

КРАЙНО-ЕЛЕМЕНТНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОВАРОНОСИМОСТТА ПРИ ОГЪВАНЕ НА МЕТАЛНИ КОНСТРУКЦИОННИ ЕЛЕМЕНТИ С НЕКРЪГЛИ ОТВОРИ**FINITE ELEMENT INVESTIGATION OF BENDING LOAD-CARRYING CAPACITY OF STRUCTURAL ELEMENTS WITH NONCIRCULAR OPENINGS**

Марията Д. Иванова Галя В. Дунчева*

*Катедра "Машинни елементи и техническо чертане"
Технически университет - Габрово*

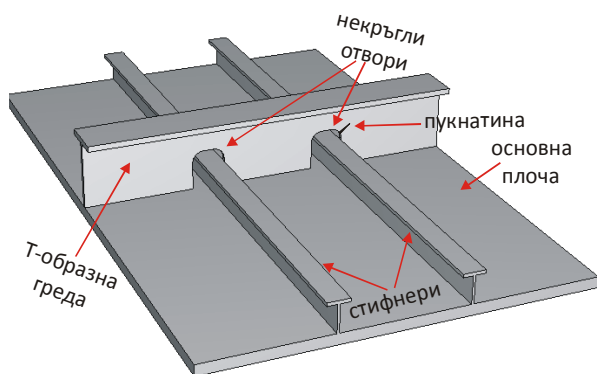
Статията е постъпила на 5 септември 2013 г.; приета за отпечатване на 10 октомври 2013 г.

Abstract

The paper presents the outcomes from an investigation of bending load-carrying capacity of plate with non-circular opening. The main purpose of the investigation is directed to obtaining an assessment of the beneficial effect of applying of different methods for cold expansion of preliminarily drilled holes situated in the zones with fillets. The task is solved as series of numerical simulation are carried out. The comparative analysis is made on the basis of the residual hoop normal stress redistribution around the concentrators after positive and negative bending moment loading. The loading is applied by preliminarily determined kinematic impact. It is proved that the method called Controlled Symmetry Cold Expansion ensures the most intensive and homogeneous compressive zone around the concentrators.

Keywords: noncircular openings; residual stresses; load-carrying capacity; bending; finite element simulations**1. ВЪВЕДЕНИЕ**

Известно е, че отворите са естествени концентратори на деформации и напрежения, поради което са определящи за якостния ресурс на съответните конструкционни елементи. Така например, работните напрежения около цилиндрични отвори в плоски образци, натоварени на опън, са около три пъти по-големи в сравнение с номиналните (за случая на плътно сечение) [1]. Такава концентрация на напреженията се наблюдава и в случаи на конструкционни елементи, съдържащи некръгли отвори. Типичен пример за конструкционни елементи с некръгли отвори са Т-образните греди от носещата метална конструкция, показана на фиг. 1. Основното ѝ предимство е малката маса в комбинация с относително голямата коравина на огъване. Поради това намира приложение в строежа на яхти, където се използват алуминиеви сплави – например AA6082 (ISO: Al Si1MgMn) [2].



Фиг. 1 Метална конструкция с некръгли отвори

В конкретния случай некръглите отвори съдържат праволинейни участъци и зони със закръгления с постоянен радиус. Очевидно, последните са местата с най-голяма концентрация на напреженията, което провокира възникване и развитие на пукнатини. При наличие на статичен товар пукнатиноустойчивостта на съответния конструкционен елемент се лимитира от този концентратор. Ако външният товар е цикличен, от повърхността на отворите започва зараждането и развитието на пукнатини от умора [3]. В този случай експлоатационният срок на конструкционния елемент зависи от:

- конкретната геометрия на конструкционния елемент и концентратора;
- характерът на приложеното динамично (циклично) натоварване.
- физико-механичното състояние на материала около отворите, характеризиращо се с определена грапавост, микротвърдост и остатъчните напрежения.

Основната концепция, върху която са разработени най-разпространените методи за повишаване на уморната дълготрайност на метални конструкционни елементи с отвори, е известна като "cold working", т.е. механично пластично деформиране на материала около отвора (по повърхнината на отвора или по челните повърхнини на конструкционните елементи) [4]. Целта е да се генерира зона с полезни остатъчни нормални напрежения на натиск, която да противодейства на процеса на възникване и развитие на уморни пукнатини. Тъй като около отворите се провокира развитието обикновено на пукнатини от I тип (пукнатини на разкъсване) [3], то от определящо значение е разпределението около концентраторите в количествен и качествен аспект на ок-

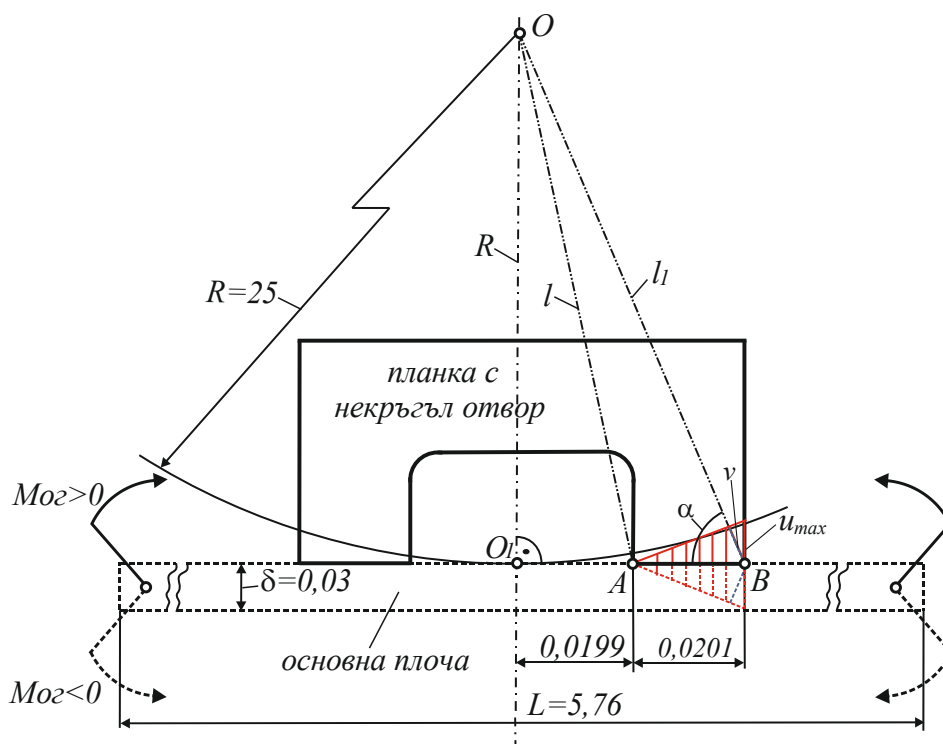
ръжните нормални напрежения [1, 5, 6, 7]. За случая на крепежни отвори най-голямо приложение са намерили методите, при които се въздейства непосредствено върху повърхнината на отвора. Такива са: Split Sleeve Cold Expansion (студено разширение (CP) чрез преминаване на дорн с цилиндрична работна част през надлъжно разрязана втулка-посредник [8-11] и Split Mandrel Cold Working [12,13]. В резултат на тази експанзия се генерира натискава зона на значителна дълбочина (до няколко милиметра), което е основно предимство на посочените методи. Същевременно, се наблюдава изразен градиент на натисковата зона с остатъчни напрежения по оста на отвора, дължащ се на значителния осов силов поток, преминаващ през конструктивния елемент [14-17]. В случаите на относително по-големи дължини на отворите, откъм страната на входа на инструмента се появява опънов пръстен – предпоставка за възникване на опасни ъглови пукнатини. За елиминирание на този недостатък, Максимов и Дунчева разработват иновативния метод Controlled Symmetric Cold Expansion (Контролирано Симетрично Студено Разширение), при който въздействието се упражнява в радиално направление на повърхнината на отвора, а генерираната натискава зона е симетрична спрямо средната равнина на елемента [18-21, 28].

Другият основен подход, реализиращ “cold working”, се базира върху идеята за създаване на зона с остатъчни напрежения на натиск чрез механично въздействие върху челните повърхнини на конструктивните елементи, непосредствено около концентраторите. Такива са патентованите методи в [22-25], като методът “Stress coining” е използван за стресиране на зоните с некръгли отвори в конструкцията, показана на фиг. 1 [2]. Като цяло, методът е подходящ за приложение върху материали с по-малък модул на линейни деформации, какъвто е случаят в [2]. Независимо, че методът е подходящ от тази гледна точка, основен недостатък е относително плитката натискава зона, която се създава.

Използвайки предимството на метода Split Sleeve Cold Expansion, M. Landy го адаптира за случая с некръгли отвори, съдържащи участъци със закръгления [26]. Съгласно изобретението, процесът се реализира в две последователни стъпки: CP на предварително пробити отвори в местата, съответстващи на закръгленията и последващо формиране на контура на некръглия отвор (премахване на излишния метал). Независимо от преразпределението на остатъчните напрежения в края на процеса, се разчита на достатъчно интензивна натискава зона, генерирана след CP.

На основа на метода, патентован от M. Landy, в [27] авторите са изследвани резултатите за разпределението на остатъчните окръжни нормални напрежения около концентраторите, получени на база на X-ray diffraction експеримент и 3D крайно-елементен (KE) модел на планки с некръгли отвори, предварително подложени на конвенционално CP по различни схеми. Геометрията на планките е адаптирана към конструктивното решение, показано на фиг. 1, като за материал е избрана стомана 17ГС (БДС EN 10025-1:2005), с оглед на по-широко приложение на носещата конструкция. Аналогично, в [28] е изследван ефекта от замяната на конвенционалното CP с иновативния метод Controlled Symmetry Cold Expansion в първата стъпка на процеса. За получаване на по-пълна оценка на полезния ефект от прилагане на посочените методи, е необходимо да се познава изменението на остатъчните напрежения около зоните с концентрация на напреженията около некръглия отвор след натоварване. В конкретния случай, отчитайки функционалното предназначение на носещата конструкция със стифнери от фиг. 1, гредите с некръгли отвори като елементи от нея, са натоварени на огъване.

Основна цел на настоящото изследване е да се оцени товароносимостта при огъване на планка с некръгъл отвор, съдържащ участъци със закръгления, предварително подложен на конвенционално CP и чрез метода Controlled Symmetric Cold Expansion.



Фиг. 2 Схема за моделиране на огъването на планката

Отчитайки спецификата на изследвания обект, както и поставената цел, е целесъобразно да се приложи крайно-елементен подход. Това позволява да се получи значителен обем от инженерна информация, която е недостъпна по експериментален път. За тази цел са проведени серия числени симулации, като началните напрежения и деформации в планката съответстват на окончателните резултати, получени след КЕ анализ, проведен в [27] и [28].

2. 3D КРАЙНО-ЕЛЕМЕНТНО (КЕ) МОДЕЛИРАНЕ

2.1. Симулиране на натоварването от огъване

В съответствие с конструктивното решение от фиг. 1, се приема, че планката с некръглия отвор е само част от гредата с относително голяма дължина, заварена (кораво свързана) към основната плоча. По този начин огъващия момент $M_{ог}$, приложен към основната плоча, се предава на планката посредством общите им контактни повърхнини, причинявайки съответни премествания в равнината на планката (фиг. 2).

Следователно, за симулиране на огъването на планката е целесъобразно да се зададе съответен закон за преместванията по долния контур на планката от двете страни на некръглия отвор, т.е. да се използва кинематично въздействие. За определяне на огъващия момент, основната плоча се моделира като гредата, подложена на огъване само в едната главна инерционна равнина, следствие приложена в средата сила $P = 50000 \text{ N}$, с дължина $L = 5.76 \text{ m}$, ширина $B = 4 \text{ m}$ и дебелина $\delta = 0,03 \text{ m}$ (фиг. 2). За огъващия момент следва:

$$M_{ог} = \frac{P L}{4} = 72\,000 \text{ Nm}$$

За радиуса на кривина R при огъване се получава:

$$R = \frac{E J}{M_{ог}} = \frac{2 \times 10^{11} \times 9 \times 10^{-6}}{72000} = 25 \text{ m},$$

където E, Pa е модул на линейни деформации, а

$$J = \frac{0,03^3 \times 4}{12} = 0,000009 \text{ m}^4 \text{ е инерционният момент на сечението.}$$

Съгласно схемата (фиг. 2), за хипотенузите на правоъгълните триъгълници OO_1A и OO_1B съответно се получава: $l = 25,00000792 \text{ m}$ и $l_1 = 25,000032 \text{ m}$; за ъгъл $\alpha = 89,908^\circ \approx 90^\circ$. Следователно, може да се приеме триъгълников закон за контактните премествания по направление, успоредно на вертикалните страни на планката с максимална стойност:

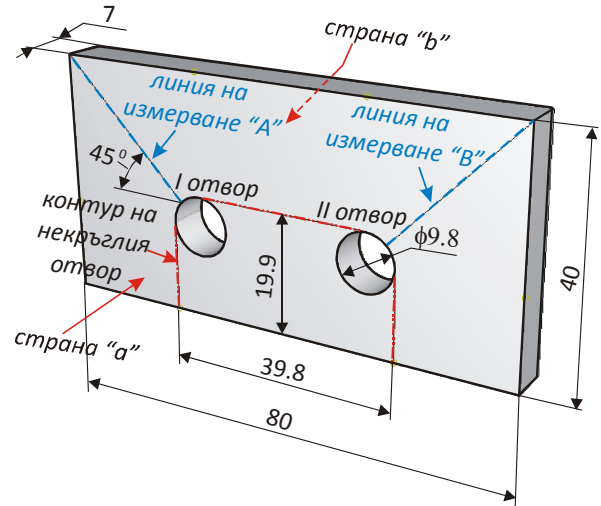
$$u_{max} \approx v = l_1 - l = 0,024 \text{ mm}$$

2.2. КЕ моделиране на огъването

Обект на експериментално и числено изследване е планка с некръгъл отвор с геометрия според фиг. 3. Планката съдържа два отвора, разположени в местата със закръгления. Отчитат се КЕ резултати за разпределение на остатъчните окръжни нормални напрежения σ_t^{res} по направление на линиите „А“ и „В“, съответно около I^{ви} и II^{ри} отвора, върху двете страни на план-

ката – съответно страна „а“ и „в“. Прието е, че страна „а“ е страната на влизане на инструментите, реализиращи СР на I^{ви} отвор за всички сравнявани варианти (фиг. 3).

За симулиране на натоварването от огъване, е разработен 3D КЕ на планката, като е използвана същата топология, както в 3D КЕ модели, разработени в [27] и [28].



Фиг. 3 Геометрия на планката

За целта е използвана техниката в ABAQUS.CAE Version 6.5-1 [29] за прочитане на резултатите за напреженията и преместванията, съдържащи се в output data base файлове, генерирани по време на проведени преди това анализи. Това позволява да се минимизира изчислителното време, като анализът се провежда в една стъпка (loading), а КЕ резултати за напреженията и преместванията, получени от проведените предишни числени симулации на изследваните процеси, съответстват на началните им стойности в модела. Използвани са крайните КЕ резултати, получени от числени симулации на следните процеси:

- Последователно еднопосочно СР на двата отвора и последващо изрязване контура на некръглия отвор;
- Последователно разнопосочно СР на двата отвора и последващо изрязване контура на некръглия отвор;
- Последователно СР на двата отвора чрез инструмент, реализиращ процеса Controlled Symmetric Cold Expansion (Контролирано Симетрично Студено Разширение) и последващо изрязване контура на некръглия отвор.

За моделиране поведението на планката в пластичната област е избран модел с комбинирано нелинейно и изотропно уякчаване, както в [15]. Степента на СР за всички анализирани случаи е една и съща - $DCE = 4\%$, а прочетените начални стойности за напреженията и преместванията в настоящия анализ съответстват на последната итерация от последната стъпка в проведените в [27] и [28] числени симулации – т.е. след изрязване контура на некръглия отвор.

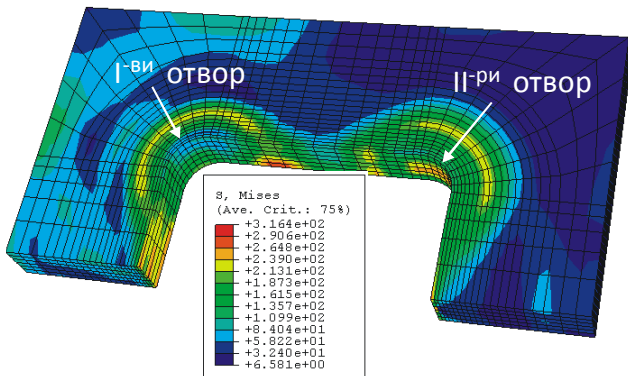
Натоварването на планката от огъване е симулирано, като са зададени премествания на възлите от долния контур на планката в съответствие с линейния закон, показан на фиг. 2 и изчислената максимална стойност за u_{max} . Същите са дефинирани посредством табулирани функции, синхронизирани в псевдоре-

то. Отчитайки геометрията на планката, за всички сравнявани варианти, анализите са проведени съответно за положителна и отрицателна посока на огъващите моменти (фиг. 2).

2.3. КЕ резултати и коментари

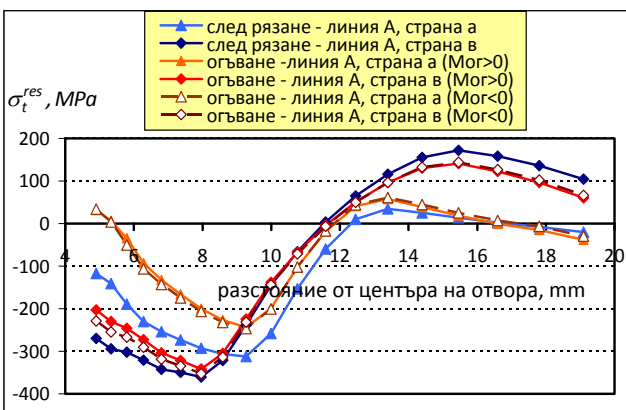
2.3.1. След еднопосочно СР

На фиг. 4 са показани КЕ за еквивалентните напрежения $\sigma_{екв}$ в планката след огъване с положителна стойност на огъващия момент ($M_{oz} = 72000 Nm$). Наблюдава се очевидна асиметрия в разпределението на $\sigma_{екв}$ около двата отвора.



Фиг. 4 Разпределение на $\sigma_{екв}$ в планка след еднопосочно СР, изрязване на отвора и огъване

Разпределението на остатъчните окръжни нормални напрежения σ_t^{res} по линии на измерване „А“ и „В“ (фиг. 3) е отчетено спрямо въведени цилиндрични координатни системи (съответно за I-ви и II-ри отвори). Разпределението на остатъчните окръжни нормални напрежения по направление на линия „А“ по двете страни на планката след изрязване на контура на некръглия отвор и след огъване е показано на фиг. 5.

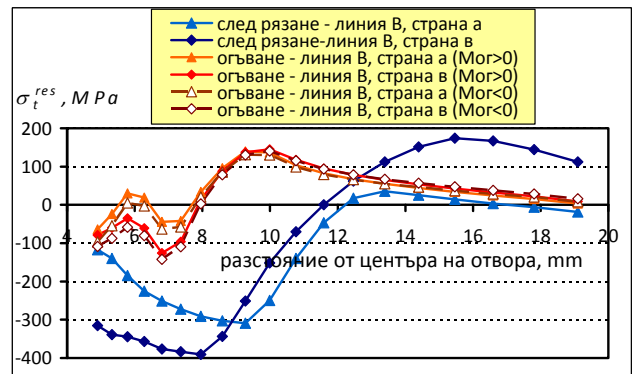


Фиг. 5 Разпределение на σ_t^{res} по линия „А“ след еднопосочно СР

Освият градиент в разпределението на σ_t^{res} се запазва и след огъване на планката – откъм страната на влизане на инструмента, реализиращ СР, натисковата зона е с по-малка интензивност, като непосредствено до отвора се забелязва опънов пръстен. От друга страна, разпределението на σ_t^{res} след натоварването на

планката съответно с положителен и отрицателен огъващ момент не се различава съществено в качествен аспект, но като цяло по-малка е релаксацията след натоварване с отрицателен момент ($M_{oz} = -72000 Nm$).

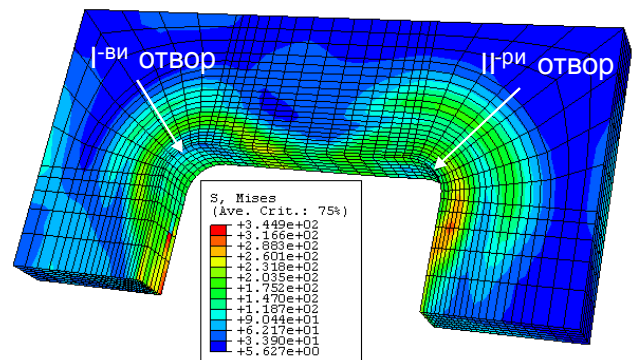
КЕ резултати за разпределението на σ_t^{res} по линия на измерване „В“ (в близост до II-ри отвор) са показани на фиг. 6. За разлика от резултатите, получени за линия „А“, опъновият пръстен по линия „В“ откъм страната на влизане на инструмента (страна „а“) е изтеглен в дълбочина (около 1 mm от повърхнината на отвора). Като цяло, се наблюдава по-изразено преразпределение на остатъчните напрежения и в резултат натисковата зона около II-ри отвор е с по-малка интензивност.



Фиг. 6 Разпределение на σ_t^{res} по линия „В“ след еднопосочно СР

2.3.2. След разнопосочно СР

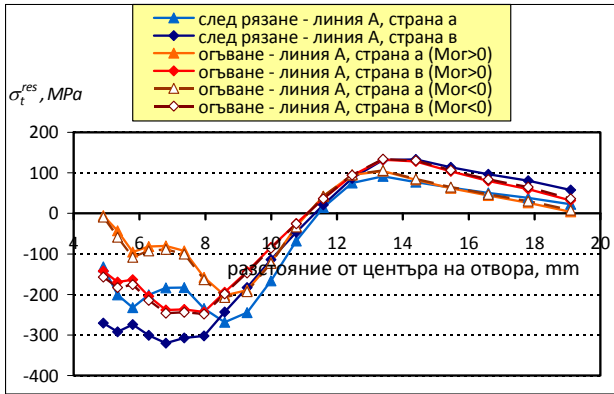
На фиг. 7 е показано разпределението на $\sigma_{екв}$ в планката след огъване с положителен момент $M_{oz} = 72000 Nm$. Както в случая на еднопосочно СР, и в този случай се наблюдава асиметрия спрямо средната равнина на планката.



Фиг. 7 Разпределение на $\sigma_{екв}$ в планка след разнопосочно СР, изрязване на отвора и огъване

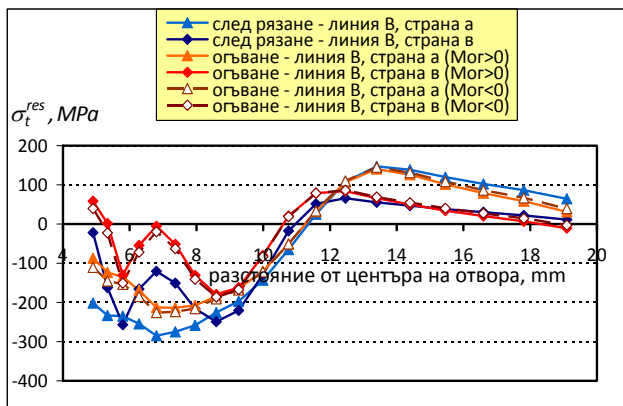
КЕ за разпределението на остатъчните окръжни нормални напрежения σ_t^{res} по линия „А“ са показани на фиг. 8. Графиките за σ_t^{res} , отчетени след изрязване на контура на некръглия отвор имат един и същи характер с тези, съответстващи на разпределението на

σ_t^{res} след огъване на планката. Същевременно, последните са изтеглени по посока на намаляване интензивността на натисквата зона, като този ефект е по-слабо изразен, когато огъващият момент е отрицателен ($M_{oz} = -72000 Nm$). Като цяло, натисквата зона непосредствено около Γ^{VI} отвор е по-изразена в сравнение със случая на еднопосочно СР.



Фиг. 8 Разпределение на σ_t^{res} по линия „А“ след разпосочно СР

Разпределението на σ_t^{res} по направление на линия “В” е показано на фиг. 9. Очевидно, около Π^{VII} отвор по отношение на СР, откъм страната на входа на инструмента (страна “в”) се наблюдава опънов пръстен. Същевременно, на около $1 mm$ от повърхнината на отвора натисквата зона е достатъчно интензивна ($\sigma_t^{res} = -130 \div -150 MPa$).

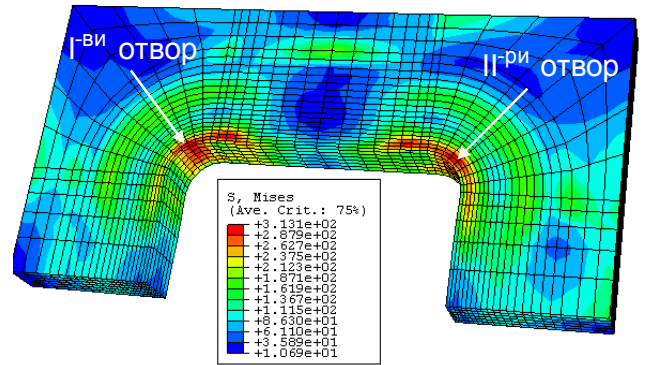


Фиг. 9 Разпределение на σ_t^{res} по линия „В“ след разпосочно СР

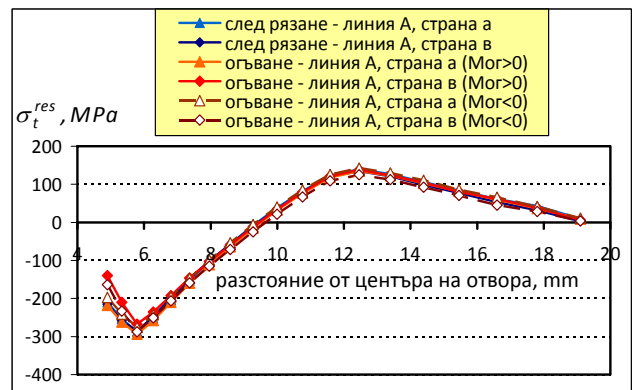
2.3.3. След Контролирано Симетрично Студено Разширение (CSCE)

КЕ резултати за $\sigma_{екв}$, получени след огъване на планка с отвори, предварително подложени на Controlled Symmetric Cold Expansion и последващо изрязване на контура на некръглия отвор, са показани на фиг. 10. Очевидно, за разлика от другите два случая (базирани на конвернционално СР), в този случай се наблюдава почти пълна симетрия по отношение на средната равнина на планката.

Както се вижда от фиг. 11, КЕ резултати за σ_t^{res} , получени по направление на линия на измерване “А”, са отчетливо групирани - разсейването между графиките е по-забележимо непосредствено около концентратора и то се дължи преди всичко на ефекта от огъване. Независимо от това, най-малкото по абсолютна стойност остатъчно окръжно напрежение по повърхнината на закръгления около Γ^{VI} отвор е $\sigma_t^{res} = -139,71 MPa$, отчетено след огъване с $M_{oz} = 72000 Nm$.

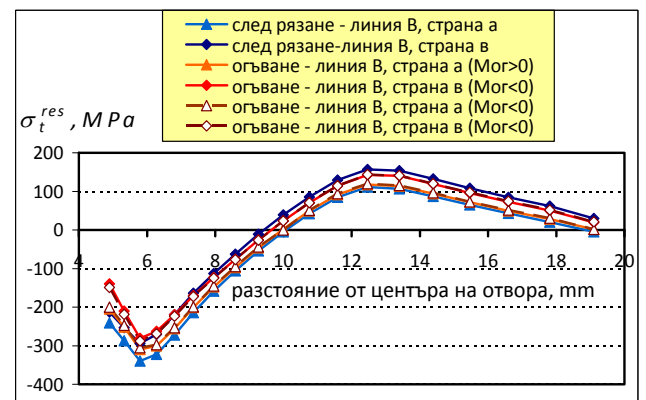


Фиг. 10 Разпределение на $\sigma_{екв}$ в планка след CSCE, изрязване на отвора и огъване



Фиг. 11 Разпределение на σ_t^{res} по линия „А“ след CSCE

Аналогично, КЕ резултати за σ_t^{res} , получени за линия на измерване “В”, са показани на фиг. 12.

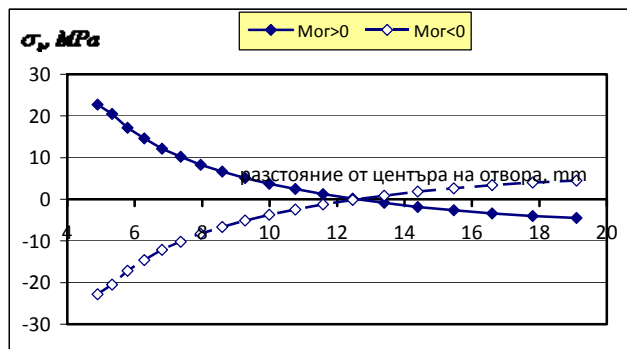


Фиг. 12 Разпределение на σ_t^{res} по линия „В“ след CSCE

Наблюдава се един и същи характер на графиките, с незначително разсейване помежду им. Малката разлика в полето на σ_t^{res} , получени по направление на линиите на "А" и "В" (в близост до двата отвора), може да се обясни с интерференцията между пластичните и еластични вълни след CSCE, дължаща се на близкото разположение между тях.

2.3.4. След огъване без предварително СР

За сравнение с показаните КЕ резултати, е проведен анализ на плнаката, като същата е подложена само на огъващ товар (без предварителна интервенция върху зоните със закръгления). КЕ резултати са показани на фиг. 13.



Фиг. 13. КЕ резултати след огъване без предварително СР

Както може да се очаква, от посоката на огъващия момент зависи знака на работните окръжни нормални напрежения. От тази гледна точка, прилагането на $M_{oz} < 0$ е по-благоприятно, тъй като в близост до закръгленията работните окръжни нормални напрежения са натискови. В действителност, отчитайки конкретното предназначение на изследваната конструкция, знакът на огъващия момент има случаен характер, и следователно, се провокира процес на възникване и развитие на пукнатини от умора. За сравнение, във всички изследвани случаи с предврително СР (включително еднопосочно и разнопосочно СР), на разстояние $\approx 1 \text{ mm}$ се генерира натискова зона с достатъчна интензивност.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На база на КЕ подход е направена оценка на товароносимостта при огъване на носеща конструкция, съдържаща некръгли отвори. Изследвани са различни методи за повишаване на уморната дълготрайност, базирани върху СР на предварително пробити отвори в местата, съответстващи на закръгленията на некръглите отвори. Обект на сравнителен анализ са две работни схеми за изпълнение на конвенционално СР (еднопосочно и разнопосочно) и нов метод, реализиращ процеса Controlled Symmetric Cold Expansion. Отчитайки функционалното предназначение на изследваната конструкция, за всеки от сравняваните варианти са проведени анализи съответно с положителен и отрицателен огъващ момент. Направена е оценка на полезния ефект от прилагане на различните методи на база на разпределението на остатъчните окръжни нормални

напрежения около концентраторите на напрежения. Доказано е, че иновативният метод Controlled Symmetric Cold Expansion осигурява генерирането на натискови зони с максимална интензивност и хомогенност. Това дава основание да се заключи, че използването му би осигурило най-голяма сигурност и уморна дълготрайност на конструкционни елементи с некръгли отвори. Направеното изследване потвърждава, че посоката на огъващият момент има незначително влияние върху разпределението на окръжните нормални напрежения в близост до концентраторите, като по-благоприятен е случаят, когато огъващият момент е отрицателен.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. E. T. Easterbrook, Method and Apparatus for Producing Beneficial Stresses around Apertures by use of Focused Stress Waves, and Improved Fatigue Life Products made by the Method, US Patent No.: 6,230,531 B1. May 15, 2001.
- [2]. Ogeman R. T., Josefson B. L. Residual stresses at a longitudinal stiffener-web frame intersection and their effects on crack growth. Marine Structures 8 (1995) 630-616.
- [3]. Георгиев М., Межова Н., Пукнатинуостойчивост на металите при циклично натоварване. София, Булвест 2000, 2008.
- [4]. Иванова М. Д., Синтез и анализ на методи за повишаване на уморната дълготрайност на метални конструкционни елементи с некръгли отвори. Известия на ТУ – Габрово, 44, 11-18.
- [5]. Maximov JT, Duncheva GV, Ganev N. Enhancement of Fatigue Life of Net Section in Fitted Bolt Connections. Journal of Constructional Steel Research 74 (2012) 37-48.
- [6]. Дунчева Г., Максимов Й., 3-D крайно-елементен анализ на студено разширени отвори с предварително съществуваща надлъжна пукнатина, Известия на ТУ – Габрово, 35, (2007) 3-9.
- [7]. 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.
- [8]. L.A. Champoux, Coldworking Method and Apparatus. US Patent No.:3,566,662, Apr. 28, 1969.
- [9]. Wagner R. V. et al. Beneficial Effect of Split Sleeve Cold Expansiontm. In: 1992 Aircraft Structural Integrity Program Conference, San Antonio TX, USA, 1992.
- [10]. Fatigue Technology Inc. Engineering Proces Specification FTI 8101C, "Cold Expansion of Holes Using the Standart Split Sleeve Systemtm (SsCxtm) and Countersink Cold Expansiontm (CsCxtm)", July, 1994.
- [11]. 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.
- [12]. Franciscus Hogenhout, Method and Apparatus for Hole Coldworking. US Patent Number: 4,583,388, Apr. 22, 1986.
- [13]. Leon A. Benefits of split mandrel coldworking. International Journal of Fatigue 20(1) (1998) 1-8.
- [14]. 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.
- [15]. 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.
- [16]. 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.

- [17]. T. N. Chakherlou, Y. Alvandi Tabrizi, A. Kiani, On the fatigue behaviour of cold expanded fastener holes subjected to bolt tightening. *International Journal of Fatigue*, 33(6) (2011) 800-810.
- [18]. Максимов Й. Т., Дунчева Г. В., Инструмент за обработване на крепежни отвори. Патент за изобретение: № 66052/30.12.2010 г.
- [19]. Maximov J. T., Duncheva G. V., Device and tool for controlled cold expansion of fastener holes. U.S. Patent Application № 13/295046 /12.11.2011 г.
- [20]. Duncheva G.V., Maximov J. T., A new approach to enhancement of fatigue life of rail-end-bolt holes. *Engineering Failure Analysis* 29 (2013) 167-179.
- [21]. Maximov J. T., Duncheva G.V., Amudjev I. M., A novel method and tool which enhance the fatigue life of structural components with fastener holes. *Engineering Failure Analysis* 31 (2013) 132-143.
- [22]. Philips A. Coining structural parts. USA Patent 3110086, Patented Nov. 12, 1963.
- [23]. Speakman E. R. Stress coining. USA Patent 3434327, Patented Mar. 25, 1969.
- [24]. Philips A. Ring pad stress coining. USA Patent 3796086. Patented Mar. 12, 1974.
- [25]. Philips A. Ring pad stress coined structure. USA Patent 3895922, Patented July 22, 1975.
- [26]. M. A. Landy (Fatigue Tech. Inc.), Fatigue Life Enhancement of Dovetail Connector Slots and Noncircular Openings. US Patent № 4,885,829, Dec. 12, 1989.
- [27]. Дунчева Г., Иванова М., Ganev N., Ичкова М., Експериментално и крайно-елементно моделиране на разпределението на остатъчните напрежения около некръгли отвори. Национална конференция по машиностроене и машинознание, 8-10 септ., Варна, 2013.
- [28]. Дунчева Г., Иванова М., Крайно-елементни симулации на нов метод за повишаване на уморната дълготрайност на метални конструкционни елементи с некръгли отвори. *Известия на ТУ – Габрово*, 45, 38-44.
- [29]. Hibbit, Karlsson and Sirensen Inc. ABAQUS/CAE Theory Manual, Version 6.5.1, ABAQUS Inc. Rising Sun Mills, 166 Valley Street Providence, RI 02909-2499, 2004.