



**СИСТЕМАТИЗИРАНЕ НА ПОДХОДИТЕ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА УМОРНАТА
ДЪЛГОТРАЙНОСТ НА МЕТАЛНИ КОНСТРУКЦИОННИ ЕЛЕМЕНТИ С ОТВОРИ
ЧАСТ I: МАКРО-ПОДХОД**

**SYSTEMATIZATION OF THE APPROACHES TO IMPROVE THE FATIGUE LIFE OF
METAL STRUCTURAL COMPONENTS WITH HOLES
PART I: MACRO-APPROACH**

Галя Дунчева*

Технически университет -Габрово

Статията е постъпила на 16.07. 2015г.; приета за отпечатване на 17.09. 2015г.

Abstract

In this study a new classification of the basic approaches to increase the fatigue life of the metal structural components with openings is grounded. These approaches are based on the concept of "processing through plastic deformation". In the first part of the study the macro-approach is theoretically developed. A detailed classification of the methods realizing the macro-approach is made using the morphological method. On the basis of deep analysis of the existings methods two innovative methods for cold hole expansion have been developed.

Keywords: fatigue life; cold working; residual stresses; cold hole expansion; pure radial expansion

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Известно е, че зоните около отворите са критични за поведението на конструкционни елементи, тъй като са естествени концентратори на напрежения и деформации. Работните напрежения са най-големи в точките от повърхнината на отворите - например, за случая на плоски образци с отвори, работните напрежения около отворите са около три пъти по-големи в сравнение с номиналните (Георгиев, 2005). В индустрията и в общото машиностроене в частност, преобладават металните конструкционни елементи, подложени на динамични или на циклични натоварвания. Лимитиращият фактор, определящ срока на експлоатация в този случай, е уморното разрушение, причинено от възникване и развитие на пукнатини около отворите - предимно от I^{ви} тип (пукнатини на разкъсване). Разрушението от умора на материала е типично за сектор транспорт, където динамичният характер на натоварване провокира възникване и развитие на уморни пукнатини във всички технически съоръжения във въздушния, железопътния, автомобилния и морския транспорт. Особено показателно е, че дялът на уморните разрушения в аероиндустрията представлява около 50 – 90 % от всички повреди на компонентите (Abdelkrim et al., 2014). Якостният ресурс и сигурността при експлоатация на конструкционните елементи с отвори в най-голяма степен зависят от състоянието на материала около самите отвори.

В условията на все по-големи скорости и натоварвания на техническите съоръжения, едно от направленията за развитие изобщо, е стремежът на изследователите

да синтезират нови материали. В тази връзка „идеалният“ материал се характеризира с много високи статична якост, динамична якост и пукнатинуустойчивост, ниска масова плътност, висока пластичност и корозионна устойчивост. Предвид ефекта от локална концентрация на напрежения около отворите, интерес заслужава идеята за апроксимация на този „идеален“ материал с модификация на реалния такъв. Ефективен подход в тази посока е обработването чрез пластично деформиране.

Един от общоприетите критерии за класификация на подходите за повишаване на уморната дълготрайност на конструкционни елементи с отвори е дълбочината на пластично деформирания слой (Maximov and Duncheva, 2014). Според този критерий подходите са повърхностно пластично деформиране (ППД) (burnishing) и студено обемно пластично деформиране (cold working).

Като цяло, ефектът от въздействието върху металите посредством пластично деформиране зависи от основните характеристики на това въздействие: еквивалентна пластична деформация, скорост на деформацията, температурно поле и вида на контакта между деформиращия инструмент и третираната повърхност – нормален, тангенциален или комбинация от двете. В действителност, съвкупността от посочените характеристики определя мащаба, в който се оценява ефекта от пластичното деформиране – в целия обем на съответния конструкционен елемент или на ниво кристална решетка и дори атомно ниво. В първия случай модификацията на реалния материал е следствие от преминаване в ново еластично равновесие на съответния елемент след пластичното му деформиране, а във втория случай – модифика-

* Тел.: 066 827 312; e-mail: duncheva@tugab.bg

цията се свежда до промяна на микроструктурата. Тази постановка дава възможност да се изследва изменението в механичното състояние на подложения на пластично деформиране материал от различни гледни точки – според апарата на механиката на непрекъсната среда (макро-подход), според модификацията на микроструктурата (микро-подход) или подход, който комбинира и двата ефекта.

На база на описаната постановка, в настоящата работа са обосновани основните подходи за локално модифициране на механичното състояние на металите, и на тази основа са систематизирани различните методи за повишаване на уморната дълготрайност на метални конструкционни елементи с отвори.

В първата част от изследването, обект на класификация и задълбочен анализ са методите, базирани върху макро-подхода. Задачата е решена чрез използване на морфологичния метод.

2. МАКРО - ПОДХОД

2.1. Същност на макро-подхода

Известно е, че ако едно тяло не е подложено на въздействие от други тела, същото се намира в състояние на *естествено равновесие*. За реалните конструкционни елементи това състояние е присъщо за случая, когато те са достатъчно отдалечено от други тела, като се изключват съществуващите структурни напрежения следствие от технологичната наследственост – от изработване на заготовките и предшестващата обработка.

Същността на макро-подхода се състои в преминаването в еластично равновесие след приложено външно механично въздействие (силово и/или температурно) предвид еластичния закон за разтоварване, независимо от наличието на пластична деформация по време на външното въздействие. Когато следствие от външното въздействие в еластичните тела се провокира нехомогенно разпределение на топлина и пластична деформация, в определени региони се генерират *остатъчни напрежения*. Те зависят от три фактора, действащи в съвкупност или поотделно по време на процеса на изработване на съответния конструкционен елемент – температурен, механичен и металургичен. Според същността им и мащаба, в който се проявяват, остатъчните напрежения са макро- (тип I) и микро- напрежения (тип II и тип III) (Kandil et al., 2001; Mishra et al., 2014; Withers, Bhadeshia, 2001). Микро-остатъчните напрежения от тип II и тип III се улавняват съответно в обсега на десетки зърна или на атомно ниво.

След преустановяване на външното въздействие макро-остатъчните напрежения се улавняват в целия обем на съответния конструкционен елемент. В този аспект, оценката на интензивността на вътрешните сили в новото еластично равновесие се прави на макро-ниво, т.е. прилага се апарата на механиката на непрекъснатата среда, независимо, че реалното взаимодействие е на микро- и мезо- ниво. Следователно, този подход може да се определи като макро-подход. Ключовият момент в макро-подхода е идеята за пластифицирането на материала около наличния или бъдещия отвор с цел генериране около него на остатъчни окръжни макро-напрежения на натиск.

Процесите, базирани върху макро-подхода, се характеризират с относително малка степен на еквивалентна

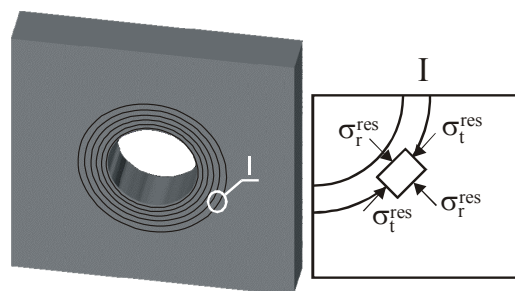
пластична деформация ε_{ekv}^{pl} (4 – 5 %), която се проявява не само на повърхността, но и в основния материал (bulk material) на значителна дълбочина - до няколко милиметра. Основен принос в ε_{ekv}^{pl} има окръжната линейна деформация за точките от повърхнината на отвора $\varepsilon_{t,0}$. Това е от голямо значение за процеса на формиране и развитие на уморни пукнатини от $\Gamma^{ви}$ тип – пукнатини, чийто фронт се развива в радиално направление по отношение на отворите (фиг. 1).



Фиг. 1. Пукнатини от $\Gamma^{ви}$ тип около отворите

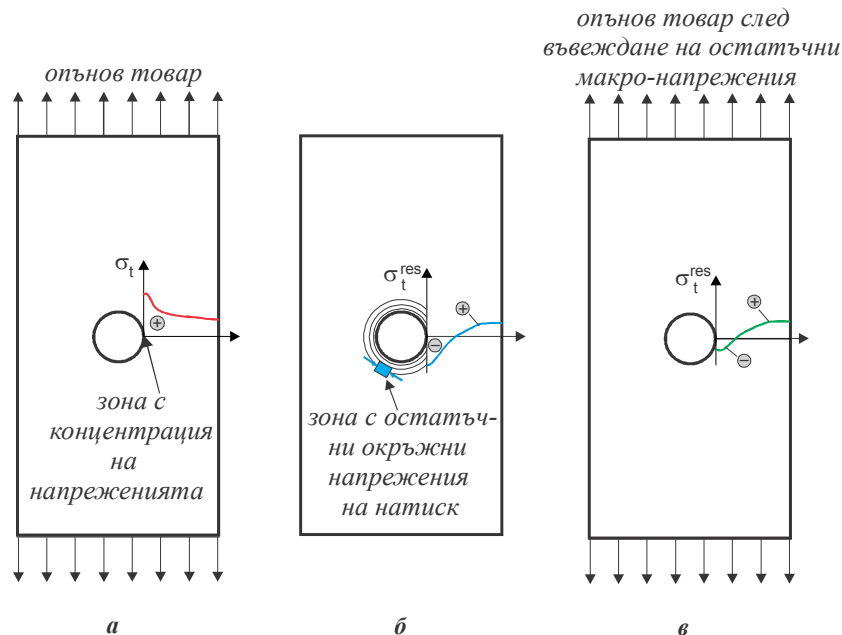
2.2. Действие на зоната с остатъчни окръжни макро-напрежения на натиск

Идеята за полезния ефект от предварително въвежданата зона с остатъчни окръжни напрежения на натиск около скрепителните отвори е развита и патентована от компанията Boeing за конкретно приложение в аероиндустрията (Champoix, 1971). Целта е тази зона да има максимална интензивност и дълбочина. Тя действа подобно на скоба, като многократно забавя процеса на развитие на уморни пукнатини от $\Gamma^{ви}$ тип (фиг. 2).



Фиг. 2. Действие на натисквата зона с остатъчни макро-напрежения около отворите

В инженерната практика като цяло, оразмеряването на конструкционните елементи се базира на якостни изчисления, като се отчитат само напреженията от работни натоварвания, т.е. приема се, че началните напрежения в детайла са нулеви. В действителност, тази постановка предопределя некоректното оценяване на якостния ресурс на съответните елементи. Отнесено към конструкционни елементи с отвори, разпределението на остатъчните окръжни макро-напрежения σ_t^{res} в качествен и количествен аспект практически определя различни начални условия преди да започне експлоатацията на съответните елементи. В този смисъл технологичният процес на изработване и сглобяване, особено вида на довършващото обработване на отворите, е от определящо значение за уморното разрушение. Прилагането на подходящо въздействие, базирано върху макро-подхода, провокира зона с остатъчни окръжни макро-напрежения на натиск σ_t^{res} в материала в близост до отвора (фиг. 3б).



Фиг. 3. Действие на зоната с предварително въведени остатъчни окръжни напрежения на натиск

Обратно, технологичният процес на изработване чрез рязане, какъвто е конвенционалният случай, води до опънови остатъчни напрежения (El-Axir M. H., 2002). Известно е, че напреженията на опън и на срязване в най-голяма степен интензифицират процеса на развитие на уморни пукнатини от I^{III} тип. При наличие на предварително генерирана зона с полезни остатъчни окръжни макро-напрежения на натиск σ_t^{res} , независимо от локалната концентрация, след прилагане на динамичен експлоатационен товар се получава ефект на наслагване на тези остатъчни напрежения с работните такива. По този начин качествено се променя вида на цикъла на натоварване – с тенденция от пулсиращ към асиметричен натисков (фиг. 3в). Разпределението на остатъчните окръжни макро-напрежения след прилагане на макро-подхода, както и ефекта на релаксация на същите е изследвано от редица автори (Clark and Johnson, 2003; Chakherlou and Vogwell, 2004; Garcia-Granada et al., 1998; Garcia-Granada et al., 2000; Kang and Johnson, 2001; Kang et al., 2002; Karabin et al., 2006; Nigrelli and Pasta, 2008; Krasnowski et al., 2000; Lacarac et al., 2000; Prime, 1999; Prime, 1999a; Prime, 1999b; Prime and Prantil, 2000; Prime et al., 2000; Webster and Wimpory, 2001; Wu and Lu, 1998; Zhuang and Halford, 2001; Maximov and Duncheva, 2008; Maximov et al., 2008; Maximov et al., 2009; Duncheva and Maximov, 2013; Maximov et al., 2014). Резултатът се изразява в повишени уморна дълготрайност и сигурност при експлоатацията вследствие забавяне на процеса на развитие на уморни пукнатини, намалени разходи за поддръжка и планови ремонти на техническите съоръжения (Leon, 1998; Fujimoto; Lacarac et al., 2000a; Lacarac et al., 2001; Pavier et al., 2001; Wagner et al., 1992; Webster and Ezeilo, 2001; Maximov et al., 2013).

От гледна точка на макро-подхода, за едно и също разпределение на σ_t^{res} , срокът на експлоатация на съответните елементи ще зависи от вида на материала, параметрите на динамичното натоварване и характеристиките на околната среда.

Съществена характеристика на процесите, базирани върху макро-подхода, е относително малката скорост на деформацията:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon} = 1 \times 10^{-4} \div 1 \times 10^{-3}, s^{-1}$$

Работата на вътрешните сили и работата на външните тангенциални сили дисипира в топлина, но промяната на температурата е пренебрежимо малка поради малката скорост на деформацията и малката скорост на приложните точки на външните тангенциални сили (Дунчева, 2009). Следствие от това практически не се достига температурата на рекристализация на металите, поради което макро-подходът по същество се базира върху студена обемна пластична деформация. Поради това методите, чиято практическа реализация съответства на посочените основни характеристики на макро-подхода, се асоциират с термина „cold working”.

3. СИСТЕМАТИЗИРАНЕ НА МЕТОДИТЕ ЗА ГЕНЕРИРАНЕ НА ПОЛЕЗНИ ОСТАТЪЧНИ МАКРО-НАПРЕЖЕНИЯ НА НАТИСК ОКОЛО ОТВОРИ

3.1. Обобщена класификация на групите методи

За систематизиране на методите за създаване на полезни остатъчни макро-напрежения на натиск е използван системния подход – на съответните методи е присвоено буквено или буквено-цифрово означение в съответствие с йерархичното му ниво. Разработената обобщена класификация на групите и подгрупите методи, както и приетото буквено-цифрово означение на същите са показани на фиг. 4.

Анализирайки работните схеми на известните методи, е прието за целесъобразно същите да се диференцират според разположението във времето на съответното въздействие по отношение на пробиването на съответния отвор – след или преди пробиване на отвора. Така на базово ниво („ниво а”) са получени две основни групи методи, означени съответно с „А” и „В”.



Фиг. 4. Обобщена класификация на групите методи

На “ниво в” двете групи методи са диференцирани съответно в две (А.1 и А.2) и три подгрупи (В.1, В.2 и В.3) според вида и направлението на съответното въздействие.

3.2. Систематизиране на методите, реализиращи концепцията „Cold hole expansion” (подгрупа А.1)

Систематизирайки научните публикации по проблема, прави впечатление, че най-широко приложение в практиката са намерили методите, при които механичното въздействие се прилага върху цилиндричната повърхнина на предварително пробития отвор (методи с означение “А.1”). Поради това тези методи се свързват с термина „Cold hole expansion” (студено разширение на отвори). Предвид относително голямото разнообразие и приложение на методите, реализиращи концепцията „Cold hole expansion”, същите се оценяват като конвенционални от гледна точка на макро-подхода. Поради относително голямото им разнообразие, методите от група А.1 са систематизирани в отделна йерархична класификационна схема (фиг. 5).

Причините, поради които научните изследвания, посветени на концепцията „Cold hole expansion” са най-широко застъпени, са следните:

- *Геометрията на отворите – наличие на кухина в плътен материал, което позволява след радиална експанзия по естествен път около отвора да се генерира зона с полезни остатъчни окръжни макро-напрежения на натиск;*
- *Повърхностните слоеве непосредствено около повърхнината на отворите са най-натоварените слоеве;*
- *Повърхнината на отворите е носител на технологични концентратори на напрежения;*
- *Контактните взаимодействия с монтираните скрепителни елементи (нити, болтове) следствие преминаващия през отвора значителен силов поток по време на монтаж и експлоатация;*
- *Повърхнината на отворите е подложена на непосредственото влияние на околната среда;*

На *ниво II* в йерархичната схема методите са диференцирани според начина, по който се реализира студено разширение на отворите:

► *Посредством преминаване на инструмента през отвора открай докрай по направление на оста му – методи, означени с „А.1.1”;*

► *Посредством радиално въздействие върху повърхнината на отвора – методи, означени с „А.1.2”.*

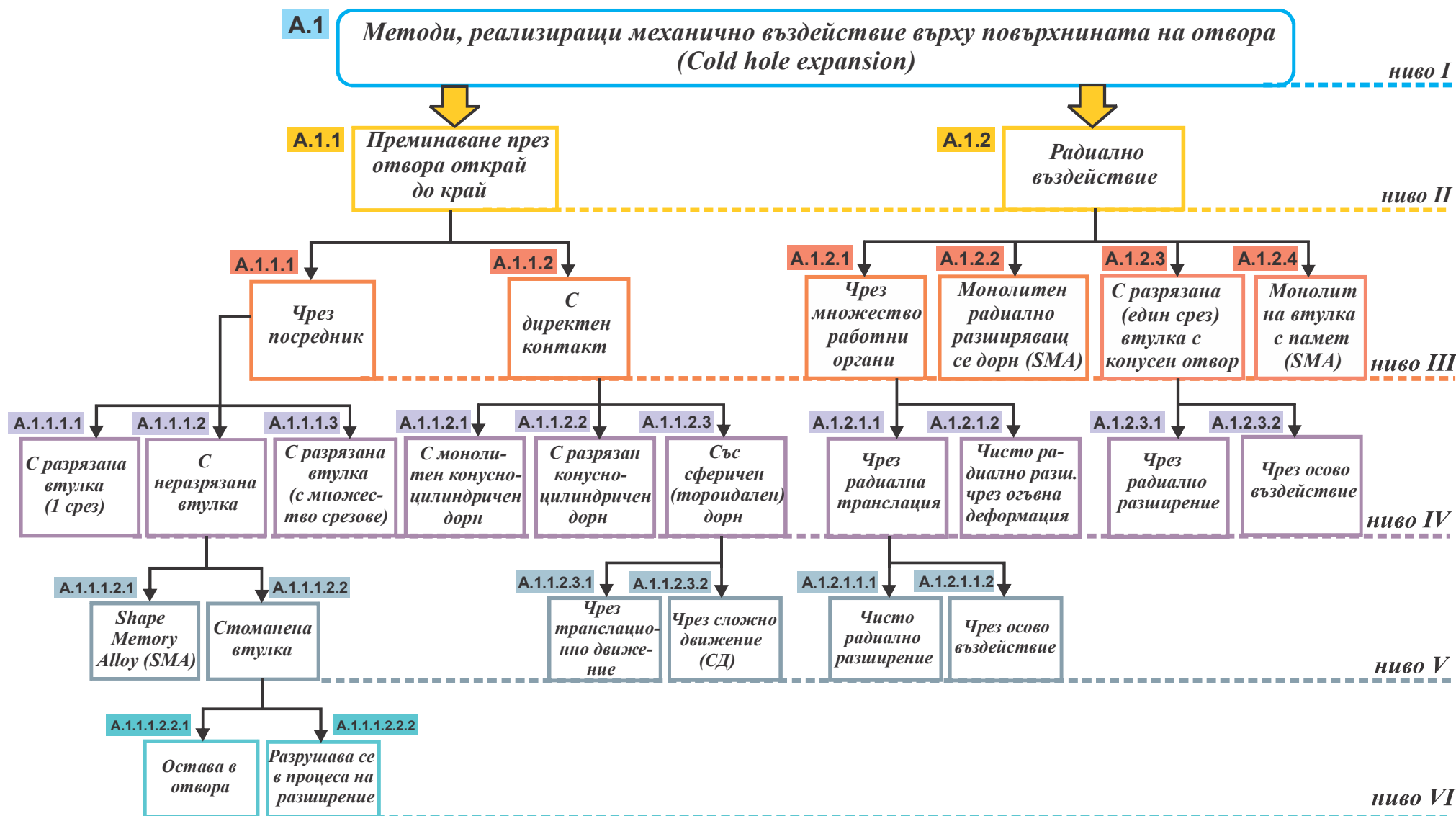
Количествена мярка на радиалната експанзия е степента на студено разширение DCE , еквивалентна на линейната окръжна деформация за точките от повърхнината на отвора:

$$DCE = \varepsilon_{t,0} = \frac{d_t - d_0}{d_0} \times 100, \% \quad (1)$$

където d_t е диаметърът на работната част на инструмента, а d_0 е диаметърът на предварително пробития отвор.

От гледна точка на принципна схема за реализация, първоначалната идея, върху която са синтезирани методите от подгрупа А.1.1, е разработена и патентована от Focke and Mize (1947). Изобретението е насочено конкретно за приложение върху ролково-втулковите вериги и се свежда до студено пластично деформиране на материала около отворите в пластините. Авторите посочват две алтернативни решения на проблема за повишаване на уморната дълготрайност на пластинките – посредством преминаване през отворите по направление на оста им на сферичен дорн или монолитен

конусно-цилиндричен дорн с гарантирана стегнатост (методи, означени с А.1.1.2). Тези методи в наши дни са известни съответно като “Bal cold working” и “Mandrel cold working” и се свързват с относителни най-простите инструменти за студено разширение, реализиращи процеса в условията на директен нормален и тангенциален контакт с повърхнината на отвора в присъствието на смазващо вещество. Авторите използват понятието *cold working*, но акцентът не се поставя върху създадената зона с полезни остатъчни напрежения на натиск, а върху емпирични зависимости за определяне на необходимата стегнатост и силите,



Фиг. 5 Йерархична класификация на методите, реализиращи механично въздействие върху повърхнината на отвора

необходими за избиване на щифтовете и втулките от отворите. Същевременно ефектът от изобретението, изразен в значително повишена якост на умора (с 50 единици), авторите обясняват с намалената грапавост и повишената плътност на материала около отворите.

Идеята за полезния ефект от генериране на зона с полезни остатъчни окъжни макро-напрежения на натиск, следствие преминаване на инструмент през отвора открай докрай по направление на оста му, за първи път е развита и патентована от Boeing като превенция срещу възникване и развитие на уморни пукнатини около отворите в носещи компоненти в самолетостроенето (Chamroux, 1971). Отличителна характеристика на пионерния метод е използването на монолитен конусен дорн и разрязана тънкостенна втулка-посредник от неръждаема стомана с вътрешно мазане. Втулката се поставя около дорна и заедно с него се въвежда в отвора. Отворът се разширява когато дорнът се изтегля обратно през разрязаната втулка, причинявайки пластична деформация около отвора и еластична такава в по-отдалечените слоеве. Използването на втулка-посредник с вътрешно мазане намалява необходимата осова сила при изтегляне на дорна и позволява процеса да се реализира при едностранен достъп до обработвания детайл. Като цяло обаче, относително голямото технологично съпротивление налага да се използва хидравлично изтеглящо устройство. След това втулката се изважда от отвора и се изхвърля, тъй като е негодна за повторна употреба. *След прекратяване на действието на инструмента върху отвора, пластично деформирания слой метал около отвора се оказва натиснат след преминаване в ново еластично равновесие поради естествения стремеж на еластично деформираните слоеве да се върнат в първоначалното си състояние. Следователно, ефективността на процеса студено разширение в голяма степен зависи от дебелината на слоя метал около отвора.* От тази гледна точка, съществува принципна разлика между студено разширение и разширението на тръби, независимо, че двата процеса могат да се реализират на база на едни и същи работни схеми. Разширението на тръби във варианта „дорноване” е изследвано преди всичко в технологичен аспект през 50-те и 60-те години на XX век в Русия от школата на Проскуряков.

Пионерният метод дава тласък на редица методи, реализиращи преминаването през отвора в условията на индиректен контакт с повърхнината му (методи, означени с A.1.1.2). Редица подобрения на негова основа са патентовани, след като Boeing възлага развитието на тази концепция на компанията Fatigue Technology Inc. (Chamroux, 1977; Chamroux, 1980; Chamroux, 1984; Chamroux, 1984a; Chamroux, 1984b). Най-широко приложение в наши дни е намерил методът *Split Sleeve Cold Expansion*, собственост на Fatigue Technology Inc. (FTI) (Quincey et al., 1994), при който разрязаната втулка за еднократна употреба се изважда автоматично от обработения отвор. На база на него са разработени редица подобрения (Chamroux, 1984; Chamroux, 1985; Chamroux, 1985a).

Морфологичният признак на *ниво III* се отнася до основна характеристика на контакта “отвор-инстру-

мент“, а следващите IV^{-то}, V^{-то} и VI^{-то} нива дават допълнителни характеристики на съответните методи.

За елиминиране на основния недостатък на метода *Split Sleeve Cold Expansion* - реализиране на студено разширение посредством скъпоструваща втулка-посредник за еднократна употреба, е патентована идеята за използване на неразрязана втулка за многократна употреба, изработена от сплав, имаща памет на формата (метод с означение A.1.1.2.1) (Mead, 1984). Авторът предлага два вида сплави с такова поведение – нитинол на основата на никел-титан с около 53-57 % никел или на основата на мед-цинк-алуминий с около 70 % медно съдържание. Методът предвижда специфично трикратно температурно въздействие върху втулката: в диапазона $(-320 - 300) ^\circ F$ за провокиране на памет на формата, охлаждане преди студено разширение и нагряване на пластично деформираната втулка до критична преходна температура за намаляване на диаметъра ѝ, така, че да може да се извади от обработения отвор. До момента обаче, не са известни публикации относно практическото приложение на метода.

Идеята за използване на предварително смазана тънкостенна монолитна втулка-посредник за многократна употреба (метод от подгрупа A.1.1.2.1) е развита в (Куо, 2001). За обезпечаване на памет на формата в случая се разчита на супереластично поведение за материала, от който е изработена втулката. Независимо от претенцията за елиминиране на финалното райбероване в технологичния цикъл, не са известни публикации, свързани с приложението на метода.

Използването на неразрязана стоманена втулка-посредник е адаптирано за случая на студено разширение на две и повече плочи, които се свързват чрез болтово съединение (King, 1975). Методът се реализира чрез конусно-цилиндричен дорн, преминаващ през общия отвор открай докрай, като между дорна и отвора е установена монолитна втулка, която след разширението остава в общия отвор за предпазване от т.н. “фретинг ефект”. Този ефект се наблюдава обичайно при болтови съединения, натоварени динамично вследствие високи контактни напрежения и малки относителни премествания по челните повърхнини в близост до отвора. Методът е модифициран в (King J. O., 1979), като тънкостенната втулка се характеризира с определена коравина в осово и окръжно направление. Използването на втулка, която остава в общия обработен отвор (с означение A.1.1.2.2.1), рефлектира в туширане както на фретинг ефекта, така и на неизбежния за процеса ефект от “surface upset” (out-of-plane деформации) – осови деформации на входа и изхода в близост до обработения отвор. Идеята за използването на тънкостенна неразрязана стоманена втулка като посредник между преминаващ през отвора открай докрай конусно-цилиндричен дорн и обработения отвор е модифицирана в изобретените метод и устройство за студено разширение в (King, 1976). Когато най-големият диаметър на дорна преминава през втулката, специален режещ ръб върху дорна надлъжно разрязва втулката с цел по-лесно изваждане на същата от обработения отвор (с означение A.1.1.2.2.2). Устройство

за студено разширение на отвори посредством трансляционно движещ се дорн и втулка, разрязана с множество срезове, е разработено от Boeing (Champoux et al., 1975). Надлъжно разрязаната втулка е закрепена неподвижно в единия си край, а другият се въвежда в отвора. Студеното разширение на отвора е резултат от преминаването през втулката на конусно-цилиндричен дорн (с означение А.1.1.1.3).

Независимо, че многообразието от методи, базирани върху използването на втулка-посредник, са възникнали с цел превенция срещу уморното разрушение в аероиндустрията, повечето от тях не са намерили практическо приложение с изключение на метода *Split Sleeve Cold Expansion*. На негова основа компанията FTI разработва специфични приложения в алуминиеви, стоманени и титанови детайли. Пълната спецификация на инструменти и устройства, реализиращи метода е публикувана в средата на 80-те години на миналия век и е възприета като стандартна технологична практика в аероиндустрията на САЩ. За повишаване на уморната дълготрайност на релсовите пътища в ж.п. транспорта, FTI е разработила системата RailTec (RtCx), реализираща студено разширение на болтовите отвори в краищата на релсите в незаварените релсови пътища или т.н. наставови железни пътища. Системата RailTec е възприета не само в САЩ, но и във Великобритания (прилага се от компанията Torgent Trackside Ltd.) и Хонг Конг. Резултатите от внедряването показват висока ефективност на системата – аварии, следствие умора на материала около болтовите отвори са намалели драстично, а икономическият ефект се дължи на икономии от намален надзор на пътя, на намалени разходи за текущо поддържане и смяна на релсите. В резултат срокът на експлоатация на релсите преди появата на пукнатини от умора се е увеличил от три до десет пъти, което рефлектира в значително по-голяма сигурност. На основата на посочените приложения на метода *Split Sleeve Cold Expansion* в наши дни компанията FTI заема най-голям пазарен дял в сектори като самолетостроене и ж.п. транспорт в страните, в които концепцията студено разширение е възприета.

Акцентирайки върху скъпоструващата разрязана втулка за еднократна употреба, компанията West Coast Ind. разработва метода „*Split Mandrel*” като алтернатива на конкурентния метод за приложение в аероиндустрията (с означение А.1.1.2.2) (Hogenhout, 1986). Методът *Split Mandrel* включва използването на кух разглобем дорн (надлъжно разрязания на четири части, откъдето произтича наименованието на метода), който щом като се въведе в отвора, се „втвърдява” посредством осово преместване на малък щифт, разположен в централен отвор и същевременно се достига необходимия работен диаметрален размер. След „втвърдяването” му, дорнът се изтегля през отвора, при което го разширява. Тъй като студеното разширение се реализира в условията на директен нормален и тангенциален контакт с повърхнината на отвора, методът *Split Mandrel* изисква използването на течно мажещо вещество между дорна и отвора. Поради вида на контакта и спецификата в поведението на алуминиевите сплави, мажещото вещество е на основата на цети-

лов алкохол, което се впръсква чрез специално приспособление за пулверизиране. Така се намалява осовото усилие за изтегляне на дорна, както и задирианията по повърхността на отвора. След подобрене на устройството, реализиращо метода (Hogenhout, 1986a), *Split Mandrel* е най-широко използвания метод в практиката от методите, при които студеното разширение се осъществява в условията на директен контакт с повърхнината на отвора (методи от група А.1.1.2). От гледна точка на принципна схема, за предшественик на метода *Split Mandrel* може да се смята патентования доста преди това метод от Maxwell, 1944, разработен с цел студено разширение на тръби. Процесът се реализира чрез трансляционно движение на кух, надлъжно разрязан дорн с конусен отвор, който се настройва на размер чрез конусен „пин”, установен в конусния отвор на дорна.

Идеята за студено разширение посредством преминаващ открай до край на конусно-цилиндричен дорн с или без разрязана втулка-посредник е адаптирана от Landy M. A., 1989 към случая на отвори с некръгла или овална форма, които съдържат участъци със закръгления и праволинейни такива. За целта през I^{-вия} етап се въвеждат натискови остатъчни напрежения около предварително пробитите отвори в зоните със закръгления. През II^{-рия} етап се изрязва излишния метал за формиране на желаната конфигурация на некръглия отвор. По този начин натисковата зона е локализирана в местата с най-интензивна естествена концентрация на напреженията.

Идеята за обработване на отвори чрез студена пластична деформация посредством преминаващ през отвора открай докрай монолитен сферичен инструмент е адаптирана за условията на конвенционално машиностроително оборудване в Патент за изобретение (Максимов и др., 2013). Методът се отличава със специфична кинематика на инструмента по отношение на неподвижния детайл – суперпозиция от сферично движение и праволинейна трансляция по направление на оста на отвора. Акцентирайки върху основния компонент в кинематиката на метода, същият е наречен *Сферично дорноване*. Чрез избор на подходяща номинална стегнатост методът позволява да се комбинират предимствата на ППД технологиите (burnishing) и студената обемна пластична деформация. Механиката на процеса е задълбочено изследвана в (Maximov, 2002; Maximov 2002a; Maximov and Anchev, 2003; Maximov, 2004; Maximov, 2005; Maximov and Duncheva, 2008), а мащабно изследване на технологичните му възможности е проведено в периода 2013-2015 г. в изпълнение на проект „Нова уякчаваща технология и инструментална екипировка за обработване на отвори” с бенефициент ГД Инженеринг ЕООД, Договор BG161PO003-1.1.05-0310-C0001/15.02.2013 г., процедура BG161PO003-1.1.05 „Разработване на иновации от стартиращи предприятия”, ОП „Развитие на конкурентността на българската икономика” 2007-2013.

Хронологически най-рано – в началото на XX век, са възникнали методите, реализиращи идеята за студено разширение посредством радиално механично въздействие върху повърхнината на отвора (методи от

подгрупа A.1.2). Това може да се обясни с асоциирането на логическата зависимост “причина – следствие” с термините “радиално механично въздействие – студено разширение”. От гледна точка на принципни схеми, тези методи имат характер на пионерни изобретения, макар че се използват по-скоро в технологичен аспект - за разширение на краища на тръби.

В този аспект първият метод за радиално студено разширение се реализира чрез осово движение на конусен дорн, взаимодействащ си с конусен отвор на диагонално разрязана втулка (с означение A.1.2.3) (Young and Speyer, 1901).

В (Salter et al., 1966) радиалното въздействие се реализира посредством монолитен конусен дорн и монолитна конусна втулка с цилиндрична външна повърхнина, при което втулката е изработена от материал с памет на формата (с означение A.1.2.4).

Идеята за радиално разширение посредством използване на материал с памет на формата е приложена и по отношение на дорна в (Kennedy and Larson, 1996). Дорнът се разширява радиално, разширявайки отвора посредством втулка-посредник, след което се свива (с означение A.1.2.2). Тази трансформация в размера му се постига за сметка на последователно загряване-охлаждане. Изобретението предвижда оставането на втулката в отвора, така, че радиалната експанзия остава да действа след изваждане на дорна.

Идеята за радиално въздействие чрез множество радиално подвижни работни органи за пръв път е развита и патентована от Faessler (1909), а малко по-късно – подобрена от Austin (1909). Прави впечатление, че методите от подгрупа A.1.2, насочени за приложение върху динамично натоварени конструкционни елементи с отвори, не са развивани изобщо през XX век. Същевременно, макро-ефектът не се свързва с радиално въздействие по отношение на повърхнината на отвора до началото на XXI^{ви} век. Едва през 2009 г. е патентован инструмент, реализиращ идеята за радиално въздействие върху повърхнината на отвора посредством множество от радиално подвижни работни органи, задвижвани от осово подвижен инструмент с конусна или пирамидална форма (с означение A.1.2.1.1) (Wolcken et al., 2009). Патентът се ограничава до принципни схеми за реализация с ръчно задвижване.

3.3. Чрез механично въздействие по челните повърхнини около отвора (подгрупа A.2)

Методите от подгрупа „A.2” са разработени през 60^{-те} години на XX век и подобно на повечето методи, базирани върху макро-подхода, са провокирани от повредите вследствие умора на материала около многобройните отвори в носещите структурни компоненти на летателните апарати - крила, фюзелажи и др. Пионерното изобретение се свежда до щанцоване с деформираща ролка или пресоване на тънък канал с полукръгло напречно сечение по челните страни на метални компоненти в близост около периферията на кръгли или некръгли отвори (Phillips, 1963). *Изобретението е пионерно и от друга гледна точка – за пръв път претенцията за ефективност на предлагания метод*

се основава на полезния ефект от генерираната вследствие студената пластична деформация зона с полезни остатъчни окръжни напрежения на натиск, която възпрепятства развитието на пукнатини от I^{ви} тип. Акцентирайки върху този ефект, методът е наречен “Stress coining”. Предвид характера на въздействието, методът е подходящ за приложение върху листови конструкционни елементи от алуминиеви сплави, чийто модул на еластични деформации е приблизително три пъти по-малък от този на стоманата. Може да се използва и върху конструкционни елементи, чийто ресурс от гледна точка на умора на материала е частично изчерпан – ефектът се изразява в “арестуване” на вече възникнали уморни пукнатини.

По-късно Speakman, 1969 патентова метода “Ring coining”, претендирайки за по-ефективна стресирана зона около отворите - резултат от ударно въздействие чрез инструменти с пръстеновидно сечение по челните повърхнини на конструкционните елементи, така, че се формира пръстеновиден отпечатък около отвора.

Ударно въздействие чрез индентори с пръстеновидно напречно сечение по направление на оста на отвора, при което единият индентор изпълнява функцията на поасон, а другият – на матрица, е в основата на метода “Pad stress coining” (Phillips, 1972; Phillips, 1973). Ефективността на методите от вида Pad stress coining върху алуминиеви сплави 2014-T3 и 7075-T6 е доказана чрез уморни тестове в самите изобретения. Независимо от това, с много малки изключения (Ogeman and Josefson, 1995), не са известни научни публикации, доказващи приложимостта на методите от група A.2 в практиката.

3.4. Чрез ударно въздействие преди пробиване (подгрупа B.1)

С определена условност създаването на натискова зона преди пробиването на отвора може да се разглежда като развитие на идеята “stress coining”. Пионерното изобретение е разработено като алтернатива на методите Split Sleeve и Split Mandrel в аероиндустрията от компанията StressWave Inc. сравнително късно (Easterbrook, 2001). Методът се реализира в два етапа. В първия етап се създава натискова зона в плътния материал посредством предварително ударно въздействие от двете страни на плочата едновременно по оста на бъдещия отвор, като следата на повърхността служи за центрови отвор. Следствие на получения удар, материалът около контактната зона с инденторите се деформира пластично, като същевременно във всички направления се разпространява еластична вълна на напреженията, което е дало наименованието на метода – “StressWave”. Следствие от акумулираната потенциална енергия на еластичните деформации, след затихване на вълните в пластично деформираната зона се получават остатъчни напрежения на натиск. Във втория етап се осъществява свредловане. Премахването на излишния материал, респ. получаване на отвора, променя съпротивлението и по естествен път се получава преразпределение на остатъчните напрежения в посока на увеличаване по абсолютна стойност на окръжните нормални натискови напрежения около периферията на отвора. Изобретението по-късно е подобро от автoра си (Easterbrook, 2004).

3.5. Чрез температурно въздействие преди пробиване (щанцоване) (подгрупа В.2)

Идеята за температурно въздействие преди създаване на отвора е развита и защитена в Патент за изобретение "Метод за създаване на натискова зона около крепежни отвори" № 65220/15.11.2007 (Максимов и др., 2007). При този метод в първия етап се прилага локално кратковременно топлинно въздействие чрез електроди, т.е. създава се температурно поле върху мястото на бъдещия отвор. Формирането на зоната с остатъчни окръжни напрежения на натиск е резултат от втория етап – щанцоване. Процесът се осъществява при термомеханичен режим на полугореща пластична деформация. След отстраняване на излишния метал в областта на отвора по естествен път се извършва преразпределение на напреженията. Охлаждащите се слоеве метал, които в следствие на топлинното въздействие от първия етап са отдалечени от центъра на отвора, се стремят да преодолеят противопоставящите им се деформирани слоеве метал и да се придвижат в обратна посока. По този начин около отвора се формира достатъчно широка и интензивна зона с остатъчните окръжни натискови нормални напрежения. Предвид характерът на въздействие, методът е ефективен върху материали с относително по-малка пластичност и по-голяма якост.

4. АНАЛИЗ НА СЪЩЕСТВУВАЩИТЕ МЕТОДИ, БАЗИРАНИ ВЪРХУ МАКРО-ПОДХОДА

4.1. Принципи на схеми (технологични цикли)

За анализ на методите, реализиращи макро-подхода, е необходимо да се познават принципните им схеми и/или съответстващите им технологичните цикли. За целта в таблица 1 схематично са представени едни от най-известните методи, като всеки метод е означен в съответствие с класификационните схеми, показани на фиг. 4 и фиг. 5.

Целесъобразно е анализът на посочените в табл. 1 методи да се базира върху два основни аспекта:

► *Разпределение на остатъчните макро-напрежения в осово и окръжно направление;*

► *Технологична рационалност на съответния метод.*

4.2. Разпределение на остатъчните макро-напрежения в осово и окръжно направление

4.2.1. „Идеално” разпределение на остатъчните макро-напрежения

В съответствие с основната идея на макро-подхода, превенцията срещу уморното разрушение ще бъде толкова по-ефективна, колкото генерираната около отвора зона с остатъчни окръжни макро-напрежения на натиск е по-интензивна и хомогенна. Предвид значението на уморните пукнатини от I^{вн} тип, от интерес е разпределението на остатъчните окръжни нормални напрежения σ_t^{res} . Разпределението на σ_t^{res} е „идеално”, когато генерираната зона е напълно хомогенна в осово и окръжно направление, т.е. липсват градиенти в тези направления. Очевидно, „идеалното” разпределение допуска градиент на зоната с σ_t^{res} в радиално направление, тъй като обратното изключва тезата за постигане на еластично равновесие след студено пластично деформиране.

4.2.2. Анализ на методите в аспект на разпределение на σ_t^{res} в осово направление

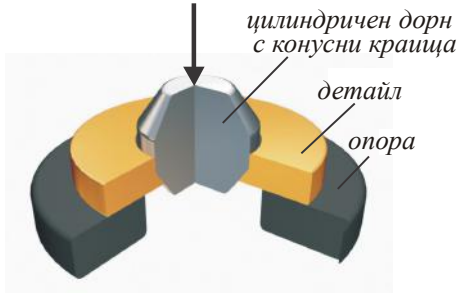
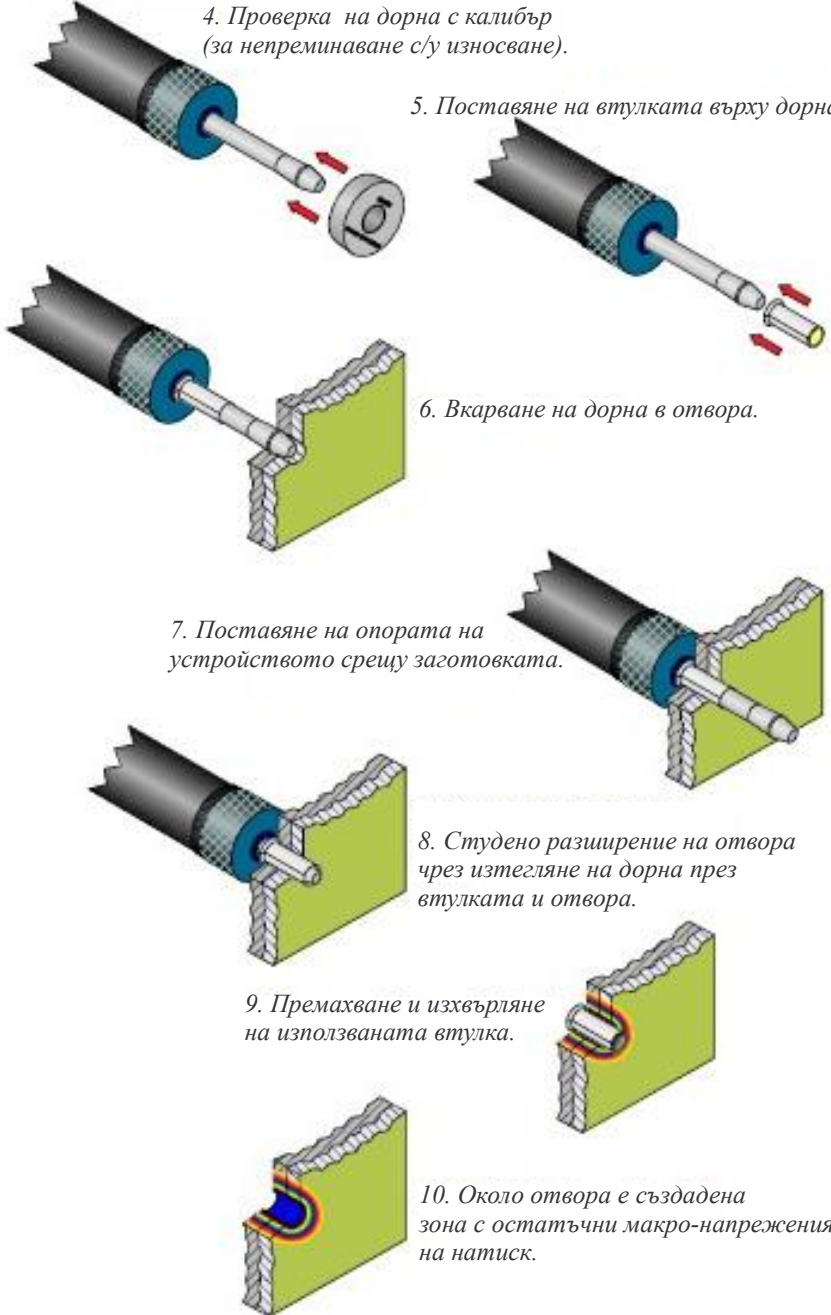
Проучването на публикациите, свързани с различни аспекти на макро-подхода, доказва най-широко приложение на методите, при които създаването на зоната с остатъчни макро-напрежения на натиск е резултат от преминаване открай докрай през предварително пробития отвор на съответния инструмент (методи от подгрупа А.1.1). Независимо от използването или не на втулка-посредник, всички методи от подгрупа А.1.1 (табл. 1, поз. 1-поз. 6 вкл.) имат обща черта – *процесът на студено разширение се реализира посредством използването на опора, контактуваща с детайла.*

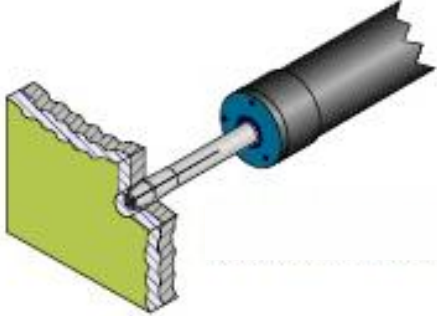
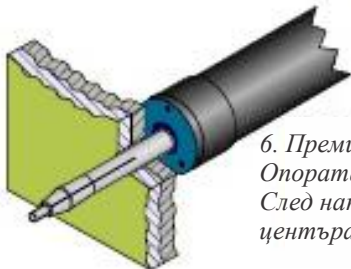
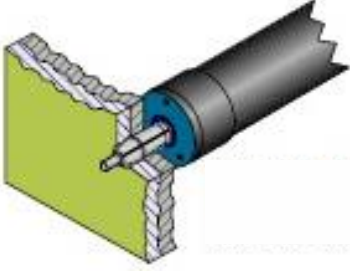
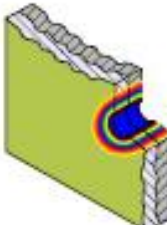
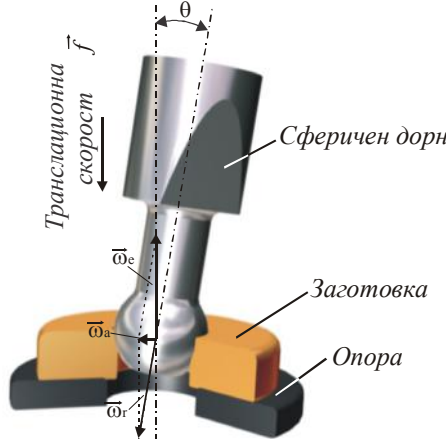
За изясняване на същността на процеса на студено разширение, реализирано чрез методи от подгрупа А.1.1, е използвана принципната схема на най-разпространения метод - *Split Sleeve Cold Expansion* (фиг. 6).

Принципни схеми (технологични цикли) на основни методи, реализиращи макро-подхода

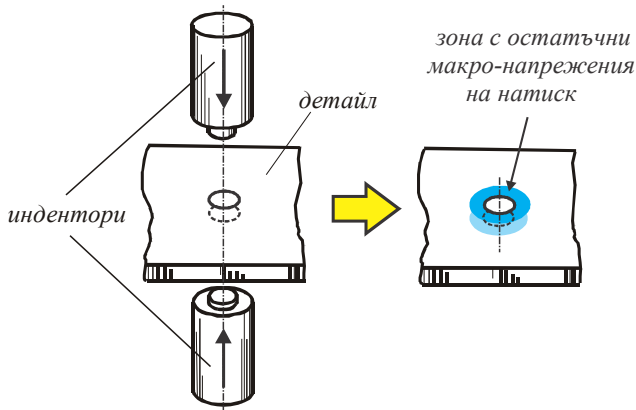
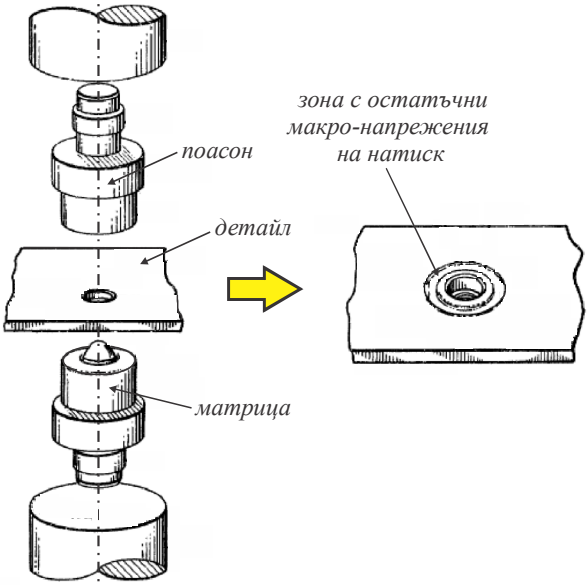
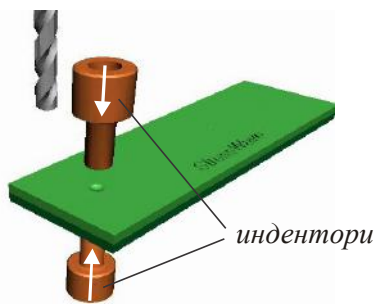
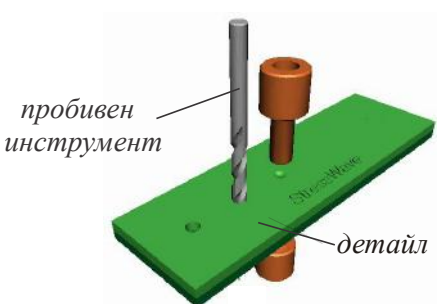
Таблица 1

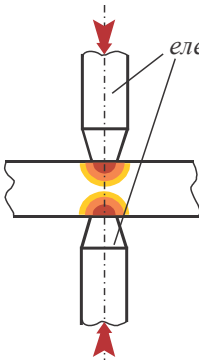
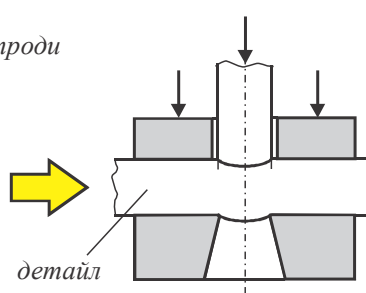
№	Означение	Наименование	Принципна схема (технологичен цикъл)
Подгрупа А.1			
1	A.1.1.2.3.1	Ball cold working	

2	A.1.1.2.1	Mandrel cold working	
3	A.1.1.1.1	Split sleeve cold expansion (технологичен цикъл според FTI)	1. Свредловане на отвора. 2. Райбероване на отвора до началния му диаметър. 3. Проверка на началния диаметър на отвора с калибър. 4. Проверка на дорна с калибър (за непреминаване с/у износване). 5. Поставяне на втулката върху дорна. 6. Вкарване на дорна в отвора. 7. Поставяне на опората на устройството срещу заготовката. 8. Студено разширение на отвора чрез изтегляне на дорна през втулката и отвора. 9. Премахване и изхвърляне на използваната втулка. 10. Около отвора е създадена зона с остатъчни макро-напрежения на натиск. 11. Инспекция на обработения отвор с калибър. 12. Райбероване на отвора до финалния диаметър. 13. Инспекция на финалния диаметър с калибър (допълнително райбероване, ако е необходимо). 

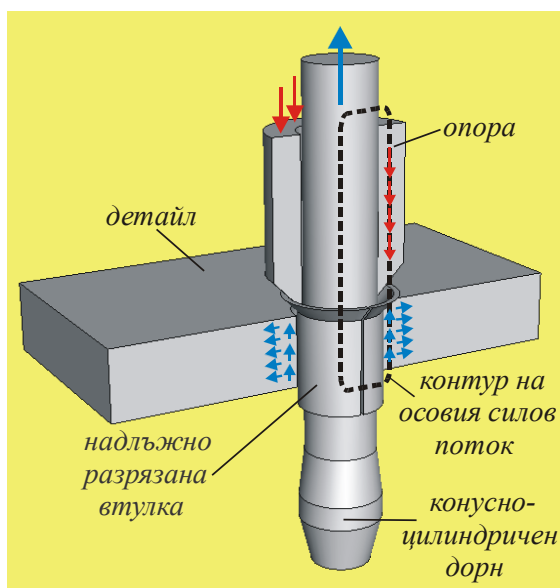
4	A.1.1.2.2	<i>Split mandrel (технологичен цикъл според West Coast Ind.)</i>	1. Свредловане на отвора. 2. Райбероване на отвора до началния му диаметър. 3. Проверка на началния диаметър на отвора с калибър.  4. Инспекция на дорна чрез вкарване на цифт-калибър до края на дорна и проверка на дорна с калибър с/у износване.  5. Вкарване на дорна в отвора (кухият разрязан дорн се свива).  6. Премаването през отвора е завършено. Опората на устройството е допряла до плочата. След натискане на спусъка, цифтът преминава центъра на кухия дорн и го „втвърдява“.  7. Отворът се разширява чрез издърпване обратно през материала на втвърдения дорн.  8. Отворът е студено разширен без използване на втулка, която се изхвърля. 9. Инспекция на диаметъра на обработения отвор с калибър. 10. Райбероване на отвора до финалния му диаметър. 11. Инспекция на финалния диаметър на отвора с калибър (допълнително райбероване, ако е необходимо).
5	A.1.1.2.3.2	<i>Сферично дорноване</i> <i>(Патент за изобретение BG№66384B1/ 03.01.2014 г. „Метод за обработване на цилиндрични отвори“)</i>	

6	A.1.1.2.1	Приложение на метода Mandrel cold working за стресиране на зоните с концентрация на напреженията в некръгли отвори	1. студено разширение на предварително пробитите отвори в местата със закръгления 2. изрязване на излишния метал (формиране на некръглия отвор)
7	A.1.2.4	Радиално разширение чрез монолитен конусен дорн и монолитна конусна втулка с памет на формата	1 2 конусен дорн 3 монолитна втулка с конусен отвор
8	A.1.2.2	Радиално разширение чрез дорн с памет на формата	1 2 загряване 3 охлаждане втулка-посредник дорн с памет на формата
9	A.1.2.1.1	Инструмент за радиално разширение на отвори чрез множество радиално подвижни сектори	ръчно задвижване осово подвижен конусен или пирамидален дорн множество радиално подвижни сектори

Подгрупа А.2			
10	-	Ring coining	 детайл индентори зона с остатъчни макро-напрежения на натиск
11	-	Ring pad coining	 поасон детайл матрица зона с остатъчни макро-напрежения на натиск
Подгрупа В.1			
12	-	Stress wave	1. Ударно въздействие  индентори 2. Пробиване на отвора  пробивен инструмент детайл

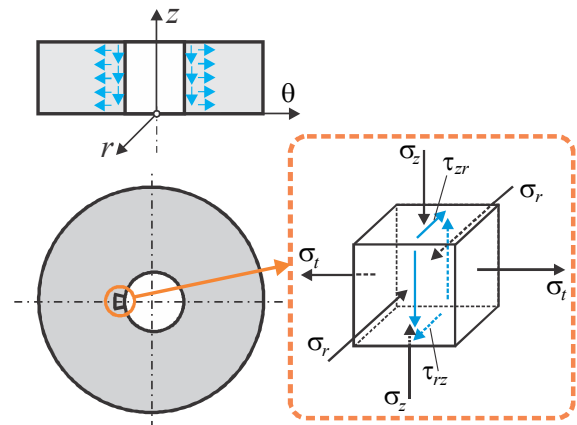
Подгрупа В.2			
13	-	Температурно въздействие преди щанцоване на отвора	1. Локално нагряване  2. Щанцоване 

Независимо, че въздействието върху повърхнината на отвора се извършва през надлъжно разрязана втулка-посредник, контурът на осовия силов поток се затваря през плочата (детайла) и опората към силовата част на съответното устройство, когато работната цилиндрична част на дорна се изтегля обратно през отвора, осъществявайки студено разширение (табл. 1, поз. 3, стъпка 8 от технологичния цикъл).



Фиг. 6. Принципно схемата на метода Split Sleeve Cold Expansion

В действителност процесът на студено разширение се осъществява слой след слой, тъй като представлява пластична деформационна вълна, която се премества по направление на оста на отвора заедно с движещия се дорн. Тангенциалните сили по направление на оста на отвора се отнасят за всички методи от подгрупа А.1.1, и следователно, тензорът на напреженията за точките в близост до повърхнината на отвора ще съдържа тангенциални напрежения в равнина rz (фиг. 7).



Фиг. 7. Напрегнато състояние за методите от подгрупа А.1.1 по време на студено разширение

Физическата същност на описания процес води до следните нежелани ефекти:

- Триразмерната природа на процеса на деформиране рефлектира в нееднородно напрегнато и деформирано състояние в различните напречни сечения по дебелината на плочата. В точките от челната повърхнина на плочата, разположена откъм страната на влизане на инструмента, напрегнатото състояние е двумерно, а деформираното състояние – тримерно. Точките от средното сечение на заготовката са в равнинно деформирано състояние. В точките от челната страна на заготовката, контактуващи с опората, напрегнатото състояние е тримерно. Това нееднородно напрегнато и деформирано състояние води до значителен градиент на остатъчните напрежения по направление на оста на заготовката. В резултат се получава изразено неравномерно разпределение на остатъчните напрежения в осово направление, като често пъти на входа се получава нежелателен пръстен от остатъчни напрежения на опън, респ. значително се увеличава вероятността за поява на ъглови пукнатини от умора на материала;

- Невъзпрепятстваното деформиране на точките от входната челна повърхнина на плочата, разположени около периферията на обработвания отвор, води до нежелани, значителни по големина остатъчни осови де

формации, известни като *“surface upset”*. Тези осови деформации около ръбовете на отвора са предпоставка за износване и развитие на микропукнатини следствие вредния фретинг ефект;

- Реализацията на процеса, респ. употребата на опора, налага закрепване на плочата, аналогично на схемата „третичково огъване“. В резултат се получава нежелан ефект от огъване на плочата около отвора.

Наличието на осов градиент в разпределението на σ_t^{res} след прилагане на методите от подгрупа А.1.1 е доказано в редица изследвания (Maximov and Duncheva, 2008; Maximov et al., 2008; Maximov et al., 2009; Garcia-Granada et al., 2000; Chakherlou et al., 2011; Duncheva et al., 2015). Предложеният от Chakherlou and Vogwell J. (2004) метод за студено разширение посредством разрязана конусна втулка отчасти тушира осовия градиент, но носи негативите от използване на специална разрязана втулка за еднократна употреба. Положителната роля на фаските за преразпределение на остатъчните напрежения на входа и на изхода на инструмента е доказана в (Дунчева Г.В. и др., 2006). Използването на фаски има и друг положителен ефект – минимизира се *surface upset* ефекта.

От гледна точка на минимизиране на осовия градиент, методите от подгрупа А.1.2 следва да бъдат предпочитани, тъй като процесът на студено разширение е резултат от радиално въздействие върху цялата повърхнина на отвора. Когато радиалното въздействие е еквивалентно на едновременно прилагане на налягане с една и съща големина в радиално направление по отношение на повърхнината на отвора, процесът е „чисто радиално разширение“. Тази постановка изключва тангенциален контакт между инструмента и повърхнината на отвора, както и присъствието на опора/опори. Но дори в условията на чисто радиално разширение, пълна осова симетрия в геометрията на конструкционните елементи и идеално хомогенен материал, генерираната зона с остатъчни напрежения не е равномерна в осово направление. Причината е различната радиална коравина на различните напречни сечения на плочата – в средата радиалната коравина е най-голяма, а в двете челни сечения – най-малка. Следователно, в идеалния случай на чисто радиално разширение се генерира симетрично спрямо средната равнина на плочата разпределение на остатъчните радиални премествания и остатъчни окръжни макро-напрежения.

В аспект на чисто радиално разширение, внимание заслужават методите, при които се използва материал с памет на формата – съответно монолитен дорн (табл. 1, поз. 7) и монолитна втулка (табл. 1, поз. 8). Тези методи обаче имат общ недостатък – използва се температурно въздействие посредством загряване на съответния конструкционен елемент след студено разширение с цел изваждане на инструмента от отвора. Това причинява релаксация на въведените остатъчни напрежения, редуцирайки полезния ефект от тях. Посоченият недостатък е избегнат при метода, предложен от Куо, 2001, при който за осигуряване на поведение с памет на формата на втулката се разчита на супереластичен материал. До момента тази идея не е приложена в практиката. Следователно, с оглед на минимизиране

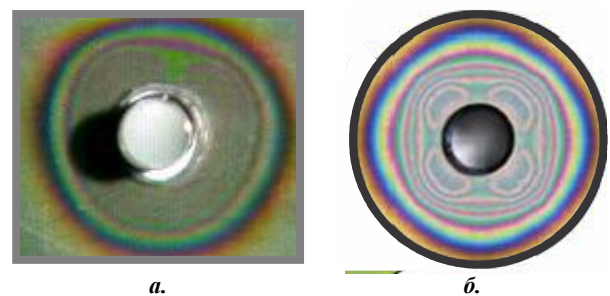
на осовия градиент, най-перспективни за практическа реализация са методите от подгрупа А.1.2.1, при които радиалното разширение се постига чрез множество радиално подвижни работни органи. В изобретението, патентовано от Wolcken et al., 2009, тази идея е развита до ниво “принципна схема на инструмент с ръчно задвижване”, като се акцентира върху твърдата връзка между осово преместващия се конусен или пирамидален дорн и радиално преместващите се множество сектори – степента на студено разширение *DCE* е в корелация с осовото преместване на дорна (табл. 1, поз. 9).

Принципните схеми на методите от група А.2, базирани върху едновременно механично въздействие по челните повърхнини по направление на оста на отвора (табл. 1, поз. 10 и поз. 11) осигуряват положителния ефект от генериране на симетрична спрямо средната равнина на плочата зона с остатъчни напрежения. Това предимство е характерно и за метода – представител на група В.1- StressWave (табл. 1, поз. 12) и метода от група В.2 – с предшестващо щанцоването на отвора двустранно локално нагряване (табл. 1, поз. 13). Недостатък на тези методи са внесените около отворите опънови остатъчни окръжни нормални напрежения вследствие окончателното обработване чрез рязане.

Недостатък на посочените методи от групи А.2, В.1 и В.2 е относително малката дълбочина и интензивност на създадената зона с полезни остатъчни напрежения. Тази зона е ефективна в близост до челните страни на плочата. Например след прилагане на метода *Ring pad coining* са измерени максимални по абсолютна стойност остатъчни окръжни напрежения до -25 ksi , т.е. по-малко от 1 MPa ;

4.2.3. Анализ на методите в аспект на разпределение на σ_t^{res} в окръжно направление

Хомогенността на зоната с σ_t^{res} в окръжно направление зависи от геометрията на инструмента, контактуващ с повърхнината на отвора. Наличието на срезове в надлъжно или диагонално направление причинява нехомогенност на генерираната зона с σ_t^{res} около отвора. Поради тази причина при метода Split Sleeve Cold Expansion зоната с остатъчни напрежения има сърцевидна форма в окръжно направление вследствие надлъжния прорез във втулката-посредник (фиг. 8а), а при метода Slit Mandrel характерът на разпределението наподобява четирилистна детелина (фиг. 8б).



Фиг. 8. Разпределение на зоната с σ_t^{res} в окръжно направление
а. при метода Split Sleeve Cold Expansion;
б. при метода Slit Mandrel

Очевидно, за постигане на максимално хомогенизиране на зоната с σ_t^{res} в окръжно направление, е необходимо инструментът или посредникът да бъдат монолитни. Реализирането на процеса студено разширение посредством преминаващи през отвора монолитни сферични или конусно-цилиндрични дорнове отговарят на това условие, но директният тангенциален контакт в осово направление е предпоставка за задиране на повърхнината на отвора.

Методите от групи А.2, В.1 и В.2 осигуряват напълно хомогенна зона в разпределението на σ_t^{res} в окръжно направление - следствие от начина на въздействие и осовата симетрия в геометрията на инденторите/елекродите.

4.3. Технологична рационалност на методите, реализиращи макро-подхода

Практическата реализация на различните методи в най-голяма степен зависи от технологичната рационалност на тези методи. Технологичната рационалност се определя от следните основни фактори:

- *Реализация на процеса с едностранен или двустранен достъп до съответния конструкционен елемент;*
- *Степен на сложност на инструментите и задвижващите ги устройства;*
- *Броят на операциите в технологичния цикъл, в т.ч. – брой на контролните операции;*
- *Изисквания по отношение на размерите и качеството на предварително пробитите отвори;*
- *Ефективност върху различни материали;*
- *Изисквания по отношение на квалификацията на операторите.*

Очевидно, повечето фактори са във взаимна зависимост.

Сравнителният анализ между принципните схеми на исторически най-старите методи - Ball cold working и Mandrel cold working с метода Сферично дорноване и най-широко застъпените методи в наши дни - Split Sleeve Cold Expansion и Split Mandrel, показва едно сериозно предимство на последните два метода: възможност за реализация на процеса с едностранен достъп до съответния конструкционен елемент. От друга страна, посредством принципната схема на конкретния метод, този показател е свързан с вида на необходимото техническото оборудване за практическата му реализация: пресови машини (машини за опън-натиск), конвенционално машиностроително оборудване или специални мобилни (преносими) устройства с хидравлично задвижване. В този аспект, всички методи от подгрупа А.1.1, с изключение на метода Сферично дорноване, реализират една от двете работни схеми по отношение на дорна – прошиване (методите Ball cold working и Mandrel cold working) или изтегляне (методите Split Sleeve Cold Expansion и Split Mandrel). Поради това реализацията на тези методи изисква значителна осова сила, осигурена съответно от стационарни пресови машини или мобилни хидравлични станции. Специфичната кинематика на метода Сферично дорноване включва инструмент – сферичен дорн, който се върти около собствената си ос с релативна ъглова скорост $\bar{\omega}_r$, и същевременно се върти около оста на отвора с пре-

носна ъглова скорост $\bar{\omega}_e$ (табл. 1, поз. 5). Двете оси се пресичат под малък ъгъл θ (ъгъл на нутация), а абсолютната ъглова скорост на инструмента е векторна сума от преносната и релативната. Същевременно инструментът извършва праволинейна трансляция по оста на отвора. Именно сферичното движение позволява многократно да се редуцира необходимата осова сила при равни други условия в сравнение със случая на чиста трансляция (например метода *Ball cold working*). Това дава възможност Сферичното дорноване да се реализира върху конвенционално машиностроително оборудване посредством относително несложни устройства.

Реализирането на процеса при едностранен достъп е от определящо значение в аероиндустрията, където процентът на ръчни дейности е относително голям, а конструкционните елементи имат голям брой отвори и големи габаритни размери. Това обстоятелство пряко рефлектира както върху сложността на необходимото техническо оборудване, така и върху броя на операциите в технологичния цикъл. Независимо от различията в детайлите, най-общо реализирането на методите от подгрупа А.1.1 в условията на едностранен достъп включват последователно вкарване в предварително пробития отвор на инструмент с по-малък диаметър и изтегляне на инструмента с максимален работен диаметър обратно през отвора за реализиране на процеса на студено разширение. Това в значителна степен усложнява както конструктивната реализация на инструментите, така и специалните устройства за задвижване и управление на съответния технологичен цикъл. Технологичните цикли, съответстващи на двата конкурентни метода, съдържат значителен брой операции: при метода Split Sleeve Cold Expansion общият брой на операциите е 13 (табл. 1, поз. 3), а при метода Split Mandrel – с две по-малко (табл. 1, поз. 4). Основен недостатък на първия метод е използването на надлъжно разрязана втулка-посредник, която след разширението се изхвърля, тъй като е негодна за употреба. Този факт обяснява затрудненията с практическата реализация на идеята за втулка-посредник за многократна употреба със супереластично поведение за осигуряване на памет на формата. От друга страна, тази идея усложнява технологичния цикъл, тъй като е необходимо значително по-голяма сила за предварително вкарване на работната част на дорна (с максимален диаметър) във втулката. По този начин, за всеки обработван отвор, втулката ще трябва да бъде подложена два пъти на максимална деформация – веднъж за вкарване върху дорна и втори път – по време на студено разширение. Причините, поради които не е намерил практическа реализация и методът, при който за осигуряване на памет на формата се препоръчва нитинол или сплав на основата на мед-цинк-алуминий (Mead A. R., 1984) са високата цена на материала на втулката и разходите, необходими за трикратно температурно въздействие до достигане на критични преходни температури.

Анализирайки технологичните цикли на методите Split Sleeve Cold Expansion и Split Mandrel, може да се заключи, че и двата метода са разработени върху принципно една и съща концепция. Степента на студено разширение *DCE* на отвора зависи единствено и само от диаметралните размери на дорна при Split Sleeve

Cold Expansion или на дорна и щифта при Split Mandrel, и от диаметра на предварително пробития и райберован отвор. За да се гарантира зададената със съответен допуск стегнатост между деформиращия отвора дорн и предварително пробития отвор, е необходимо осъществяването на контрол по геометричен критерий, както и на диаметра на предварително пробития отвор, така и на работната част на „вкоравения“ дорн срещу износване (чрез калибри). Такъв контрол се извършва и на осовия отвор на дорна, в който се позиционира цилиндричния щифт при метода Split Mandrel. Големият брой операции, както и необходимостта от добре обучени оператори повишава цената на обработката. От друга страна, се изисква много тесен допуск на диаметралния размер на предварително обработените отвори, което значително оскъпява технологичния процес като цяло. Следователно, процесът на студено разширение, реализиран чрез най-конкурентните методи Split Sleeve Cold Expansion и Split Mandrel по същество съответства на размерен процес. Тази характеристика се отнася до всички методи от подгрупа A.1.1.

Ефективността на методите от подгрупа A.2 зависи от механичните характеристики на в технологичен аспект обработвания материал, геометрията на стресраната пръстеновидна повърхнина около отвора, кинетичната енергия и геометрията на инденторите и дълбочината на проникване. Физическата същност на тези методи и посочените фактори затрудняват оптимизирането на процеса като цяло и ограничават приложението им само до алуминиеви сплави.

Методът StressWave (табл. 1, поз. 12) е подходящ за приложение върху алуминиеви сплави с възможност за автоматизация, но в конструктивен вариант на равнинни компоненти с множество отвори с еднаква стъпка. Повечето носещи компоненти в летателните апарати имат профилна форма, което затруднява практическата реализация на метода.

Техническата реализация на метода, включващ температурно въздействие преди щанцоване на отвора (табл. 1, поз. 13), респ. изследването и оптимизирането на работния цикъл са свързани със значителни разходи на средства, труд и време. Поради тези причини до момента методът не е изследван експериментално.

Обобщавайки, алтернатива на размерните процеси са методите от подгрупа A.1.2, реализиращи концепцията „радиално разширение“. Поради посочените недостатъци на тези от тях, при които се използва материал с памет на формата, особено перспективен е подходът за радиално разширение чрез множество радиално подвижни работни органи.

5. ОСНОВНИ ИЗВОДИ ЗА СЪВРЕМЕНОТО СЪСТОЯНИЕ НА МЕТОДИТЕ, РЕАЛИЗИРАЩИ МАКРО-ПОДХОДА

За определяне на насоките на развитие на макро-подхода е необходимо да се направят *основните изводи за състоянието на съществуващите методи*:

- Методите, реализиращи концепцията студено разширение (подгрупа A.1) са най-перспективни от гледна точка на възможност за осигуряване на натиска зона с максимална интензивност и дълбочина и технологична рационалност;

- Основен недостатък на най-разпространените методи от подгрупа A.1.1, вкл. методите Split Sleeve Cold Expansion и Split Mandrel е наличието на значителен осов градиент в разпределението на σ_t^{res} - предпоставка за възникване и развитие на опасни ъглови пукнатини;

- Технологичните цикли на най-конкурентните методи Split Sleeve Cold Expansion и Split Mandrel на практика реализират размерен процес, което увеличава броя на операциите и оскъпява технологичния процес като цяло;

- Концепцията за радиално разширение посредством дорн или втулка-посредник с памет на формата осигурява по-хомогенна зона с остатъчни напрежения в осово и окръжно направление, но практическата ѝ реализация е свързана със значителни технологични проблеми;

6. ИНОВАТИВНИ МЕТОДИ ЗА СТУДЕНО РАЗШИРЕНИЕ НА СКРЕПИТЕЛНИ ОТВОРИ

Направените изводи позволяват да се определят основните насоки за синтез на иновативни методи, реализиращи макро-подхода:

- *Минимизиране на осовия градиент в разпределението на остатъчните напрежения σ_t^{res} около отвора в посока на генериране на симетрична зона спрямо средната равнина на съответния конструктивен елемент;*

- *Възможност за компенсиране на относително по-широк допуск в диаметралния размер на предварително обработените отвори;*

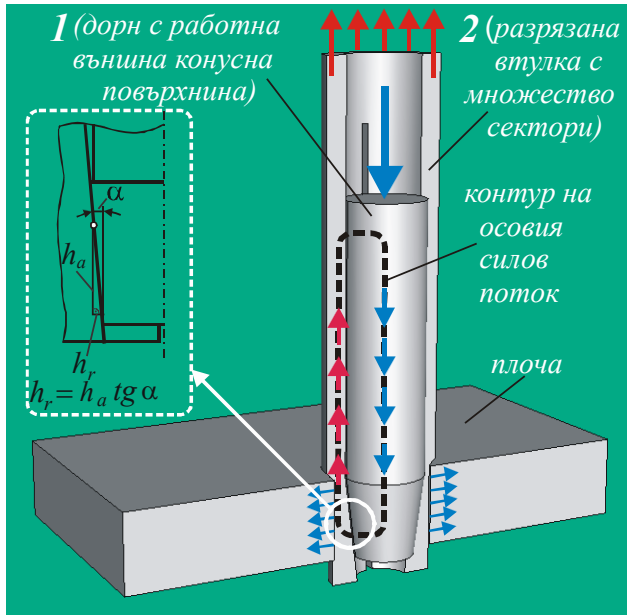
- *Възможност за управление на степента на студено разширение DCE;*

- *Намаляване на броя на операциите в технологичния цикъл, вкл. контролните операции и оттам – себестойността на обработката.*

6.1. Методът Controlled Symmetric Cold Expansion (Контролирано Симетрично Студено Разширение)

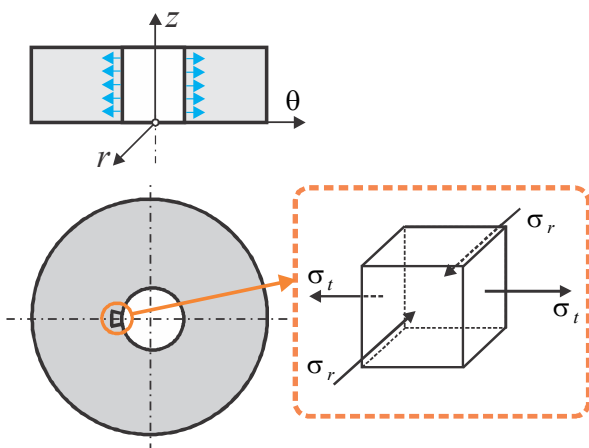
Методът реализира идеята за чисто радиално разширение посредством радиално преместващи се множество работни органи тип сектори (методи от подгрупа A.1.2.1). В действителност, на основата на тази идея независимо едно от друго са патентовани две изобретения: “Expansion tool for cold expansion of holes” (Wolcken et al., 2009) и „Инструмент за обработване на скрепителни отвори” (Максимов и Дунчева, 2011) (фиг. 9).

Процесът на студено разширение се реализира чрез осово преместване на дорна, при което последният си взаимодейства със съответни вътрешни конусни повърхнини на секторите 2, изработени с ъгъл на конуса, равен на α . В резултат на това се провокира едновременно преместване на секторите, при което всеки сектор се премества радиално по направление на симетралната си равнина, следствие от огъвната му деформация. За обезпечаване на необходимата огъвна деформация на секторите, съгласно изобретението, втулката 2 е разрязана на достатъчно голяма дължина.



Фиг. 9. Принципно схем на метод за чисто радиално разширение посредством множество радиално подвижни сектори

Отличителна особеност на иновацията е осигуряване на контрол върху степента на студено разширение DCE чрез последователно реализирани силов контрол (по налягане) и кинематичен контрол (по преместване). Силовият контрол гарантира взаимодействието между конусните повърхнини на дорна и секторите, когато външните цилиндрични повърхнини на последните контактуват с повърхнината на отвора след обикане на хлабината. Това позволява да се обработват отвори с относително по-голям допуск на предварителния им диаметър. Кинематичният контрол осигурява достигане на определено радиално преместване h_r , а оттам и на зададената степен на студено разширение DCE.



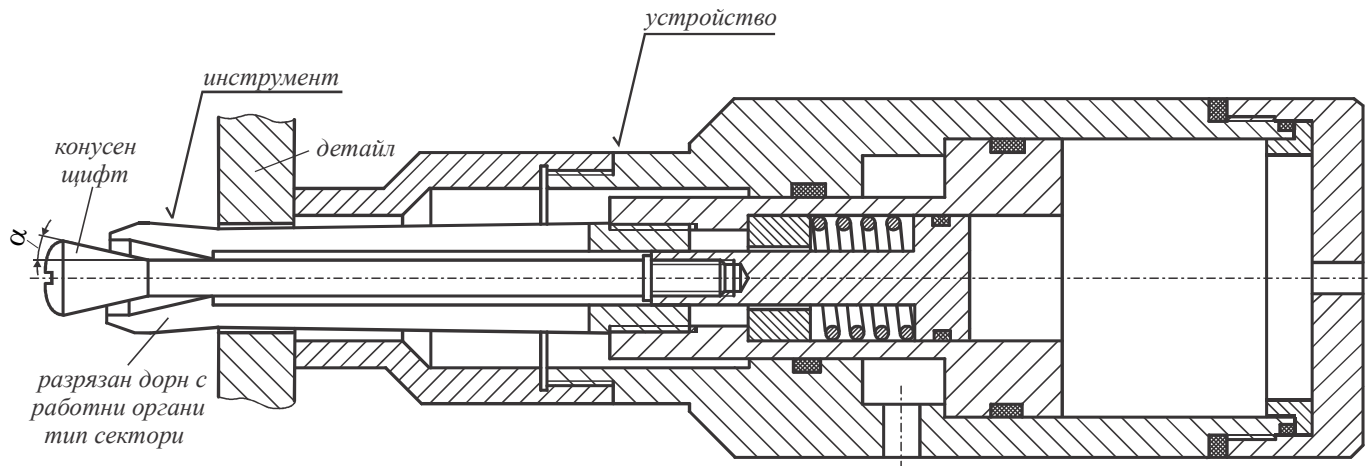
Фиг. 10. Напрегнато състояние по време на студено разширение за методите от подгрупа A.1.2

Съгласно принципната схема на метода, през детайла с обработвания отвор не преминава осов силов поток, което изключва тангенциални компоненти на напреженията (фиг. 10). В резултат се получава почти равномерна и симетрична спрямо средната равнина на детайла зона с остатъчни напрежения на натиск (Duncheva and Maximov, 2013; Maximov et al., 2013). Поради изброените предимства методът е наречен *Controlled Symmetric Cold Expansion* (Контролирано Симетрично Студено Разширение). Методът е особено подходящ за СР на скрепителни отвори в конструкционни елементи от материали с ортотропно поведение – например композитни алуминиеви сплави с вибросъкло, използвани в аероиндустрията.

На основа на описаното изобретение, авторите Й. Максимов и Г. Дунчева разработват следваща, подобрена версия, патентована в САЩ и Русия (Maksimov and Duncheva, 2014; Максимов и Дунчева, 2013) която се отнася до „Устройство и инструмент за студено разширяване на скрепителни отвори“ (Device and tool for cold expansion of fastener holes). Предимствата на инструмента се състоят в това, че с един инструмент може да се реализират различни степени на студено разширение, процесът се осъществява с по-малка осова сила поради отсъствие на ръбов контакт между дорна и сегментите. За целта всеки сегмент контактува с конусната повърхнина на дорна само по една образуваща, лежаща в равнината на симетрия на съответния сегмент, за всяко взаимно разположение на дорна и сегментите. Съгласно изобретението, е разработен и вариант на изпълнение на инструмент, при който радиалното разширение се реализира чрез радиална трансляция на работните органи (с означение A.1.2.1.1.2). Осъществяваният с устройството процес на студено разширение не е размерен, тъй като е един и същ инструмент се реализират различни степени на студено разширение в зависимост от осовия ход на дорна след достигане на зададеното минимално налягане, респ. след достигане на плътен контакт между конусната част на дорна, сегментите и отвора. По този начин се допуска относително по-широк допуск на диаметра на предварително пробития отвор и не се налага проверка с калибър, което е присъщо на размерните процеси.

6.2. Модифициран метод за студено разширение

Разработен е иновативен метод за студено разширение на отвори, който по същество представлява модификация на метода Split Mandrel (Maksimov and Duncheva, 2014a). За тази цел, в съответствие с изобретението са създадени инструмент и устройство с хидравлично задвижване и управление. Общ вид на устройството и инструмента, съответстващ на основния вариант на изпълнение на устройството и началото на технологичния цикъл, е показан на фиг. 11.



Фиг. 11. Инструмент и устройство, реализиращи патентован модифициран метод за студено разширение

Инструментът включва дорн, надлъжно частично разрязан, така, че са оформени поне три симетрични сегмента на дорна, в осов отвор на който е позициониран цилиндричен, осово подвижен щифт. Работната част на дорна е оформена от две конусни повърхнини, свързани помежду си с цилиндрична повърхнина с максимален диаметър. Единият край на цилиндричния щифт има конусна повърхнина, влизаща в контакт с повърхнината на конусен отвор, изработен в разрязания край на дорна, като двете конусни повърхнини имат един и същ ъгъл на наклона α и се разширяват по посока на разрязания край на дорн. Всеки сегмент от работната част на дорна, посредством конусната си повърхнина, контактува с конусната повърхнина на щифта само по една образуваща, лежаща в равнината на симетрия на съответния сегмент, за всяко взаимно разположение в осово направление на сегментите и щифта.

Предвид реализиране на процеса посредством преминаване открай докрай през отвора (чрез изтегляне), номиналната стегнатост е геометрически неизменяема величина, тъй като се определя от разликата между максималния и минимален диаметър на разрязания дорн. Това осигурява предимството процесът да се реализира с една и съща стегнатост между дорна и предварително пробитите отвори, при относително по-широк допуск на диаметралния им размер. Възможността за компенсиране на допуската на предварителните отвори, от една страна позволява да се изключат контролните операции, присъщи за базовия метод Split Mandrel, а от друга страна, не се изисква тесен допуск на предварително обработените отвори. Това рефлектира в намален брой на операции в технологичния цикъл и намалена себестойност на обработката като цяло.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата работа е обоснована нова класификация на основните подходи за повишаване на уморната дълготрайност на метални конструктивни елементи с отвори, реализиращи концепцията „обработване чрез пластично деформиране“. Защитена е идеята за класифициране на подходите според мащаба, в който се проявява ефекта от пластичното деформиране.

В първата част от работата теоретично е изяснена същността на макро-подхода и посредством системния подход са систематизирани методите, реализиращи този подход. На база на направения задълбочен анализ на известните методи са определени насоките за развитие на макро-подхода. Представени са два иновативни метода за студено разширение на крепежни отвори, защитени с патенти за изобретения.

ЛИТЕРАТУРА

- Abdelkrim Aid1, Zahar Semari1, Mohamed Benguediab, Finite Element Method Investigation of the Effect of Cold Expansion Process on Fatigue Crack Growth in 6082 Aluminum Alloy. Modeling and Numerical Simulation of Material Science, (2014), 4, 25-31.
- Chakherlou T. N., Vogwell J., A novel method of cold expansion which creates near-uniform compressive tangential stress around a fastener holes. Fatigue Fract Engng Mater Struct 27 (2004) 343-351.
- Champoux L. A. Apparatus and method for prestressing a countersunk fastener holes. USA Patent 4423619, Patented Jan. 3, 1984a.
- Champoux L. A. Apparatus having extended prestressing and sleeve retaining devices for prestressing countersunk fastener holes and method. USA Patent 4425780, Patented Jan. 17, 1984b.
- Champoux L. A. Coldworking Method and Apparatus. USA Patent 3566662, Patented March 2, 1971.
- Champoux L. A. Coldworking Method and Apparatus. USA Patent 3566662, Patented March 2, 1971.
- Champoux L. A. Pulling apparatus and method. USA Patent 4187708, Patented Feb. 12, 1980.
- Champoux L. A., Hill H. E., Philips J. L. Apparatus for coldworking holes. USA Patent 3892121, Patented July 1, 1975.
- Champoux R. L. Apparatus for prestressing fastener holes. USA Patent 4524600, Patented June 25, 1985.
- Champoux R. L. Apparatus having extended prestressing and sleeve retaining devices for prestressing countersunk fastener holes and method. USA Patent 4471643, Patented Sep. 18, 1984.
- Champoux R. L. Method of cold expanding and sizing fastener holes. USA Patent 4557033, Patented Dec. 10, 1985a.
- Clark D. A., Johnson W. S. Temperature effects on fatigue performance of cold expanded holes in 7050-T7451 aluminum alloy. International Journal of Fatigue 25(2) (2003) 159-165.

- Duncheva GV, Maximov JT, A new approach to enhancement of fatigue life of rail-end-bolt holes. *Engineering Failure Analysis* 29 (2013) 167-179.
- Duncheva GV, Maximov JT, Ganev N., Ivanova MD, Fatigue life enhancement of welded stiffened S355 steel plates with noncircular openings. *Journal of Constructional Steel Research* 112 (2015) 93–107.
- Easterbrook E. T. Method and apparatus for producing beneficial stresses around apertures by use of focused stress waves. USA Patent 6230537, Patented May 15, 2001.
- Easterbrook E. T. Method and apparatus for producing beneficial stresses around apertures and improved fatigue life products made by the method. USA Patent 6711928, Patented Mar. 30, 2004.
- El-Axir M. H. A method of modeling residual stress distribution in turning for different materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42 (9) (2002) 1055-1063.
- Faessler J. W. Flue or tube expander. USA Patent 0924049, Patented June. 8, 1909.
- Focke A. E., Mize G. G. Chain. USA Patent 2424087, Patented July 15, 1947.
- Fujimoto W. T. Analytic Testing of Joints with Cold Worked Holes. Report; Advanced Structural Technology Inc., USA.
- Garcia-Granada A. A., Lacarac V. D., Smith D. J., Pavier M. J. A new procedure based on Sachs' boring for measuring non-axisymmetric residual stresses: experimental application. *International Journal of Mechanical Sciences* 43 2000 2753-2768.
- Hogenhout F. Method and apparatus for coldworking holes. USA Patent 4597282, Patented July 1, 1986a.
- Hogenhout F. Method and apparatus for hole coldworking. USA Patent 4583388, Patented April 22, 1986.
- Kandil F. A., Lord J. D., Fry A. T., Grant P.V. A Review of Residual Stress Measurement Methods – A Guide to Technique Selection. NPL Report MATC(A) 04, Project CPM 4.5. NPL Material Centre, Queens Road, Teddington, UK, February 2001.
- Kang J., Johnson S. W. Three Dimensional Finite Element Analysis of the Cold Expansion Process of Holes with and without Cracks. In: The 5-th Joint NASA/FAA/DoD Conference on Aging Aircraft. Orlando, Florida, USA, September 10-13, 2001.
- Kang J., Johnson S. W., Clark D. A. Three Dimensional Finite Element Analysis of the Cold Expansion of Fastener Holes in Two Aluminum Alloys. *Journal of Engineering Materials and Technology* 2002 (124) 140-145.
- Karabin M. E., Barlez F., Schultz R. W., Numerical and Experimental Study of the Cold Expansion Process in 7085 Plate using a Modified Split Sleeve. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006.
- Kennedy J. R., Larson D. J. Method of cold working holes using a shape memory alloy tool. USA Patent 5265456, Patented Nov. 30, 1993.
- King J. O. Coldwork system with delay split sleeve. USA Patent 3943748, Patented Mar. 16, 1976.
- King J. O. Coldworked joint held by seampluss tubular member. USA Patent 3949535, Patented Apr. 13, 1976.
- King J. O. Method of forming a coldworked joint. USA Patent 4164807, Patented Aug. 21, 1979.
- Krasnowski B. R. et al. Presented at the American Helicopter Society Forum 56, Virginia Beach, Virginia, May 2-4, 2000.
- Kuo A. S. Coldwork holes with reusable seampluss SMA sleeve. USA Patent 6266991, Patented July 31, 2001.
- Landy M. A. Fatigue life enhancement of dovetail connector slots and noncircular openings. USA Patent 4885829, Patented Dec. 12, 1989.
- Leon A. Benefits of split mandrel coldworking. *International Journal of Fatigue* 20(1) (1998) 1-8.
- Maksimov YT, Duncheva GV, Device and tool for cold expansion of fastener holes. Patent No: US 8,915,114 B2, Dec., 23.2014.
- Maksimov YT, Duncheva GV, Device and tool for cold expansion of holes. International Publication Number WO 2014/012153 A1, January 2014a.
- Maximov J. T. Finite element analysis of the spherical mandrelling process of cylindrical holes. *Finite Elements in Analysis and Design*. 40 (9-10) (2004) 1217-1232.
- Maximov J. T. Thermodynamic Optimization of Cold Expansion of Holes by means of Spherical Mandrelling. *International Journal of Vehicle Design*, 39 (1-2) (2005) 38-50.
- Maximov J. T., Anchev A. P. Modelling of residual stress field in spherical mandrelling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 (12) (2003) 1241-1251.
- Maximov J. T., Kalchev G. M. Modelling of spherical mandrelling manufacturing resistance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 44 (1) (2004) 95-100.
- Maximov J.T., Duncheva G.V., Amudjev I.M., A novel method and tool which enhance the fatigue live of structural components with fastener holes. *Engineering Failure Analysis* 31 (2013) 132-143.
- Maximov J.T., Duncheva G.V., Anchev A.P., An approach to modeling time-dependent creep and residual stress relaxation around cold worked holes in aluminium alloys at room temepreature. *Engineering Failure Analysis* 45 (2014) 1-14.
- Maximov JT, Duncheva GV, Ganev N, Bakalova T. The benefit from an adequate finite element simulation of the cold hole expansion process. *Engineering Failure Analysis*, (2009), 6(1):503-511.
- Maximov JT, Duncheva GV, Innovative methods, devices and tools for enhancement of fatigue life of structural components with natural concentrators. *Journal of the Technical University of Gabrovo*, Vol. 50'2014 (3-16).
- Maximov JT, Duncheva GV, Kuzmanov TV. Modelling of hardening behaviour of cold expanded holes in medium carbon steel. *Journal of Constructional Steel Research* (2008) 64(3):261-267.
- Maximov JT, Duncheva GV. A new 3D finite element model of the spherical mandrelling process. *Finite Elements in Analysis and Design* 44 (6-7) (2008) 372-382.
- Maximov JT. Forming of Cross-profile Holes by Adding Rotations round Coplanar Axes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42 (3) (2002) 313-320.
- Maximov JT. Spherical Mandrelling Method Implementation on Conventional Machine Tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 42(12) (2002a) 1315-1325.
- Maximov JT., Duncheva G.V., N. Ganev, Amudjev I.M., Modeling of residual stress distribution around fastener holes in thin plates after symmetric cold expansion. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* (2013) DOI 10.1007/s40430-013-0090-2.
- Maxwell C. A. Apparatus for producing pressure-tight tube and tube seat connections. USA Patent 2357123, Patented Aug. 29, 1944.
- Mead A. R. Method for working holes. USA Patent 4433567, Patented Feb. 28, 1984.
- Pavier M. J., Garcia-Granada A. A., Lacarac V. D., Smith D. J. Growth of fatigue cracks from cold expanded holes. Oral/poster reference: ICF 1000982 OR, 2001.

- Philips A. Coining structural parts. USA Patent 3110086, Patented Nov. 12, 1963.
- Philips A. Ring pad stress coined structure. USA Patent 3895922, Patented July 22, 1975.
- Philips A. Ring pad stress coining. USA Patent 3796086. Patented Mar. 12, 1974.
- Prime M. B. Measuring residual stress and resulting stress intensity factor in compact tension specimens. *Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures* 22 (3) (1999) 195-204.
- Prime M. B. Residual stress measured before and after stress relief in rolled aluminum plate. In: *ASME Mechanics of Materials Conference*, 1999, pp. 241-242.
- Prime M. B. Residual stress measurement by successive extension of a slot: the crack compliance method. *Appl. Mech. Rev.* 52 (2) (1999) 75-96.
- Prime M. B., Prantil V. C., Rangaswamy P., Garcia F. P. Residual stress Measurement and prediction in a Hardened Steel Fing. *Materials Science Forum* (347-349) (2000) 223-228.
- Prime M. B., Rangaswamy P., Bourke M. A. M. Measuring Spatial Variation of Residual Stresses in a MMC Using Crack Compliance. *Proceedings of the Seventh International Conference on Composites Engineering*, Denver, CO, July 2-8, 2000, pp. 711-712.
- Quincey D. E., Copple C. M., Walsh W. B., Jarzebowicz R. Z., Easterbrook E. T. Split sleeve cold expansion. USA Patent 5305627, Patented Apr. 26, 1994.
- Salter L., Estates P. V., Briles F. S. Method of prestressed fastening of materials. USA Patent 3270410, Patented Sept. 6, 1966.
- Speakman E. R. Stress coining. USA Patent 3434327, Patented Mar. 25, 1969.
- T. N. Chakherlou, Y. Alvandi Tabrizi, A. Kiani, On the fatigue behaviour of cold expanded fastener holes subjected to bold tightening. *International Journal of Fatigue*, 33(6) (2011) 800-810.
- V. Nigrelli, S. Pasta, Finite element simulation of residual stress induced by split sleeve cold expansion process of holes. *Journal of Material Processing Technology* 205 (2008) 290-296.
- Wagner R. V. et al. Beneficial Effect of Split Sleeve Cold Expansiontm. In: 1992 Aircraft Structural Integrity Program Conference, San Antonio TX, USA, 1992.
- Webster G. A., Ezeilo A. N. Residual stress distribution and their influence on fatigue lifetimes. *International Journal of Fatigue* 23(1) (2001) 375-383.
- Webster G. A., Wimpory R. C. Non-destructive measurement of residual stress by neutron diffraction. *Journal of Material Processing Technology* 117 (3) (2001) 395-399.
- Withers PJ, Bhadeshia HKDH. Residual stress. Part 1 Measurement techniques. *Material Science and Technology*, 2001 (17): 355-365.
- Wolcken Piet, Eggert D. Reese, Timothy G.B. Jones. Expansion Tool for Cold Expansion of Holes, Patent Appl. Publ. № US 2009/0113979 A1, May 7, 2009.
- Wu Z., Lu J. Residual stresses by Moire interferometry and incremental hole drilling. In: 11 th International Conference on Experimental Mechanics, Balkema, Rotterdam, 1998, pp. 1319-1324.
- Young D. B., Speyer M. Tube expander. USA Patent 0684661, Patented Oct., 1901.
- Zhuang W. Z., Halford G. R. Investigation of residual stress relaxation under cyclic load. *International Journal of Fatigue* 23(0) (2001) 31-37.
- Георгиев М., Пукнатиноустойчивост на металите при статично натоварване, С., БУЛБЕСТ 2000, 2005.
- Дунчева Г., Максимов Й., Кузманов Т., Влияние на фаските върху остатъчните напрежения около студено разширени скрепителни отвори., Сп. на ТУ – Пловдив “Фундаментални науки и приложения”, т.13 (7), с. 19-27, П., 2006 г.
- Дунчева Г.В., Термомеханичен анализ на процеса студено разширение на отвори, Известия на ТУ – Габрово, 37, (2009) 3-10.
- Махимов Ъордан, Дунчева Галя, Устройство и инструмент для холодного расширения крепежных отверстий. РСТ WO 2013/040661 A1, 28 марта 2013.
- Максимов Й.Т., Дунчева Г.В., Кузманов Т.В., Амуджев И.М., Патент за изобретение BG № 66384 B1/ 03.01.2014 г. „Метод за обработване на цилиндрични отвори” – публикувано в Бюлетин на Патентното ведомство от 29.11.2013 г.