



КРАЙНО-ЕЛЕМЕНТНИ СИМУЛАЦИИ НА НОВ МЕТОД ЗА ПОВИШАВАНЕ НА УМОРНАТА ДЪЛГОТРАЙНОСТ НА МЕТАЛНИ КОНСТРУКЦИОННИ ЕЛЕМЕНТИ С НЕКРЪГЛИ ОТВОРИ

FINITE ELEMENT SIMULATIONS OF A NEW METHOD TO THE FATIGUE LIFE ENHANCEMENT OF STRUCTURAL ELEMENTS WITH NONCIRCULAR OPENINGS

Галя В. Дунчева* Мариета Д. Иванова

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

Статията е постъпила на 7 май 2013 г.; приета за отпечатване на 31 май 2013 г.

Abstract

The paper presents the outcomes from finite element simulations of a new method to enhancement of fatigue life of metal structural elements with noncircular openings. The method fulfils a process of "pure radial cold expansion" by means of a new patented tool. The study has been grounded on 3D finite element model of the process contains consecutively cold expansion of the preliminarily drilled two holes which correspond to the zones with fillets and next cutting the noncircular opening contour. On the basis of the finite element results it has been proved that the created compressive field around the fillet is symmetric in relation to the middle plane of the plate, i.e. the new method ensures the minimal axial gradient of the residual circumferential normal stresses. In conclusion, it have been determined the rational level of the degree of cold expansion – DCE=4%.

Keywords: pure radial cold expansion; noncircular openings, residual stresses; finite element simulations

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Проектирането на съвременните метални конструкции най-общо е свързано с удовлетворяване на две противоречиви изисквания:

- По-голяма товарносимост, по-дълъг срок и повишена сигурност при експлоатация;
- Икономичност, респ. намаляване на металоемкостта на конструкционните елементи.

Като цяло, повечето метални конструкционни елементи са подложени на динамични или циклични натоварвания. Такива са носещите метални конструкции в мостови и кранови съоръжения, различни компоненти в самолети, автомобили, кораби, яхти и др., които се характеризират с наличие на естествени концентратори на напреженията - скрепителни отвори, различни по форма конструктивни отвори, прорези, жлеbove, изрезни контури и др. Конструктивните отвори могат да имат кръгло или некръгло напречно сечение, като във втория случай те се изпълняват с или без закръгления [1]. Включването им в металните конструкции се налага по конструктивни, монтажни или технологични съображения. Такива са например кръглите или некръглите отвори, предвидени с цел олекотяване на конструкцията или постигане на определена огъвна или усукваща коравина на съответните конструкционни елементи, улесняване на технологичния процес на сглобяване и др.

За удовлетворяване на изискването за икономичност, е необходимо да се минимизират габаритните размери, респ. масата на конструкционните елементи. В този аспект, особено перспективни са носещите метални конструкции със „стифнери”, включващи основна

плоча, усилена с Т-образни греди или греди с друго сечение, през които преминават по-малки профили – „стифнери” (фиг. 1). За тази цел през гредите е необходимо да се изработят некръгли отвори. Този начин на изграждане на конструкцията посредством заваряване на „стифнери” позволява постигане на значителна огъвна коравина, като същевременно се минимизира масата. Поради това тези конструкции намират приложение в строежа на яхти, където основно се използва алуминиева сплав AA6082 (ISO: Al Si1MgMn) [2]. Очевидно, посоченото конструктивно решение би намерило по-широко приложение, ако се използват подходящи заваряеми стомани.

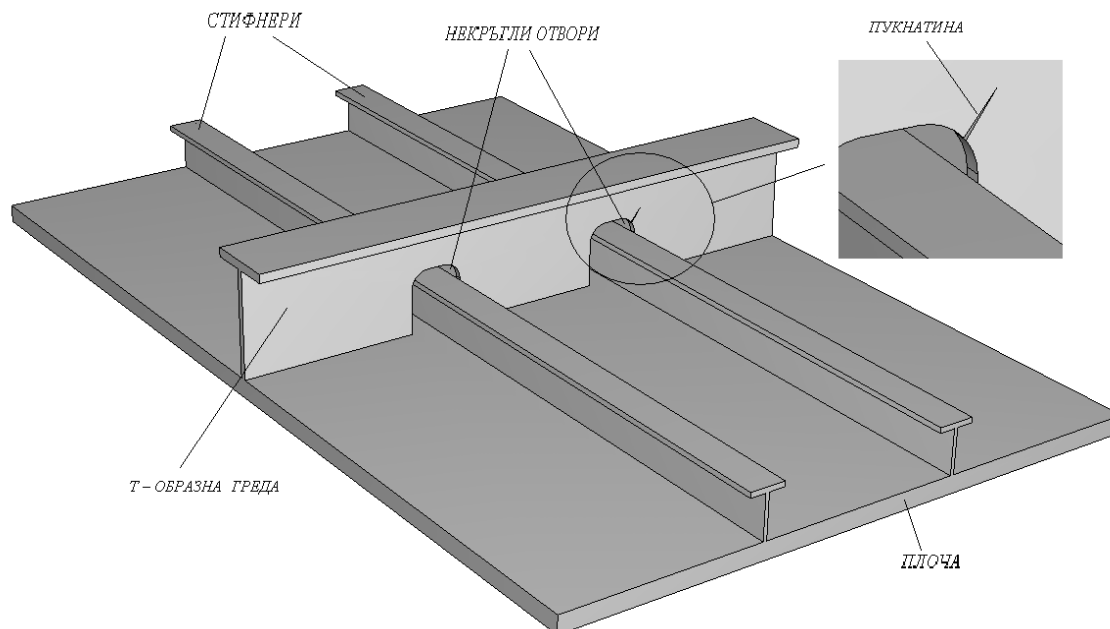
В условията на динамично натоварване, лимитиращият фактор, определящ товарносимостта, срока на експлоатация и сигурността на конструкциите е процесът на възникване и развитие на уморни пукнатини от първи тип (пукнатини на разкъсване) [3-7] в зоните около концентраторите. Този процес се интензифицира в най-голяма степен, ако работните напрежения са опънови или на срязване. В случай на отговорни метални конструкции, ако не се противодейства на този процес, могат да настъпят повреди или разрушения, довеждащи до материални загуби, а в случай на носещи метални конструкции в транспортни съоръжения – дори до човешки загуби.

Основен подход за превенция срещу възникване и развитие на уморни пукнатини от първи тип е въвеждането на полезни остатъчни натискови нормални напрежения около концентраторите, известен като “Cold Working” – пластично деформиране на метала при тем-

* E-mail: duncheva@tugab.bg; Tel: 066827312

пература, по-ниска от тази на рекристализация. По отношение на крепежни и некръгли отвори, този подход се базира върху механично третиране на повърхностните слоеве около отворите, така, че материалът претърпява пластична деформация. В случаи на некръгли отвори, съдържащи участъци със закръгления, може да се въздейства непосредствено върху повърхнината на отвора или върху челните повърхнини в близост до контура му [1]. Въздействието върху повърхнината на отвора се осъществява в условията на директен контакт

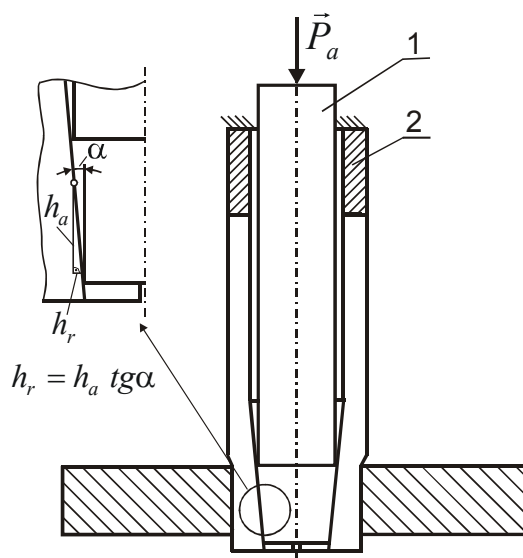
или чрез посредник посредством преминаване от край до край през него на инструмент с гарантирана стегнатост. Най-известните методи, реализиращи тази концепция по отношение на крепежните отвори са: Ball Cold Working (инструментът е сфера) или Mandrel Cold Working (инструментът е цилиндричен дорн), реализиращи процеса в условията на директен контакт [8]; Split Sleeve Cold Expansion (студено разширение (СР) през надлъжно разрязана втулка-посредник) [9-11]; Split Mandrel Cold Working [12].



Фиг. 1 Носеща конструкция със „стифнери“, съдържаща некръгли отвори

Стъпка напред е разработеният от Й. Максимов и Г. Дунчева модифициран Split Mandrel метод, който повишава възможностите за приложение и контрол на базовия метод Split Mandrel Cold Working [13]. Основно предимство на изброените методи в сравнение с методите, реализиращи ППД (“burnishing”) е възможността за генериране на натискова зона на относително голяма дълбочина около отворите. Използвайки метода Split Sleeve Cold Expansion, М. Landy го адаптира конкретно за некръгли отвори, съдържащи участъци със закръгления [14]. Методът се реализира в два последователни етапа: през I^{вия} етап предварително пробити отвори в участъците със закръгления се подлагат на СР, в резултат на което около тях се създава зона с полезни остатъчни напрежения на натиск; през II^{рия} етап се премахва излишния метал в съответствие с конфигурацията на некръглият отвор. Очевидно, след II^{рия} етап конструктивният елемент преминава в ново равновесно положение, така, че полето на остатъчните напрежения се преразпределя, но натисковата зона локално около концентратора остава интензивна. Основен недостатък на посочените методи е наличието на значителен градиент на генерираните остатъчни напрежения по оста на отвора вследствие от преминаващия през детайла значителен осов силов поток, като понякога откъм страната на входа на инструмента се създава опънов пръстен [15-18]. Наличието на такъв градиент е предпоставка за възникване и развитие на опасни ъгли пукнатини около концентраторите. Контрапункт на методите с преминаващ през предварително пробития отвор на инструмент с гарантирана

стегнатост е идеята за „чисто радиално СР“. Провокирани от тази идея, Й. Максимов и Г. Дунчева разработват иновативен метод, при който въздействието се упражнява само в радиално направление. В съответствие с Патент за изобретение № 66052/ 30.12.2010 е разработен инструмент [19], който се състои от дорн 1 с външна конусна работна част с малък ъгъл на конуса α и втулка 2, разрязана на множество сектори (фиг. 2).



Фиг. 2. Принцилна схема на иновативен инструмент за „чисто радиално студено разширение“

Процесът на СР се реализира чрез осово преместване на дорна, при което последният си взаимодейства със съответни вътрешни конусни повърхнини на секторите, с ъгъл, равен на α . В резултат на това се провиква 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. Отличителна особеност на иновацията е осигуряване на контрол върху степента на СР чрез последователен 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. Кинематичният контрол осигурява достигане на зададена степен на СР - DCE . Съгласно принципната схема на метода, през детайла с обработвания отвор не преминава осов силов поток, което рефлектира в почти равномерна и симетрична спрямо средната равнина на детайла зона с остатъчни напрежения на натиск [5, 20]. Поради посочените предимства методът е наречен Controlled Symmetry Cold Expansion (Контролирано Симетрично Студено Разширение). Следователно, конвенционалното СР на отворите в I-вия етап в метода на М. Landy може да се замени с процес, съответстващ на метода Controlled Symmetry Cold Expansion.

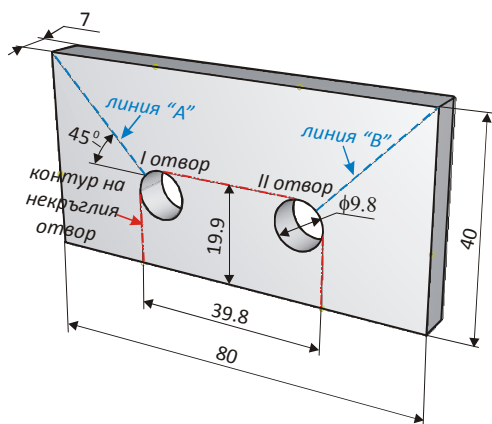
Основна цел на настоящата работа е да се направи оценка на ефекта от използване на нов инструмент, реализиращ иновативния метод Controlled Symmetry Cold Expansion върху разпределението в качествен и количествен аспект на остатъчните напрежения в планка с некръгъл отвор, чиято геометрия е адаптирана към носещата конструкция, показана на фиг. 1.

Отчитайки физическата същност на изследвания проблем, за постигане на поставената цел е използван крайно-елементен подход. Това позволява да се систематизира голям обем инженерна информация относно изменението на деформираното и напрегнатото състояние във времето за целия обем на изследвания обект.

2. 3D КРАЙНО-ЕЛЕМЕНТЕН (КЕ) МОДЕЛ

2.1. Обща характеристика

Обект на експериментално и числено изследване е планка с некръгъл отвор с геометрия според фиг. 3.



Фиг. 3 Геометрия на планката

За симулиране на изследвания подход е разработен 3D КЕ (фиг. 4). Използвана е системата за инженерен анализ ABAQUS.CAE Version 6.5-1 [21]. КЕ модел включва планка и два инструмента за реализиране на „чисто радиално СР“ последователно на I-ви и II-ви отвор. В съответствие с изобретението, всеки инструмент включва дорн с външна конусна работна част и четири работни органи тип сектори. Планката и работните органи са моделирани като твърди деформируеми тела, а дорновете – като идеално твърди (rigid body).

Анализът е проведен в четири последователни стъпки: expansion I (СР на I-ви отвор); stress recovery (формиране на остатъчните напрежения около I-ви отвор); expansion II (СР на II-ви отвор); stress recovery (формиране на остатъчните напрежения около II-ви отвор); cutting (премахване на излишния метал за формиране на контура на некръглия отвор).

Анализиран са два случая – със степени на СР: съответно $DCE = 4\%$ и $DCE = 5\%$. Степента на СР DCE е числено равна на окръжната линейна деформация в точка от повърхнината на отвора и се определя от зависимостта:

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

където d_o е диаметърът на предварително пробития отвор, d_t е диаметърът на инструмента, съответстващ на диаметъра на описаната окръжност около работните органи (секторите) след радиално преместване на последните с големина h_r (фиг. 2). В съответствие със зададените стойности на DCE на база на (1) и за ъгъл на работната конусна повърхнина $\alpha = 1^\circ$ са изчислени необходимите осови премествания h_a на дорновете (табл. 1).

Таблица 1

| $DCE, \%$ | Осов ход на дорна h_a, mm |
|-----------|-----------------------------|
| 4 | 12 |
| 5 | 14,7522 |

Според принципната схема на метода, СР на двата отвора е симулирано, като изчислените стойности на осовите премествания на дорновете по направление на ос Z са отнесени към т.н. Reference Point (RP) на последните (фиг. 4). Същите са зададени посредством табулирани функции, синхронизирани в общото псевдоре време.

Ефектът от формирането на контура на некръглия отвор (премахване на излишния метал) е симулирано в стъпка „cutting“ чрез температурозависим от псевдоремето намаляващ модул на линейни деформации.

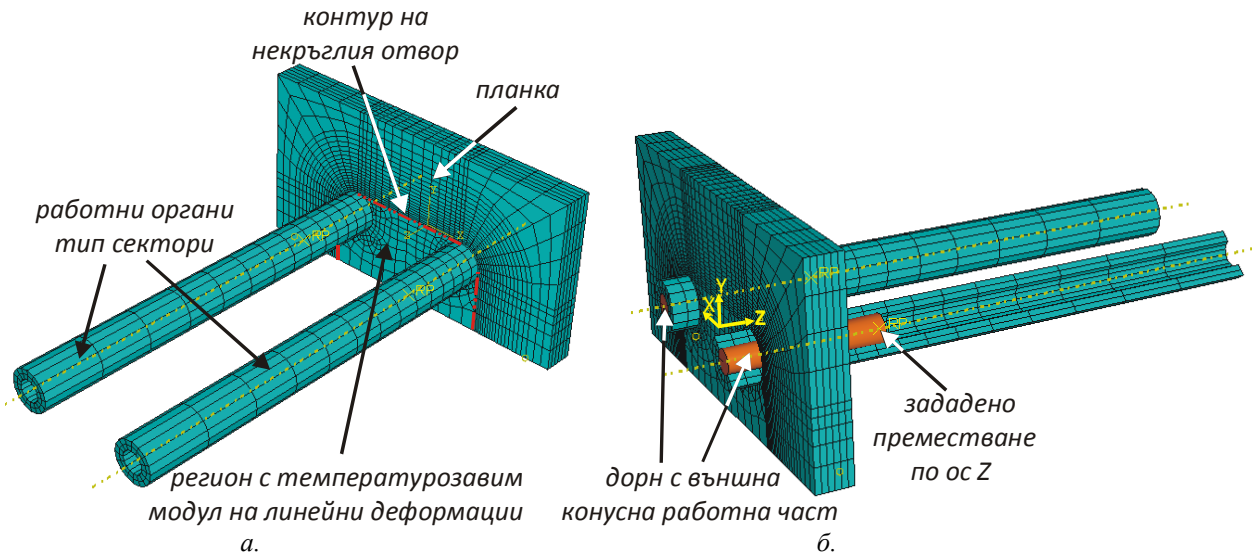
Топологията на планката е съобразена с естеството на изследвания проблем. За всички региони с изключение на този, съответстващ на некръглия отвор, са зададени шестостенни линейни КЕ тип C3D8R, като е използвана техника за съгъстяване в близост до закръгленията на некръглия отвор.

2.2. Конститутивни модели на материала

В съответствие с физическата същност на изследвания процес, за моделите на материала на планката и работните органи е дефинирано еласто-пластично по-

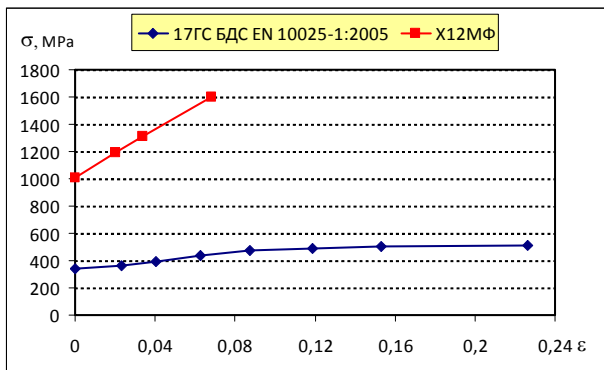
ведение. Зададени са модул на линейни деформации $E = 2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ и коефициент на Poisson 0.3. За материал на планката е избрана стомана 17ГС БДС EN 10025-1:2005, подходяща за заваръчни конструкции, подложени на високи налягания в температурния диапазон $(-40 \div +475)^\circ\text{C}$, а за работните органи – легирана стомана X12МФ. Поведението на двете стомани в пластичната област, получено на основата на половин циклов опънов тест в условията на стайна температу-

ра, е показано на фиг. 5. На базата на тези експериментални резултати, за моделиране поведението на планката в пластичната област е избран модел с комбинирано нелинейно и изотропно уякчаване. Този закон на моделиране на уякчаването е предпочетен като най-подходящ конкретно за процеса СР на отвори в ниско- и средновъглеродни стомани на база на изследването, направено в [16]. За материала на работните органи е избран модел на изотропно уякчаване.



Фиг. 4. 3D КЕ модел

а). дорновете не са показани; б). дорновете са показани



Фиг. 5. $\sigma - \varepsilon$ диаграми в пластичната област

2.3. Взаимодействия

Между работните органи (секторите) и дорновете, отчитайки мазането между тях, е дефиниран нормален и тангенциален контакт с коефициент на триене 0,1. Взаимодействието между външните повърхнини на секторите и отворите е дефинирано, като е зададен нормален и тангенциален контакт с коефициент на триене 0,15. Тези взаимодействия са изключени в съответните стъпки от анализа, в съответствие с физиката на изследвания процес.

2.4. Гранични условия

Ограниченията, наложени на елементите в изследваната механична система са съобразени с физическата същност на процеса СР и последователността на обработване на отворите. В началото на процеса и двата инструмента са вкарани в отворите, респ. зададени са

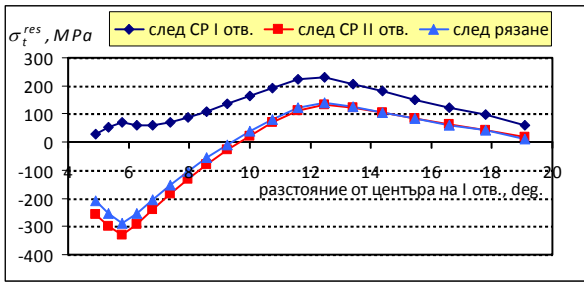
взаимодействия между съответните повърхнини. Отчитайки интерференцията между еластичните и пластични вълни след СР на двата отвора, е симулиран ефекта от самонагаждане на втория инструмент по отношение на $\Pi^{\text{ПН}}$ отвор по време на СР на $\Gamma^{\text{ВН}}$ отвор - на работните органи, обработващи $\Pi^{\text{ПН}}$ отвор по време на СР на $\Gamma^{\text{ВН}}$ отвор са наложени ограничения за преместване само по направление на ос Z, а по време на СР на $\Pi^{\text{ПН}}$ отвор на същите са зададени ограничения за премествания по осите X и Y (фиг. 4). В стъпка "cutting" планката е ограничена като „идеално твърдо тяло“.

3. КЕ РЕЗУЛТАТИ И КОМЕНТАРИ

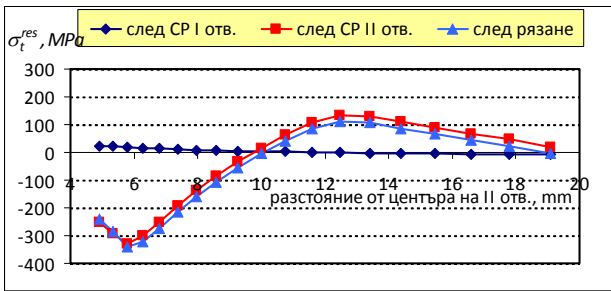
Обект на изследване е разпределението на остатъчните окръжни нормални напрежения σ_t^{res} в зоните с повишена концентрация на напреженията, т.е. около закръгленията на некръглия отвор. Акцентът в изследването е поставен върху средите на закръгленията на двата отвора, ориентирани под 45° спрямо преходите с праволинейните участъци от отвора. Отчетено е разпределението на σ_t^{res} върху челните повърхнини на планката съответно по направление на „линия „А““ и „линия „В““ (фиг. 3). С оглед на качествена оценка на новия метод, е изследвано разпределението на σ_t^{res} в осово направление - по образуващите от двата отвора, съответстващи на средите на закръгленията. Допълнително е изследвано разпределението на σ_t^{res} по контура на закръгленията.

3.1. За $DCE = 4\%$

На фиг. 6а, б е показано разпределението на σ_t^{res} в радиално направление, респ. по линиите „А” и „В” след СР съответно на I и II отвор и след формиране на контура на некръглия отвор, т.е. след рязане (премахване на излишния метал). Прави впечатление, че СР на I отвор довежда до опънови окръжни остатъчни напрежения около средата на закръгления на отвора, които след СР на II отвор се преразпределят в натискови. Този ефект се дължи на интерференцията между еластичните и пластични вълни на двата отвора поради близкото им разположение.



а.

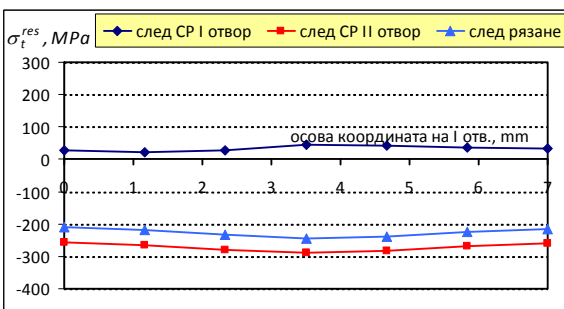


б.

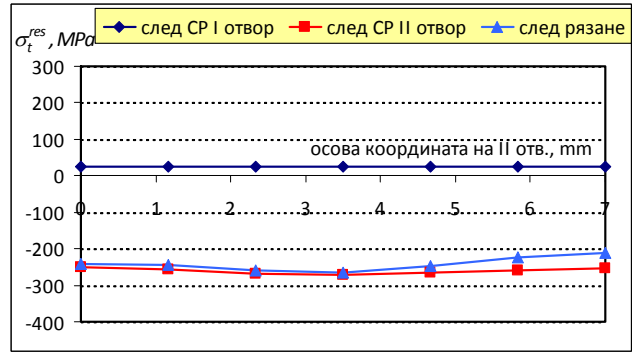
Фиг. 6 Разпределение на σ_t^{res} по челните повърхнини а). по линия „А”; б). по линия „В”

След изрязване на контура на некръглия отвор се наблюдава преразпределение на σ_t^{res} , което има различен характер за двата отвора. В средата на закръгления около I отвор остатъчните напрежения частично релаксират, а в близост до II отвор зоната почти не се променя. Същевременно, окончателно генерирани зони с σ_t^{res} по направление на линии „А” и „В” в качествен и количествен аспект се различават малко – като цяло около концентратора на II отвор зоната с полезни остатъчни напрежения на натиск е по-интензивна.

На фиг. 7а, б е показано разпределението по образуващите на двата отвора, съответстващи на средите на закръгленията.



а.

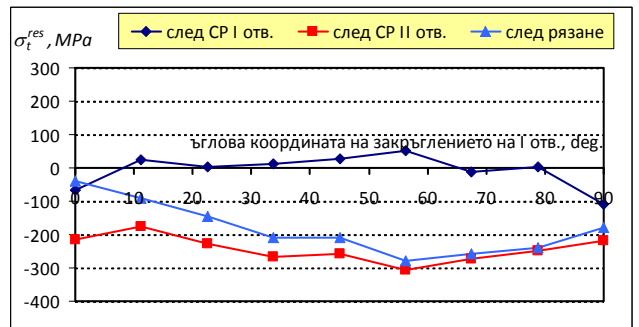


б.

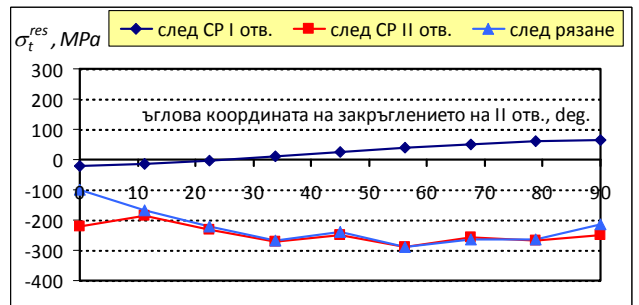
Фиг. 7 Разпределение на σ_t^{res} в осово направление а). I отвор; б). II отвор

В графиките от фиг. 7 се наблюдава почти идеална симетрия спрямо средната равнина на планката, което доказва характера на „чисто радиално СР”. Като цяло, след премахване на излишния метал, респ. формиране на контура на некръглия отвор, около I отвор се наблюдава по-силно изразен ефект на релаксация на σ_t^{res} .

Предвид симетричната зона с остатъчни напрежения, е показано разпределението на σ_t^{res} по контура на закръгленията върху една от челните повърхнини на планката (фиг. 8а, б). За преходните точки от закръгленията, лежащи върху по-късата страна от планката, е приета ъглова координата θ^0 , а за другите преходни точки ъгловата координата е 90^0 .



а.



б.

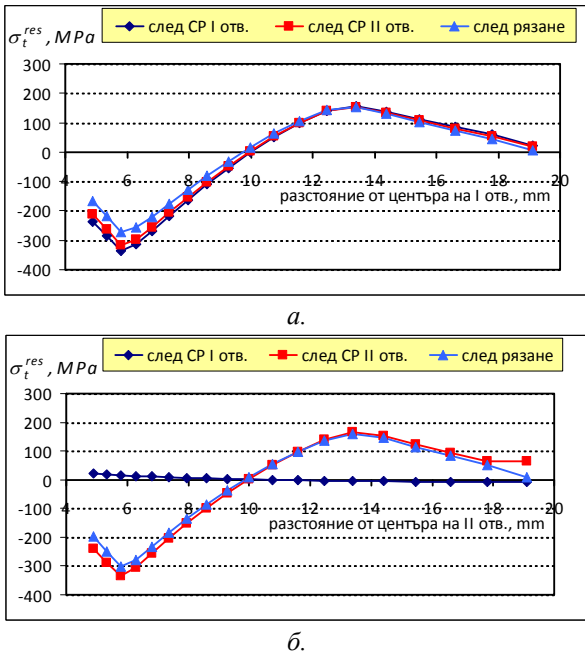
Фиг. 8 Разпределение на σ_t^{res} по контура на закръгленията а). I отвор; б). II отвор

Както може да се предвиди, ефектът от преразпределение на остатъчните напрежения след изрязване на

контура на некръглия отвор е най-изразен в краищата на закръгленията. Същевременно този ефект е различен около двата прехода с праволинейните участъци от некръглия отвор – релаксацията на σ_t^{res} е по-осезаема около точките с ъглови координати 0° . Това се дължи на различното количество освободена потенциална енергия на деформацията от двете страни на закръгления поради геометрията на некръглия отвор и некръглитe външни граници на планката.

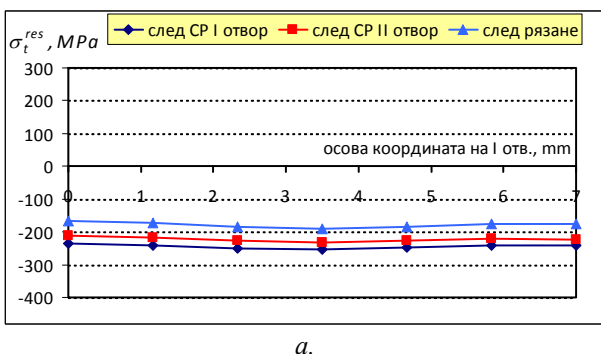
3.1. За $DCE = 5\%$

Разпределението на σ_t^{res} в радиално направление, респ. по линиите „А” и „В” в различните етапи от процеса е показано на фиг. 9а, б.

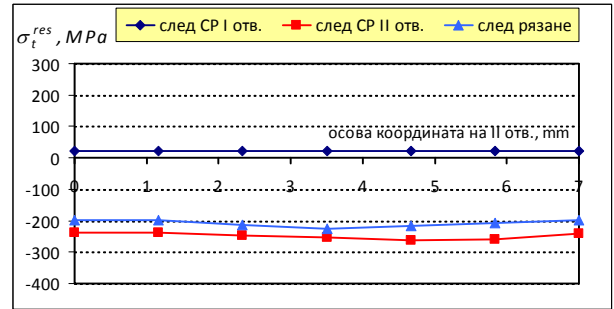


Фиг. 9 Разпределение на σ_t^{res} по челните повърхнини а). по линия „А”; б). по линия „В”

За разлика от случая с $DCE = 4\%$, по-голямата степен на CP осигурява изразена натисква зона в средата на закръглението на I отвор непосредствено след CP на същия. Независимо от различните междинни резултати, след формиране на контура на некръглия отвор, т.е. след премахване на излишния метал, за случая $DCE = 5\%$ се наблюдава по-скоро негативен ефект в разпределението на σ_t^{res} - в близост до закръгленията натискватa зона е с около 40 MPa по-слабо интензивна. Като цяло, и за двата анализирани случаи окончателно генерираната зона е по-интензивна в средата на закръглението на II отвор.



а.

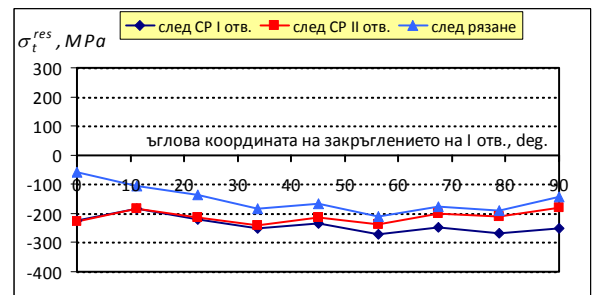


б.

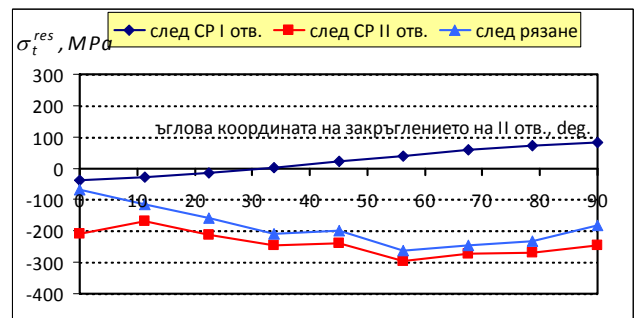
Фиг. 10 Разпределение на σ_t^{res} в осово направление а). I отвор; б). II отвор

Разпределението на σ_t^{res} в осово направление е показано на фиг. 10а, б. KE резултати потвърждават симетричния характер на генерираната зона с остатъчни напрежения спрямо средната равнина на планката. Същевременно, за случая на $DCE = 5\%$ се наблюдава още по-слабо изразен осов градиент, а релаксацията на остатъчните напрежения в средите на двете закръгления в качествен и количествен аспект практически не се различава.

Последователността на обработване на отворите се отразява и върху разпределението на σ_t^{res} по контура на закръгленията (фиг. 11а, б). Като цяло по контура на закръглението на II отвор се формира зона с по-голяма интензивност. Същевременно, сравнителният анализ между двата случая показва по-слабо изразен градиент по контура на закръгленията за случая, когато $DCE = 5\%$. Това може да се обясни с различния характер на деформациите на секторите следствие от по-голямото им радиално преместване.



а.



б.

Фиг. 11 Разпределение на σ_t^{res} по контура на закръгленията а). I отвор; б). II отвор

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработен е 3D KE модел за симулиране на подход за повишаване на уморната дълготрайност на метални конструкционни елементи с некръгли отвори, съдържащи участъци със закръгления. Подходът е базиран върху иновативния метод Controlled Symmetry Cold Expansion и инструмент, реализиращ процес на „чисто радиално СР“ на предварително пробити отвори в зоната на закръгленията и последващо формиране на контура на некръглия отвор чрез премахване на излишния метал. Резултатите, получени от числените симулации потвърждават позитивния ефект от прилагане на метода, изразяващ се в наличие на зона с полезни остатъчни окръжни нормални напрежения на натиск около концентраторите с достатъчна интензивност. Доказано е, че прилагането на метода осигурява симетрична спрямо средната равнина на планката зона с остатъчни напрежения на натиск с минимален осов градиент, дължащ се единствено на различната радиална коравина на материала по дебелина. От гледна точка на интензивност и равномерност в окръжно направление на натисквата зона около закръгленията, е установено, че е целесъобразно процесът да се реализира с по-малка степен на СР - $DCE = 4\%$ (вместо $DCE = 5\%$). По този начин за изследваната стомана 17ГС БДС EN 10025-1:2005 процесът е оптимизиран в аспект на минимизиране на енерго-силовите разходи. Разработеният 3D KE модел позволява използваният подход да се приложи и по отношение на други материали.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. 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, (2012) 11-18
- [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]. 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.
- [4]. Георгиев М., Межова Н., Пукнатиноустойчивост на металите при циклично натоварване. София, Булвест 2000, 2008.
- [5]. Dunchева 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.
- [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]. E. L. Salih, L. Gardner, D. A. Nethercot. Numerical investigation of net section failure in stainless steel bolted connections. Journal of Constructional Steel Research 66 (2010) 1455-1466.
- [8]. 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.
- [9]. Fatigue Technology Inc. Engineering Proces Specification FTI 8101C, “Cold Expansion of Holes Using the Standart Split Sleeve Systemtm (SsCx_{tm}) and Countersink Cold Expansiontm (CsCx_{tm})”, July, 1994.
- [10]. Wagner R. V. et al. Beneficial Effect of Split Sleeve Cold Expansiontm. In: 1992 Aircraft Structural Integrity Program Conference, San Antonio TX, USA, 1992.
- [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]. Leon A. Benefits of split mandrel coldworking. International Journal of Fatigue 20(1) (1998) 1-8.
- [13]. Максимов Й. Т., Дунчева Г. В., Инструмент и устройство за студено разширяване на отвори. Заявка за Патент за изобретение № 111269 /20.07.2012 г.
- [14]. M. A. Landy (Fatigue Tech. Inc.), Fatigue Life Enhancement of Dovetail Connector Slots and Noncircular Openings. US Patent № 4,885,829, Dec. 12, 1989.
- [15]. Maximov JT, Dunchева GV. A new 3D finite element model of the spherical Mandrelling process. Finite elements in analysis and design 44 (6-7) (2008) 372-382.
- [16]. Maximov JT, Dunchева 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.
- [17]. Maximov JT, Dunchева GV, Ganев 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.
- [18]. Maximov JT, Dunchева GV, Mitev IN. Modelling of residual stress relaxation around cold expanded holes in carbon steel. Journal of Constructional Steel Research 2009;65(4):909-917.
- [19]. Максимов Й. Т., Дунчева Г. В., Инструмент за обработване на крепежни отвори. Патент за изобретение: № 66052/ 30.12.2010 г.
- [20]. Maximov J. T., Dunchева 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.
- [21]. 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.