

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ВЪТРЕШНИТЕ ОСТАТЪЧНИ НАПРЕЖЕНИЯ В ЗАВАРЪЧНИ ШЕВОВЕ НА АПАРАТИ, ПОДЛОЖЕНИ НА МЕХАНИЧНО И ТОПЛИННО НАТОВАРВАНЕ

Антонов, Г., Овчаров, П.

Резюме: В публикацията е направен анализ на причините за разрушаване на конструкциите поради наличието вътрешни остатъчни напрежения, възникващи в областта на заваръчните съединения на апаратите при механично и термично натоварване. Изследвани са специално изработените образци и са приведени резултати, с чиято помощ могат да се определят зони в материала на изучавания обект с недопустима стойност на вътрешните напрежения. Разработена е методика за оценка на остатъчните напрежения в заварени образци чрез метода на глухите отвори.

Ключови думи: съдове под налягане, напрегнато състояние, остатъчни напрежения, носеща способност, метод на „глухите отвори“

1. Въведение

Характерна особеност на съвременните машиностроителни конструкции е обстоятелството, че те са подложени на едновременното въздействие на силови и температурни полета. Една от най-коварните причини за появата на пукнатини и внезапното разрушаване на конструкциите са вътрешните остатъчни напрежения, възникващи в детайлите най-често в областта на заваръчните съединения. Обединяването на работните напрежения на апаратите и съществуващите вътрешни остатъчни напрежения обикновено в зоните на заваръчни съединения предполага възникване на неочаквани дефекти и в крайна сметка на откази на оборудването. Основен признак за оценка на критическото състояние на материала в една сложно натоварена конструкция е наличието в локални участъци от нея на високи напрежения. За изделията от стомана те могат да достигнат границата на провлачване и често се оказват по-опасни по отношение намаляването на якостта на материала отколкото някои видове съществуващи дефекти в него.

В стадия на проектиране на дадена конструкция, механичните качества на използваните материали са известни с необходимата точност, а със някои съвременни методи могат експериментално да се определят и остатъчните напрежения, което дава добра оценка за началния ресурс на якостта на обектите.

Във връзка с горните съображения се предлага методика за изследване и определяне на остатъчните напрежения чрез

метода на “глухите отвори”.

2. Възникване на вътрешни собствени напрежения и особености на заваръчните собствени напрежения

Известно е в литературата съществуването на собствени напрежения от I, II и III род. Напреженията от I род се уравновесяват в относително големи обеми от материала, обхващащи поне няколко зърна. Напреженията от II и III род действат и се уравновесяват в много малки (в пределите на отделни зърна от метала) или ултрамалки (съизмерими с няколко междуатомни разстояния) от обема на материала. Ако тялото, в което съществуват остатъчни напрежения от I род, се раздели от равнинен или дъговиден разрез, то отделните части се освобождават от действащите им сили и моменти.

При много технологични процеси вътрешните напрежения възникват вследствие на неравномерните остатъчни деформации, които се наричат източници на напрежения или начални формоизменения, вътрешни деформации, остатъчни деформации или екстрадеформации.

Обща оценка на степента на влияние на изброените причини за възникване на собствени заваръчни напрежения не е необходима. Това влияние зависи от материала, процеса на заваряване, изменение на температурата през времето и механичните крайни условия, в които се намира заваръчния шев в момента на заваряване. При заваряването на конструкционни стомани определяща роля

процеса на структурно изменение и развитието на пластически деформации вследствие на неравномерно нагряване. Разпределението на собствените напрежения се определя от характера на изменението на структурата и способността на материала за пластична деформация.

При дифузионно заваряване най-съществена се явява промяната на материалните връзки (причина в). При този вид заваряване в равнината на контакта на двата разнородни материала, повишената температура предизвиква дифузионни процеси, водещи до свързване на материалите. След охлаждане възникват остатъчни напрежения, предизвикани от различни коефициенти на термични деформации в образуващото се единно съединение.

В общия случай местните необратими деформации, възникващи в заварените конструкции в резултат на заварките, се явяват причината за възникването на собствените заваръчни напрежения.

3. Определяне на остатъчните напрежения

Изчислителните методи в теорията на еластичността и теорията на пластичността, използвани за определяне на работните напрежения, са негодни за определяне на остатъчните напрежения, тъй като последните не зависят от външните сили, моменти или обемни сили.

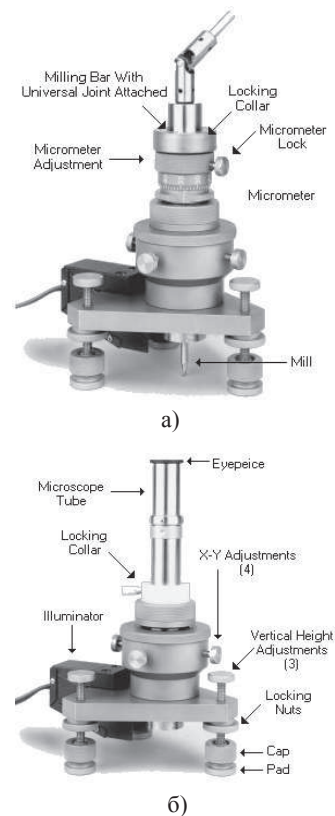
Ако са известни неравномерните остатъчни деформации, предизвикващи остатъчни напрежения, то съществува възможност за еднозначно изчислително определяне на напреженията. При линейна зависимост на коефициента на топлинно разширяване от температурата на екстрадеформациите, възникващи в процеса на нагряване детайла, са пропорционални на местното изменение на температурата. В този случай проблема за определяне на тези деформации се свежда до определяне на температурното поле. Ако в локалните участъци термическите напрежения превишават границата на провлачване на, то топлинните екстрадеформации и пластичните деформации

образуват полето на остатъчните деформации, определящи възникването на остатъчните напрежения.

Екстрадеформациите, предизвикващи остатъчни напрежения в заварените детайли, са неизвестни, и непосредственото им определяне е невъзможно. Затова се използва разчетно- експериментален метод за определяне на остатъчните напрежения, също наричан метод на изрязването. При изрязване на детайл с напрежения от I род, в резултат на освобождаването на напреженията възникват микроскопични деформации. Обикновено се прави последователно рязане на образци, предназначени за определяне на остатъчните напрежения от I род. Методиката на рязане трябва да съответства на геометрията на образеца. При това се измерват и регистрират макро-

скопическите деформации, възникващи в образеца при освобождаването му от напреженията и зависещи от ширината на изрязаната площ и размера на оставащата част от образеца. За изчисляване на експериментално измерените деформации са необходими уравнения, свързващи големината на

деформациите, ширината на отрязаната част и размера на оставащата част от образеца с напрежения. Сложността на тези уравнения зависи от геометричната форма на образеца, методиката на рязане и характера на напрегнатото състояние. В отделни случаи остатъчните напрежения се определят чрез прости изчисления, основаващи се на експериментални данни.



Фиг. 1. Експериментален микроскоп RS 200

3.1. Остатъчни напрежения в челни заваръчни шевове

При оценка на остатъчните напрежения в челни заваръчни съединения от листов материал е приета схема на равнинно напрегнато състояние. При това положение в средата на шева се образуват опънови остатъчни напрежения. Те са най- силно изразени в надлъжна направление вследствие на голямото надлъжно припокриване на шева.

$$\int_{-b}^{+b} \sigma_x(y,0)dx = 0, \int_{-b}^{+b} \sigma_y(y,0)dx = 0 \quad (1)$$

$x = \text{const} = 0$, т.е. разпределението на $\sigma_x(0,y)$ в челно заваръчно съединение на листове с размери $2b$, $2l$. Ако изходим от равновесието на силите, то надлъжните и напречните напрежения удовлетворяват уравнението.

Тези уравнения важат и за всяко друго сечение $x = \text{const}$ и $y = \text{const}$. Въпреки това при остатъчните напрежения отсъстват резултантни сръзващи моменти.

Експерименталното определяне на остатъчните напрежения в челно заварените листове се осъществява по метода на изразяване на участъци с кръгла или квадратна форма. Затова по време на измерването постоянно се определят деформациите в три различни направления, възникващи след премахването на началните напрежения по закона на Хук:

$$\sigma_x = \frac{E(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y)}{(1 - \mu^2)}$$

$$\sigma_y = \frac{E(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x)}{(1 - \mu^2)} \quad (2)$$

$$\tau = G\gamma$$

В тези уравнения E, μ, G - са съответно модул на еластичност, коефициент на Поасон и модула на плъзгане на материала.

Друга възможност за по точно определяне на предварителните остатъчни напрежения в равнинно напрегнато състояние дава методът на глухите отвори.

3.2. Метод на “глухите отвори”

Измерването на остатъчни напрежения на металите може да бъде осъществено чрез

експериментални анализи на напреженията от тензорезистор за измерване на остатъчните напрежения, който измерва напреженията след монтажа му.

За да определим остатъчните напрежения с тези тензорезистори е необходимо да премахнем част от метала, с което се дава възможност на метала да се деформира от вътрешните му напрежения в тази част. Тези измерени напрежения съответстват на съществуващите остатъчни напрежения в тази област на метала.

Тази техника е приложима основно в лабораторни условия за плоски и цилиндрични повърхнини и е трудно приложима в реалните обекти заради сложността на конструкциите и наличието на остатъчни напрежения в трудно достъпни места.

3.2.1. Същност на метод на „глухите отвори“

Най-широко използваната техника за измерване на остатъчните напрежения е метода на глухите отвори, метод на релаксация на напрежението.

Накратко процедурата на измерването включва следните шест основни стъпки:

1. Монтира се тензорезистор за измерване на остатъчни напрежения върху експерименталния обект в точка, където остатъчните напрежения трябва да бъдат определени.

2. Трите измервателни решетки, от които се състои тензорезистора за измерване на остатъчни напрежения се свързват към отделни канали на измервателната апаратура.

3. Прецизен водач (Експериментален микроскоп - модел RS200 - фиг. 1) е захванат към експерименталния обект и точно центриран над тензорезистора.

4. След нулево-балансиране на каналите на измервателната апаратура се пробива плитък отвор през центъра на тензорезистора - фиг. 1 а/).

5. Отчитането на напрежението в трите направления се извършва след пробиването на отвора с помощта на микроскопа - фиг. 1 б) .

6. Използвайки специална методика се определя посоката на остатъчното напрежение въз основа на трите измерени напрежения.

Описаната процедура е сравнително лесна и е стандартизирана в ASTM - Стандартен Тестови Метод E837.

Този метод се причислява към методите за "полу-разрушителен" контрол, защото малкия отвор незначително поврежда структурната цялост на тествания обекта. За тестване на големи обекти, понякога е възможно да загладим повърхността, където е пробит отвора след като тестването е завършило. Това трябва да се извършва много внимателно, за да се избегне поява на нови остатъчни напрежения в процеса на обработката.

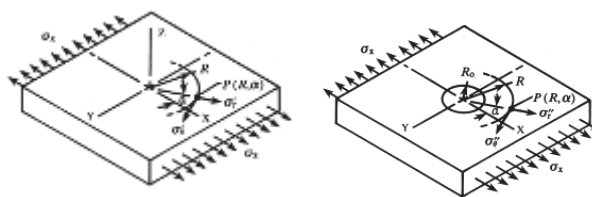
3.2.2. Принцип и теория на метода на глухите отвори

Пробиването на отвори дори и с много малък диаметър върху повърхността с остатъчни напрежения освобождава напреженията в областта, където е пробит отвора. Отстраняването на обема метал от отвора позволява околната повърхност да се деформира моментално вследствие на съществуващите локални напрежения в тествания обект..

В повечето случаи на приложения на метода пробивания отвор е глух, чиято дълбочина е колкото е диаметъра му или по-малка в зависимост от дебелината на тествания обекта. Геометрията на глухия отвор затруднява прилагането на теорията на еластичността за директно пресмятане на остатъчни напрежения от измерените напрежения. Решението може да е получено, обаче, за по-простия случай на проходен отвор пробит през тънка пластина, в която остатъчните напрежения са равномерно разпределени по дебелината на пластината. Поради това, теорията на метода на глухите отвори най-напред ще бъде демонстрирана за проходни отвори и в последствие приложена и за глухи отвори.

Показната на фиг. 2а част от тънка пластина, в която има остатъчни напрежения σ_x . Напрежението във всяка точка е P (R, α) може да бъде показано в полярни координати както следва:

$$\begin{aligned} \sigma_r' &= \frac{\sigma_x}{2}(1 + \cos 2\alpha) \\ \sigma_\theta' &= \frac{\sigma_x}{2}(1 - \cos 2\alpha) \\ \tau_{r\theta}' &= -\frac{\sigma_x}{2}(\sin 2\alpha) \end{aligned} \tag{3}$$



а) б)
Фиг. 2

След пробиване на малък проходен отвор (фиг. 2б) напреженията в околността на отвора са сега напълно различни от $\sigma_r, \tau_{r\theta}$. Трябва да бъдат нула навсякъде на повърхността на отвора. Решението за този случай е било получено от Г. Кирш през 1898г. И се получават следните зависимости за напреженията в т.Р (R, α):

$$\begin{aligned} \sigma_r'' &= \frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{1}{r^2}\right) + \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3}{r^4} - \frac{4}{r^2}\right) \cos 2\alpha \\ \sigma_\theta'' &= \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{1}{r^2}\right) - \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3}{r^4}\right) \cos 2\alpha \\ \tau_{r\theta}'' &= -\frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{3}{r^4} + \frac{2}{r^2}\right) \sin 2\alpha \end{aligned} \tag{4}$$

където:

$$r = \frac{R}{R_0} (R \geq R_0)$$

R_0 = радиус на отвора; R = произволен радиус от центъра на отвора.

Разликата на началните напрежения и крайните (след пробиването) е освободеното остатъчно напрежение:

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_r &= \sigma_r'' - \sigma_r' \\ \Delta \sigma_\theta &= \sigma_\theta'' - \sigma_\theta' \\ \Delta \tau_{r\theta} &= \tau_{r\theta}'' - \tau_{r\theta}' \end{aligned} \tag{5}$$

При условие за хомогенност и изотропност на материала, тези уравнения могат да се заместят в закона на Хук за двумерно напрегнато състояние в т.Р (R, α). Получените зависимости са следните:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha + \frac{4}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] \\ \varepsilon_\theta &= -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha - \frac{4\nu}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] \end{aligned} \tag{6}$$

За кръг с произволен радиус $R(R \geq R_0)$, може

да се опростят :

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \sigma_x (A + B \cos 2\alpha) \\ \varepsilon_\theta &= \sigma_x (-A + C \cos 2\alpha) , \end{aligned} \tag{7}$$

където коефициентите А, В и С имат следния вид:

$$\begin{aligned} A &= -\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{1}{r^2} \right) \\ B &= -\frac{1+\nu}{2E} \left[\left(\frac{4}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right] \\ C &= -\frac{1+\nu}{2E} \left[-\left(\frac{4\nu}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

Установено, че деформациите намаляват с отдалечаване от центъра на отвора и поради това измерването им се прави близко до ръба на отвора. От друга страна смущенията също така се увеличават в непосредствена околност на отвора. Тези разсъждения водят до избора на оптимален радиус (R) за разположение на измервателните решетки. Аналитичните и експериментални изследвания са установили практически диапазон

$$0,3 < r < 0,45,$$

където $r = R_0/R$, R_0 е радиус на отвора, а R е радиуса до центъра измервателната решетка.

На практика остатъчните напрежения са много често двумерни с две ненулеви главни напрежения. Това условие лесно може да е включено в анализа с използването на принципа на суперпозицията, който е приложим за линейно-еластични материали. Позовавайки се отново на фиг.2 е видно, че едномерното остатъчно напрежение ще бъде само по ос Y вместо по оста X, уравнения (3) и уравнения (3) ще бъдат все още приложими при $\cos(2\alpha)$, заменен с $\cos 2(\alpha=90^\circ)$, или от $-\cos(2\alpha)$. По този начин намаленото радиално напрежение в т.Р(R, α) се записва във вида:

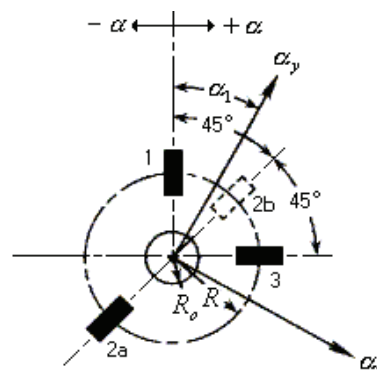
$$\varepsilon_r^y = \sigma_y (A - B \cos 2\alpha) \quad (9)$$

Използвайки връзката с уравнения (5) се получава:

$$\varepsilon_r^x = \sigma_x (A + B \cos 2\alpha) \quad (10)$$

Когато остатъчните напрежения са представени едновременно, принципа на суперпозицията позволява алгебрично събиране на уравнения (9) и (10), така че израза на освободените напрежения в равнинно двумерно напрегнато състояние е:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \sigma_x (A + B \cos 2\alpha) + \sigma_y (A - B \cos 2\alpha) \quad \text{или} \\ \varepsilon_r &= A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha \end{aligned} \quad (11)$$



Фиг. 3. Определяне на посоките на остатъчните напрежения чрез измерване на напреженията в три направления

Макар, че ъглите между решетките могат да бъдат произволни, 45-ъгловото разположение(фиг.3) води до най-простите аналитични изчисления.

Уравнението (11) може да бъде написано три пъти всяка измервателна решетка:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha \\ \varepsilon_2 &= A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2(\alpha + 45^\circ) \\ \varepsilon_3 &= A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2(\alpha + 90^\circ) \end{aligned} \quad (12)$$

Откъдето следва за напреженията:

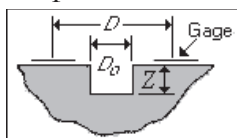
$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \\ \sigma_{\min} &= \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \\ \tan 2\alpha &= \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \end{aligned} \quad (13)$$

където α е ъгъла от най-близката главна ос до измервателна решетка номер 1 (положителен ако е по посока на номерацията).

По отношение на коефициентите А и В може да се каже, че определени по алгебричен път в уравнения (8), те се прилагат само, когато условията, наложени от Кирш в уравнения (4) са изпълнени. По-точни резултати се получават ако стойностите за коефициентите могат да са получени от интегрирането на уравнения (6) над областите на съответните решетки (\bar{A} и \bar{B}). Алтернативен метод за получаването им е да ги определим чрез експериментална калибровка, описана в [1].

За пръв път Рендлер и Вигнес са направили аналогията между разпределението на напреженията в глухия и проходния отвор. По този начин, освободените напрежения около пробития отвор също се изменят

синусоидално с отдалечаване от отвора, по начина описан в уравнения (11). От това следва, че тези зависимости както и връзките в уравнения (13) са еднакво приложими и към реализацията на метода на глухия отвор при условие на подходящо определени коефициенти.



Фиг. 4

В сравнение с процедурата на проходния отвор в този анализ включва една допълнителна независима променлива, а именно, дълбочина на отвора, Z (фиг.4). В универсална функционална форма, коефициентите могат да са изразени както следва:

$$\bar{A} = f_A(E, \mu, r, Z/D)$$

$$\bar{B} = f_B(E, \mu, r, Z/D) \quad (14)$$

където са зададени характеристики на материала E и μ , а коефициентите \bar{A} и \bar{B} са прости геометрични функции и са постоянни за всички геометрично подобни случаи.

При задаването на първоначално ниво на остатъчното напрежение и фиксиран диаметър на отвора, напреженията обикновено се увеличават с увеличаване на дълбочината на отвора. Следователно за постигане на максимални добри сигнали, отворът обикновено се пробива на дълбочина в съответствие с съотношението $Z/D=0,4$.

Трябва да се отбележи, че стойностите на основните коефициенти \bar{A} и \bar{B} получени чрез поредица от калибровъчни тестове се отнасят само за измерването на остатъчни напрежения при следните условия на калиброването: материал със същите еластични характеристики; еднаква геометрия; еднакъв размер на отвора; еднаква форма на отвора; еднакво напрежение в дълбочина; еднакви равнинни напрежения;

3.3. Методика на измерване

Определянето на остатъчните напрежение по метода на глухите отвори изисква спазване на следните основни стъпки:

1. Правилен избор и инсталиране на тензорезистора.
2. Центроване и пробиване на отвора.
3. Апаратура за измерване на деформацията.

4. Познания за механичните характеристики на тествания материал.

Правилен избор и инсталиране на тензорезистора

Инсталирането на три отделни тензорезистора, разположени в кръг е трудно и не се препоръчва, защото минималните грешки в разположението им могат да доведат до значителни отклонения от получените резултати за остатъчното напрежение. Подготовката на повърхността за инсталиране на тензорезистора е стандартна.

Центроване и пробиване на отворите

Прецизността на метода, прилаган на работните места е директно свързан с възможността на оператора да постави пробиващото устройство точно в центъра на тензорезистора. Чрез наблюдения се определя грешката дължаща се на ексцентричността на отвора. Режима на рязане при пробиване трябва да бъде така избран, че да се получават минимални напрежения и минимално триене между режещия инструмент и метала.

Механичните характеристики

Както при всеки експериментален анализ, точността на измерването на остатъчното напрежение зависи от точността, с която са определени модула на еластичност и коефициентът на Поасон. Много по-големи грешки могат да се получат от изменение в предпоставките, включени в основната теория. Например, главна предпоставка е линейната еластичност на метала. Ако връзката между напрежението и деформацията не е линейна поради огъване или други причини, изчисленото остатъчно напрежение няма да е вярно.

Ограничения и съображения

Изучаването на метода на глухия отвор чрез метода на крайните елементи показва, че промяната в деформацията, която се получава при пробиване в дълбочина през всеки слой (след първия) е причинено само от остатъчното напрежение в този слой. Останалата част от тази деформация е причинена от остатъчните напрежения в предходните слоеве. Колкото повече се увеличава разстоянието от повърхността толкова по-рязко се увеличава деформацията. Като резултат цялостната освободена

деформация в крайната дълбочина на отвора се влияе най-силно от напреженията в слоевете материал, които са най-близко до повърхността. В отвори с следното съотношение $Z/D > 0,2$ напреженията в тези слоеве имат много слабо влияние върху наблюдаваните деформации.

Като правило, грешките при измерване силно зависят от качеството на експерименталните техники и броя на включените параметри. Тъй като, определянето на остатъчното напрежение чрез метода на глухите отвори включва голям брой параметри и методи отколкото обикновения експериментален анализа на напрежението, възможността за грешки е съответно по-голяма. Поради това остатъчните напрежения обикновено не могат да се определят със същата прецизност както напреженията дължащи се на статично външно натоварване.

Пробиването на малък отвор в тествания образец е една от най-критичните операции в метода. Отвора трябва да бъде концентричен към центъра на тензорезистора и да бъде с определена форма, т.е. строга цилиндричност, плоско дъно и остър ръб на повърхността. Много е важно изискванията на формата на отвора да са добре спазени, когато се извършва сегментно пробиване за измерване на промяната на напрежението в дълбочина. При същите условия е от съществено значение дълбочината на отвора във всеки сегмент да се измери възможно най-точно, защото дори и много малка грешка в дълбочина може да доведе до значително голяма грешка в измереното напрежение. Точно измерване на диаметъра на отвора е много важно условие. Най-накрая е много важно отвора да се пробива без да се добавя значително остатъчно напрежение. Ако някои от по-горе посочените изисквания не са спазени точноста ще бъде намалена.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Даденият метод позволява да се определят за остатъчните напрежения в конструкциите, на основата на които да се локализируют области в материала с недопустима стойност на вътрешните напрежения. Счита се [1], че предложената методика дава известни

отклонения от реалните резултати. За получаването на достоверни данни по отношение на големината и посоката на остатъчните напрежения е необходимо да се изследват посочените образци и чрез шумовете на Баркхаузен [2].

2. Изследването на остатъчните напрежения може да се продължи, като се определят техните стойности в съответните направления в едни и същи точки и при същите условия, но върху термообработена плоча за снемане на остатъчните напрежения. По сравнението с показанията на заварената нетермообработена плоча може да се съди за степента на намаляване на остатъчните напрежения и в крайна сметка за ефективността на термообработката.

3. Предотвратяване на образуването на остатъчни напрежения е невъзможно. Все пак в отделни случаи с помощта на предварителни мероприятия може да се осигури намаляване на тези напрежения или целенасочено да се регулира тяхното разпределение. В практиката са известни основно два типа методи за намаляване на остатъчните напрежения: механични (вибрационни и дробеструене) и термични (отвърщане).

Литература

Tech Note. Measurements Group. TN-503-4, Residual Stress Measurements North Carolina USA, 1993

Wojtas A. S., W. J. P. Vink and G. den Ouden, Stress Measurements in GTA welded steel by means of the Barkhausen effect, Department of Materials Science and Engineering, Delft University of Technology, Netherlands, 1995

За контакти:

Антонов, Г., Овчаров, П.
gea_print@abv.bg, ovcharov@ms3.tuvarna.acad.bg
Технически Университет – Варна, България