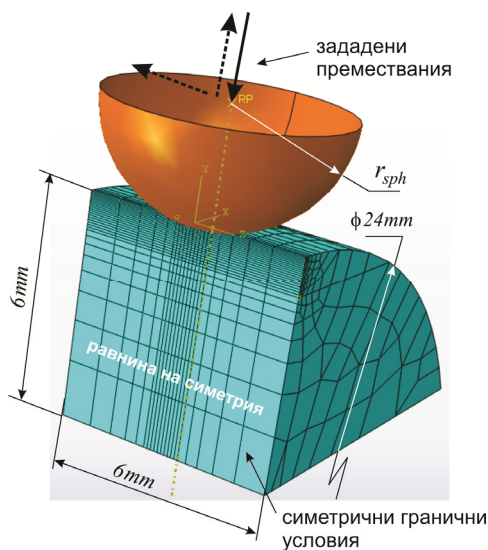
Фиг. 3.8. Профил на микротвърдостта в дълбочина при различни условия: а. еднопосочна схема и мазане; б. разнопосочна схема и мазане; с. еднопосочна схема без мазане

Възможно е фактора технологична наследственост да оказва влияние върху разпределението на стойностите на измерената микротвърдост. Въпреки това, целта на изследването е да се оцени ефекта от процеса ДЗ върху получаваната микротвърдост в сравнение с образец обработен само чрез рязане. Влиянието на фактора технологична наследственост е едно и също при обработваните и измервани образци.

3.3.2.2. Крайно-елементни симулации на еквивалентната пластична деформация в повърхностните и подповърхностни слоеве

Повишената микротвърдост, експериментално доказана в 3.2.1, е в резултат на пластичната деформация на повърхностните и подповърхностни слоеве. Следователно съществува корелация между разпределението на микротвърдостта в дълбочина и разпределението на еквивалентната пластична деформация в дълбочина.

За да се установи еквивалентната пластична деформация в дълбочина, в зависимост от радиуса на върха на инструмента и силата на притискане, е проведен КЕ на процеса ДЗ. Разработен е 3D КЕ (фиг. 3.9) в ABAQUS/CAE 6.12.



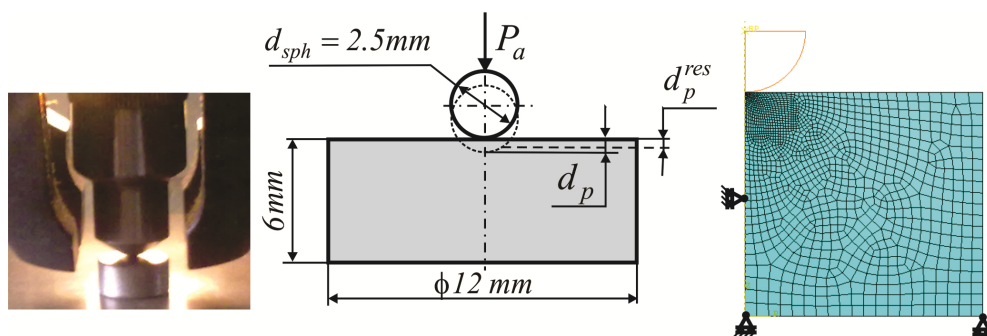
Фиг. 3.9. 3D КЕ модел на процеса

Моделираната част (поради симетрията, само половината част е моделирана) от обработвания образец е изградена от 2260 осем възлови шестстенни КЕ от тип С3D8R и 200 линейни КЕ от тип С3D6. Общият брой на възлите е 2856. ИТТ с кръгла форма упражнява натиск върху повърхността на образца, докато силата не достигне предварително зададена стойност. След това ИТТ се повдига и премества по направление на оста на образца на разстояние $f = 0.05\text{mm}$, равно на подаването на инструмента. Цикълът „натоварване – разтоварване – преместване“ се повтаря двадесет пъти. Контрол по преместване е използван, като нормалното и осовото преместване на инструмента, са синхронизирани в псевдореалното време чрез времевни криви. За да се получи адекватен КЕ модел, освен реална геометрия и взаимодействие, е необходим адекватен конститутивен модел на поведение на повърхностните слоеве на образца.

Поведението на този слой се различава значително от поведението на основния материал, поради наличието на големи пластични деформации, въведени по време на първичното обработване на заготовката. Поради тези причини конвенционалният метод за определяне на кривата напрежение – деформации чрез едномерен тест на опън, както и съответните циклични тестове, може да се приложи за основния материал, но не и за повърхностния му слой. За него тази зависимост трябва да се дефинира по начин кореспондиращ с истинското натоварване на този слой. Използван е комбиниран подход, базиран на експериментален тест (тест с проникване) и обратен КЕ анализ. Експерименталната част от подхода е тест, наподобяващ измерване на твърдост по метода на Бринел. Индентор представлява сфера с диаметър $d_{sph} = 2.5\text{mm}$, се притиска към образец под действието на осова сила P_a (фиг. 3.10). След разтоварване се измерва остатъчната дълбочина на проникване d_p^{res} на сферата. Зависимостта $P_{a,i} = P_{a,i}(d_{p,i}^{res})$ е представена в табулирана форма. КЕ анализ има за задача да установи връзката напрежение-деформация на материала в пластичната зона. Тази зависимост е представена чрез:

$$\sigma = \sigma_Y \left(1 + \frac{E}{\sigma_Y} \varepsilon_p \right)^n, \quad (3.3)$$

където σ е flow stress, σ_Y е граница на провлачване, E е модул на Young, ε_p е пластична деформация и n е показател на деформационно уякчаване за едномерно напрегнато състояние



Фиг. 3.10. Установка, схема и КЕ модел на теста за определяне на конститутивния модел на повърхностните слоеве на материала

КЕ симулация (ососиметричен КЕ модел) на механичния тест се повтаря, всеки път с различни комбинации на σ_y и n в модела (3.3), и от КЕ резултат за всяка комбинация се установява зависимостта „осова сила - остатъчна дълбочина на отпечатъка на сферата“. Диаметъра на отпечатъка се измерва и се пресмята дълбочината му. Тази зависимост се сравнява с експериментална такава. Варирането с двойката σ_y и n продължава, докато разликата между експерименталните и КЕ стойности станат минимални (табл. 3.3). Приема се, че (3.3) е валидно за всички пътища на натоварване и за всички напрегнати състояния. Всъщност деформационния процес е тримерен. Този цикличен товар (един цикъл „натоварване-разтоварване“) предизвиква деформационна анизотропия, т.е. предизвиква неравномерно преместване на равнината на провлачване в пространството на напреженията. Именно заради това е избрано нелинейно кинематично уякчаване за ососиметричния КЕ модел. Получените стойности на константите в уравнение (3.3) са: $E = 72 \text{ GPa}$; $\sigma_y = 280 \text{ MPa}$; $n = 0.075$.

Таблица 3.3. Зависимост между осова сила – остатъчна дълбочина на проникване на сферата

Осова сила	Експеримент	49.05	98.10	147.15	196.2	294.3
P_a, N	КЕ модел	49.19	98.21	147.22	196.6	294.22
Дълбочина	Експеримент	0.0065	0.0128	0.0195	0.0289	0.0362
d_p^{res}, mm	КЕ модел	0.0061	0.0124	0.0188	0.0225	0.0351

Поради цикличното натоварване в околност на точка по време на обработване, прието е нелинейно кинематично/изтропно уякчаване в 3D КЕ модел (фиг. 3.9):

$$\begin{cases} \dot{\alpha}_{ij} = \frac{C}{\sigma^0} \sigma_{ij}^a \dot{\bar{\epsilon}}^{Pl} - \gamma \alpha_{ij} \dot{\bar{\epsilon}}^{Pl} \\ \sigma^0 = \sigma|_0 + Q_\infty \left(1 - e^{-b \bar{\epsilon}^{Pl}} \right) \end{cases}$$

където α_{ij} тензор на микро-напреженията; C е начален кинематичен модул на уякчаване; σ^0 е еквивалентно напрежение, дефиниращо размера на повърхнината на провлачване, като е прието, че то е валидно за всички пътища на натоварване и за всички напрегнати състояния; $\sigma|_0$ е граница на провлачване и е начална стойност на σ^0 ; $\sigma_{ij}^a = \sigma_{ij} - \alpha_{ij}$ е активния тензор на напреженията; σ_{ij} е тензор на напреженията; γ е коефициент, дефиниращ темпа на намаляване на кинематичния модул с увеличаване на еквивалентната пластична деформация $\bar{\epsilon}^{Pl}$; Q_∞ е максималната промяна на размера на повърхнината на провлачване; b дефинира темпа, с който размерът на повърхнината на провлачване се променя с увеличаване на еквивалентната пластична деформация.

Компонентната на кинематично уякчаване е използвана да предскаже “plastic shakedown” след първия цикъл, докато изтропната компонента в комбинация с нелинейната кинематична компонента предсказват пластичното поведение на материала след няколко цикъла. Коефициентът на Poisson е 0,33. Дълбочината на проникване, в зависимост от радиуса на върха на инструмента и силата на притискане, е установена чрез 3D КЕ модел (табл. 3.4).

КЕ резултати за разпределението на еквивалентната деформация в дълбочина са показани на фиг. 3.11. Добре известна е зависимостта между деформационното уякчаване и микротвърдостта. КЕ резултати показват, че еквивалентната пластична деформация има максимални стойности не на повърхността, а на няколко десетки микрометра под нея. Следователно максималната стойност на микротвърдостта е на същото разстояние от повърхността. За всички комбинации от радиуси и сили на притискане, максималните стойности

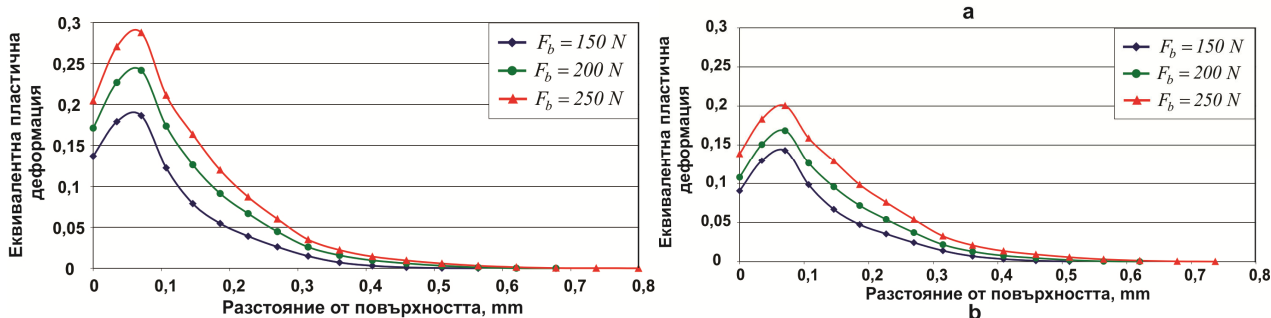
на еквивалентната пластична деформация се наблюдават под повърхността на дълбочина между 50 и 100 микрометра. Този факт се потвърждава от измерената микротвърдост.

За двете големини на радиуса на инструмента, еквивалентната пластична деформация на повърхността и последващите слоеве нараства, с нарастването на силата на притискане. По-малкият радиус на инструмента осигурява по-голяма пластична деформация. Ако основната цел на ДЗ е да постигне голяма микротвърдост, следователно трябва да се използват малък радиус и голяма сила на притискане.

Използваният KE 3D модел не отчита влиянието на началната грапавост на образците, както и включва нулеви стойности на началните напрежения и деформации. Независимо от това този модел представя адекватно деформационния процес благодарение на адекватния конститутивен модел на материала.

Таблица 3.4. Дълбочина на проникване в зависимост от радиуса на инструмента и силата на притискане

Сила на притискане F_b, N	150	200	250
Дълбочина на проникване d_p, mm			
$r = 3 mm$	0.01367	0.01816	0.02148
$r = 4 mm$	0.01216	0.01516	0.01876



Фиг. 3.11. разпределение на еквивалентната пластична деформация в дълбочина:
а. $r = 3 mm$; б. $r = 4 mm$

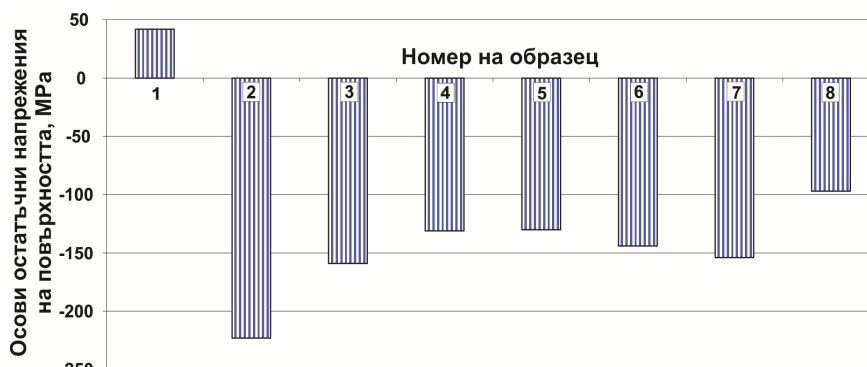
3.3.3. Остатъчни осови напрежения

3.3.3.1. Експериментални резултати

Фиг. 3.12 показва ефекта от използваните работна схема и смазочно охлаждаща течност върху остатъчните повърхностни осови напрежения. Образец 1, наречен „базов“ е обработен само чрез рязане. Останалите образци са подложени на ДЗ с оптималните параметри и са означени както следва: образец 2 (S2) – със смазване и брой на преходите $N = 1$; S3- със смазване, еднопосочна схема на обработване и $N = 8$; S4 – със смазване, разнопосочна схема на обработване и $N = 2$; S5 – със смазване, разнопосочна схема на обработване и $N = 6$; S6 – без смазване и $N = 1$; S7 – със смазване, еднопосочна схема и $N = 8$; S8 – без смазване, разнопосочна схема и $N = 4$.

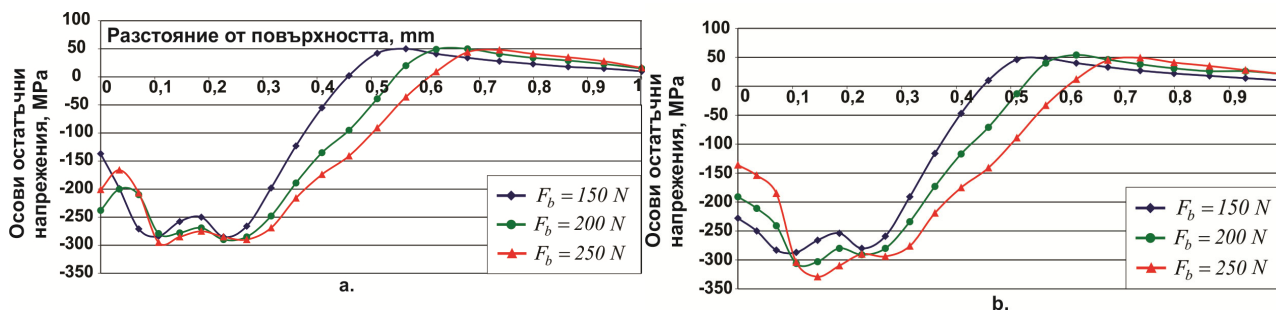
Очевидно остатъчните напрежения в базовия образец са опънови, докато процеса ДЗ въвежда натискови остатъчни напрежения в повърхностния слой. Най-големи по абсолютна стойност остатъчни напрежения са измерени в образец S2. С нарастване на броя на преминаванията до $N = 8$ (S3), остатъчните напрежения намаляват по абсолютна стойност поради наличието на деформационната анизотропия, дължаща се на цикличното натоварване в околност на точка от повърхността по време на обработване. Това е причината за релаксация на остатъчните напрежения. Сравнението между S2, S4 и S5 показва, че релаксацията е най-голяма

след първия преход, след което скоростта на релаксация рязко спада. За случая на ДЗ на сухо (виж S6, S7 и S8), разнопосочната схема (S8) очевидно води до още по-интензивна релаксация на остатъчните напрежения.



Фиг. 3.12. Осови остатъчни напрежения на повърхността

3.3.3.2. Крайно-елементни резултати



Фиг. 3.13. Разпределение в дълбочина на осови остатъчни напрежения: а. $r = 3 \text{ mm}$; б. $r = 4 \text{ mm}$

За да се установи разпределението на остатъчни напрежения в дълбочина, в зависимост от радиуса на инструмента и силата на притискане, КЕ анализ е проведен с модела показан на фиг. 3.9.

КЕ резултати за разпределението на остатъчните осови напрежения са показани на фиг. 3.13. За двете големина на радиуса на инструмента, дълбочината на зоната с полезни остатъчни напрежения нараства, с нарастването на силата на притискане. Въпреки че е незначителна, тенденцията е по-добре изразена за по-малкия радиус. И за двата изследвани радиуса с нарастване на силата на притискане води до намаляване на абсолютните по стойност остатъчни напрежения на повърхността, с изключение на комбинацията $r = 4 \text{ mm}$ и $F_b = 150 \text{ N}$. Едновременно с това интензивността на натисковата зона нараства, като дълбочината на натисковата зона е 0.52 mm .

3.4. Изводи

Резултатите от проведеното разширено експериментално изследване показват, че процеса ДЗ на образци от високояки алуминиеви сплави значително намаляват получаваната грапавост – до $0.05 \mu\text{m}$. Следователно този метод изпълнява изискванията за полиране. Освен това при процеса ДЗ на тези сплави, се въвеждат натискови остатъчни напрежения на повърхностните слоеве, които са близки до границата на провлачване и са на дълбочина по-голяма от 0.5 mm . Микротвърдостта, непосредствено под повърхността също нараства значително.

Гл. 4. Влияние на основните параметри на процеса диамантно заглаждане върху якостта на умора на високо-яка алуминиева сплав 2024-T3

4.1. Условия на експеримента

ДЗ е проведено с оптималните големина на основните параметри по критерий минимална грапавост.

4.1.3. Осови остатъчни напрежения

4.1.3.1. Избрана стратегия

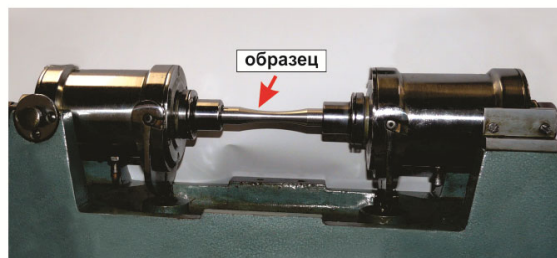
Най-голям принос за повишаване на уморната дълготрайност на оси и валове подложени на циклично огъване имат остатъчните осови нормални напрежения създадени в повърхностния слой чрез ДЗ. Тези напрежения са измерени по два начина: експериментално (X-ray diffraction) и числено (МКЕ). Методът X-ray diffraction е скъп и времеемък, дълбочината на проникване на лъча е няколко микрометра, отстраняването на слоеве от измервания образец с цел измерване на остатъчните напрежения в дълбочина при алуминиеви сплави представлява значителна трудност. Използваният 3D КЕ модел не отчита началната грапавост, температурния ефект и локалното уякчаване. В същото време КЕ модел дава информация за разпределението на ОН в дълбочина. Тази информация може да бъде получена лесно и бързо за всяка произволна комбинация на технологичните параметри на процеса ДЗ. Това е причината поради която се налага използването на комбиниран подход в това изследване – използва се X-ray метода за измерване на ОН на повърхността, а КЕ модел за намиране на профила им в дълбочина. За проверка на адекватността на КЕ модел, ОН за една комбинация от технологични параметри са измерени в дълбочина и резултатите са сравнени с КЕ такива.

4.1.3.2. Измерване на ОН

Обект на изследване са два образца с диаметър 24 mm и дължина от 30 mm . Първият е обработен само чрез струговане, а вторият с ДЗ. С цел получаване на стойностите на ОН в дълбочина, слоеве материал са отстранявани посредством електролитно полиране. ОН са измерени чрез метода X-ray diffraction, проведени са върху вертикален дифрактометър θ/θ X'Pert PRO MPD с точков колиматор $0.5 \times 1.0\text{ mm}^2$, както бе обяснено в Гл. 3.

4.1.4. Уморни тестове

Уморните тестове са проведени с три групи образци с форма на пясъчен часовник с минимален диаметър 10 mm . Първата група образци са обработени само чрез струговане върху струг CNC T200. Постигната е средна грапавост $R_a = 0.41\text{ }\mu\text{m}$ след рязане, чрез употребата на твърдосплавна пластина DNMG 50608 – RF.

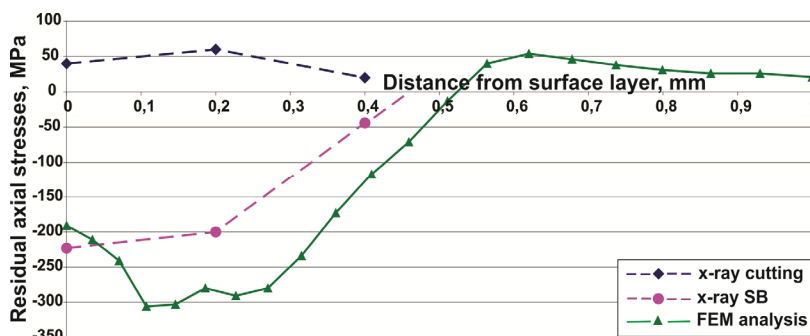


Фиг. 4.2. Изпитвателна машина за циклично огъване

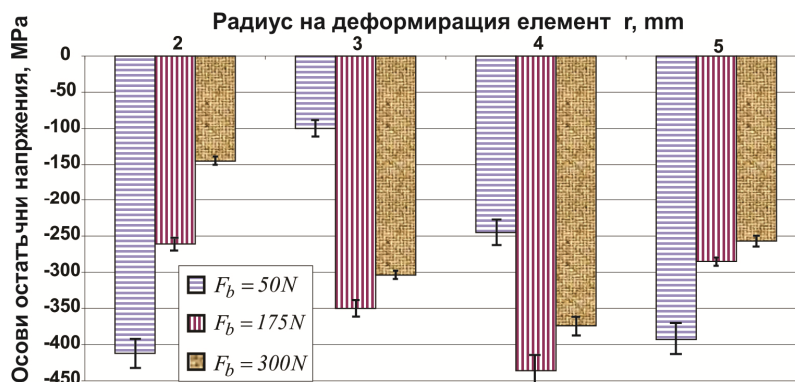
Тази група образци служи за база, с която втората група образци да бъде сравнена. Втората група образци е подложена на ДЗ. Третата група образци е подложена на ДЗ с различни комбинации на технологичните параметри радиус r на диаманта и сила на притискане F_b .

Уморните тестове са реализирани чрез въртящ се товар, изпълняващ симетричен цикъл на натоварване $R = -1$ и честота 100Hz (фиг. 4.2). Кривата на умора е построена чрез изпитването на един образец за всяка амплитуда на натоварване. В случаите на наличие на значителна разлика между очакваните и получените резултати, изпитването е повторено при същата амплитуда толкова пъти, колкото е необходимо.

Резултатите за осовите ОН получени чрез X-ray са показани на фиг. 4.3. Очевидно ОН в първия образец (обработен само чрез рязане) са опънови, докато обработени чрез ДЗ създават зона с натискови ОН; дълбочината на тази зона е около $0,5\text{mm}$. Фиг. 4.4 показва промяната на осовите остатъчни напрежения в повърхностния слой в зависимост от двата най-важни управляващи фактора: радиус и сила на притискане. Максималното отклонение $\Delta\sigma$ е $\pm 25\text{MPa}$, а минималното - $\pm 6\text{MPa}$. За граничните стойности на радиуса на инструмента и промяна с една стъпка на силата на притискане довежда до намаляване на абсолютната стойност на ОН в повърхностния слой. За средната стойност на интервала на вариране на радиуса тенденцията е различна. Минималната сила на притискане създава минимални по големина ОН, докато сила на притискане със стойност в средата на интервала на вариране води до максимални по абсолютна стойност ОН.



Фиг. 4.3. Разпределение в дълбочина на осовите остатъчни напрежения

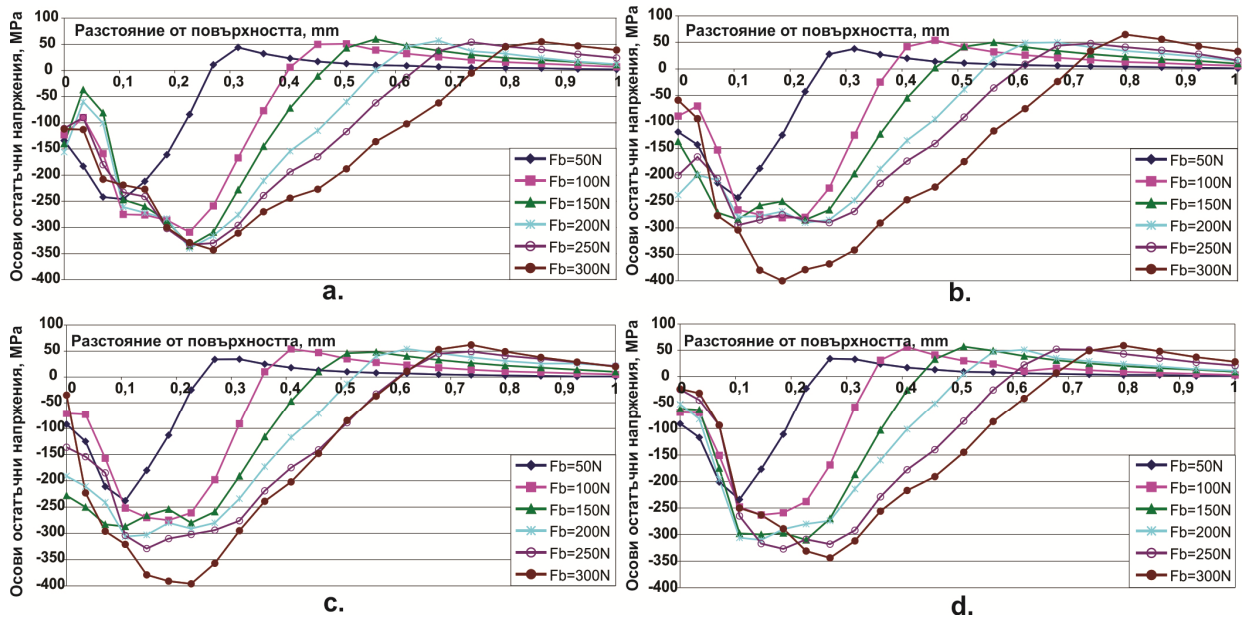


Фиг. 4.4. Осови остатъчни напрежения в повърхностния слой в зависимост от силата на притискане

4.2.2. Крайно-елементен анализ

Фиг. 4.3 показва добро съвпадение между X-ray и КЕ резултати за ОН от ДЗ в повърхностните и подповърхностни слоеве и дълбочина на зоната на натиск. Както често се случва при такива сравнения, КЕ резултати показват завишени по абсолютна стойност ОН. Вероятно причината се крие в същността на метода на КЕ. Всяко деформируемо тяло притежава безброй степени на свобода. Ограничаването на тези степени на свобода е равносилно на добавянето на допълнителни връзки, което води до повишаването на коравината в сравнение с действителното тяло.

КЕ резултати за остатъчните осови напрежения и тяхното разпределение в зависимост от радиуса и силата на притискане са показани на фиг. 4.6. За всички стойности на радиуса, повишаването на силата на притискане води до по-дълбока и по-голяма натискава зона с ОН.

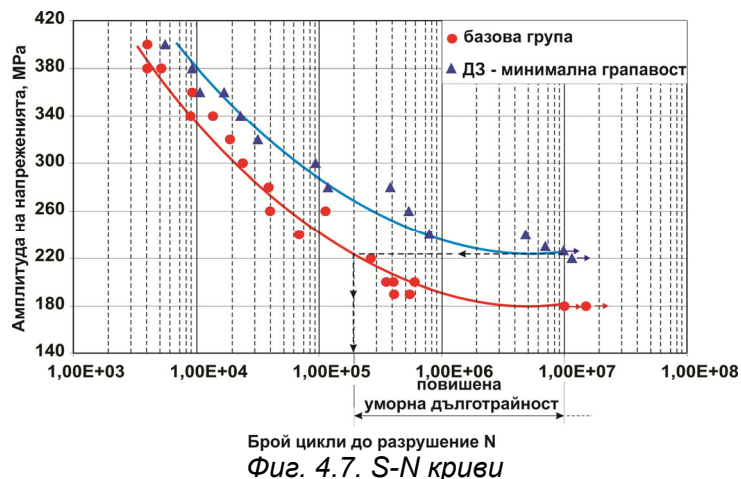


Фиг. 4.6. КЕ резултати за разпределението на осовите остатъчни напрежения: a. $r = 2 \text{ mm}$;
 b. $r = 3 \text{ mm}$; c. $r = 4 \text{ mm}$; d. $r = 5 \text{ mm}$

4.3. Резултати за уморното поведение

4.3.1. Оптимални параметри на процеса диамантно заглаждане по критерий „минимална грапавост“

В инженерната практика е прието, че границата на умора за цветни сплави е $N_b = 2 \times 10^8$ цикъла. В това изследване якостта на умора, дефинирана въз основа на експеримент, проведен до $N_b = 10^7$, е „ограничена граница на умора“.

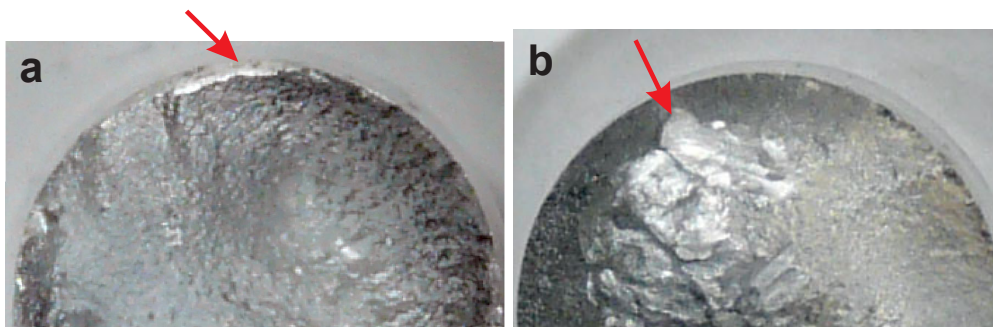


Фиг. 4.7. S-N криви

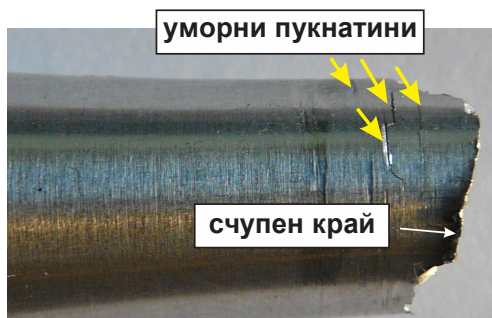
Кривите на Вюлер (S-N) показани на фиг. 4.7, представят сравнение на образци получени само чрез рязане и такива обработени чрез ДЗ. За втората крива, образците са обработени с оптимални стойности на управляващите фактори по критерий минимална грапавост. Броят на

преминаванията е 1. Ограничената граница на умора за образците, обработени само чрез рязане, е 180MPa , което съответства на около 52% от границата на провлачване. При образците, обработени чрез ДЗ, ограничената граница на умора нараства с около 25% - от 180MPa на 225MPa , което означава че уморната дълготрайност се увеличава десетки пъти (виж фиг. 4.7).

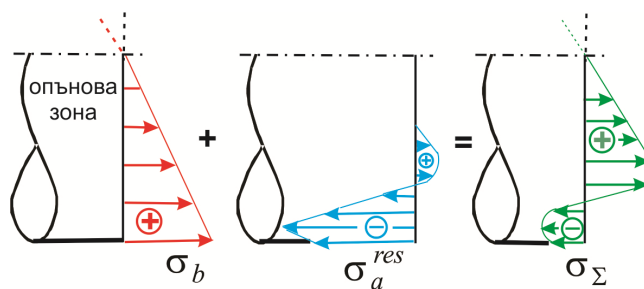
Това значително увеличаване на дълготрайността при малоциклова умора на образците, обработени чрез ДЗ, се дължи на осовите остатъчни натискови напрежения. Измерените средни стойности на осовите ОН на повърхността на образци от двете групи са 40MPa и -240MPa (образци, обработени съответно чрез рязане и чрез ДЗ). С други думи довършващата обработка чрез рязане води до опънови ОН на повърхността и обратно ОН при ДЗ са натискови (фиг. 4.4).



Фиг. 4.8. Област на зараждане на пукнатина: а. при образец обработен само чрез рязане - $\sigma_a = 190\text{MPa}$; б. при образец обработен чрез диамантно заглаждане и оптимални стойности на работните параметри - $\sigma_a = 230\text{MPa}$



Фиг. 4.9. Необработен образец с множество пукнатини на повърхността



Фиг. 4.10. Разпределение на осовите нормални напрежения

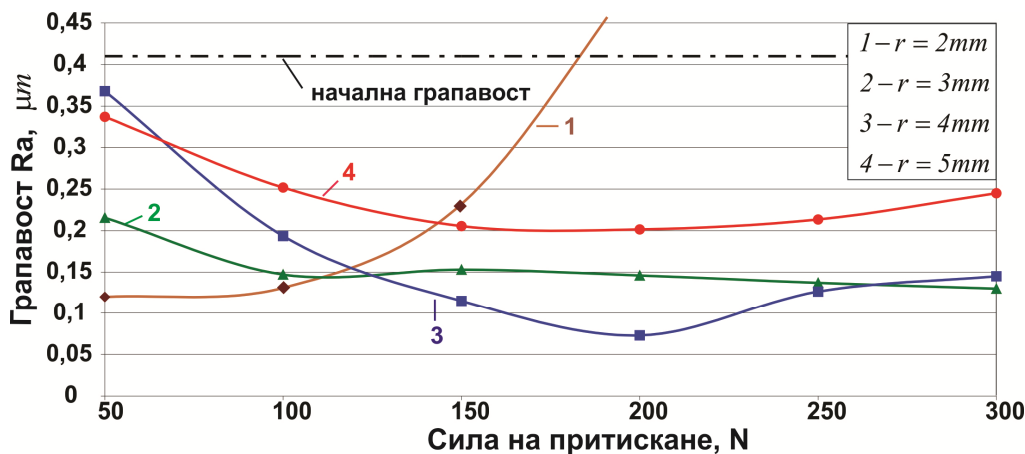
Уморната пукнатина при образците, обработени чрез рязане, стартира от повърхността (фиг. 4.8a). На някои от необработените образци са забелязани множество пукнатини на повърхността (фиг. 4.9), докато при други от обработените чрез ДЗ образци (подложени на работни напрежения с по-малка амплитуда) уморната пукнатина започва от подповърхностните слоеве (фиг. 4.8b). Това са пукнатини от първи род, които нарастват под действието на огъвните напрежения. Следователно ОН на натиск изместват зараждането на пукнатина от повърхността към слоеве под повърхността. Освен това суперпозицията от ОН на натиск и опънови напрежения от огъване, води до натискови или малки по стойност опънови работни напрежения на повърхността и в подповърхностните слоеве (фиг. 4.10).

4.3.2. Оптимални параметри на процеса диамантно заглаждане по критерий „максимална якост на умора“

4.3.2.1. Уморна дълготрайност

В Гл. 3 е установено, че радиуса и силата на притискане имат най-силно влияние върху пластифицирането на повърхностния слой. Съществува корелация между двата фактора:

комбинацията от малък радиус и голяма сила на притискане води до много голямо повърхностно напрежение между деформиращият елемент и обработвания образец. По време на обработка, ако работните напрежения превишат по стойност границата на якост на материала, се увеличава възможността за създаване и развитие на пукнатини. Поради тази причина, това изследване се концентрира върху влиянието на технологичните параметри за оценка на уморната дълготрайност при амплитуда на работните напрежения σ_a от 260 MPa .



Фиг. 4.11. Зависимост на получаваната грапавост от радиуса на инструмента и силата на притискане

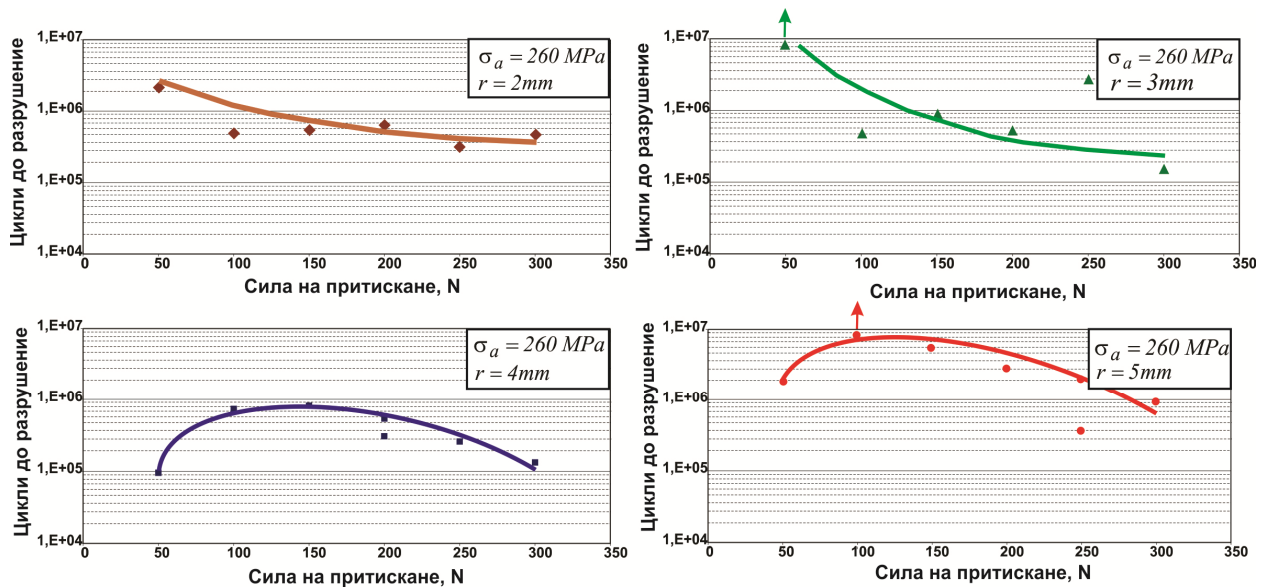
Образците се подлагат на ДЗ с различни комбинации от радиус и сила на притискане, като подаването и скоростта са постоянни: $f = 0,05 \text{ mm/rev}$; $v = 100 \text{ m/min}$. Тези стойности на технологичните параметри се запазват постоянни, тъй като те осигуряват минимална грапавост (фиг. 4.11). Редуциране на стойностите на получаваната грапавост (след струговане) се наблюдава за всички комбинации от радиуси и сила на притискане с изключение на комбинацията радиус $r = 2 \text{ mm}$ и сила на притискане по-голяма от 160 N . Както се очаква, минимална грапавост се постига при следната комбинация $r = 4 \text{ mm}$ и $F_b = 200 \text{ N}$.

Ефекта от влиянието на основните параметри r и F_b върху дълготрайността на умора при амплитуда на натоварване 260 MPa е представена на фиг. 4.12. При по-малките радиуси ($r = 2 \div 3 \text{ mm}$), дълготрайността на умора намалява монотонно с увеличаване на силата на притискане. Въпреки, че увеличената сила на притискане води до по-голяма по дълбочина и по-голяма по интензивност зона с полезни натискови остатъчни напрежения (виж фиг. 4.7), дълготрайността намалява. Високите стойности на еквивалентните напрежения в повърхностния и подповърхностните слоеве, поради не добра комбинация от управляващи фактори, може да предизвика локални дефекти. Вероятно, по-голяма сила на притискане (особено в комбинация с малък радиус) предизвиква локални повърхностни дефекти, от които тръгва зараждането и развитието на пукнатина.

При експерименти с по-големите радиуси ($r = 4 \div 5 \text{ mm}$), дълготрайността на умора първоначално нараства с нарастването на силата на притискане и след това намалява. Най-голямата дълготрайност на умора се наблюдава при следните две комбинации: $r = 3 \text{ mm}$ и $F_b = 50 \text{ N}$; $r = 5 \text{ mm}$ $F_b = 100 \text{ N}$.

Върху уморната дълготрайност съществено влияние оказват следните фактори: 1) състоянието на повърхностния слой: грапавост, микро-твърдост, осови ОН (големина и разпределение в дълбочина); 2) темп на релаксацията на ОН предизвикана от външен цикличен товар; 3) възникнали дефекти на повърхността в резултат от пластична деформация. Очевидно,

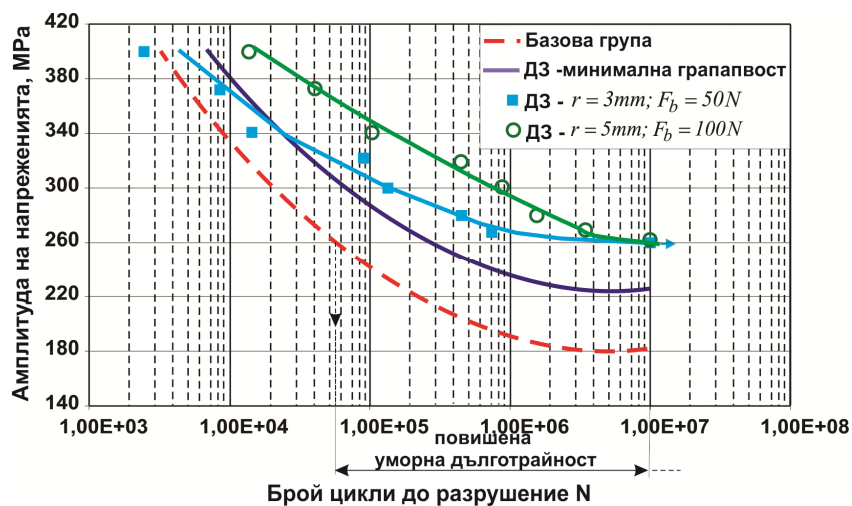
тези фактори съвпадат по най-благоприятен начин и за двете комбинации на радиус и сила на притискане.



Фиг. 4.12. Зависимост на дълготрайността на умора от радиуса на инструмента и силата на притискане

4.3.2.2. Криви на Вьолер

За двете избрани комбинации (първата: $r = 3 \text{ mm}$ и $F_b = 50 \text{ N}$; втората: $r = 5 \text{ mm}$ и $F_b = 100 \text{ N}$), ограничените криви на умора са показани на фиг. 4.13. Практически, всяка от двете комбинации осигуряват една и съща якост на умора: 260 MPa . Въпреки това, втората комбинация осигурява значително по-добра уморна дълготрайност в малоцикловата умора в сравнение с първата. От друга страна и двете комбинации значително увеличават ограничената якост на умора в сравнение с ДЗ, изпълнено чрез оптимални параметри по критерий „минимална грапавост“.



Фиг. 4.13. Криви на Вьолер

След ДЗ на образците и при всяка от двете комбинации, ограничената якост на умора се увеличава с 44% - от 180 MPa до 260 MPa . В същото време дълготрайността на умора се увеличава повече от 200 пъти (виж фиг. 4.13). Важно е да се отбележи, че получената грапавост и при двете комбинации е практически една и съща $R_a = 0.21 \div 0.25 \mu\text{m}$ (виж фиг. 4.11).

4.3.2.3. Граница на умора

При леките сплави границата на умора е базирана на условието, че образеца не се разрушава до $N_b = 2 \times 10^8$ цикъла. Два проблема се появяват в този случай: 1) необходимо е значително машинно време (водещо до увеличаване на разходите); 2) при преминаването на границата от 10^7 цикъла, счупвания на образците в местата за захващане са често срещани, което е в следствие на явлението “fretting fatigue” (фиг. 4.14). Трябва да се отбележи, че алуминиевите сплави (включително и 2024-T3) не притежават обособена (физическа) граница на умора, т.е. за брой цикли 2×10^8 . Именно тя е целта на настоящето изследване.



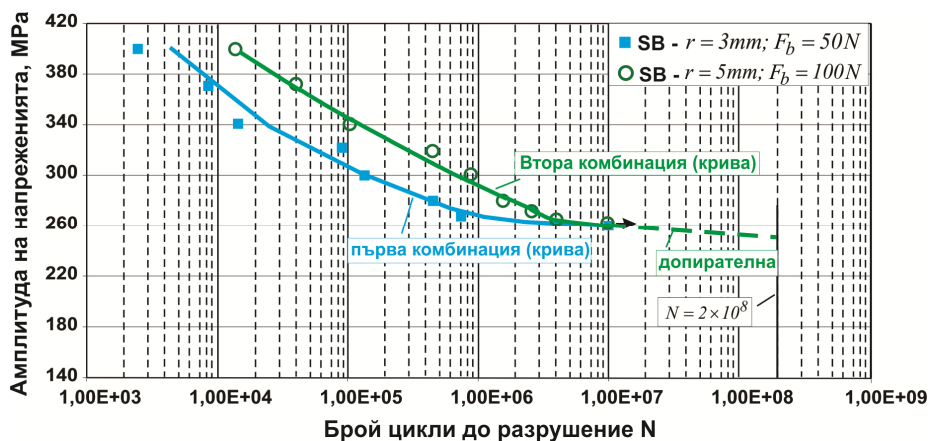
Фиг. 4.14. Разрушен образец в следствие на явлението контактна умора (fretting fatigue)

За изследваната сплав, отсъствието на обособена граница на умора означава че кривата на умора не притежава хоризонтална част. С други думи частта от кривата след 10^7 цикъла трябва да лежи между допирателната към кривата в точката 10^7 цикъла и правата преминаваща през същата точка.

Фиг. 4.15 показва експериментално получената ограничена крива на Вюлер за образци подложени на ДЗ с двете комбинации от технологични параметри. Кривите са получени по метода на най-малките квадрати, реализиран в софтуера QstatLab и апроксимация на Hoerl: $\sigma_a = ab^N N^c$. Въпреки, че двете комбинации осигуряват една и съща граница на умора до 10^7 цикъла, втората комбинация е избрана, защото тя осигурява по голяма дълготрайност на умора в малоцикловата област. Следователно оптималните технологични параметри на процеса ДЗ, осигуряващи добра дълготрайност на умора са: $r = 5mm$, $F_b = 100N$, $f = 0.05mm/rev$, $v = 100m/min$. Уравнението на втората крива от фиг. 4.16 притежава следните стойности на константите: $a = 827.4$, $b = 1$, $c = -0.07573$, при което $N \in (13900, 10^7)$. Тангентата в точка с координати $(N = 10^7; \sigma_a = 260 MPa)$ пресича вертикална линия с уравнение $N = 2 \times 10^8$ в точка с координати $(N = 2 \times 10^8; \sigma_a \approx 254 MPa)$. С други думи, може да се приеме че границата на умора е приблизително $\sigma_e = 250 MPa$.

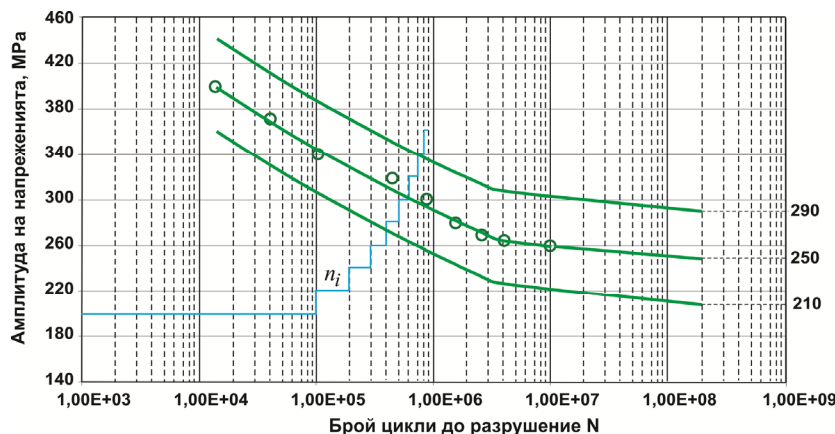
В съответствие с метода на Losatì, границата на умора може да бъде установена чрез изпитването на един образец, познавайки кривата на умора за аналогични образци и предполагайки валидност на хипотезата на Palmgren-Miner за линейно разрушение, която е частен случай на теорията за натрупаните повреди. Образецът се подлага на постъпково натоварване с постоянна стъпка. При това началната амплитуда на напрежението е по-малка от предполагаемата граница на умора и броя цикли е един и същ за всяка стъпка на натоварването. Натоварването продължава докато образецът се разруши. За да се определи броя цикли до разрушаване N_i за всяка амплитуда на напрежението $\sigma_{a,i}$, се построява предполагаемата крива

на Вюлер. За всяка крива сумата на натрупаните повреди се изчислява: $\sum_{i=1}^k (n_i / N_i)$, където k е броя на амплитудите на напрежението. Напрежението, получено чрез интерполиране за $\sum_{i=1}^k (n_i / N_i) = 1$, е границата на умора σ_e .



Фиг. 4.15. Определяне границата на умора

Фиг. 4.16 показва три еквидистантни криви на Вьолер. Средната крива е експериментално получената, както се вижда на фиг. 4.15 ($r = 5\text{mm}$, $F_b = 100\text{N}$), докато другите две криви са получени чрез паралелно преместване на средната крива във вертикално направление, респ. на 40MPa и -40MPa . Броят на циклите за всяка стъпка на работното напрежение е $n_i = 10^5$ и разлика между всеки две нива $\Delta\sigma_a = 20\text{MPa}$.



Фиг. 4.16. Метод на Locati's

Границата на умора за трите криви са: 210MPa ; 250MPa ; 290MPa . Изследвани са три образца, като са получени следните резултати за границата на умора: 241MPa , 244MPa , 264MPa ; средната стойност за големината на границата на умора, определена посредством метода на Locati е 249MPa .

Обработването на образци, с оптимални технологични параметри, от високояка алуминиева сплав 2024-T3 посредством ДЗ, повишава границата на умора до 250MPa по критерий „максимална якост на умора“.

4.3.3. Изводи

ДЗ на образци от високояка алуминиева сплав 2024-T3 постига грапавост $Ra = 0.05\mu\text{m}$, създавайки зона с полезни остатъчни напрежения на натиск в повърхностния и подповърхностните слоеве и като резултат ограничената граница на умора се повишава с 25% - от 180MPa до 225MPa . В същото време дълготрайността на умора се увеличава десетки пъти.

Намерени са оптималните технологични параметри на процеса ДЗ по критерий максимална якост на умора. Границата на умора при 10^7 цикъла се повишава с 44% - от 180MPa до

260MPa , като получаваната грапавост е $Ra = 0.25\mu m$. В същото време дълготрайността на умора се увеличава стотици пъти.

За определяне на физическата граница на умора (2×10^8 цикъла), е използван комбиниран подход базиран върху ограничена крива на умора на Вьолер и метода на Locati. Границата на умора на високояка алуминиева сплав 2024-T3 се повишава до 250 MPa при прилагането на метода ДЗ по критерий “максимална якост на умора”.

Гл. 5. Влияние на допълнителните параметри на процеса диамантно заглаждане върху якостта на умора на високо-яка алуминиева сплав 2024-T3

5.1. Условия на експеримента

5.1.2 Управляващи параметри

Допълнителните параметри на процеса ДЗ са: брой преминавания, работна схема – еднопосочна, разнопосочна, със и без мазане. При брой на преходите повече от един схемата на реализиране на процеса е показана фиг. 3.6. Оптималните параметри на процеса ДЗ по критерий минимална грапавост са: $r = 4mm$, $F_b = 200N$, $f = 0.05mm/rev$, $v = 100m/min$.

5.1.3. Измерване на остатъчните напрежения

ОН са измерени чрез метода X-ray diffraction.

5.1.4. Уморен тест

За целта на изследването бяха изработени пет групи образци. Минималният диаметър на образците е 10mm . Образците от всички групи бяха обработени посредством ДЗ на CNC струг T200 с оптимално избрани параметри по критерий минимална грапавост. Първите две групи образци бяха обработени с 8-кратно преминаване, с използване на смазочна-охлаждащо течност (СОТ) Nocus 795-H, съответно чрез еднопосочна (първа група) и разнопосочна (втора група) схема. Останалите три групи образци бяха обработени посредством ДЗ, в условията на отсъствие на СОТ, както следва: трета група, еднократно преминаване на инструмента; четвърта група, осемкратно преминаване и еднопосочна схема; пета група, осемкратно преминаване и разнопосочна схема. Уморното представяне на петте групи образци е сравнено с т.нар. базова група образци. Последните са образци, обработени с оптимални технологични параметри по критерий минимална грапавост, еднократно преминаване на инструмента и с употреба на СОТ Nocus 795-H. Установено е, че за първата група образци ограничената якост на умора нараства с 25% (от 180MPa до 225MPa), в сравнение с образци обработени само с рязане.

Уморните тестове се провеждат върху електромеханичната машина МУИ-6000, с контрол на натоварването и въртящ се огъващ товар с коефициент на асиметрия $R = -1$. Честотата на натоварване е 100Hz . Всеки един образец се изпитва до разрушаване. Всяка S-N крива се получава, като се изпитва един образец за всяка стойност на работното напрежение на огъване. Минималният брой образци за всяка група е 10. При наблюдаване на голямо разсейване на резултатите в конкретна експериментална точка, експериментът за тази точка се повтаря.

5.2. Експериментални резултати и анализ

5.2.1. Анализ на ОН

За измерване на ОН са изработени 6 броя образци с размери: диаметър $\phi = 18mm$ и дължина $L = 40mm$.

Всички образци са обработени посредством диамантно заглаждане при различни комбинации от допълнителни параметри на процеса. Комбинациите от параметри отговарят на тези, с които бяха обработени петте групи експериментални образци, както и така наречената основна група. Предполага се, че измерените напрежения в тези шест образца са същите като остатъчните напрежения, въведени в предходните групи образци.

Разпределението на осовите ОН е представено на фиг. 5.3. Основните изводи които могат да се направят са:

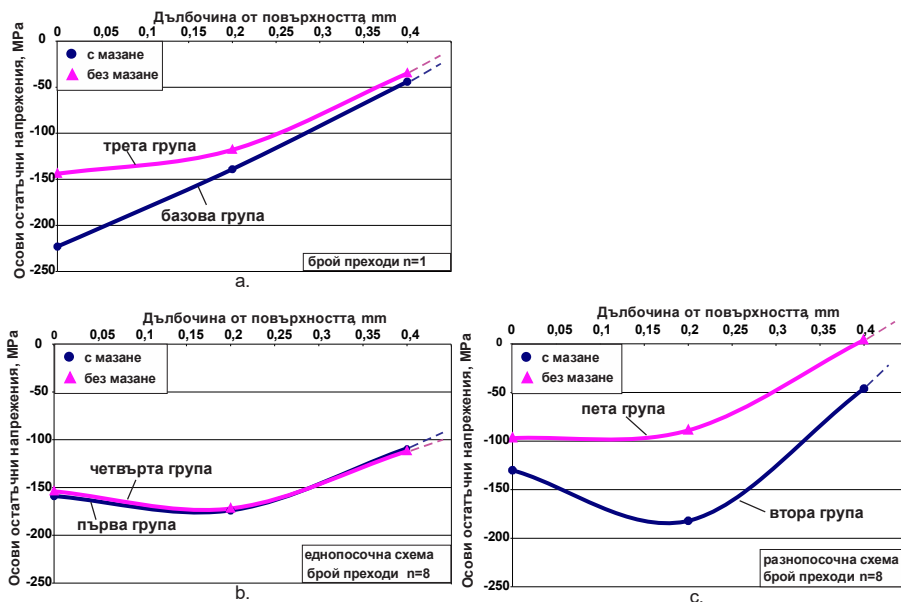
- Като цяло, в образците, обработени чрез ДЗ и употреба на СОТ, е налична зона с ОН на натиск, в която те са с по-голяма абсолютна стойност и на по-голяма дълбочина в сравнение с образци обработени без СОТ. Изключение е еднопосочната схема с брой преминавания $n = 8$, където областта с ОН на натиск е практически една и съща и не зависи от използването на смазка.

- При еднопосочна схема на работа, дълбочината на зоната с натискови напрежения значително се увеличава с нарастването на броя на преходите, независимо от употребата на СОТ.

- При разнопосочната схема се осигурява натискова зона със значително по-малка дълбочина в сравнение с еднопосочната схема. Освен това, най-голямата разлика в разпределението на ОН между ДЗ на сухо и ДЗ при употреба на СОТ се наблюдава точно при разнопосочната схема.

- ОН на натиск в повърхностния слой са най-големи по абсолютна стойност при ДЗ на образци с употреба на СОТ и еднократно преминаване.

- При двете схеми на работа релаксацията на ОН нараства с нарастване на броя на преходите.



Фиг. 5.3. Разпределение на осовите ОН; а. брой преходи $n = 1$; б. еднопосочна схема и брой на преходите $n = 8$; с. разнопосочна схема $n = 6$

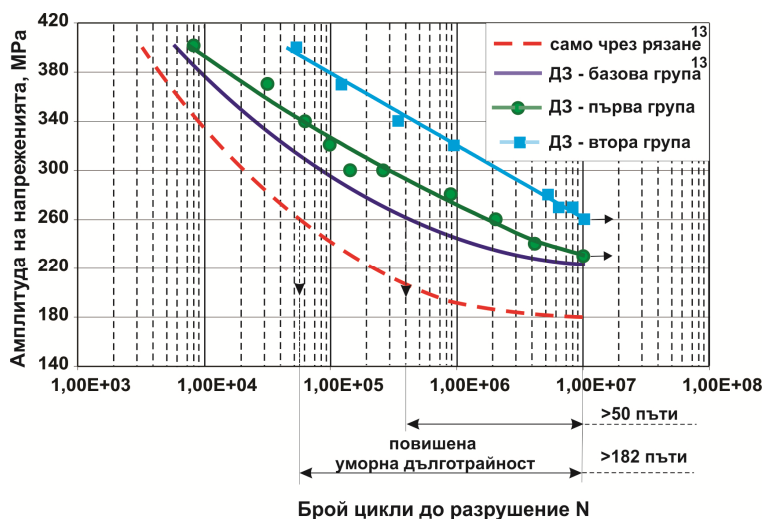
5.2.2. Резултати от уморните изпитания

5.2.2.1. Криви на Вюлер

За първа и втора група образци S-N кривите са показани на фиг. 5.4. Направено е сравнение между образците обработени само чрез рязане, базовата група и ДЗ образци от първа и втора група. Фиг. 5.4 показва ефекта и типа на работната схема и броя на преходите (в присъствие на СОТ) върху поведението на умора на образци обработени посредством ДЗ. Първата група има якост на умора от 230MPa при 10^7 брой цикли, което съответства приблизително на 27.8% нарастване в сравнение с якостта на умора на образците обработени чрез рязане и 2.2% нарастване в сравнение с базовата група образци. Якостта на умора за втората група образци получена при 10^7 брой цикли е 260MPa . Това е приблизително 44.5% нарастване на якостта на умора в сравнение с якостта на умора на образците обработени чрез рязане и 15.6% нарастване в сравнение с базовата група образци. Дълготрайността на умора

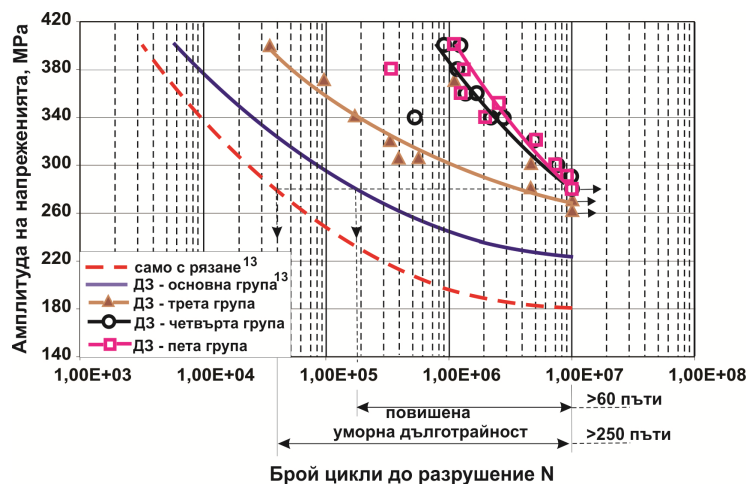
нараства повече от 25 пъти в сравнение с образците обработени само чрез рязане и повече от 182 пъти в сравнение с базовата група образци. В условията на малоциклова умора доброто представяне на втората група образци е по-силно изразено отколкото първата група.

По отношение на въведените полезни ОН на натиск чрез ДЗ (виж фиг. 5.3а, б), първата група образци, в сравнение с базовата, показват по-висока якост на умора поради значително по-голямата дълбочина на натисквата зона. Само ОН (виж фиг. 5.3б, с) не са достатъчни, за да обяснят значително по-голямата якост на умора при сравняване на втората група с първата. Въпреки, че дълбочината на натисквата зона на първата група е по-голяма и ОН в повърхностния слой са по-големи по абсолютна стойност, втората група показва значително по-висока якост на умора. Възможна причина за това може да бъде различната скорост на релаксация на ОН въведени и при двете групи по време на провеждането на теста. Друга причина може да бъде благоприятна промяна на микроструктурата на повърхностния и подповърхностните слоеве дължаща се на особеностите на разнопосочната схема на обработване. Добре известен е фактът, че повишената микротвърдост води до увеличена уморна дълготрайност на обработвания материал. Установено е, че разнопосочната работна схема (употреба на СОТ) осигурява повишена микротвърдост в сравнение с еднопосочната при един и същ брой на преходите. Следователно третата причина за повишената якост на умора на втората група образци в сравнение с първата може да бъде повишената микротвърдост на повърхностния слой, осигурена от разнопосочната схема на обработка.



Фиг. 5.4. Влияние на работната схема и употребата на СОТ върху уморната якост

За третата, четвъртата и петата група образци S-N кривите са показани на фиг. 5.5. С други думи фиг. 5.5 показва ефекта от броя на преходите и вида на работната схема върху уморното поведение на образци обработени чрез ДЗ бе наличието на СОТ. Третата група показва, при 10^7 брой цикли, якост на умора от 270MPa , което съответства на 50% повишение в сравнение с образци, обработени само чрез рязане и 20% повишение в сравнение с базовата група. Четвъртата и пета група образци постигат якост на умора от 280MPa при 10^7 брой цикли. Това е приблизително 56.5% нарастване на якостта на умора спрямо образците обработени само чрез рязане и нарастване от 24.4% в сравнение с базовата група образци. Дълготрайността на умора нараства повече от 60 пъти в сравнение с образците, обработени само чрез рязане и повече от 250 пъти в сравнение с базовата група образци. Очевидно предимството на четвъртата и петата група, в сравнение с третата е в областта на малоцикловата умора.



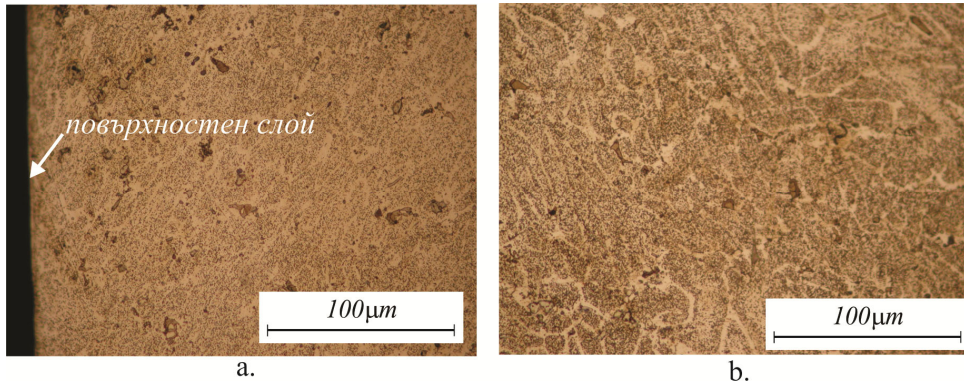
Фиг. 5.5. Влияние на работната схема без употреба на СОТ върху якостта на умора

По-високата якост на умора на четвъртата група образци спрямо третата вероятно се дължи на по-големите по абсолютна стойност ОН на натиск (фиг. 5.3а, б), въведени на по-голяма дълбочина. Обаче само разпределението на ОН не е в състояние да обясни следните явления:

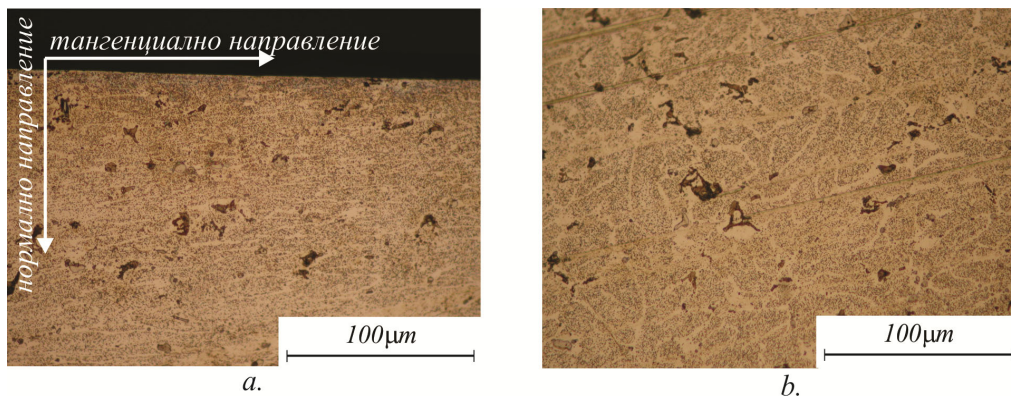
- По-високата якост на умора при 10^7 цикъла на третата група образци в сравнение с базовата група, независимо от по-големите по абсолютна стойност ОН на натиск (виж фиг. 5.3а) на базовата група.
- Независимо от практически еднаквото разпределение на ОН (виж фиг. 5.3б) на първата и четвъртата група образци, последната има много по-висока якост на умора при 10^7 цикъла (280MPa срещу 230MPa).
- Четвъртата и петата група образци показват еднакви стойности на якостта на умора при 10^7 цикъла, въпреки че ОН при петата група са по-малки по абсолютна стойност и са въведени на по-малка дълбочина отколкото при четвъртата група. Освен това петата група образци показва по-голяма уморна дълготрайност в областта на малоцикловата умора.

Горните явления могат да бъдат обяснени, чрез благоприятния ефект, дължащ се на наличието на тангенциален контакт между деформацията на диамант и повърхностния слой на обработвания образец при ДЗ без употреба на СОТ. Този ефект се изразява в намаляване на размера на зърната, намаляване на порите в материала и хомогенизиране на микроструктурата. Еволюцията на микроструктурата е показана на фиг. 5.6-5.8. Базовият образец (фиг. 5.6) е обработен само чрез рязане. Изследваната високояка алуминиева сплав 2024-T3 притежава мултифазна структура, дължаща се на големия брой легиращи елементи. Като следствие от топлинната обработка и последващо стареене, в твърдия разтвор се получават уякчаващи (втвърдяващи) фази. Основните фази са CuAl_2 и Al_2CuMg , а също така $\text{Al}_2\text{Mn}_2\text{Cu}$, $(\text{MnFe})\text{Al}_6$, Al_2CuFe , и Mg_2Si . Голямата част от зърната притежават форма на вторични дендрити и размера на зърната варира в относително широки граници. Размерът на зърната в близост до повърхността е приблизително $12\ \mu\text{m}$ (фиг. 5.6а), а в дълбочина $22\ \mu\text{m}$ (фиг. 5.6б). По-малкият размер на зърната в близост до повърхността е в резултат от по-голямата пластична деформация, дължаща се на изтеглянето по време на производство на пръта. Изтеглянето на материала и последващото стареене водят до изкривяване на кристалната решетка и до формирането на множество равномерно разпределени рекристализационни центрове. Може да бъде предсказано влиянието на два фактора, имащи противоположен ефект по отношение на последваща обработка чрез пластична деформация, въз основа на наблюдаваната микроструктура. Неуякчените гранични зони благоприятстват пластичната деформация, а получените уякчаващи фази възпрепятстват това.

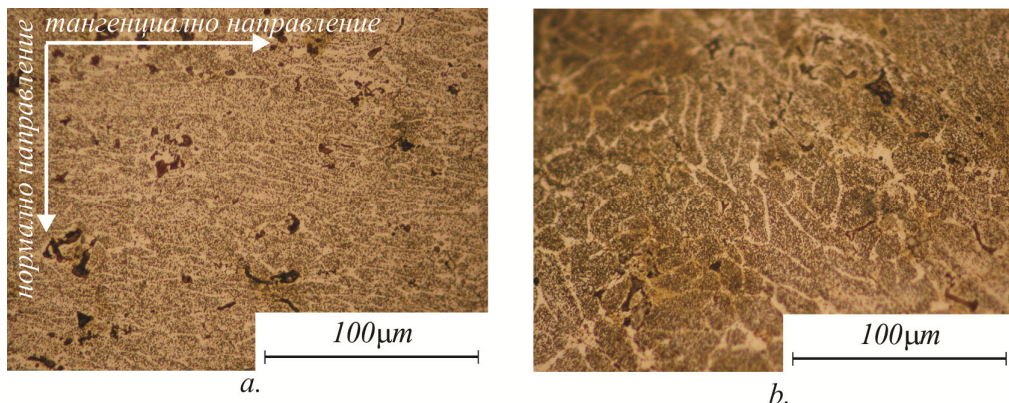
Вторият образец е обработен посредством ДЗ без употреба на СОТ (фиг. 5.7). Получената микроструктура на дълбочина приблизително 0.5 mm е значително деформирана. Зоните в близост до повърхността са подложени на значителна пластична деформация и са пременили своята структура. Наблюдавано е значително удължаване на зърната в тангенциално направление (паралелно на скоростта на обработка) (фиг. 5.7a). Като цяло се наблюдава по-хомогенна структура със среден размер на зърната в нормално направление $6.4\ \mu\text{m}$. В сравнение с базовият образец получената микроструктура е с два пъти по-малък среден размер на зърната в същото направление. На дълбочина, по-голяма от 1 mm , микроструктурата няма ясно изразена текстура в тангенциална посока, а средният размер на зърната е приблизително $22\ \mu\text{m}$ (фиг. 5.7b).



Фиг. 5.6. Металографски снимки на базов образец: а. микроструктура близо до повърхността; б. микроструктура в дълбочина



Фиг. 5.7. Металографски снимки на образец с $n = 1$: а. микроструктура близо до повърхността; б. микроструктура в дълбочина



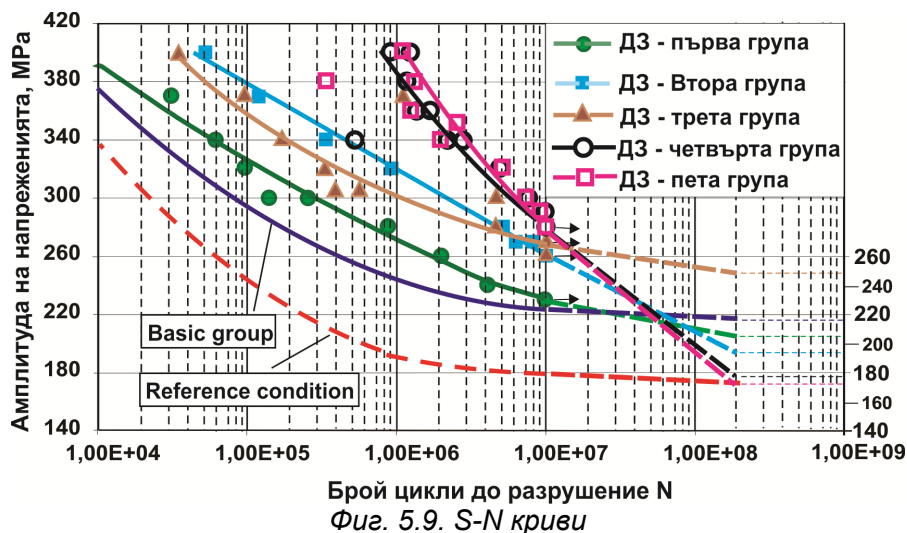
Фиг. 5.8. Металографски снимки на образец с $n = 8$: а. микроструктура близо до повърхността; б. микроструктура в дълбочина

Третият образец е обработен посредством ДЗ без употреба на СОТ, като е използвана еднопосочна схема на работа и осем броя преходи (фиг. 5.8). Наблюдаваната микроструктура е подобна на тази на образца с един преход. В близост до повърхността, средния размер на зърната в нормално направление е по-малък $6.1 \mu m$ (фиг. 5.8a). В дълбочина средния размер е приблизително $22 \mu m$ (фиг. 5.8b). В същото време се забелязва по-голяма степен на хомогенизиране на структурата в повърхностния слой.

Може да се заключи, че извършеният анализ потвърждава предположението, че обработването посредством ДЗ без употреба на СОТ намалява размера на зърната, хомогенизира структурата и намалява порите в обема на материала.

5.2.2.2 Граница на умора

Както е добре известно високояките цветни сплави не притежават физическа граница на умора. За тези сплави границата на умора се приема $N_b = 2 \times 10^8$ цикъла. В това изследване е използван комбиниран подход, базиран на ограничени криви на умора и метода на Locati. Този подход детайлно беше описан в Гл. 3.



Получените резултати за границата на умора са показани на фиг. 5.9. За всяка S-N крива са проведени по три натурни експеримента. По този начин границата на умора е получена като средноаритметична стойност от трите резултата.

В условията на малоциклова умора по-високият коефициент на триене и по-големия брой преходи води до значително увеличаване на якостта и дълготрайността на умора в сравнение с базовата група образци и образците обработени само чрез рязане (фиг. 5.9). Тази тенденция макар и в по-малка степен се запазва и в областта на мегацикловата умора (10^7 цикъла). След 5×10^7 цикъла тенденцията се променя значително: образците обработени посредством ДЗ с голям брой на преходите и без употреба на СОТ имат граница на умора, практически равна на границата на умора на образците, обработени само с рязане. Следователно, исканото уморно поведение на компоненти, обработени посредством ДЗ, може да се осигури чрез подходящ избор на допълнителните параметри на процеса ДЗ.

5.2.2.3 Нарастване на уморната пукнатина

Може да се заключи, че процеса ДЗ произвежда два ефекта: макроефект, който се изразява във въвеждането на полезни ОН на натиск на значителна дълбочина от повърхността на образца, и микроефект, който се изразява в модифициране на микроструктурата на повърхностния слой в посока на издредбяване на зърната, хомогенизиране и намаляване на порите в материала.

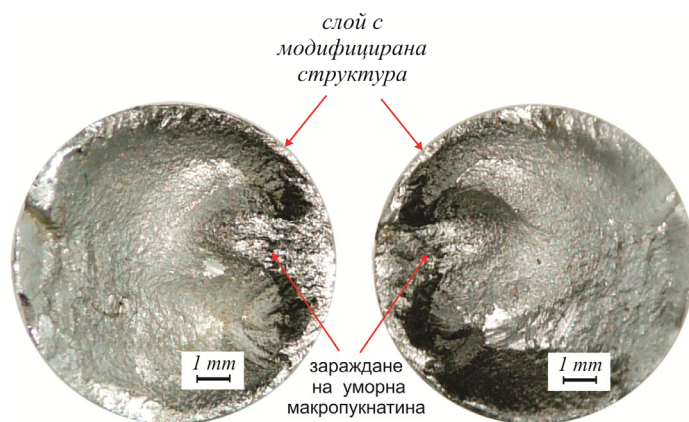
Както е добре известно, приложения циклически товар с голяма амплитуда (напреженията са в пластичната зона) води до бърза релаксация на предварително въведените полезни ОН на натиск. Понякога един работен цикъл е достатъчен полезните ОН на натиск да изчезнат напълно. Следователно, макроефектът получен от ДЗ без употреба на СОТ, няма практическо значение за повишената якост на умора в условията на малоцикловата умора. Повишената уморна дълготрайност при нея се дължи на микроэффекта.

Повдига се следния въпрос: микроэффекта забавя формирането на уморната пукнатина (образца работи по-дълго без наличието на макропукнатина), или микроэффекта намалява скоростта на нарастване на вече формирана макропукнатина (образца работи по-дълго с наличие на макропукнатина).

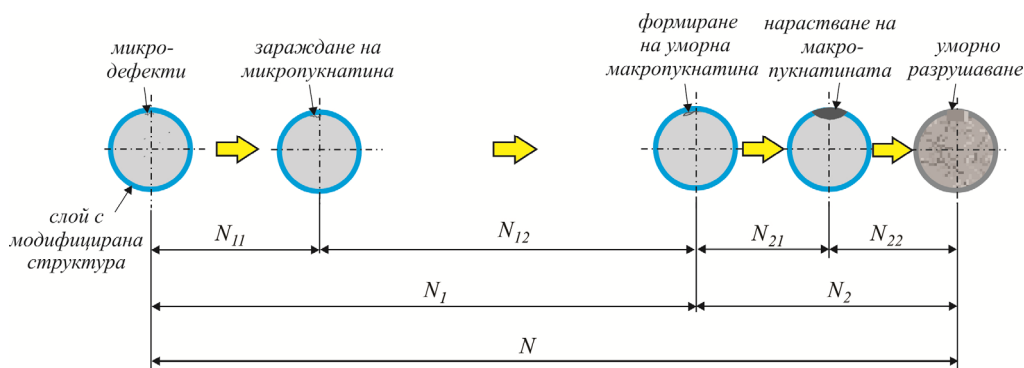
При решаването на този проблем е необходимо първо да се определят и анализират етапите, през които преминава образецът, обработен чрез ДЗ, от самото начало на теста до неговото разрушаване. Обичайно, по време на производството на металните заготовки се появяват голям брой дефекти (дислокации) в кристалите, от които са изградени. Това се дължи на различни конфигурации на дислокациите, които водят до появата на микропукнатини, поради наличието на пластична деформация на микрониво и големи локални микронапрежения. Под въздействието на външния циклически товар тези микропукнатини се сливат и се образува единична макропукнатина с относителен размер около $100 \mu m$. При определени условия тази макропукнатина нараства докато не настъпи цялостно разрушаване на образца. Обработването чрез ДЗ създава зона с дебелина около $500 \mu m$ и в този слой се проявява влиянието на микро- и макроефекта. В Гл. 3 беше показано, че уморната пукнатина възниква непосредствено под повърхността на пластично деформирания слой. Сечението, в което е настъпило уморното разрушаване (фиг. 5.10), има формата на тръба с дебелина на стената, равна на размера на пластично деформирания слой. Двете основни причини за това са: (1) рязкото изменение на свойствата на материала на границата между афектирания слой и основния материал и (2) микронапреженията в точките по тази граница са практически равни на огъвните напрежения. Фиг. 5.11 представя основните етапи, през които преминава проведения уморен тест. $N = N_1 + N_2$ е общият брой цикли до разрушение на изпитвания образец; $N = N_{11} + N_{12}$ е броят цикли изминали преди формирането на уморната макропукнатина, където N_{11} е броят цикли до зараждането на микропукнатини и N_{12} е броят цикли, при който множеството микропукнатини формират макропукнатина; $N = N_{21} + N_{22}$ е броят цикли за който макропукнатината нараства и настъпва пълно разрушение на образца, където N_{21} е броят на циклите, за които уморната пукнатина нараства в посока към афектирания слой, докато стане „видима“ пукнатина и N_{22} е броят цикли до пълно разрушение, след като се е формирала „видимата“ пукнатина. Посредством уморните тестове чрез разрушаване е възможно да се намерят само N и N_{22} . Определянето на N_1 чрез безразрушителен метод е възможно, например чрез ултразвуково изследване. На практика определянето на N_{11} и N_{12} е невъзможно.

За определянето на N_{22} е проведен следния експеримент. Изработени са нови четири групи образци (фиг. 5.12), обработени, с различни комбинации от допълнителните параметри, посредством ДЗ и нанесена „V“-образна пукнатина. Комбинацията от допълнителни параметри съответства на тези на базовата, втората, третата и петата група образци. Дълбочината на нанесената „V“-образна пукнатина е $0.5 mm$, която представлява средната стойност на дълбочината на натисковата зона. Радиусът на закръгление и ъгъла на отваряне на пукнатината са съответно $r = 0.25 mm$ и $2\alpha = 60^\circ$. Образците са подложени на същият уморен тест със същите параметри, като образците, обработени посредством ДЗ. Получените криви на умора са показани на фиг. 5.13. Изпитанията на умора с образци с предварително нанесена „V“-образна пукнатина показ-

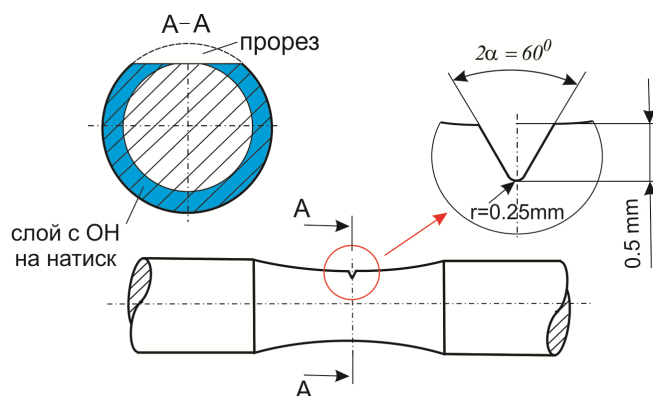
ват, че въпреки различните комбинации от допълнителни параметри на процеса ДЗ, дълготрайността на умора практически е една и съща, след като се достигне образуването на „видима“ макропукнатина.



Фиг. 5.10. Характерен лом с наличието на добре оформена зона с форма на тръба по повърхността на образца



Фиг. 5.11. Основни етапи, през които преминава уморния тест



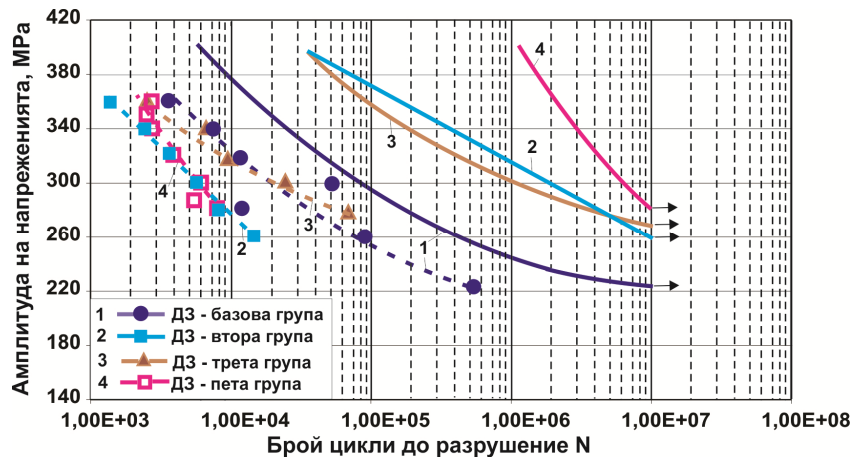
Фиг. 5.12. Образец с форма на пясъчен часовник и нанесена "V" пукнатина

5.3. Изводи

Разкрит е механизмът, чрез който допълнителните фактори влияят върху уморното поведение на алуминиева сплав 2024-T3.

Обработването чрез ДЗ води до два основни ефекта: макрофект и микрофект. Макрофектът се изразява във въвеждането на ОН на натиск в повърхностния и подповърхностни слоеве. Тези напрежения забавят формирането и нарастването на уморните макропукнатини и това довежда до увеличения живот на компонента. Микрофектът се изразява в модифициране на

микроструктурата на повърхностния и подповърхностни слоеве, съответно издребняване на зърната, хомогенизиране и намаляване на порите в материала. Така подобрената микроструктура повишава пластичността и съпротивлението срещу появата на уморни пукнатини. Дълготрайността на умора зависи от комбинирането на тези два ефекта.



Фиг. 5.13. S-N криви, за образци с "V" пукнатина

Допълнителните параметри на процеса ДЗ притежават сериозно влияние върху уморното поведение на обработените образци. В същото време, влиянието им е различно за поведението в условия на малоциклова и мегациклова умора. Следователно, необходимото уморно поведение на съответния компонент може да бъде осигурено, посредством избор на подходяща комбинация от допълнителните параметри на процеса ДЗ.

Големият брой преходи (с и без употреба на СОТ) подобрява значително уморното поведение на образците в областта на малоцикловата умора и в по-малка степен в областта на мегацикловата умора (10^7 брой цикли), и понижава границата на умора (при 2×10^8 цикъла) на обработените образци в сравнение със случая на един преход. Тази тенденция е по-ясно изразена при процеса ДЗ без употреба на СОТ.

Разнопосочната работна схема с мазане подобрява значително уморното поведение и в областта на малоцикловата и мегацикловата умора. Подобна тенденция не се забелязва при ДЗ без употреба на СОТ.

Като цяло ДЗ на образци без мазане и един преход осигуряват най-висока якост на умора в областта на малоцикловата умора. Най-високата якост на умора при 2×10^8 цикъла се осигурява от ДЗ с един преход.

Микроефектът е най-силно изразен при разнопосочна схема и няколко прехода. Този факт обяснява повишената уморна дълготрайност в областта на малоцикловата умора. Както е добре известно осовите ОН на натиск бързо релаксират под действие на цикличен товар с амплитуда около и над границата на провлачване.

Повишената уморна дълготрайност в този случай се дължи на модифицираните повърхностен и подповърхностни слоеве. Релаксацията на ОН (дори отсъствието им) е причината за намалената граница на умора (2×10^8 цикъла) в сравнение с базовата група образци. Обратно, макроефекта значително превишава микроефекта при ДЗ с мазане.

Изпитанията на умора, проведени върху образци с нанесена пукнатина, показват, че въпреки различните комбинации от допълнителни параметри уморната дълготрайност практически е една съща след формирането на видимата уморна макропукнатина. Следователно ползата от обработването посредством ДЗ се изразява в забавяне на формиране на макропукнатината. След като се формира, тази макропукнатина се развива бързо въпреки обработването чрез ДЗ.

Научно-приложни и приложни приноси

А. Научно-приложни приноси

- Получен е математичен модел на получаваната грапавост във функция от основните параметри на процеса ДЗ.
- Получени са експериментални зависимости на микротвърдостта в дълбочина от повърхностния слой във функция от параметрите на процеса ДЗ.
- Получени са експериментални и крайно-елементни зависимости за разпределение в дълбочина от повърхностния слой на въведените остатъчни осови нормални напрежения във функция от параметрите на процеса ДЗ.
- Разработена е методика, чрез която е получен конститутивния модел на повърхностния слой на високо-яка алуминиева сплав 2024-T3, който модел е приложен в крайно-елементен модел на процеса ДЗ.
- Получени са експериментални зависимости на границата на умора при циклични огъване във функция от параметрите на процеса ДЗ.
- Доказано е, че за образци, подложени на ДЗ, формиралата се уморна макро-пукнатината, следствие на циклично огъване, е локализирана на границата между въведената чрез ДЗ натискова зона и основния материал; за образци, получени само чрез рязане, процесът на зараждането на уморни микро-пукнатини, сливането им в една уморна макро-пукнатина и развитие на последната, следствие на циклично огъване, стартира от повърхностния слой.
- Разработен е модифициран метод на Locati за определяне на границата на умора на база 2×10^8 цикъла на високо-яка алуминиева сплав 2024-T3.
- Доказано е експериментално чрез тестове на циклично огъване на образци с нанесени срезове, че ДЗ забавя формирането на уморната макро-пукнатина, но веднъж формирана тази пукнатина много бързо се развива до пълно разрушение на съответния образец, независимо от комбинацията от управляващи фактори на процеса ДЗ.
- Изяснен е механизмът, по който се увеличава уморната дълготрайност на подложените на циклично огъване образци, предварително обработени чрез ДЗ.

Б. Приложни приноси

- Разработено е универсално устройство за ДЗ на външни ротационни повърхнини, позволяващо бързо и лесно задаване на геометричните и физични параметри на процеса ДЗ.
- Намерени са оптималните параметри на процеса ДЗ по различни критерии: „минимална грапавост” и „поведение на умора”, съответно в малоцикловата и многоцикловата области.

Публикации по дисертацията

1. Селимов К. Ф. Морфологичен анализ на устройства за диамантно заглаждане. Международна научна конференция UNITECH'18, Габрово, 2018
2. Selimov KF, Anchev AP, Maximov JT, Mitev Y. M. Influence of slide burnishing parameters on the surface roughness of D16T high-strength aluminium alloy. *Mechanical Engineering & Science* 27(1) (2017) 65-70.
3. Selimov K., A. Anchev, I.T. Barzev, Micro-hardness in slide burnishing of D16T high strength aluminium alloys. UNITECH 2016, Gabrovo, vol.3 p. 96-100.
4. Maximov J.T., Anchev A. P., Duncheva G. V., Ganев N., Selimov K. F. Influence of the process parameters on the surface roughness, micro-hardness and residual stresses in slide burnishing of high-strength aluminium alloys. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 39(8) (2017) 3067-3078.
5. Maximov J. T, Anchev A. P, Dunchev V. P, Ganев N., Duncheva G. V., Selimov K. F., Effect of slide burnishing basic parameters on fatigue performance of 2024-T3 high-strength aluminium alloy. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 40(11) (2017) 1893-1904.
6. Maximov JT, Anchev AP, Duncheva GV, Ganев N, Selimov KF, Dunchev VP. Impact of slide diamond burnishing additional parameters on fatigue behaviour of 2024 - T3 Al alloy. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 42(1) (2019) 363-373.