



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „Машиностроене и уредостроене”

маг. инж. Петя Христофорова Даскалова

Повишаване на уморната дълготрайност на скрепителни отвори в алуминиева сплав D 16 AT, посредством модифициран метод за студено разширение

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: Строителна механика, съпротивление на материалите

Научни ръководители: проф. д-тн инж. Йордан Тодоров Максимов
проф. д-н инж. Галя Великова Дунчева

Рецензенти: проф. д-тн инж. Николай Димитров Минчев
проф. д-р инж. Стойко Атанасов Гюров

Габрово, 2025 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за официална защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Материалознание и механика на материалите” към факултет „Машиностроене и уредостроене” на Технически университет – Габрово, проведен на 12.12.2025г.

Дисертационният труд съдържа: Съдържание, Приети означения и съкращения, Въведение, 4 глави, Класификация на приносите, Публикации по дисертацията и Литература в общ обем 95 стр., в които са поместени текст, формули, 46 фигури и графики и 4 таблици. Литературата обхваща 128 заглавия – статии, доклади, книги и интернет-сайтове.

Изследванията по дисертационния труд са извършени в катедра „Материалознание и механика на материалите” към факултет „Машиностроене и уредостроене” на Технически университет – Габрово, Технологичен парк към Технически . университет – Габрово.

Официалната защита на дисертационния труд ще се състои на 03.04.2026 г. от 13:30 ч. в Заседателна зала - Ректорат на Технически университет – Габрово.

Автор: Петя Христофорова Даскалова

Заглавие: Повишаване на уморната дълготрайност на скрепителни отвори на алуминиева сплав D 16 AT, посредством модифициран метод за студено разширение

Тираж: 20 бр.

Място на отпечатване:

Издателство „Васил Априлов” на Технически университет Габрово

ПРИЕТИ СЪКРАЩЕНИЯ

CNC – Computer numerical control
DCE – Degree of cold expansion (Степен на студено разширение)
FEM – Finite element method
IF – Interference fitting
LSP – Laser shock peening
MSMCW – Modified Split Mandrel Cold Working
SEM – Scanning Electron Microscope
SI – Surface integrity
SMCW – Split Mandrel Cold Working
SP – Shot peening
SSCE – Split Sleeve Cold Expansion
ДЗ – Диамантно заглаждане
ДСР – Директно студено разширение
КЕ – Крайни елементи
ОН – Остатъчни напрежения
ППД – Повърхностно пластично деформиране
СО – Скрепителни отвори
СРО – Студено разширение на отвори
ССР – Симетрично студено разширение
УД – Уморна дълготрайност
УМ – Умора на материала

ПРИЕТИ ОЗНАЧЕНИЯ

Латински

A₅ – Относително удължение
D – Диаметър на окръжността, описана около деформиращата част на инструмента
d₀ – Диаметър на предварително изработения отвор
d_t – Диаметър на работната част на дорна
E – Модул на Young
F_b – Деформираща сила
f – Подаване
J – Осов инерционен момент на напречното сечение на еластичната греда
i – Номинална стегнатост
l – Дължина на еластичната греда
N – Брой цикли до разрушение от умора
n_s – Брой на сегментите на работната част на инструмента
R_{0.2} – Граница на провлачване
R_a – Параметър на грапавостта, отчитащ средно-аритметичното отклонение на профила от средната линия
R_m – Якост на опън
R_z – Параметър на грапавостта, отчитащ първоначалната височина на грапавините
t – Дебелината на втулката

Гръцки

σ_t^{res} – Окръжни остатъчни напрежения на натиск
 $\varepsilon_{t,0}$ – Окръжна линейна деформация на точките от повърхнината на отвора

ω_e – Ъглова скорост около оста на отвора
 ω_r – Ъглова скорост около собствената си ос
 δ – Дебелина на среза на работната част на инструмента
 Δ – Провисване
 σ_a – Амплитуда на нормално напрежение
 θ – Ъгъл на нутация

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Високояките алуминиеви сплави намират широко приложение в авиационната индустрия поради благоприятното отношение якост/тегло. Те са предпочитани в производството на самолетни обшивки, панели, рамки, греди и други отговорни структурни части в самолетостроенето. Сглобяването на тези части се извършва чрез скрепителни отвори (СО). Типичен представител на тези материали е алуминиева сплав 2024-T3, която е аналог на D16 АТ. СО са естествени концентратори на напрежения и деформации. Динамичните напрежения по време на експлоатация причиняват умора на материала, стартираща около повърхността на СО. Доказано ефективен подход за повишаване на уморната дълготрайност на алуминиеви компоненти със СО е студено разширение на същите. Концепцията студено разширение на СО е развита и патентована от компанията Boeing за приложение в аероиндустрията. Основната идея в тях е създаване на достатъчно интензивна зона с полезни окръжни остатъчни напрежения (ОН) на натиск около отвора, която подобно на скоба забавя развитието на опасните уморни пукнатини от I^{вн} тип – пукнатини на разкъсване, увеличавайки значително уморната дълготрайност и сигурността при експлоатация.

Методите за студено разширение на отвори (СРО) посредством преминаващ по направление на оста на отвора деформиращ елемент със стегнатост са широко използвани в практиката. Най-често използваните методи са Split Sleeve Cold Expansion (SSCE) и Split Mandrel Cold Working (SMCW). Двата метода изискват технологични цикли, съдържащи голям брой контролни операции в съчетание с тесен допуск на размера на предварително обработените СО. За преодоляване на тези недостатъци е изобретен модифициран вариант на метода SMCW. Модифицираният Split Mandrel Cold Working (MSMCW) метод осигурява постоянна стегнатост при относително широк допуск на първоначалния диаметър на отвора. В резултат технологичният цикъл за СРО се редуцира, което значително редуцира времето и общите производствени разходи.

Дисертационната работа е насочена към оценка на ефективността на MSMCW за подобряване на характеристиките на surface integrity (SI) около отворите в корелация с уморното поведение на пулсиращ опън на образци от алуминиева сплав 2024-T3. Получените експериментални резултати съответстват на най-лошия сценарий на разсейване на диаметрите на предварително обработените СО, т.е. всички експериментални изследвания са проведени в условията на прекомерно голямо разсейване в сравнение с обичайните за инженерната практика допуски на диаметрите на обработените СО.

Цел и задачи на дисертационния труд

Основна цел на дисертационната работа е експериментално да се оцени ефективността на новия Модифициран Split Mandrel Cold Working (MSMCW) метод за подобряване на SI около СРО и повишаване на УД на конструкционни елементи от алуминиева сплав 2024-T3 в условията на относително голям допуск на предварително обработените отвори.

За постигане на целта са решени следните основни задачи:

- 1). Систематизирани и анализирани са основните подходи и реализиращите ги съвременни методи/техники за повишаване на УД на конструкционни елементи със СО;
- 2). Оценени са параметрите на инструмент и устройство за реализация на MSMCW;
- 3). Изследвани са характеристики на SI на материала около СРО в аспект на разпределение на ОН, микротвърдост и микроструктура в образци тип втулки, подложени на студено разширение посредством MSMCW в условията на относително голям допуск на предварително обработените отвори;
- 4). Проведено е сравнително експериментално изследване на уморното поведение на плоски уморни образци със СО от алуминиева сплав 2024-T3, подложени на студено разширение чрез MSMCW в условията на относително голям допуск на предварително обработените отвори.

Методи на изследване

Проведени са серия експериментални изследвания върху образци от алуминиева сплав 2024-T3, аналог на D16T, които включват: микроструктурен анализ чрез оптична микроскопия и SEM; изследване на профилите на микротвърдостта в дълбочина от повърхнината на отворите; X-ray diffraction анализ за оценка на окръжните ОН; уморни тестове на пулсиращ опън на плоски образци с отвори.

Авторът защитава

- ◆ Морфологична класификационна схема на основните подходи и реализиращите ги методи за повишаване на УД на метални конструкционни елементи със СО;

- ◆ Ефективността на MSMCW метод за осигуряване на интензивна и дълбока зона с полезни окръжни ОН на натиск в образци тип втулки от алуминиева сплав 2024-T3 в условията на прекомерно голямо разсейване на диаметрите на предварително обработените отвори;

- ◆ Ефективността на MSMCW метод за уякчаване и модифициране на материала около СРО в алуминиева сплав 2024-T3;

- ◆ Полезният ефект от хомогенизиране на ОН в осово направление чрез отстраняване на пластично деформиран слой с подходяща дебелина около отворите при финалното райбероване за подобряване на УД на пулсиращ цикъл на алуминиева сплав 2024-T3;

- ◆ $S - N$ криви на умора на пулсиращ цикъл, доказващи ефективността на MSMCW метод в условията на прекомерно голямо разсейване на диаметрите на предварително пробитите отвори за повишаване на УД на алуминиева сплав 2024-T3 повече от шест пъти (на база якост на умора при 10^6 цикъла) в сравнение с конвенционалния случай на обработка на отвори само с рязане.

Практическа полезност

MSMCW метод осигурява интензивна и дълбока зона с въведени полезни окръжни ОН на натиск и модифицира материала около СО в условията на голям допуск на диаметрите на предварително обработените отвори, което води до значително подобряване на УД. Следователно, прилагането на MSMCW в условията на обичайните за инженерната практика допуски на диаметрите на предварително обработените отвори ще редуцира разсейването на характеристиките на SI около СРО. В резултат значително ще се подобри уморното поведение на компоненти със СО от алуминиеви слави, осигурявайки по-благоприятно отношение цена/качество.

Апробация на работата

Дисертационната работа е докладвана и обсъждана на разширено заседание на катедра “Материалознание и механика на материалите” при ТУ – Габрово. Етапи от дисертационната работа са публикувани в международно списание „Metals“ (Impact Factor 2.5, 2025г.), списание „Известия на ТУ- Габрово“, International Scientific Conference, “Mechatronic, Eco – and energy saving systems and technology”- Габрово, International Scientific Conference Unitech’24- Габрово.

Публикуване

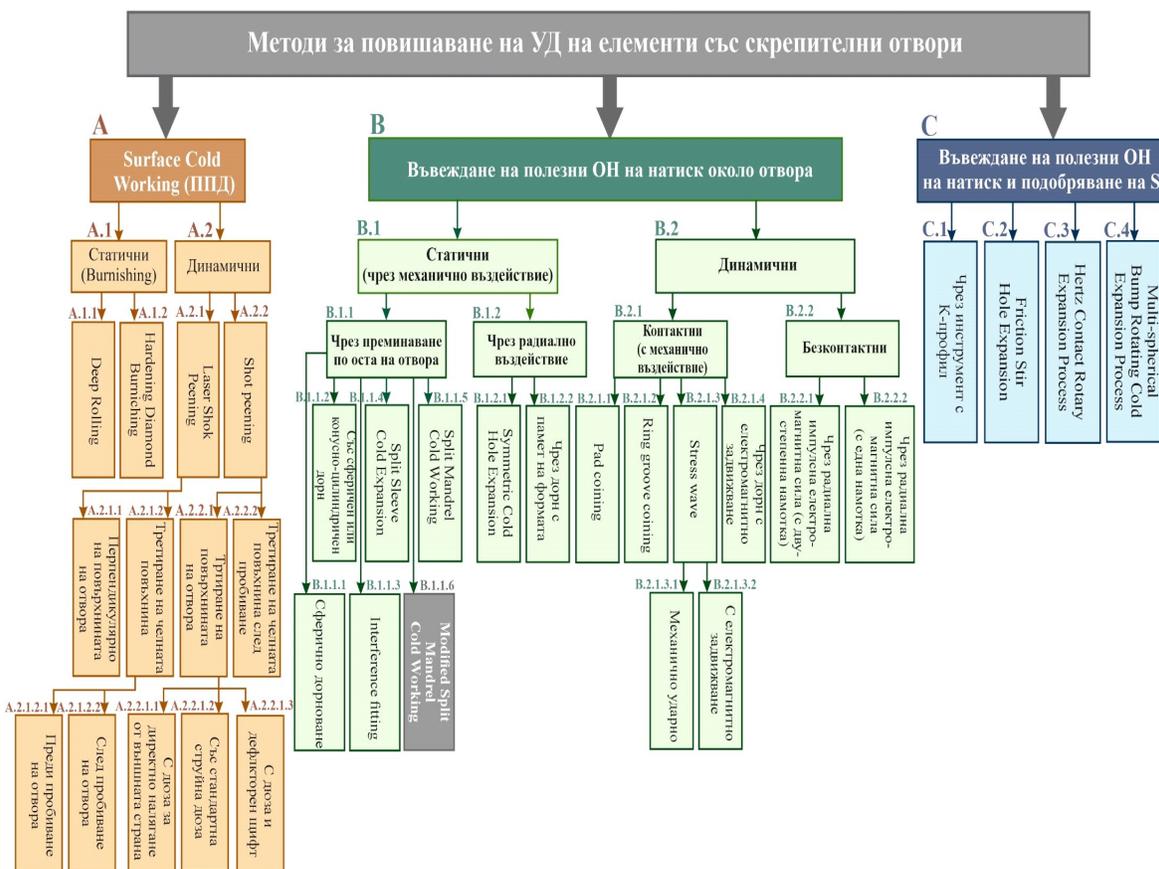
По темата на дисертацията са публикувани една статия в международно списание „Metals”, национално списание от националния референтен списък (сп. „Известия на ТУ- Габрово) и три научни доклада в международни научни конференции научно рецензирани.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава 1. СЪВРЕМЕННО СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА ЗА ПОВИШАВАНЕ НА УМОРНАТА ДЪЛГОТРАЙНОСТ НА КОНСТРУКЦИОНИ ЕЛЕМЕНТИ СЪС СКРЕПИТЕЛНИ ОТВОРИ

1.2. Обобщена класификационна схема на методите за повишаване на уморната дълготрайност на конструкционни елементи със скрепителни отвори

Общ подход за въвеждане на ОН на натиск в метални конструкционни елементи е механичното третиране чрез студено пластично деформиране (mechanical cold working). На тази основа в дисертационния труд е предложена обобщена класификационна схема на методите за подобряване на уморната дълготрайност (УД) на метални конструкционни елементи със СО (фиг. 1.7).



Фиг. 1.7. Обобщена класификационна схема на методи за повишаване на УД на конструкционни елементи със СО

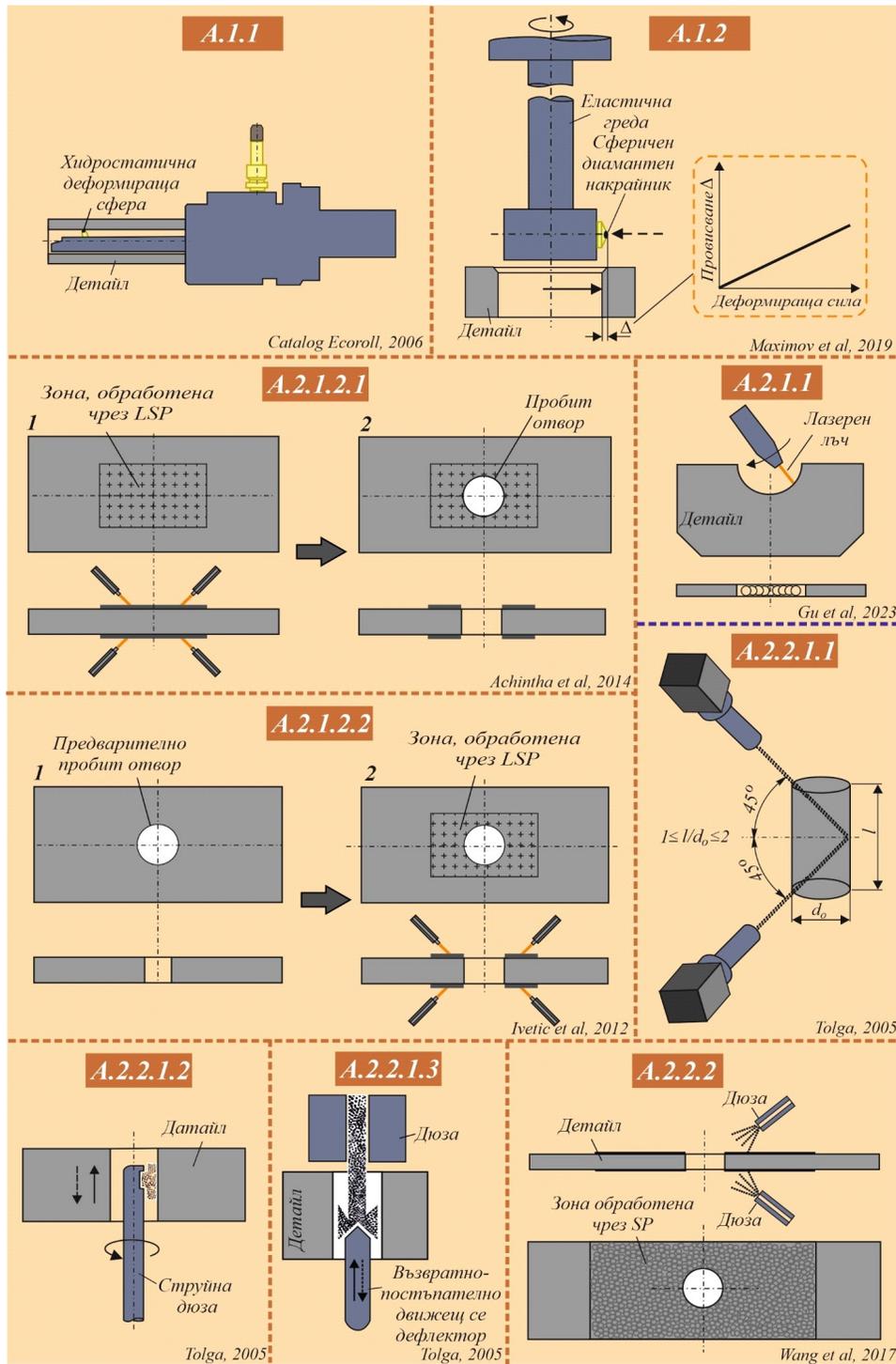
Обект на систематизиране са утвърдените методи в инженерната практика и разработените през последните години нови методи за третиране на отвори. Обобщената класификационна схема е разработена на основата на диференциално морфологичния метод, използвайки йерархично организирани признаци и подпризнаци. Всеки елемент се идентифицира еднозначно със съответен буквен или буквено-цифров код в съответствие с йерархичното ниво на използваните морфологични признаци и подпризнаци. В обобщената класификационна схема (фиг. 1.7) за основни класификационни признаци на първо ниво са приети следните основни подходи за модифициране на материала около СО, означени както следва:

- А – ППД (Surface cold working);
- В – Въвеждане на полезни окръжни ОН на натиск;

• С – Едновременно въвеждане на полезни окръжни ОН на натиск и подобряване на SI.
 На следващите йерархични нива в обобщената класификационна схема, за всеки от основните подходи е направена класификация на реализиращите ги методи, като са избрани определящи техни характеристики, приети за подпризнаци.

1.3. Анализ на съвременните методи за повишаване на УД на конструкционни елементи със СО

1.3.1. Методи за ППД

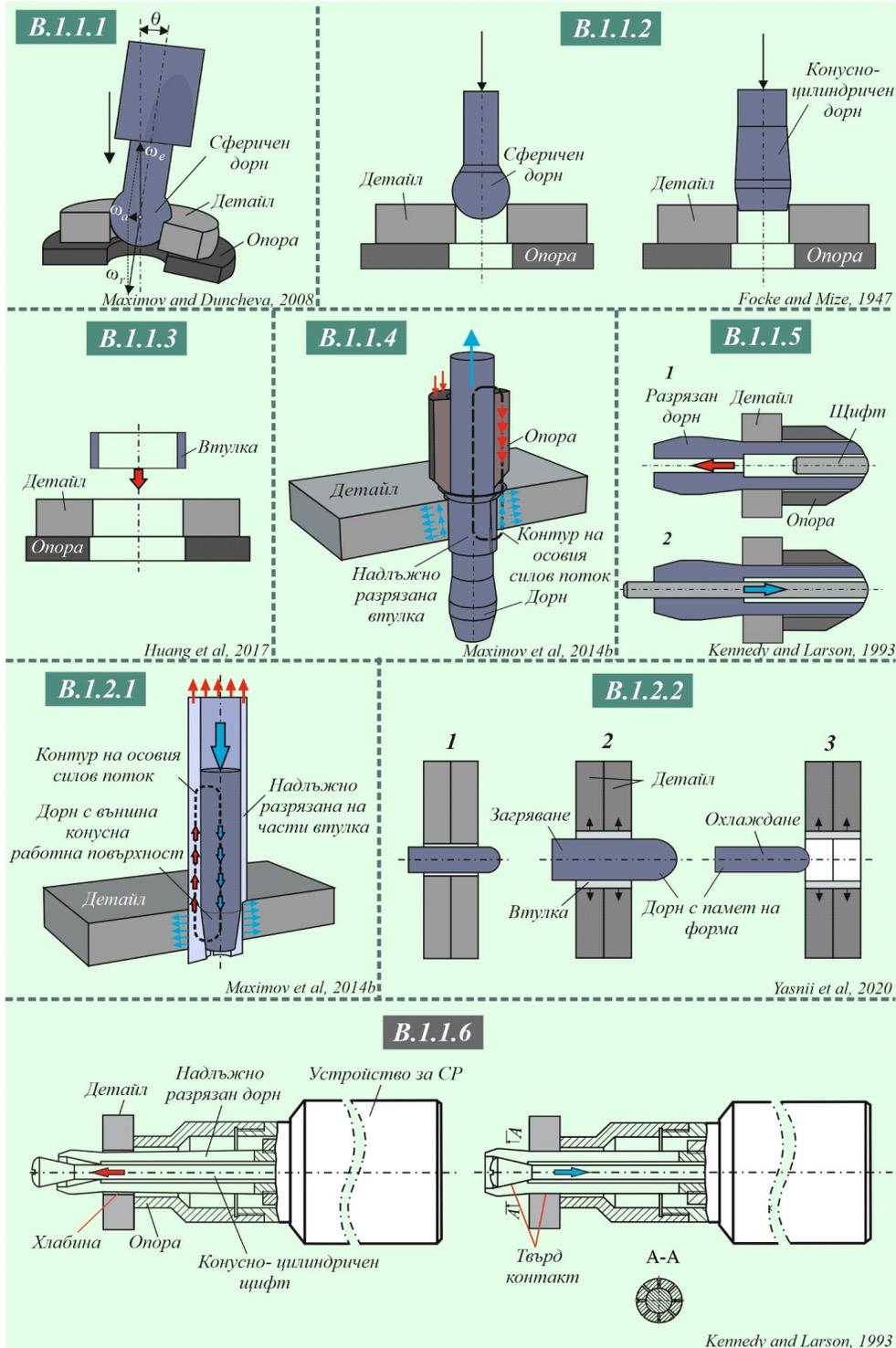


Фиг. 1.8 Принципни схеми на методи за ППД на отвори

Принципните схеми на най-широко използваните статични методи (група А.1) и динамични методи (група А.2) за ППД на отвори са показани на фиг. 1.8. Означенията на методите съответстват на приетите означения в обобщената класификационна схема (фиг. 1.7).

1.3.2. Методи за въвеждане на полезни окръжни ОН на натиск

1.3.2.1. Статични методи (група В.1)

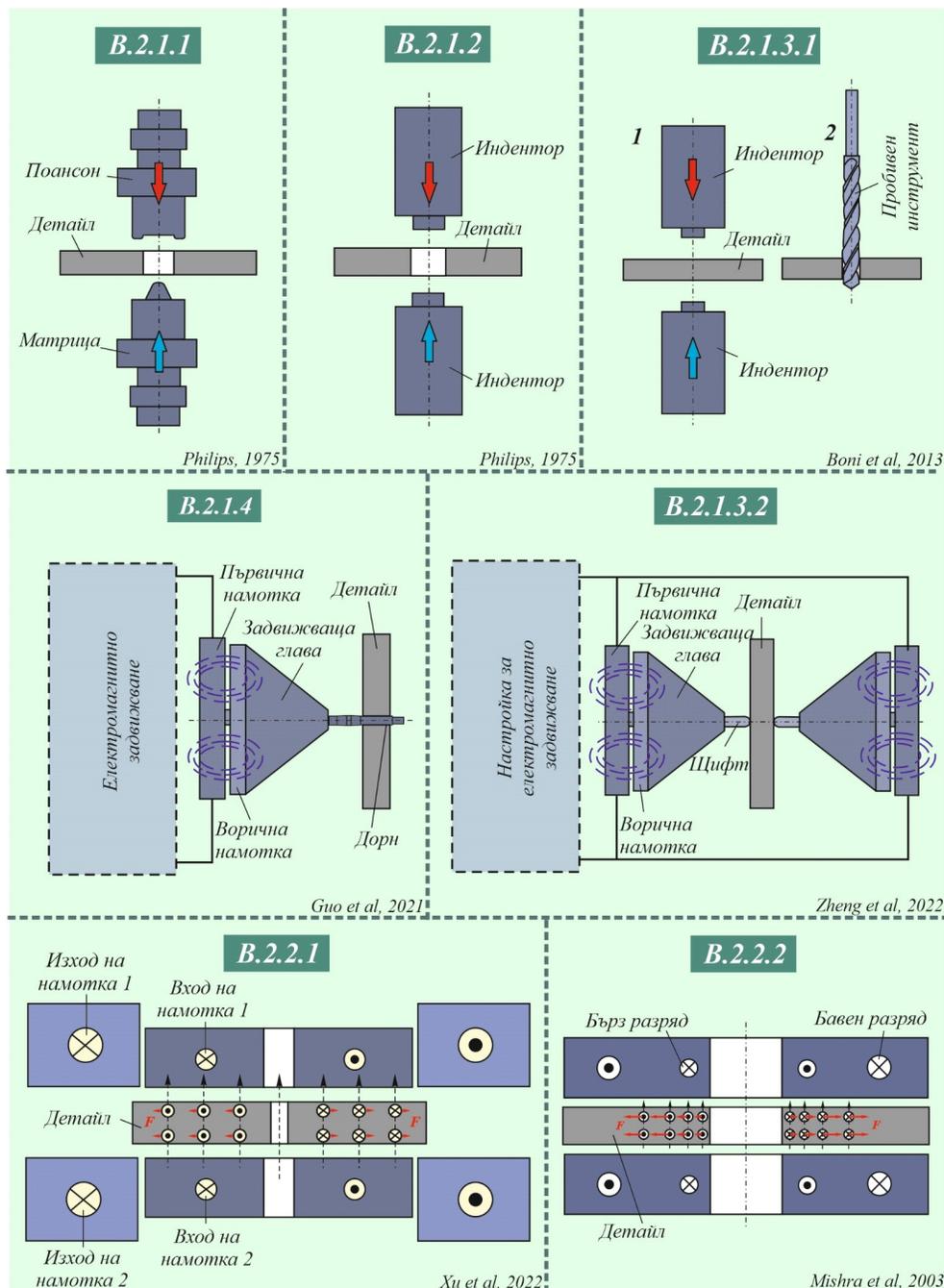


Фиг. 1.9 Принципни схеми на статични методи за въвеждане на полезни ОН на натиск

Принципните схеми на най-разпространените статични методи са визуализирани на фиг. 1.9, като означенията им съответстват на тези на фиг. 1.7.

1.3.2.2. Динамични методи (група В.2)

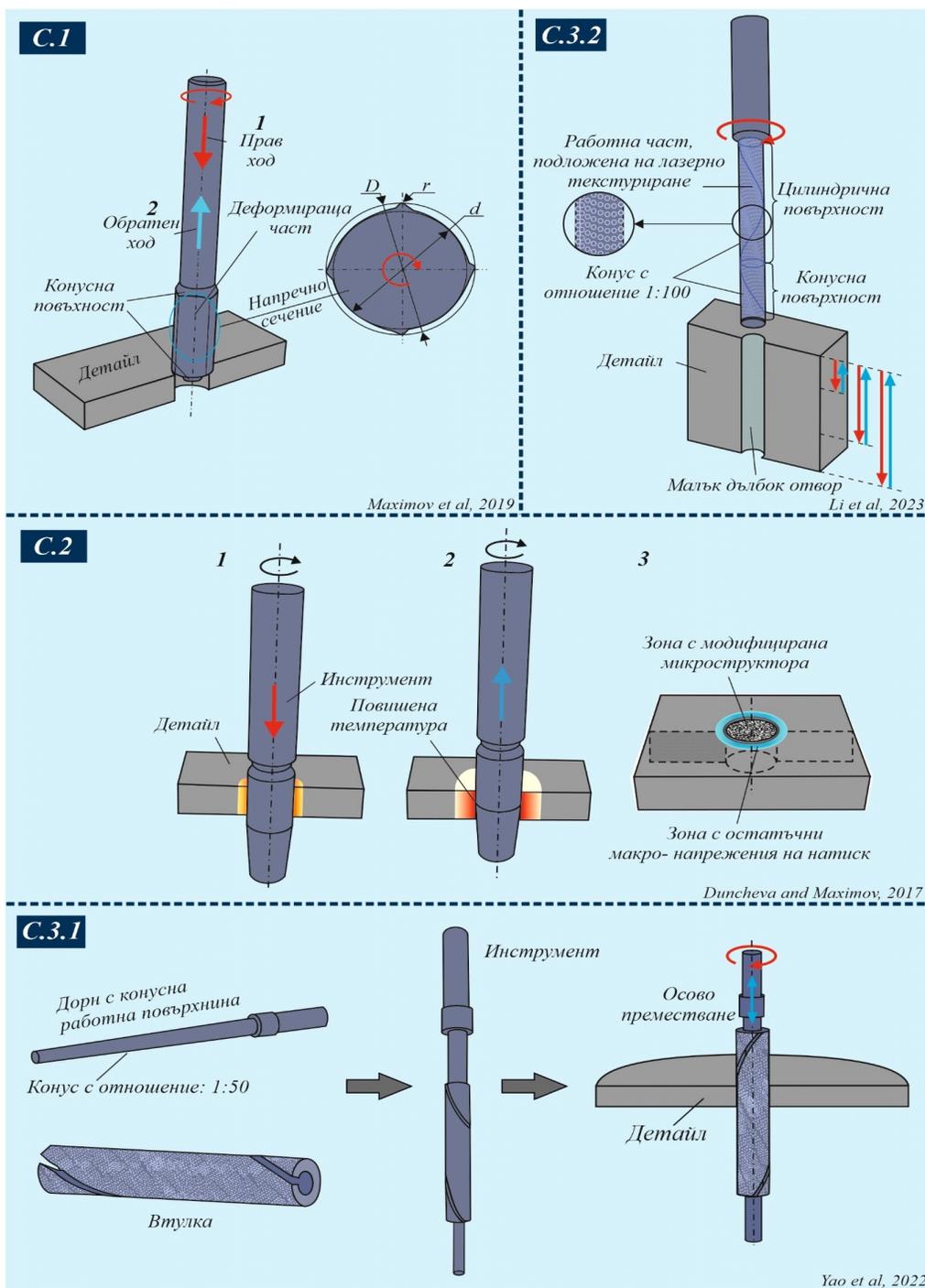
Принципни схеми на динамичните методи за *въвеждане на полезни ОН на натиск* са показани на фиг. 1.10. Според начина на прилагане на динамичното въздействие, методите от група В.2 са (фиг. 1.7): 1). Контактни (чрез механично въздействие) (подгрупа В.2.1) и 2). Безконтактни (чрез радиална пулсираща електромагнитна сила) (подгрупа В.2.2).



Фиг. 1.10 Принципни схеми на динамичните методи за въвеждане на полезни ОН на натиск

1.3.3. Методи за въвеждане на полезни окръжни ОН на натиск и подобряване на SI

Методите от група С (фиг. 1.7) преследват едновременно два ефекта: 1). Въвеждане на полезни окръжни ОН на натиск; 2). Модифициране на комплексното състояние на материала (SI) около отворите. За тази цел методите от тази група имат обща физическа основа – между съответните инструменти и повърхнината на отвора е налице тангенциален контакт както в осово, така и в окръжно направление. В резултат, кинематиката на съответните инструменти включва въртене около оста на отвора и трансляция по тази ос, т.е. винтово движение. Принципните схеми на методите от група С са показани на фиг. 1.11.



Фиг. 1.11 Принципни схеми на методи за въвеждане на полезни ОН на натиск и подобряване на SI

Глава 2. СЪЩНОСТ И РЕАЛИЗАЦИЯ НА МОДИФИЦИРАН МЕТОД ЗА СТУДЕНО РАЗШИРЕНИЕ НА СКРЕПИТЕЛНИ ОТВОРИ

2.1. Анализ на базовия метод SMCW

Основната идея на SMCW да се елиминира скъпоструващата надлъжно разрязана втулка с вътрешно мазане за еднократна употреба при конкурентния метод SSCE (фиг. 1.9, схема В.1.1.4), която изпълнява ролята на посредник между конусно-цилиндричния дорн и повърхнината на предварително обработения отвор в процеса на СР. Методът е разработен за приложение върху алуминиеви сплави, използвани в аероиндустрията. Проведеният анализ на технологичния цикъл на базовия метод SMCW показва следното:

1) Необходим е много тесен допуск на диаметралния размер на предварително обработените отвори, което изисква включване на операцията зенекроване след свредловане на отворите;

2) Технологичният цикъл съдържа голям брой операции (общо 11 операции), 4 от които са операции за контрол;

3) Стегнатостта варира в рамките на допуската на диаметъра на предварително обработения отвор, тъй като се определя от разликата между диаметъра d_t на „вкоравения“ дорн и диаметъра на предварително обработения отвор d_o .

4) Изискват се добре обучени оператори.

Изпълнението на условия 1) – 4) значително повишава цената на обработката.

2.2. Същност на Модифицирания Split Mandrel Cold Working (MSMCW) метод

Модифицираният Split Mandrel Cold Working (MSMCW) метод е изобретен от Maximov и Duncheva като контрапункт на посочените по-горе недостатъци на базовия метод SMCW. В основата на MSMCW е идеята за трансформиране на процеса на СРО от размерен в неразмерен. Инструментът и устройството, реализиращи MSMCW, осигуряват постоянна стегнатост в условията на относително по-широк допуск на диаметралния размер на предварително обработените отвори. При тази постановка, MSMCW метод може да се прилага, когато отворите са изработени само чрез свредловане. Това позволява да се елиминира операцията зенкерование, задължителна при базовия метод SMCW. В резултат се намалява общото време, необходимо за обработване на един отвор и общите производствени разходи.

2.2.1. Етапи на технологичния цикъл

Фиг. 2.3 показва геометрията на инструмента и основните етапи на СРО на отвори, използвайки разработените инструмент и устройство. Инструментът включва частично надлъжно разрязан дорн, така че да се образуват най-малко три симетрични сегмента. В осовия отвор на дорна е позициониран аксиално подвижен конусно-цилиндричен щифт. Работната част на дорна се състои от две конусни повърхнини, свързани с цилиндрична повърхнина. Конусната повърхнина на щифта контактува с повърхността на конусен отвор, изработен в разрязания край на дорна. Двете конусни повърхнини имат еднакъв ъгъл на наклона α и се разширяват по посока на разрязания край на дорна.

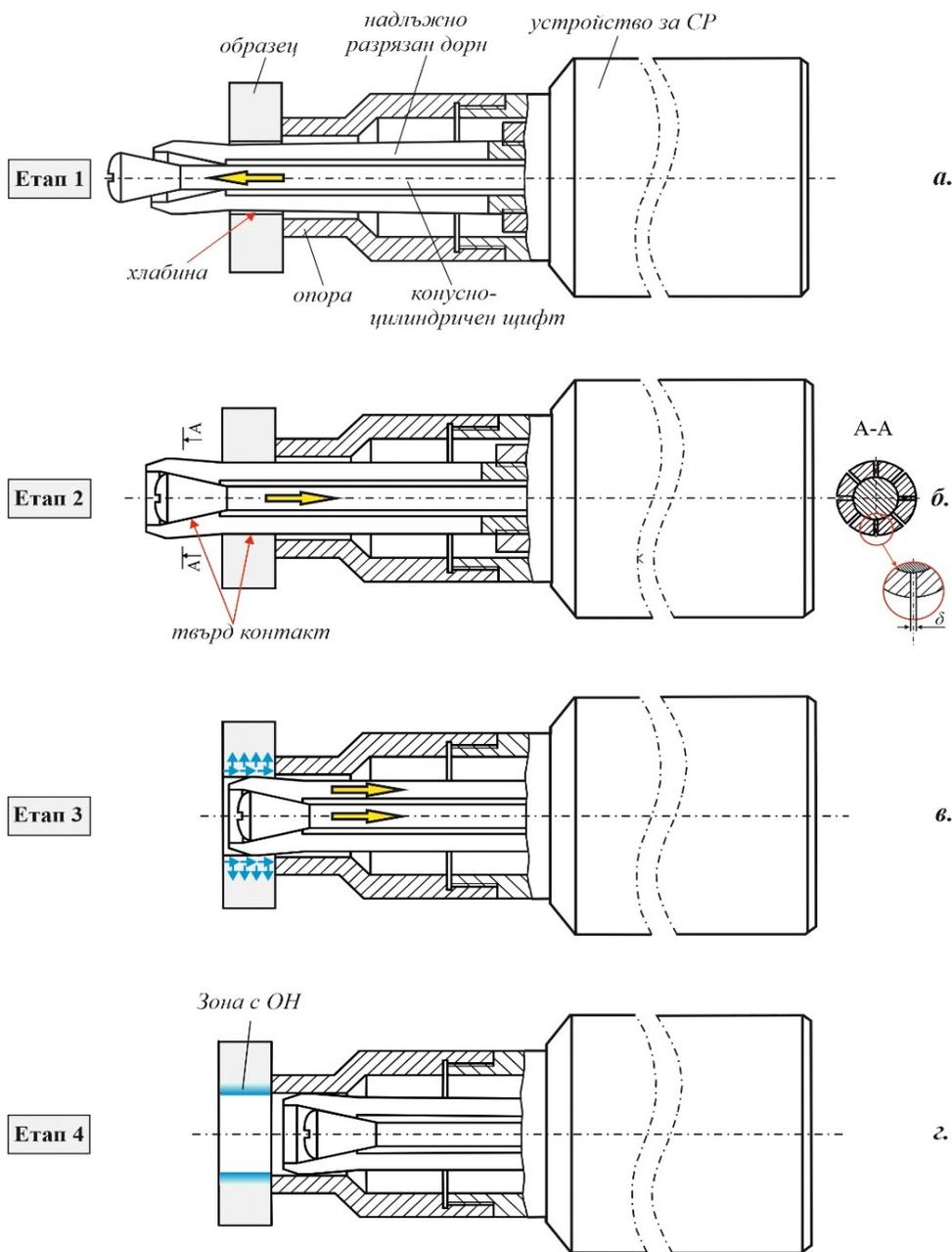
Процесът на СРО в съответствие с MSMCW включва следните етапи (фиг. 2.3):

I етап: Въвеждане на дорна на инструмента в предварително пробития отвор (фиг. 2.3.а).

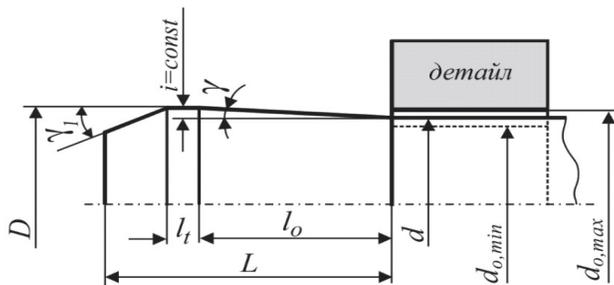
II етап: Компенсиране на хлабината между установъчната цилиндрична повърхнина на дорна и стресирания отвор (фиг. 2.3 б).

III етап: Студено разширение на отвора (фиг. 2.3.в);

IV етап: Излизане на работната част от инструмента от стресирания отвор и формиране на зона с полезни окръжни ОН около отвора (фиг. 2.3. г).



Фиг. 2.3. Етапи на технологичния цикъл при MSMCW метод



Фиг. 2.4. Геометрия на работната част на дорна

Достигането на плътен контакт гарантира постоянна стегнатост при реализацията на СРО, тъй като последната зависи единствено от разликата между диаметъра D на работната цилиндрична част от дорна и диаметъра d на цилиндричната повърхнина на същия (фиг. 2.4);

2.2.2. Геометрични изчисления

След осигуряване на твърд контакт, т.е. след финализиране на Етап II, стегнатостта по

време на СРО е постоянна величина (фиг. 2.4):

$$i = D - d = const \quad (2.2)$$

Степента на студено разширение DCE е числено равна на окръжната линейна деформация ε_t в точките от повърхнината на отвора. Нейното изменение се определя от граничните стойности на диаметъра на обработваните отвори $d_{o,min}$ и $d_{o,max}$ (фиг. 2.4):

$$DCE_{min} = \varepsilon_{t,min} = \frac{i}{d_{o,max}} \times 100, \% \quad (2.3)$$

$$DCE_{max} = \varepsilon_{t,max} = \frac{i}{d_{o,min}} \times 100, \% \quad (2.4)$$

Ф-ли (2.3) и (фиг. 2.4) показват, че разсейването на DCE е незначително в сравнение със значително по-големия интервал на изменение на диаметъра на предварително обработените отвори d_o . Следователно, широкият допуск на диаметрите на предварително обработените отвори при MSMCW метод води до относително малко изменение на DCE .

Геометричното условие за безпрепятствено вкарване на надлъжно разрязания дорн в предварително обработените отвори в граничния вариант се определя от геометричните параметри на дорна и минималния диаметър на отворите:

$$\sqrt{D^2 - \delta^2} - \frac{\delta}{\operatorname{tg}\left(\frac{180}{n_s}\right)} \leq d_{o,min} \quad (2.5)$$

2.3. Инструмент и устройство, реализиращи MSMCW метод

Инструментът, реализиращ MSMCW, е показан на фиг. 2.5.



Фиг. 2.5. Общ вид на инструмента, реализиращ MSMCW процес

В съответствие с изобретението, инструментът включва надлъжно разрязан дорн и конусно-цилиндричен щифт, фиксирани към устройството чрез резби. Четири симетрични сегмента са оформени в частично надлъжно разрязания дорн, като широчината на прорезите в дорна е $\delta = 0.5 \text{ mm}$. Компонентите на инструмента в предна позиция и задна (работна) позиция на щифта по отношение на разрязания дорн са показани съответно на фиг. 2.5а и 2.5б.

Хлабина съществува за всички третирані отвори, с изключение на тези, обработени на горната граница на диаметралния размер. Геометричните параметри на работната част на разрязания дорн в съответствие с означенията от фиг. 2.4 са показани в таблица 2.1:

Геометрични параметри на работната част на разрязания дорн Таблица 2.1.

d, mm	D, mm	l_t, mm	l_o, mm	L, mm	γ, deg	γ_1, deg	δ, mm
8.05	8.37	2	11.17	13.4	1	10	0.5

За стегнатостта i следва:

$$i = D - d = 8.37 - 8.05 = 0.32 \text{ mm} = const \quad (2.6)$$

За посочените геометрични параметри в табл. 2.1, брой на сегментите на разрязания дорн $n_s = 4$ и за $d_{0,min} = 8.00 \text{ mm}$ условието за безпрепятствено влизане на инструмента в отворите е изпълнено:

$$\sqrt{8.37^2 - 0.5^2} - \frac{0.5}{\operatorname{tg}\frac{\pi}{4}} = 7.855 \text{ mm} < d_{0,min} \quad (2.7)$$



Общ вид на устройството с хидравлично задвижване и инструмента, реализиращи технологичния цикъл на MSMCW в съответствие с етапи I-IV, е показан на фиг. 2.6.

Фиг.2.6. Устройство с хидравлично задвижване и инструмент, реализиращи MSMCW метод

2.4. Изводи

► Проведеният сравнителен анализ на технологичните цикли, използвани при конкурентните методи SSCE и SMCW потвърждава, че те реализират принципно една и съща концепция: размерен процес на СРО, респ. много тесен допуск на предварително обработените отвори в условията на едностранен достъп до съответните компоненти. Това рефлектира върху: 1) голям брой операции, в т.ч. зенкерование и операции за контрол; 2) стегнатостта е променлива величина в рамките на допуската на предварително обработените отвори; 3) значително повече време и производствени разходи;

► Модифицираният метод съчетава конкурентното предимство на базовия метод SMCW за елиминиране на скъпо струващата надлъжно разрязана втулка – посредник за еднократна употреба с възможността за СРО в условията на относително широк допуск на диаметъра на предварително обработените отвори. Това осигурява следните предимства на MSMCW в сравнение с базовия метод: 1) По-малко операции вследствие елиминиране на зенкерование на отворите и две операции за контрол по геометричен критерий на отворите и работната част на инструмента; 2) Осигуряване на СРО с постоянна стегнатост; 3). Не са необходими добре обучени оператори; 4). Значително по-малко време и общи производствени разходи;

► Проектирани и изработени са функционално свързани инструмент, предназначен за стресиране на отвори с номинален диаметър на отвора $d_o = 8 \text{ mm}$ и устройство с хидравлично задвижване, реализиращи MSMCW.

Глава 3. ЕФЕКТИВНОСТ НА MSMCW МЕТОД ЗА ПОДОБРЯВАНЕ НА SURFACE INTEGRITY В ОБРАЗЦИ ТИП ВТУЛКИ ОТ АЛУМИНИЕВА СПЛАВ 2024-T3

3.1. Основна цел

Целта на изследването е да се оцени в количествен и качествен аспект ефективността на MSMCW метод по отношение на основни характеристики на SI, които имат определящо значение за подобряване на уморното поведение на конструкционни елементи със СО. Такива характеристики са разпределението на окръжните ОН, микроструктурата и профилът на

микротвърдостта на материала около отворите. Отчитайки възможността на MSMCW метод за компенсиране на първоначалната хлабина между повърхнината на отвора и инструмента, изменението на посочените характеристики на SI е изследвано в условията на относително широк допуск на диаметъра на предварително обработените отвори.

3.2. Материал и методи на изследване

3.2.1. Материал

Изследваният материал е високояка алуминиева сплав 2024-T3, получена във вид на горещо валцувани пръти с диаметър 32 mm. За определяне на химичния състав е използван оптичен емисионен спектрометър, като минималната стойност на стъпката за определяне съдържанието на химични елементи в тегловни проценти е 0,001. Химичният състав на сплавта е показан в таблица 3.1.

Химичен състав на алуминиева сплав 2024-T3 във вид на пръти

Таблица 3.1.

<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Cr</i>
94.03	0.746	0.485	1.64	0.764	1.67	0.0192	0.0382
<i>Ni</i>	<i>Ti</i>	<i>Be</i>	<i>Ca</i>	<i>Li</i>	<i>Pb</i>	<i>Sn</i>	<i>Sr</i>
0.0186	0.0280	<0.0001	>0.0200	0.0025	0.237	0.0237	0.0004
<i>V</i>	<i>Na</i>	<i>Bi</i>	<i>Zr</i>	<i>B</i>	<i>Ga</i>	<i>Cd</i>	<i>Co</i>
0.0106	0.0156	0.0203	0.0074	<0.0005	0.0237	<0.0010	<0.0020
<i>Ag</i>	<i>Hg</i>	<i>In</i>	<i>Sb</i>	<i>Ce</i>	<i>La</i>	<i>Mo</i>	<i>Sc</i>
0.0018	<0.0050	0.0116	0.140	0.0197	0.0055	0.0037	<0.0005

3.2.2. Експериментални образци

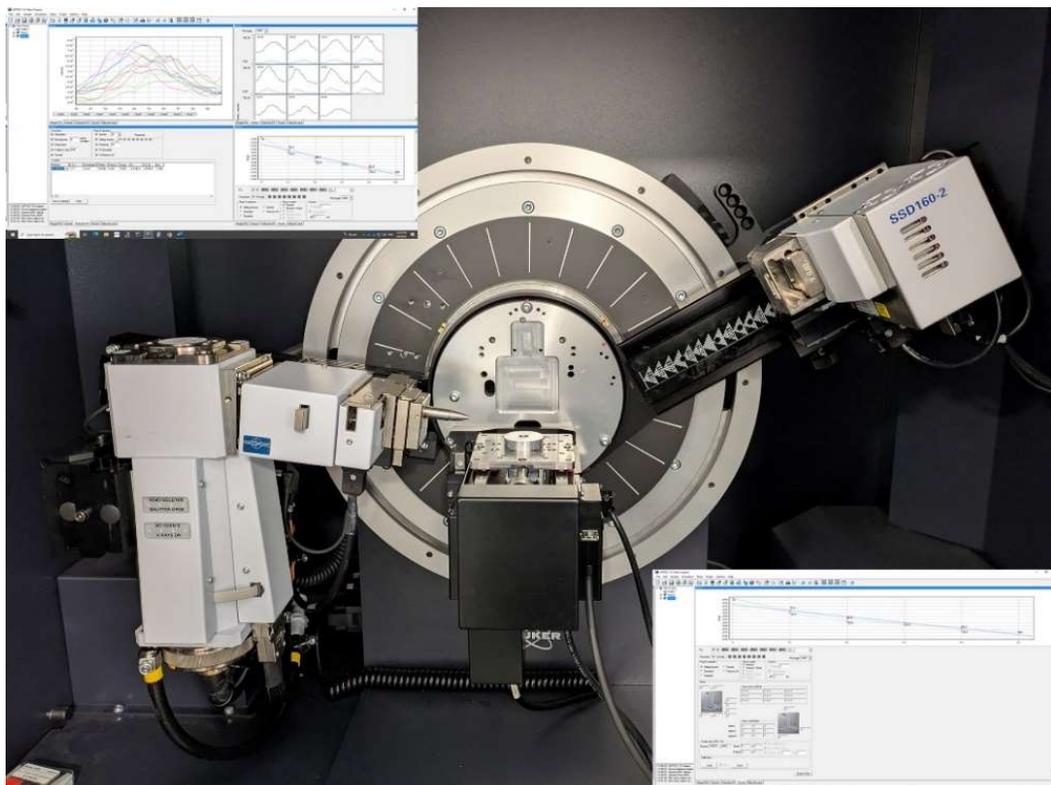
Експерименталните образци са тип втулки с номинални габаритни размери: външен диаметър $D = 32 \text{ mm}$ и височина (дебелина) $\delta = 6 \text{ mm}$. За да се оцени влиянието на разсейването на диаметъра на предварително обработените отвори, изследванията са проведени върху образци, чиито отвори са пробити и райберовани с различен номинален диаметър. Ососиметричната геометрия на образците гарантира коректни изводи за влиянието на параметрите на процеса върху разпределението на ОН, профила на микротвърдостта и микроструктурата.

3.2.3. Методи на изследване

3.2.3.1. X-ray diffraction анализ за измерване на остатъчните напрежения

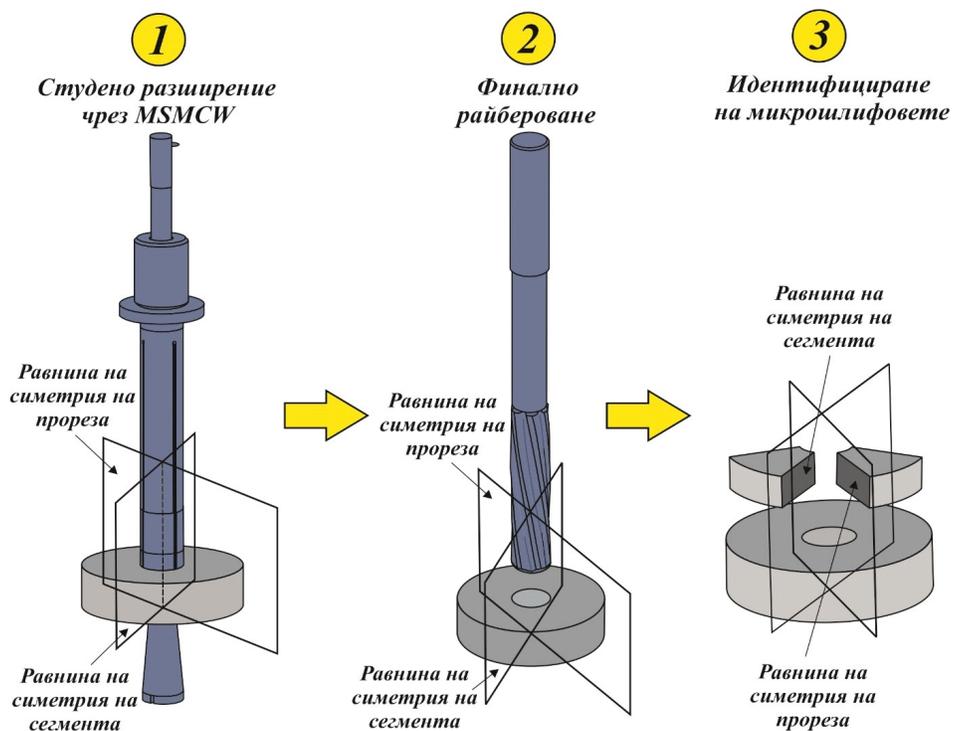
Обект на измерване са окръжните ОН върху челните страни на образците в радиално направление от ръба на отвора по входната и изходната страна на инструмента. За измерването на ОН беше използван дифрактометър D8 ADVANCE с колиматор с pin-hole $\varnothing 1.0 \text{ mm}$. Режимът на работа на рентгеновата тръба (високо напрежение/ток) е с 30 kV/ 40 mA. За определяне на ОН е използван $\sin^2\psi$ методът и числена процедура, базирана върху метода на най-малките квадрати.

Измереният дифракционен профил на равнината Al {311} има своя максимум при $2\theta \approx 139.3^\circ$ за използваното хромово лъчение, филтрирано чрез VK α филтър. Дифракционните профили са определени по метода Pearson VII, като се изчисляват деформациите на решетката на алуминиевата сплав в направление Al {311}. За обобщения закон на Хук е приложен методът на Winholtz и Cohen, като са използвани еластични константи с големини: $s_1 = -4.514 \text{ TPa}^{-1}$ и $\frac{1}{2}s_2 = 18.19 \text{ TPa}^{-1}$. Параметрите, използвани в X-ray diffraction анализа, са както следва: 2θ диапазон от $135^\circ - 143^\circ$, 2θ стъпка от 0.5° и наклон, дефиниран чрез $\sin^2\psi = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ както за положителни, така и за отрицателни стойности на ъгъл ψ . Ефективната дълбочина на проникване на СтК α лъчението е в диапазона $6.5 - 11.0 \mu\text{m}$. Експерименталната установка за рентгеноструктурен анализ е показана на фиг. 3.1 а, б.



Фиг. 3.1 Експериментална установка за рентгеноструктурен анализ

3.2.3.2. Изследване на микроструктурата



Фиг. 3.2 Схема за идентифициране на илифовете, използвани за анализ на микроструктурата и микротвърдостта



Фиг. 3.3 Сканиращ електронен микроскоп Zeiss Evo 10

За металографски анализ са използвани Металографски микроскоп EURO-MEX IM-Series, снабден с камера CMEX Pro 5, и Сканиращ електронен микроскоп (SEM) Zeiss Evo 10. За изследване на микроструктурата са подготвени шлифове в челните равнини и в осови сечения на образците.

Металографският оптичен микроскоп е използван за микроструктурен анализ в челни равнини на образците.

За анализ на микроструктурата в осови сечения, съответстващи на равнината на симетрия на сегментите и равнината на симетрия на прорезите на разрязания дорн, е използван SEM. Шлифовете в осови сечения са подготвени в сегменти, изрязани от образците според схемата, показана на фиг. 3.2. Тези шлифове са използвани и за измерване на микротвърдостта в осови сечения (виж т. 5.2). Режимът на работа на SEM е в среда на висок вакуум, големина на тока $I = 200 \text{ pA}$ и напрежение $U = 20 \text{ kV}$. Снимка на използвания SEM е показана на фиг. 3.3.

3.2.3.3. Измерване на микротвърдостта

За измерване на микротвърдостта са изработени два вида шлифове: 1) В челните равнини на образците; 2) В осови сечения на сегменти, изрязани от образците в съответствие със схемата, показана на фиг. 3.2. За сравнително изследване на микротвърдостта са изработени три образца – образец без отвор за оценка на микротвърдостта в състояние на доставка и два образца с различни диаметри на предварително обработените отвори – съответно с $d_o = 8.14 \text{ mm}$ и $d_o = 8.30 \text{ mm}$, получени след райберване.



Фиг. 3.4 Микротвърдомер Zwick/Indentec-ZHVμ-S

Обект на сравнение в двете челни равнини на образците са профилите на микротвърдостта в радиално направление. Тези профили са получени като средно-аритметична стойност в четири направления, разположени в две перпендикулярни равнини, стартирайки от точки в близост до ръба на отворите. За двата образца със СРО тези равнини съответстват на равнините на симетрия на сегментите и равнините на симетрия на прореза.

Целта на измерването на микротвърдостта в осовите сечения е да се направи сравнение на микротвърдостта при различни начални диаметри на отворите ($d_o = 8.14 \text{ mm}$ и $d_o = 8.30 \text{ mm}$) в двете характерни равнини на образците, съответстващи на равнината на симетрия на сегментите от разрязаная дорн и равнината на симетрия на прорезите на същия (фиг. 3.2).

Обект на измерване е микротвърдостта в радиално направление в близост до двете челни страни на образците.

За измерване е микротвърдостта е използван полуавтоматичен микротвърдомер *Zwick/Indentec-ZHV μ -S* (фиг. 3.4). С цел да се измери микротвърдостта максимално близо до ръба на отвора, е използвано натоварване от 10 g.

3.3. Ефективност на MSMCW метод върху разпределението на ОН

3.3.1. Постановка на изследването

За да се оцени влиянието на разсейването на диаметъра на предварително обработените отвори, изследванията са проведени върху четири образца, чиито отвори последователно са пробити и райберовани за получаване на различен номинален диаметър, както следва: $d_0 = 8.14, 8.16, 8.20, 8.30$ mm (фиг. 3.5а, б, в, г). Челните равнини на образците са шлифовани.



а. б. в. г.
Фиг. 3.5. Експериментални образци за изследване на окръжните ОН

Според формули (2.3) и (2.4), за граничните стойности на *DCE* се получава:

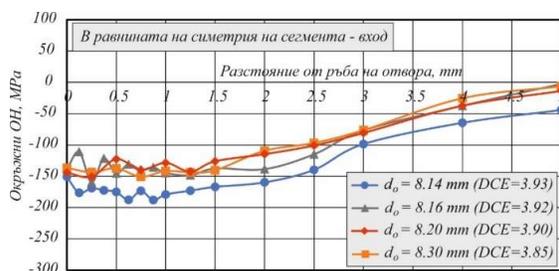
$$DCE_{max} = \varepsilon_{t,max} = \frac{i}{d_{0,min}} = \frac{0.32}{8.14} \times 100 = 3.93 \%$$

$$DCE_{min} = \varepsilon_{t,min} = \frac{i}{d_{0,max}} = \frac{0.32}{8.30} \times 100 = 3.85 \%$$

След СРО е направено последователно финално райбероване за получаване на отвори с диаметри $d = 8.4, 8.5, 8.6$ mm. По този начин е оценено влиянието на дебелината на срязания слой метал около отворите върху еволюцията на окръжните ОН в корелация с диаметъра на предварително обработените отвори d_0 .

3.3.2. Влияние на разсейването на диаметъра на предварително обработения отвор (*DCE*) върху разпределението на окръжните ОН след СРО

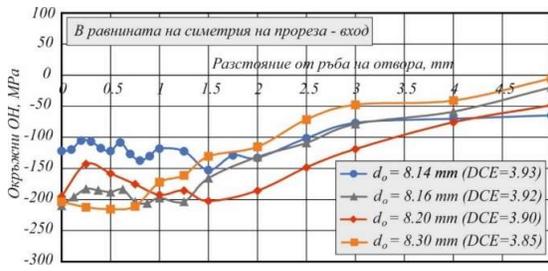
Фиг. 3.ба, б, в, г показва влиянието на разсейването на предварително обработените отвори d_0 , респ. влиянието на изменението на *DCE*, върху разпределението на окръжните ОН, получено непосредствено след СРО. Експерименталните резултати дават основание за следните коментари:



а.



б.



6.

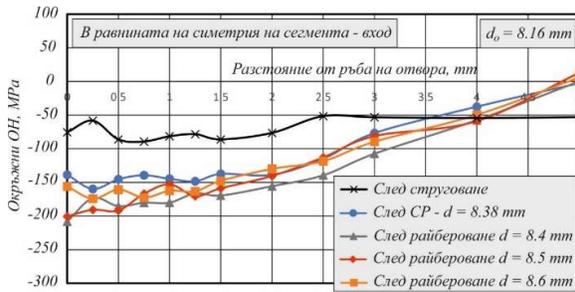


2.

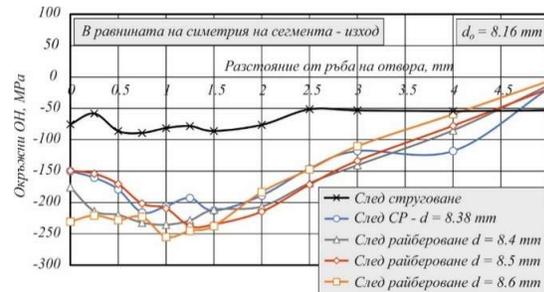
Фиг. 3.6 Влияние на изменението на DCE върху разпределението на окръжните ОН след СРО

3.3.3. Еволюция на ОН в зависимост от дебелината на срязания слой метал около отвора след финално райбероване

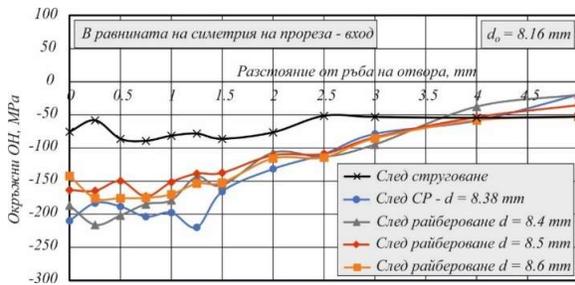
Фиг. 3.7а, б, в, г показва еволюцията на разпределението на окръжните ОН в образец с начален диаметър на отвора $d_o = 8.16 \text{ mm}$ след пробиване и райбероване, СРО и последователно райбероване до получаване на отвори с диаметри $d = 8.4, 8.5, 8.6 \text{ mm}$.



а.



б.



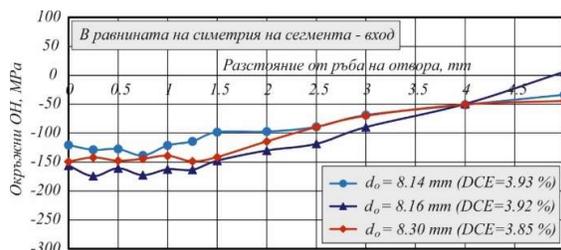
в.



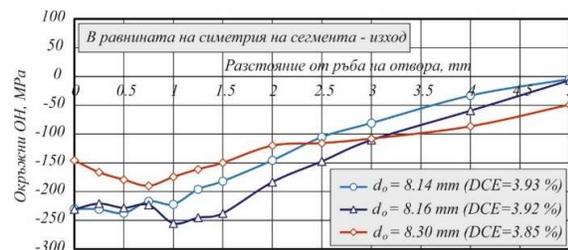
г.

Фиг. 3.7 Еволюция на ОН след струговане, СРО и последователно райбероване

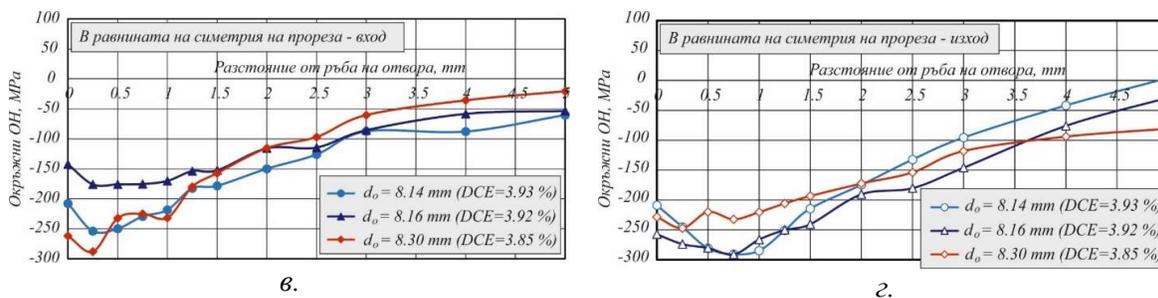
3.3.4. Влияние на разсейването на диаметъра на предварително обработения отвор (DCE) върху финалното разпределение на ОН



а.



б.



Фиг. 3.8. Влияние на разсейването на диаметъра на предварително обработения отвор върху финалното разпределение на ОН

Фиг. 3.8а, б, в, г визуализира финалното разпределение на окръжните ОН в двете характерни равнини на симетрия по входната и изходната страна на образците в зависимост от диаметъра на предварително обработения отвор d_0 .

3.4. Влияние на MSMCW метод върху микроструктурата

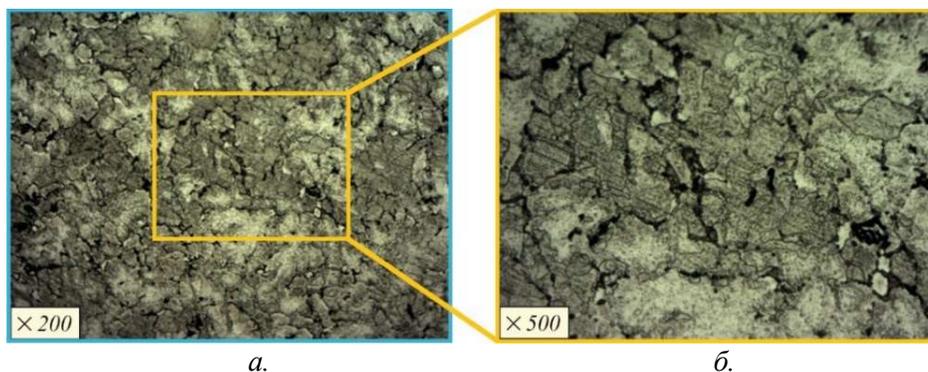
3.4.1. Микроструктура в челни сечения



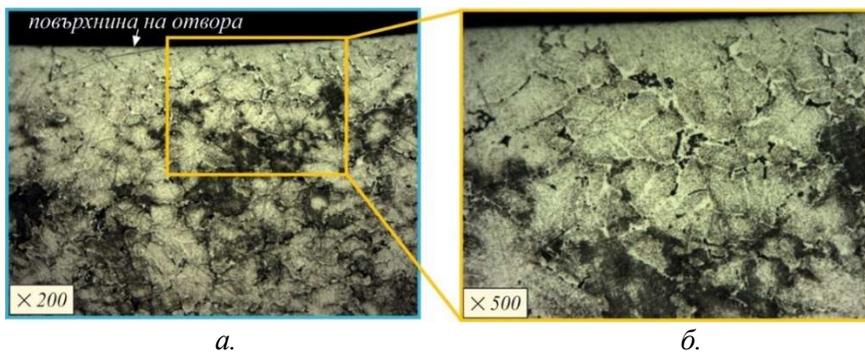
Фиг. 3.9 Пробни тела за микроструктурен анализ в челни равнини

За анализ на микроструктурата в челни сечения на образците, са подготвени 4 броя шлифове, съответстващи на следните четири етапа: 1) В състояние на доставка (без отвор); 2). След пробиване и райбероване на отвора; 3) След СРО, използвайки инструмента и устройството, реализиращи MSMCW процес; 4) След финално райбероване на отвора. Шлифовете са направени по челната страна, съответстваща на входната страна на инструмента за СРО и райберите. Изработените пробни тела са показани на фиг. 3.9.

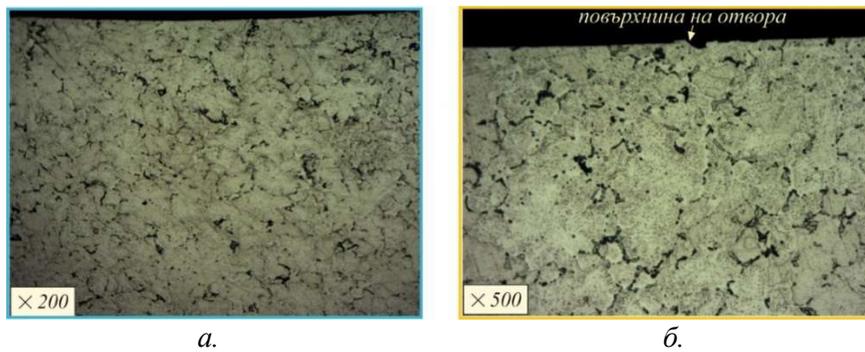
Оптични изображения на микроструктурата за посочените етапи и характерни равнини след СРО при увеличения съответно $\times 200$ и $\times 500$ са показани на фиг. 3.11 – фиг. 3.14.



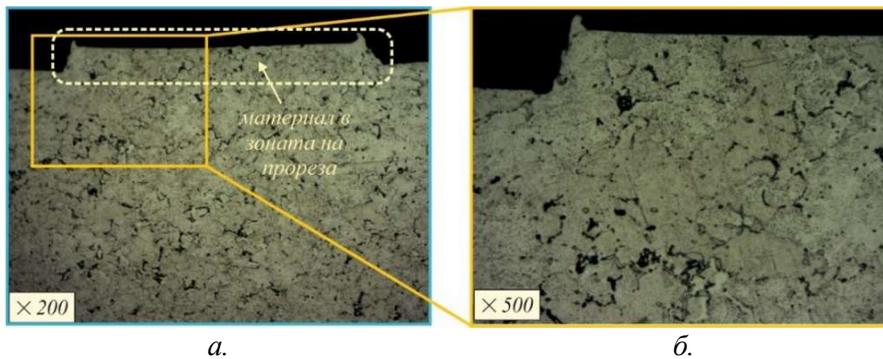
Фиг. 3.10 Оптични изображения на микроструктурата в състояние на доставка



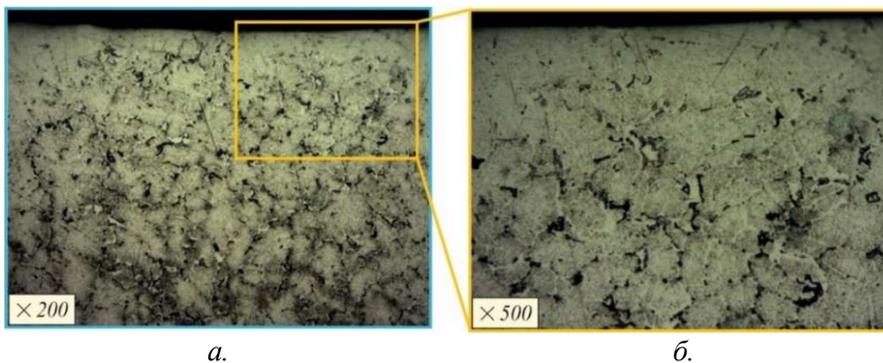
Фиг. 3.11 Оптични изображения на микроструктурата след пробиване и райбероване на отвора



Фиг. 3.12 Оптични изображения на микроструктурата след СРО в зоната на равнината на симетрия на сегмента



Фиг. 3.13 Оптични изображения на микроструктурата след СРО в зоната на равнината на симетрия на прорежа



Фиг. 3.14 Оптични изображения на микроструктурата след финално райбероване на отвора

В зоната на равнината на симетрия на сегмента се наблюдава силно деформиран слой (фиг. 3.12а, б), а в зоната на равнината на симетрия на прорежа очаквано се наблюдава тънка ивица недеформиран в радиално направление материал, тъй като същият не влиза в директен контакт с инструмента (фиг. 3.13).

3.4.2. Микроструктура в осови сечения

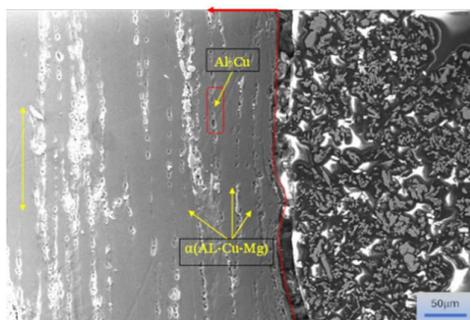
За изследване на микроструктурата в осови сечения са използвани образци тип „втулка“ с диаметър $\Phi 32\text{ mm}$ и дебелина 6 mm с предварително обработени отвори с диаметри, получени след райбероване съответно $d_o = 8.14\text{ mm}$ и $d_o = 8.30\text{ mm}$. След райбероване, отворите в двата образца последователно са подложени на студено разширение чрез MSMCW метод и финално райбероване с райбер с номинален диаметър 8.5 mm (фиг. 3.15).



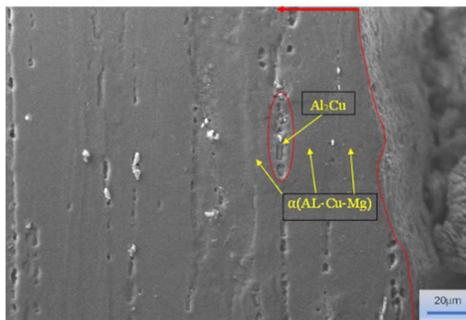
а. б.

Фиг. 3.15 Експериментални образци за изследване на микроструктурата и микротвърдостта в осови сечения

На фиг. 3.16а, б е показана микроструктурата при различни увеличения на образца с първоначален диаметър на отвора $d_o = 8.14\text{ mm}$, в осово сечение, съответстващо на равнината на симетрия на прорежа на инструмента. Фиг. 3.17 показва SEM изображения на микроструктурата на образца с начален диаметър на отвора $d_o = 8.14\text{ mm}$, в зоната, деформирана от средата на сегмента на разрязания дорн.

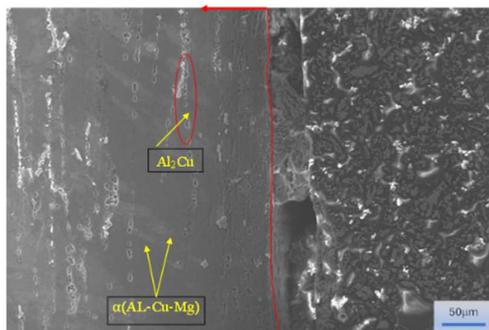


а.

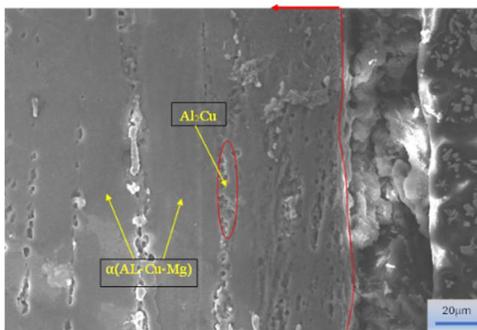


б.

Фиг. 3.16 SEM изображения на микроструктурата на образец с първоначален диаметър на отвора 8.14 mm , в зона, съответстваща на средата на прорежа на инструмента

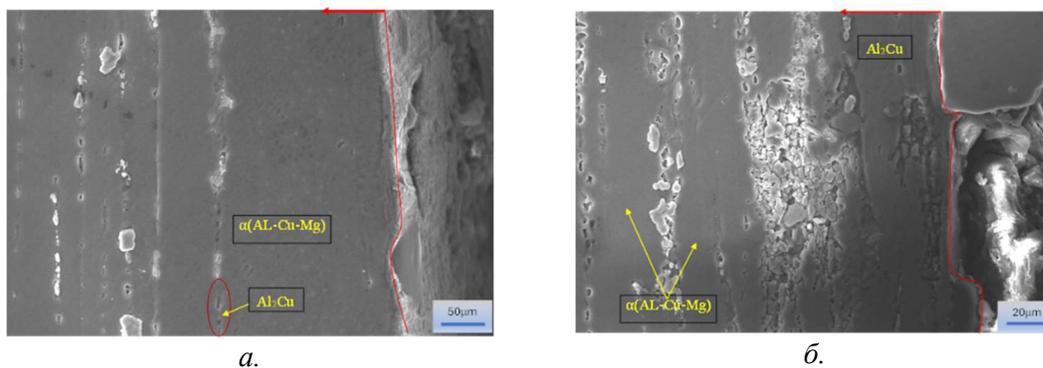


а.

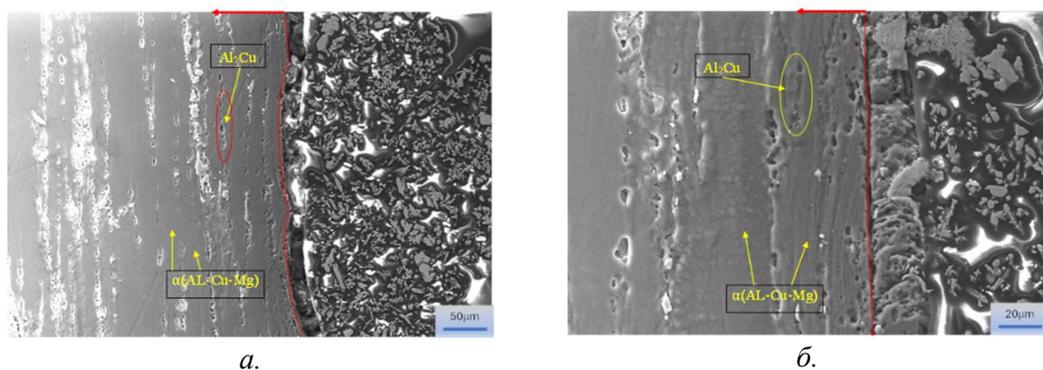


б.

Фиг. 3.17 SEM изображения на микроструктурата на образец с първоначален диаметър на отвора 8.14 mm , в зоната, деформирана от средата на сегмента на инструмента



Фиг. 3.18 SEM изображения на микроструктурата на образец с първоначален диаметър на отвора 8.30 mm, в зона, съответваща на средата на прорежа на инструмента



Фиг. 3.19 SEM изображения на микроструктурата на образец с първоначален диаметър на отвора 8.30 mm, в зоната, деформирана от средата на сегмента на инструмента

На фиг. 3.18а, б (5) е показана микроструктурата при различни увеличения на образца с първоначален диаметър на отвора $d_o = 8.30 \text{ mm}$, в осово сечение, съответстващо на средата на прорежа на инструмента, а на фиг. 3.19а, б SEM изображения на микроструктурата на същия образец в зоната, деформирана от средата на сегмента на разрязания дорн.

В разглежданите структури се наблюдава влакнеста α – Al фаза (твърд разтвор на Al, Cu, Mg) и интерметално съединение Al_2Cu (θ фаза). Отделянията на θ фазата се наблюдават по границите на зърната. В зоната в близост до отвора се наблюдава издребняване на зърната (фиг. 3.16).

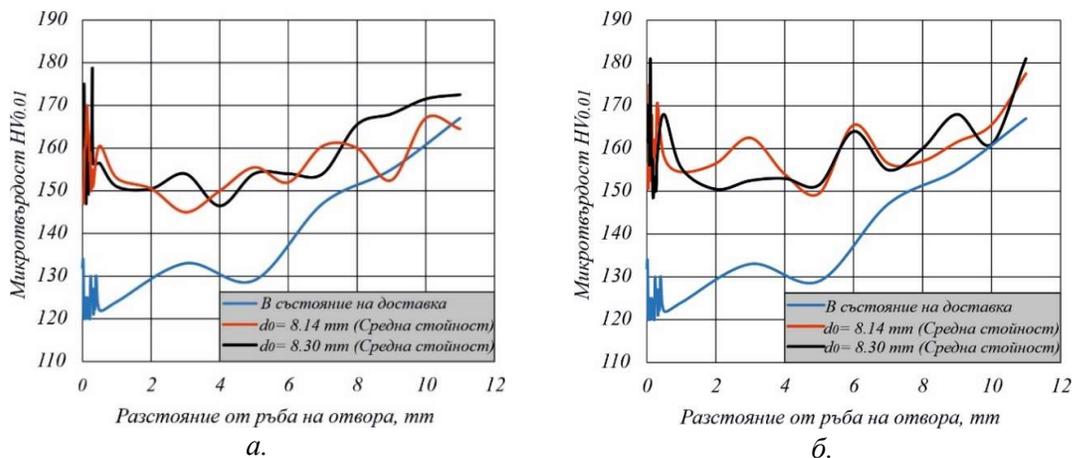
На фиг. 3.18а, б (5) е показана микроструктурата при различни увеличения на образца с първоначален диаметър на отвора $d_o = 8.30 \text{ mm}$, в осово сечение, съответстващо на средата на прорежа на инструмента, а на фиг. 3.19а, б SEM изображения на микроструктурата на същия образец в зоната, деформирана от средата на сегмента на разрязания дорн. В микроструктурите на образца с първоначален диаметър на отвора $d_o = 8.30 \text{ mm}$ се наблюдават фазите, аналогични на тези в образца с по-малък първоначален диаметър на отвора (8.14 mm). В този образец се наблюдава изтъняване на α -Al влакнестата фаза и частично изменение на ориентацията на зърната спрямо оста на отвора, дължащо се на пластичната деформация, причинена от средата на сегмента на инструмента (фиг. 3.19). В зоните, отдалечени от повърхнината на отвора, не се наблюдават фазови и структурни изменения и за двата образца.

3.5. Влияние на MSMCW метод върху микротвърдостта

3.3.1. Микротвърдост в челни равнини

Фиг. 3.20 показва профилите на средно-аритметичната микротвърдост на образца в състояние на доставка и на двата образца с диаметри на предварително обработените отвори съответно $d_o = 8.14 \text{ mm}$ и $d_o = 8.30 \text{ mm}$. Наблюдаваната тенденция на нарастване на микротвърдостта на базовия образец от центъра към външната цилиндрична повърхнина е след-

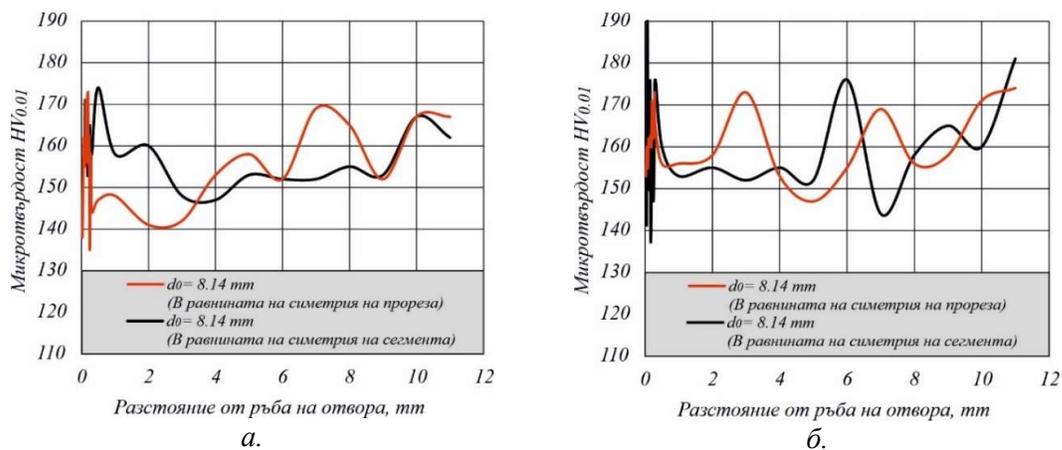
ствие от ефекта на уякчаване на външните слоеве по време на валцоването на прътовите заготовки. От графиките се вижда, че ефекта от СРО е ясно изразен на разстояние над 5 mm от ръба на отворите, както за входната повърхнина (фиг. 3.20а), така и за изходната повърхнина (фиг. 3.20б) на образците.



Фиг. 3.20 Средноаритметична микротвърдост в радиално направление от ръба на отвора; а.) входна повърхнина; б.) изходна повърхнина

3.5.2. Микротвърдост в осови сечения

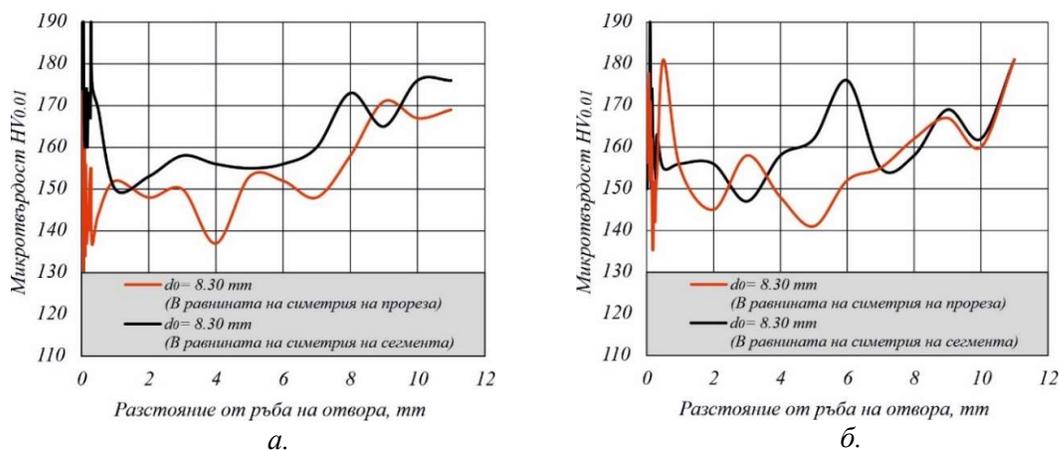
На фиг. 3.21а, б и 3.22а, б са показани профилите на микротвърдостта в осови сечения в равнината на симетрия на прореза и в равнината на симетрия на сегмента в близост до входната и изходната повърхнина на двата образца с начален диаметър на отвора съответно $d_o = 8.14 \text{ mm}$ и $d_o = 8.30 \text{ mm}$. Непосредствено до входната повърхнина на образците (фиг. 3.21а и фиг. 3.22а) се наблюдава по-голяма разлика между профилите на микротвърдостта в двете характерни равнини.



Фиг. 3.21 Микротвърдост в радиално направление от ръба на отвора, при начален диаметър $d_o = 8.14 \text{ mm}$; а.) входна повърхнина; б.) изходна повърхнина

На разстояние около 0.20 mm до ръба на отвора, в зоната, афектирана от средата на сегмента, микротвърдостта е по-голяма от тази, измерена в зоната около ръба на сегмента. Като се има предвид геометрията на инструмента, реализиращ MSMCW, този резултат е очакван, тъй като еквивалентната пластична деформация в равнината на симетрия на сегмента е по-голяма в сравнение с тази в равнината на симетрия на прореза. Градиентът в окръжно направление е по-изразен в образца с по-голям начален диаметър на отвора (фиг. 3.22а), като ефектът се проявява на по-голяма дълбочина. Това вероятно се дължи на по-малкото

количество отстранен материал при финалното райбероване. Експерименталните резултати за микротвърдостта на фиг. 3.21б и фиг. 3.22б показват, че gradientът в окръжно направление намалява в близост до изходната страна на образците.



Фиг. 3.22 Микротвърдост в радиално направление от ръба на отвора, при начален диаметър $d_0 = 8.30$ mm ; а.) входна повърхнина; б.) изходна повърхнина

3.6. Изводи

Резултатите от проведеното експериментално изследване на характеристиките на SI около СРО посредством MSMCW метод дават основание за следните *основни изводи*:

- ▶ Относително големият допуск на диаметрите на предварително обработените отвори (0,16 mm при номинален диаметър 8 mm) води до разсейване в разпределението на окръжните ОН, характеризиращо се с gradient в осово и окръжно направление. Независимо от това, MSMCW метод осигурява интензивна и дълбока зона (повече от 5 mm) с въведени полезни окръжни ОН на натиск и по двете челни страни на образците след СРО и след финалното райбероване на отворите;

- ▶ Отстраняването на пластично деформиран слой с подходяща дебелина около отвора по време на финалното райбероване води до преразпределение на окръжните ОН около СРО по посока на интензифициране на натисковата зона откъм входната страна на образците. Този ефект на хомогенизиране на ОН е предпоставка за подобряване на уморното поведение на алуминиева сплав 2024-T3;

- ▶ Изследванията на микроструктурата в близост до повърхнината на отворите при MSMCW метод потвърждават ефекта от издребняване на зърната в условията на различен диаметър на предварително изработените отвори;

- ▶ Микротвърдостта по челните повърхнини на образец в състояние на доставка е с 25 % по-ниска в сравнение с микротвърдостта на образци, подложени на СРО в условията на различен начален диаметър на отворите. Това доказва полезния ефект от уякчаване на материала при прилагане на MSMCW процес;

- ▶ Профилите на микротвърдостта в осови сечения потвърждават наличието на определен gradient в окръжно направление, дължащ се на разликата в еквивалентната пластична деформация в равнината на симетрия на сегмента и равнината на симетрия на прореза. Този ефект е по-изразен непосредствено до входната страна на образците;

- ▶ Експерименталните резултати за характеристиките на SI съответстват на целенасочено използван прекомерно голям допуск на диаметрите на предварително обработените отвори. Следователно, прилагането на MSMCW в условията на обичайните за инженерната практика допуски на диаметрите на обработените отвори значително ще редуцира разсейването на характеристиките на SI около отворите и оттам значително ще се подобри уморното поведение.

Глава 4. ЕФЕКТИВНОСТ НА МОДИФИЦИРАНИЯ SMCW МЕТОД ЗА ПОДОБРЯВАНЕ НА УМОРНОТО ПОВЕДЕНИЕ НА ОБРАЗЦИ ОТ 2024-T3 АЛУМИНИЕВА СПЛАВ СЪС СКРЕПИТЕЛНИ ОТВОРИ

4.1. Основна цел

Целта на настоящото изследване е експериментално да се оцени ефективността на MSMCW метод за повишаване на УД на листови конструкционни елементи със СО от алуминиева сплав 2024-T3 с оглед на приложението им в самолетостроенето. В съответствие с основната идея на MSMCW метод за компенсиране на първоначалната хлабина между повърхнината на предварително обработените отвори и инструмента, експерименталното изследване е проведено в условията на относително голямо разсейване на диаметрите на предварително обработените отвори, като е акцентирано върху повторемостта на резултатите.

4.2. Материал и методи на изследване

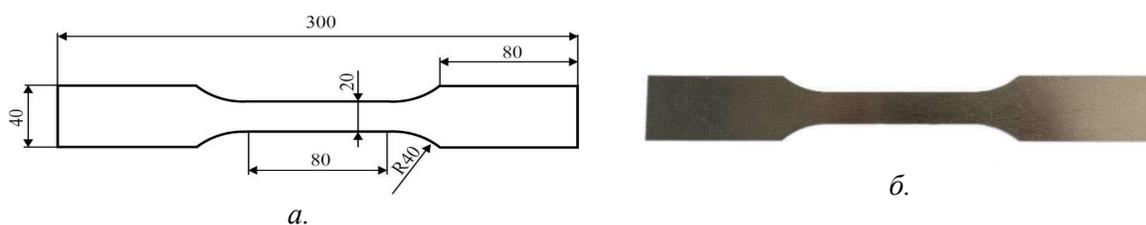
4.2.1. Материал

Материалът е алуминиева сплав 2024-T3 във вид на лист с дебелина 5 mm с химичен състав съгласно Табл. 4.1.

Химичен състав на алуминиева сплав 2024-T3 във вид на лист Таблица 4.1.

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
94.53	0.784	0.445	1.62	0.79	1.48	0.0176	0.0169
Ni	Ti	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr
0.0115	0.0485	<0.0001	<0.0001	0.0026	0.126	0.0077	0.0004
V	Na	Bi	Zr	B	Ga	Cd	Co
0.0108	0.0024	<0.005	0.0115	<0.0005	0.022	<0.0010	<0.0020
Ag	Hg	In	Sb	Ce	La	Mo	Sc
0.0011	0.0052	0.0113	0.132	0.0172	0.0052	0.0026	<0.0005

Механичните характеристики на изследваната алуминиева сплав са обобщени на базата на експеримент на едномерен опън на плоски образци. Геометрията на образците е показана на фиг. 4.1.а, а общия им вид – на фиг. 4.1.б.



Фиг. 4.1 Експериментален образец за тест на едномерен опън

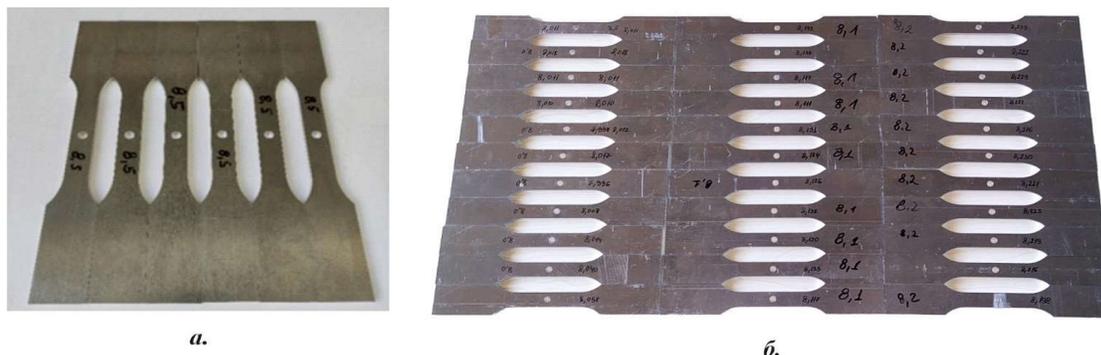
За да се оцени ефекта от наличието на централен отвор, механичните изпитания на едномерен опън са проведени за два случая: без и с централен отвор с номинален диаметър $\Phi 8.5\text{mm}$. Наличието на централен отвор с посочения диаметър оказва слабо влияние върху механичното поведение на изследваната алуминиева сплав при статично натоварване (Табл. 4.2.).

Механични характеристики на алуминиева сплав 2024-T3 без и с отвор Таблица 4.2.

Вид на образца	$R_{0.2}$, МПа	R_m , МПа	A_5 , %
Без отвор	319	430	17,5
С отвор	331	429	10,5

4.2.2. Уморни образци

Експерименталните уморни образци са с геометрични параметри съгласно фиг. 4.1.а с централен отвор.



Фиг. 4.2 Експериментални образци за уморни тестове: а) I-ва група (референтна); б) II-ра, III-та и IV-та група

Обект на уморни изпитания са четири групи образци, различаващи се по начина на обработване на отворите:

- I-ва група (референтна) – отворите са с диаметър $d_o = 8.5 \text{ mm}$ и са обработени само чрез рязане (използвайки интерполация) върху фрезов обработващ център. Показани са на фиг. 4.2а;

- II-ра група – отворите са обработени в следната последователност: чрез рязане върху фрезов обработващ център до диаметър $d_o = 8.0 \text{ mm}$, СРО и финално райбероване до диаметър $d = 8.5 \text{ mm}$ (фиг. 4.2б). Отворите от тази група са третираны със степен на СРО $DCE = \frac{i}{d_o} \times 100 = 0.04 \times 100 = 4\%$;

- III-та група – отворите са обработени в следната последователност: чрез рязане върху фрезов обработващ център до диаметър $d_o = 8.1 \text{ mm}$, СРО и финално райбероване до диаметър $d = 8.5 \text{ mm}$ (фиг. 4.2б). Отворите от тази група са третираны със степен на СРО $DCE = \frac{i}{d_o} \times 100 = 0.0395 \times 100 = 3.95\%$.

- IV-та група – отворите са обработени в следната последователност: чрез рязане върху фрезов обработващ център до диаметър $d_o = 8.2 \text{ mm}$, СРО и финално райбероване до диаметър $d = 8.5 \text{ mm}$ (фиг. 4.2б). Отворите от тази група са третираны със степен на СРО $DCE = \frac{i}{d_o} \times 100 = 0.039 \times 100 = 3.9\%$.

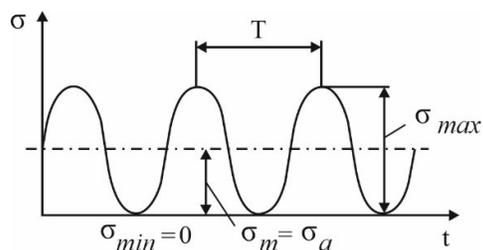
MSMCW процес се реализира с една и съща ориентация на разрязания дорн в окръжно направление – инструментът е позициониран по такъв начин, че равнината на критичното сечение на образца да съвпада с равнината на симетрия на който да е сегмент. Описаната последователност на обработване на отворите в четирите групи осигурява един и същи финален диаметър на отвора, т.е. едно и също критично сечение на уморните образци от всички групи. Описаното групиране на уморните образци позволява да се направят следните сравнителни оценки:

- 1). Да се оцени ефективността на модифицирания SMCW метод за СРО на база на сравнение на II-ра, III-та и IV-та групи с I-ва група, т.е. с конвенционалния случай на обработване на отворите само чрез рязане;

- 2). Да се оцени ефекта от разсейването на предварително обработените отвори преди процеса СРО на база на сравнение на уморното поведение на образци от II-ра, III-та и IV-та групи;

- 3). Да се направи проверка на повтораемост на поведението при умора на образци, третираны по един и същи начин.

4.2.3. Уморни тестове



Фиг. 4.3 Пулсиращ цикъл, $R=0$

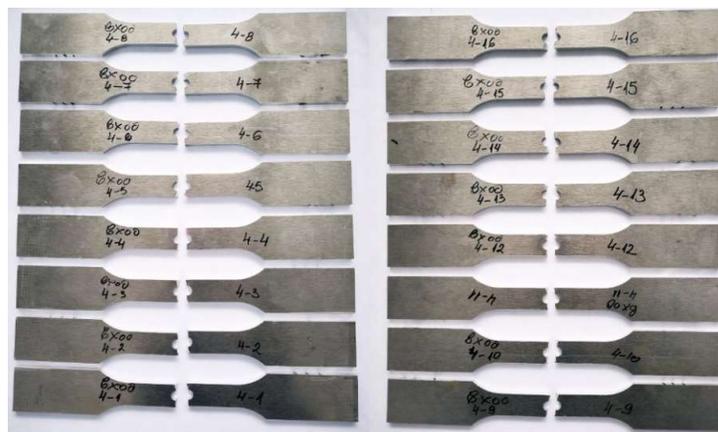
Предвид геометрията на уморните образци и целта на изследването, УД на образците от всяка група е изследвана чрез уморни тестове на пулсиращ цикъл ($R = 0$, фиг. 4.3).



Фиг. 4.4 Изпитвателна машина Zwick/Roell Vibrophore 100 в динамичен режим за работа

Уморните тестове са проведени върху изпитвателна машина Zwick/Roell Vibrophore 100 (фиг. 4.4) с честота, която автоматично се определя на база на собствените честоти на уморния образец. Тъй като всички образци са с еднакви размери (включително диаметрите на отворите, получени при финалното райбероване) и са фиксирани по един и същи начин в работните части на изпитвателната машина, собствените им честоти са еднакви (неизбежните отклонения нямат практическо значение). Така избраните честоти за всички образци са в интервала 52.2 – 52.5 Hz. Поведението на умора на групите образци е оценено чрез $S - N$ криви, получени на база на уморни тестове до 10^6 цикъла.

Разрушените уморни образци от IV-та група са показани на фиг. 4.5.

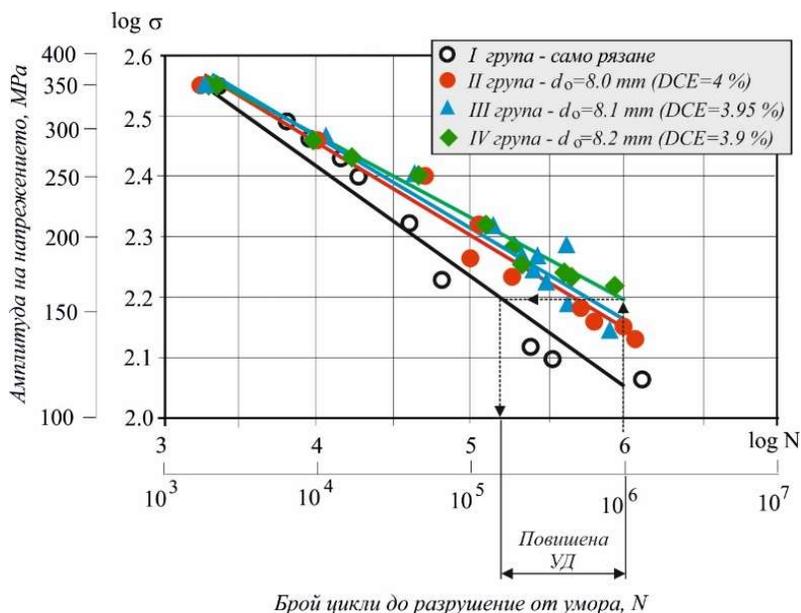


Фиг. 4.5 Разрушени уморни образци от IV-та група

4.3. Експериментални резултати

4.3.1 S – N криви

Получените S-N криви за четирите групи експериментални образци са показани на фиг. 4.6 в двойно логаритмичен мащаб. УД на трите групи образци (II, III и IV), чиито отвори са обработени посредством MSMCW метод показват значително подобрене в сравнение с първата (референтната) група образци.



Фиг. 4.6 S-N криви

- Наблюдава се лека тенденция за изменение на наклона на S – N кривите в корелация с номиналния диаметър на предварително обработените чрез рязане отвори. Въпреки че DCE е най-голяма за II група (DCE = 4%), съответната им S – N крива показва тенденция към най-ниската стойност на якостта на умора при 10^6 цикъла в сравнение с тези за групи III и IV. Най-голяма УД се наблюдава за образците от IV група, чиито предварително пробити отвори имат най-голям номинален диаметър и съответно най-малка стойност на DCE (3.9 %). Разликата в получените S – N криви може да бъде обяснена с разликата във въведените окръжни ОН на натиск около СРО, най-вече поради ефекта от преразпределение на ОН вследствие отстраняването на пластично деформирани слоеве материал при окончателното райбероване. Подходящата дебелина на отстранения слой при финално райбероване минимизира осовия градиент на ОН и по този начин се получава по-хомогенна натискова зона.

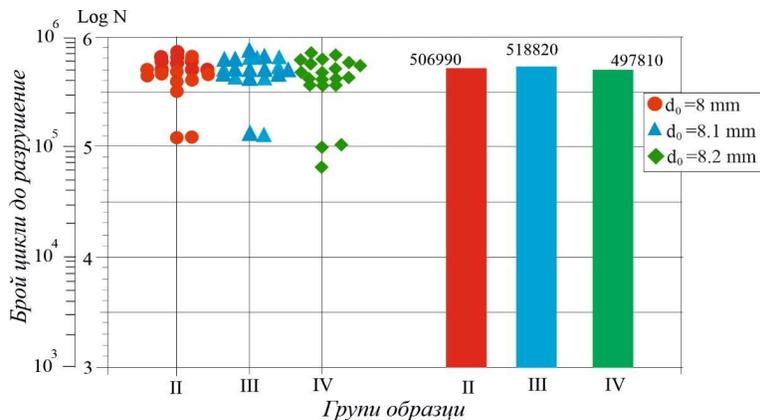
4.3.2 Повторяемост на резултатите от уморните тестове

За да се оцени повторяемостта на уморното поведение на образците, чиито отвори предварително са стресирани чрез MSMCW метод, по 20 образца са изработени от групи II, III и IV. Образците са подложени на цикличен тест с пулсиращ цикъл при една и съща амплитуда на напрежението от 170 МРa. Уморните тестове са проведени до разрушение на всеки един от образците.

Получената стойност за центъра на групиране е взета като крайно число цикли до разрушение за всяка група образци. Резултатите са обобщени на фиг. 4.7.

Експерименталните тестове доказват ефективността на MSMCW за подобряване на поведението на умора при цикличен опън на конструкционни елементи от алуминиева сплав 2024-T3.

- S-N кривите, съответстващи на образците от II, III, IV групи, чиито отвори са подложени на СР, са много близки една до друга, особено в областта на малочиклова умора. Това доказва ефективността на метода при наличието на значително разсейване на диаметрите на предварително пробитите отвори (0.2 mm при номинален диаметър 8 mm);



Фиг. 4.7 Повторяемост на уморното поведение

Експериментът показва, че броят цикли до разрушаване за образците от трите групи с амплитуда на напрежението 170 MPa , варират в тесни граници от 497 810 за IV група до 506 990 за III група. Тези резултати потвърждават получените $S - N$ криви и доказват, че MSMCW метод осигурява постоянна якост на умора при определена стойност на амплитудата на напрежение.

4.4. Изводи

Резултатите от проведеното изследване на уморното поведение на плоски образци от високояка алуминиева сплав 2024-T3 на пулсиращ опънов цикъл потвърждават следното:

- ▶ Отстраняването на пластично деформиран слой с подходяща дебелина около отвора при окончателното райбероване осигурява хомогенизиращ ефект на окръжните ОН в осово направление, което благоприятства УД;

- ▶ Сравнителното експериментално изследване на уморното поведение на пулсиращ цикъл потвърждава ефективността на MSMCW метод за значително повишаване на УД – повече от шест пъти на база якост на умора при 10^6 цикъла в сравнение с конвенционалния случай на обработка на отвори само с рязане;

- ▶ Получените $S - N$ криви потвърждават ефективността на новия метод в условията на прекомерно голямо разсейване (0.2 mm при номинален диаметър 8 mm) на диаметрите на предварително пробитите отвори;

- ▶ Получените експериментални резултати съответстват на най-лошия сценарий на разсейване на диаметрите на предварително пробитите отвори. Следователно, намаляването на дисперсията на диаметрите и отклоненията от цилиндричност на предварително пробитите отвори ще доведе до значително повишаване на ефективността на MSMCW метод в аспект на подобряване на уморното поведение;

Научно-приложни и приложни приноси

А. Научно-приложни приноси

- ◆ Морфологична класификационна схема на основните подходи и реализиращите ги методи за повишаване на УД на метални конструкционни елементи със СО;

- ◆ Доказано е, че в условията на прекомерно голямо разсейване на диаметрите на предварително обработените отвори, MSMCW метод осигурява интензивна и дълбока зона с въведени полезни окръжни ОН на натиск по двете челни страни на образци тип втулки от алуминиева сплав 2024-T3 след СРО и след финалното райбероване на отворите;

- ◆ Установен е ефектът на издробеняване на зърната в близост до повърхнината на отворите в алуминиева сплав 2024-T3 след СРО чрез MSMCW метод в условията на различен диаметър на предварително изработените отвори;

- ◆ Установено е, че микротвърдостта по челните повърхнини на образци от алуминиева сплав 2024-T3, подложени на СРО при различен начален диаметър на отворите, е с 25 % висока в сравнение с тази в състояние на доставка;

- ◆ На база на профилите на микротвърдостта в осови сечения е установено наличието на градиент в окръжно направление, дължащ се на разликата в еквивалентната пластична

деформация в осови сечения, съответващи на равнините на симетрия на сегмента и на прорежа на инструмента, реализиращ MSMCW метод;

♦ Доказано е, че отстраняването на пластично деформиран слой с подходяща дебелина около СРО при финалното райбероване осигурява хомогенизиращ ефект в разпределението на окръжните ОН в осово направление, което подобрява уморното поведение на пулсиращ цикъл на листови компоненти от алуминиева сплав 2024-T3;

♦ S – N криви на умора на пулсиращ цикъл, доказващи ефективността на MSMCW метод в условията на прекомерно голямо разсейване на диаметрите на предварително обработените отвори за повишаване на УД на алуминиева сплав 2024-T3 повече от шест пъти (на база якост на умора при 10^6 цикъла) в сравнение с конвенционалния случай на обработване на СО;

Б. Приложни приноси

♦ Икономически ефективен процес за СРО, осигуряващ постоянна стегнатост в условията на прекомерно голямо разсейване на диаметрите на предварително обработените отвори;

♦ База данни за характеристиките на SI (ОН, микротвърдост, микроструктура) в образци тип втулки от алуминиева сплав 2024-T3, подложени на СР чрез MSMCW метод в корелация със степента на студено разширение DCE и дебелината на слоя метал при финалното райбероване;

♦ База данни за УД на пулсиращ цикъл на плоски образци със СО от алуминиева сплав 2024-T3, обработени само чрез рязане и чрез MSMCW метод в корелация със степента на срудено разширение DCE и дебелината на слоя метал при финалното райбероване.

Публикации по дисертацията

1. Anchev A.P., Dunchev V.P., **Daskalova P.H.**, Fatigue behavior experimental study of specimens with fastener holes in 2024-T3 aluminum alloy subjected to cold expansions via modified split mandrel method. International Scientific Conference, “Mechatronic, Eco – and energy saving systems and technology”. Gabrovo. 2023 p.155-164 ISSN 2815-4924

2. Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Dunchev V., **Daskalova P.**, Modified Split Mandrel Method and Equipment to Improve the Fatigue Performance of Structural Components with Fastener Holes. Metals 2024, 14, 303 doi.org/10.3390/met14030303

3. **Daskalova P.** Microstructure and microhardness around holes in aluminum alloy 2024-T3 subject to cold expansion by modify Split Mandrel Method. International Scientific Conference Unitech 2024, Gabrovo, Bulgaria, Vol 2 p. 36-46, 2024

4. Dunchev V.P., **Daskalova P.H.**, Experimental study of residual stresses around fastener holes in 2024-T3 aluminum alloy via modified split mandrel method. International Scientific Conference, “Mechatronic, Eco – and energy saving systems and technology”. Gabrovo. 2023 p.136-151 ISSN 2815-4924

5. Duncheva G., **Daskalova P.**, Methods for increasing the fatigue life of structural components with fastener holes- state of the art. Journal of the Technical University of Gabrovo, 68 (2024) 21-36 doi.org/10.62853/JN WG1335

Цитирания на публикациите по дисертационният труд

Публикация

Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Dunchev V., Daskalova P., Modified Split Mandrel Method and Equipment to Improve the Fatigue Performance of Structural Components with Fastener Holes. Metals 2024, 14, 303 doi.org/10.3390/met14030303

е цитирана в:

1. Dang Z., Peng Y., Yang R., Ge D., Yan L., Gan X. Experimental study on the effect of reaming on the fatigue life of split-sleeve cold-expanded Ti-6Al-4V alloy components. *International Journal of Fatigue* 188 (2024) doi: 10.1016/j.ijfatigue.2024.108521

2. Li C., Wang J., Yang L., Zuo Y., Zhang Q. Influence of Mandrel's Working Length on Fatigue Strengthening Effects in Open-Hole Structures through Cold Expansion. *Journal of Materials Engineering and Performance* (2025) doi: 10.1007/s11665-025-11072-1

3. Hossen M.S., Santana L.B., Tan H., Kim D. Finite Element Analysis to Investigate the Effects of Split Sleeve Cold Expansion Process Variables on Residual Stress Distribution and Pulling Force Progression for Al 2024-T351 Alloy. *International Journal of Aerospace Engineering*, (2025) (1) doi: 10.1155/ijae/6296329

4. Wan N., Zhao B., Ding W., He Q. Advancements in cold extrusion anti-fatigue manufacturing technology for connecting holes. *Engineering Fracture Mechanics* (2025), 314 doi: 10.1016/j.engfracmech.2024.110764

5. Wan N., Zhao B., Ding W., He Q. Research status and tendency on cold expansion anti-fatigue manufacturing technology for aircraft structural fastening holes. *Journal of Manufacturing Processes* (2025), 141, pp. 319 – 335 doi: 10.1016/j.jmapro.2025.02.068

6. Mu Y., Shi H., Zuo Y. Effect of Coupling Ultrasonic Fatigue Strengthening and Polishing Methods on Open Hole Structures. *Journal of Materials Engineering and Performance* (2025), 34 (13), pp. 13536 – 13546 doi: 10.1007/s11665-024-10125-1

7. Zhang Q., Zuo Y., Wu Q., Hu Z. Mechanical effects of interference fitting on joints with small edge distance and large pin diameter. *Journal of Mechanical Science and Technology* (2025), 39 (9), pp. 5037 – 5049 doi: 10.1007/s12206-025-0812-2