

КОНЦЕНТРАЦИЯ В ЗАВАРЪЧНИ СЪЕДИНЕНИЯ ОТ НАЛИЧИЕТО НА ПОРИ В ШЕВА

Иван Коларов
ikolarov@vtu.bg

*ВТУ "Тодор Каблешков",
ул. "Гео Милев" № 158, София, България*

Ключови думи: Концентратор на напрежение от пори с идеална и реална форма в заваръчен шев

Резюме: Възможността за образуване на пори в заваръчния шев е проблем известен, който се дискутира в редица нормативни документи.

В работата е изследвана стойността на коефициента на концентрация на напрежение от наличието на една и повече пори. Порите са моделирани с идеална и реална форма в средата на инженерен продукт и са определени напреженията чрез измерване на напрежението в зони, близки до концентрациите. Максимална е концентрацията (9.6) за пора с формата на шестостенна призма в областта на пресичане на три ръба с радиус на кривина 0.01 mm. В ръбове, формирани от стените на призмата са регистрирани максимални концентрации от порядъка на 6.1, а в далечната зона от тези локални пикове е получена стойност 2. За пората с неправилна ротационна форма е получено 2.24, за пора със сферична форма – 1.8.

Оценена е точността на виртуалния експеримент чрез сравняване на получени резултати за класически концентратор със стойности по литературни данни.

Получените стойности имат индикативен характер и показват широкия диапазон на изменение на концентрацията в резултат на действителната форма на порите в шева.

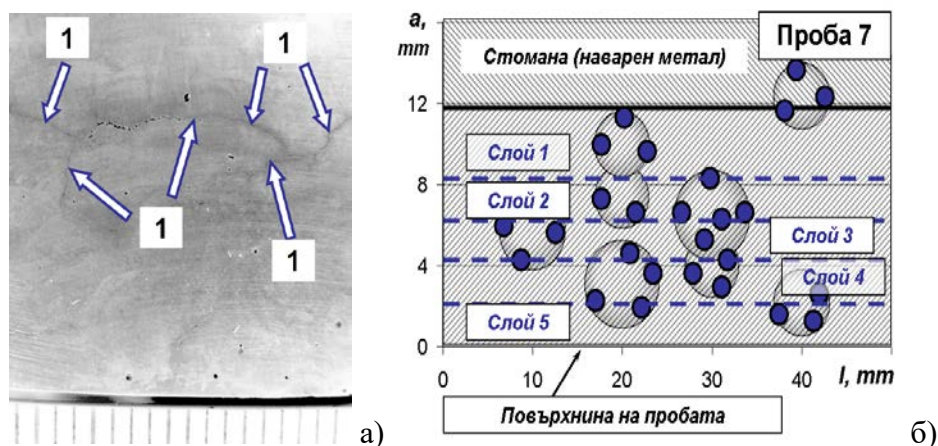
ВЪВЕДЕНИЕ

Един от основните критерии за оценка на качеството на заваръчни съединения е наличието на пори в шева. Порите се образуват поради технологични отклонения в процеса на заваряване и създават концентрации на напрежение, а така също отслабват носещото сечение. Затова в отговорни носещи конструкции се контролира тяхната големина и количество.

В количествено отношение наличието на пори зависи от методите за тяхното установяване. За контрол на несъвършенства по външните повърхнини се използват визуални методи за контрол. За установяване на пори вътре в метала най-често се използват безразрушителни методи за контрол (радиографичен и ултразвуков) и разрушителни методи, като критериите за допустимост на порите зависи от метода [1]. Класическите разрушителни методи по принцип дават възможност за сравнително точна информация за състоянието на метала и в зависимост от приложението се задават количествените ограничения за наличие на пори.

Според стандартът API 1104 : 2005 най-големият размер на пора не трябва да бъде по-голяма 1,6 mm, а общата площ на всички пори не трябва да надвишава 2% от повърхността. Съгласно БДС ISO 5817:2014 се въвеждат нива на качество и, например, за ниво на качество В допустими са: общата площ за еднослойна порестост не трябва да превишава 1% от общата площ на сечението, за многослойна порестост ограничението е $\leq 2\%$ от площта на сечението; максимален размер за единична пора за челни заварки - $\leq 20\%$ от дебелината, но максимум 3 mm; за клъстерна порестост – газовите пори е допустимо да бъдат разположени в условна окръжност с диаметър не по-голям от 15 mm [2].

Размерите и броят на порите могат да варират в зависимост от времето за втечняване на метала, като може да варира в зависимост заваряваните материали и вида на електрода. На фиг. 1 а) е показано изображение на пет-слойно наварена стоманена повърхнина със специализиран електрод [3,4]. Визуално се установяват нецялостности с форма на пори, подредени по линия (означени на фигурата с 1) с максимален условен размер 0.26 mm и единични нецялостности с предимно хаотично разположение с максимален размер 0.44 mm. Чрез ултразвуков контрол е установено наличието на клъстери от вътрешно разположени пори, формирани при нанасяне на отделните слоеве от оператора, а единичните пори с големина от порядъка на горепосочените не са дефектоскопични [3]. Може обосновано да се допусне, че формите и размерите на подповърхностните пори съответстват на тези, разположени на повърхността и може да се използват за оценка на концентрациите в метала.

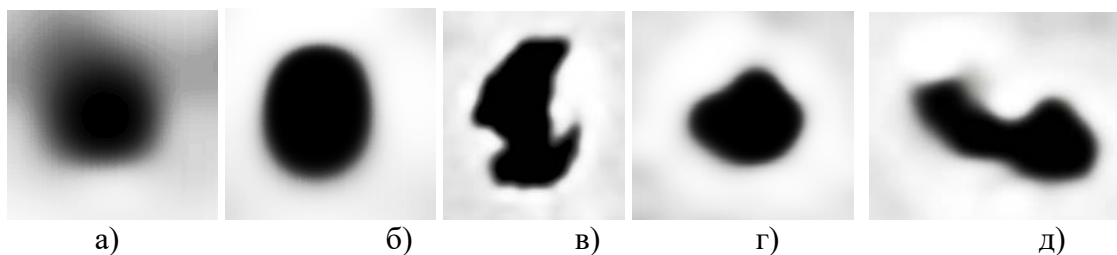


Фиг. 1. Изображение на микрошлиф, получен от изследване на двуслойно покритие (а) и условно изобразяване на регистрираните клъстери с отражатели (б).

Задача на настоящата работа е да изследва коефициента на концентрация в стомана от наличието на пори със сферична, призматична и неправилна ротационна форми.

ПОСТАНОВКА ЗА РЕШАВАНЕ НА ЗАДАЧАТА

На фиг. 2 са показани увеличени изображения на някои характерни пори с относително по-голям размер, показани на фиг. 1 а. Установяват се следните форми: сферична (а), елипсовидна (б) и неправилна в-д) като порите на фиг. 2 в) и д) са получени от сливането на поне две газови образувания с по-малки размери и разположени в съседство. Показаните на изображения не могат да обхванат всички възможни форми на порите. Те показват, че порите могат да са не само заоблени, но и да имат почти произволна форма, в т.ч. ръбове. Възможно е и ръбатостта на порите да се формира не само в равнината на наблюдение, но и зад нея, като се пресичат два и повече ръба в една относително малка област.

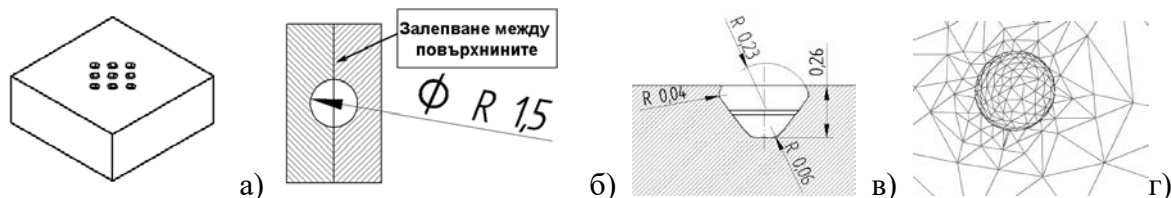


Фиг. 2. Форма на порите, установени чрез фотографско увеличение; а) сферична, б) елипсовидна, в – д) – неправилна форма.

Чрез увеличените изображения на фиг. 2 са измерени радиусите на кривина на порите в компютърна среда за двумерно изобразяване на машиностроителна документация. При измерване на радиусите са спазени действителните размери на порите. Установено е, че радиусите на кривина се намират в диапазона 0.01 – 0.7 mm.

В настоящата работа порите се моделират като кухини на границата на две еднакви тела, които се монтират във виртуална среда чрез залепване, така че се формират подповърхностни пори. Изследвани са сферични пори и пори с форма на шестостенна призма. Порите със сферична форма са с радиус R в диапазона от 0.25 – 2.5 mm. Чрез тях е изследвана зависимостта между размера на една нецялостност и коефициента на концентрация на напрежение K_{σ} . Порите с формата на шестостенна призма са с условен размер 0.3 mm. В началото е направено изследване за зависимостта между K_{σ} и радиуса на закръгление r на ръбовете на призмата. За целта r се задава в диапазона 0.01 – 0.2 mm. Същевременно са моделирани са пробни тела с 1, 3, 5 и 9 броя пори. За пробни тела с повече от една пора, разстоянието между стените на всеки две съседни нецялостности е в диапазона 0.29 и 0.38 mm. Така моделирани порите формират обща относителна площ в диапазона 0.38 – 2.88% от лицето на сечението на пробните тела. Чрез тях се оценява зависимостта между относителна площ клъстер от пори и K_{σ} . Изследвана е пора с неправилна форма, подобна на тази от фиг. 2 г) с условен размер 0.4 mm, а така също и плосък детайл с дебелина 3 mm и широчина 10 mm с цилиндричен отвор с диаметър 1 mm. Тези изследвания се правят за количествено сравнение на K_{σ} при изменение на формата на пората, а така също и за сравнение на точността.

На фиг. 3 а) е показан пример с тяло с моделирани 9 броя кухини, всяка с височина 0.15 mm. При формирането на пробните тела се следи за съосността на кухините от две слепени тела. Вариант с формиране на вътрешна пора с радиус R 1.5 е показан на фиг. 3 б).



Фиг. 3. Изображение на: моделно тяло с пори (а), сглобяване на тела за направа на инженерен анализ на напрегнатото състояние (б), моделиране на пора с неправилна форма от фиг. 2 г) и подготовка на моделите чрез формиране на мрежа за провеждане на яковстен анализ г).

На фиг. 3 в) е показано 2D изображение на разрез на тяло за формиране на пора с неправилна форма, подобна на изображението от фиг. 2 г). За целта увеличено изображение е използвано в модула за документиране на CAD за неговото транслиране

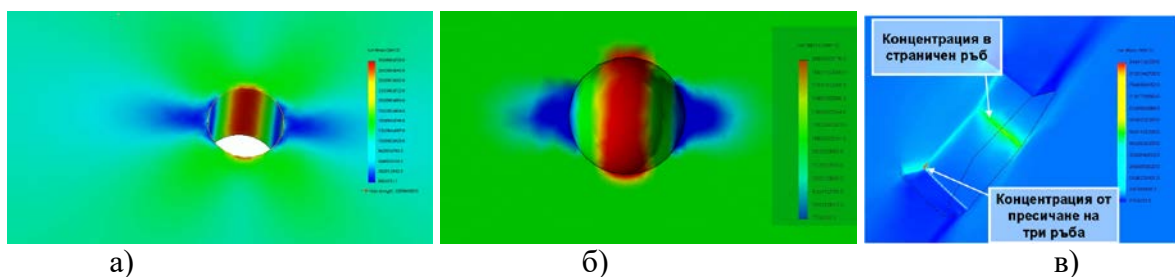
в цифров вид и чрез мащабиране се установява окончателен размер на кухината да бъде с условен размер 0.4 mm. Чрез ротация на част от контура се формира кухината в моделното тяло. Чрез слепване на две тела се получава пробно тяло, използвано за оценка на максималната концентрация.

За получаване на концентрациите на напрежение се създадените пробни тела се разделят на крайни елементи в специализирана инженерна среда за якостен анализ. За целта се създава мрежа от крайни елементи с размер, прогресивно намаляващ към областта на пората/порите. Минималния размер на елементите е в диапазона 0.005 – 0.032 mm, с което се цели осигуряване на достатъчна сходимост на получените решения. Момент от създаването на мрежа за пробно тяло със сферична пора е показан на фиг. 3 г).

РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

Решенията за K_{σ} са получени при натоварване на пробните тела на чист опън.

На фиг. 3 са показани в цветен код напрегнатите състояния около нецялостности от вида: цилиндричен отвор (а), сферична пора (б) и пора с ръбатост, формирана от пресичане на стени и ръбове от вида на шестостенна призма (в). За концентрациите със заоблена форма е характерно сравнително плавно изменение на локалното напрежение около тях и то на сравнително голямо разстояние, съпоставимо и по-голямо от размерите на концентрациите. Следователно при разположение на повече от един от тези концентратори в близка зона съпоставима с размерите им ще е налице сумиране на локалните напрежения в зависимост от отстоянието между концентрациите. За концентрацията с ръбатост се забелязват повече от една характерни зони с повишаване на напрежение: около точката на пресичане на три ръба, около ръб от пресичане на две повърхнини, общо пространство около отвора. Концентрацията около област с пресичане на три ръба обхваща област с максимален линейен размер в диапазона 10 – 20 микрометра, тази в ръб от пресичане на две стени – с максимален линейен размер около 50 микрометра, а общата концентрация около отвора се променя с характера на вече описаните за цилиндричен отвор и сфера. Следователно при оценка на напрегнатото състояние за този концентратор са значими неговата форма по отношение на екстремни стойности на локалните пикове, а така също и количеството и разстоянието между подобни концентратори.



Фиг. 4. Типично изображение на напрегнато състояние около нецялостност с: цилиндричен отвор (а), сферична пора (б), пора с ръбата форма в).

В табл. 1 са показани стойности за концентрациите K_{σ} за пробни тела с различни по форма пори. За оценка на точността на получените резултати се сравняват получените данни за цилиндричен отвор, а именно: по [5] – 2.7, по [6] – 2.75; т.е. налице е съгласуване на резултатите с литературни данни при решаване на тази класическа задача. Максимална е концентрацията в пробно тяло с формата на шестостенна призма и то в областта на пресичане на три ръба с радиус 0.01 mm ($K_{\sigma} = 9.6$). В ръбове, формиращи от стените на

призмата са регистрирани максимални концентрации от порядъка на $K_{\sigma} = 6.1$, а в далечната зона от тези локални пикове на призмата е стойността на K_{σ} се доближава към 2. За пората с неправилна форма (фиг. 3 в), която е създадена от крива с плавен преход между отделните участъци, е получено $K_{\sigma} = 2.24$, стойност по-голяма от тази за пора със сферична форма.

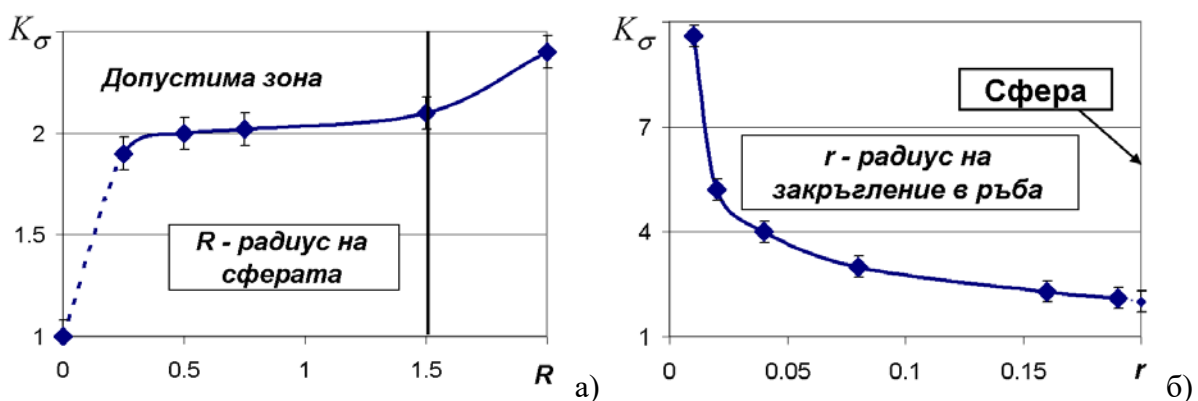
Табл. 1. Стойности на коефициента на концентрация K_{σ} за проби с различни по форма пори.

Форма на пората	Цилиндричен отвор	Сфера	Шестостенна призма	Неправилна (фиг. 2 г и фиг. 3 в)
K_{σ}	2.8	1.8	2*/6.1**/9.6***	2.24

Допълнителна информация: * - Показаната стойност е за ръбове с радиус на закръгление 0.2 mm, ** - Отнася се за зона с пресичане на две стени с радиус на закръгление 0.01 mm; *** - Отнася се за зона с пресичане на три ръба с радиус на закръгление 0.01 mm.

На фиг. 5 а) е показана графична зависимост с получените стойности на K_{σ} при изменение на радиуса R на пора със сферична форма от 0.25 до 2 mm. На същата графика е показана стойност на R съгласно БДС ISO 5817:2014. Видно е, че при допустима големина на пора в заваръчния шев е налице коефициент на концентрация на напрежение, а максималната стойност при $R = 1.5$ mm е $K_{\sigma} = 2.1$. За сравнение за API 1104 : 2005 тази стойност (при $R = 0.8$ mm) е $K_{\sigma} = 2.05$.

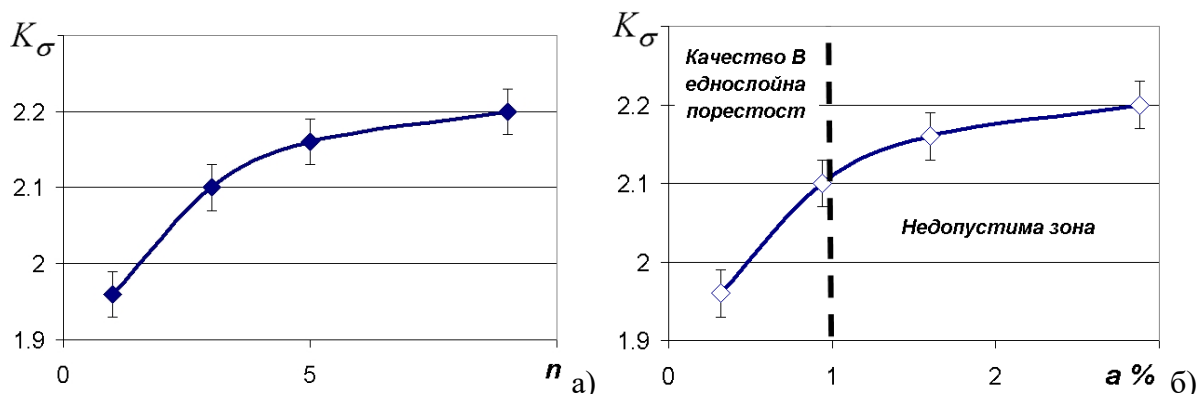
На фиг. 6 б) е показана графична зависимост за K_{σ} при изменение на радиуса r на закръгление в ръбовете на шестостенната призма от 0.01 до 0.2 mm. От графиката се вижда, че стойността на K_{σ} се променя от 9.6 до 2 и клони към получената за пора със сферична форма стойност 1.8. Тази графика може само да илюстрира широкия диапазон, в който може да се променя коефициента K_{σ} , тъй като е малка вероятността на практика да се случи пресичането на три ръба с еднакви радиуса на закръгление.



Фиг. 5. Коефициент на концентрация K_{σ} в зависимост от радиуса R на сферата (а) и в зависимост от радиуса r на закръгление в ръба на ръба на пора с формата на правилна шестостенна призма (б).

На фиг. 6 са показани резултати за изменение на K_{σ} при нарастване на броя на порите от 1 до 9 в количествено (а) и в процентно отношение (б) спрямо общата площ на сечението. Коефициентът K_{σ} се променя от 1.96 до 2.2, като при допустима стойност по БДС ISO 5817:2014 за качество B при еднослойна порестост в процентно отношение $a = 1\%$ - $K_{\sigma} = 2.1$. Съгласно допустими стойности според API 1104 : 2005 -

$$K_{\sigma} = 2.18$$



Фиг. 6. Коефициент на концентрация K_{σ} в зависимост от броя на порите с формата на правилна шестостенна призма с условен размер 0.3 mm (а) и в зависимост от процентното отношение $a\%$ на сумарното лице на порите в сравнение с общото лице на сечението (б).

ИЗВОДИ

На базата получените резултати се правят следните изводи:

- Коефициентът на концентрация K_{σ} изключително от формата на порите и в случай, че формата на една пора включва две и повече пресичащи се повърхнини, големината на концентрацията може да достигне до диапазона 6 – 9.6 при формиранни радиуси на кривина между повърхнините от порядъка на 0.01 mm.

- Въпреки установената разлика в нормативни документи БДС ISO 5817:2014 за качество В и API 1104 : 2005 за допустимите размери и количество на порите в заваръчния шев, то концентрацията на напрежения е приблизително еднаква, а установените разлики са в границите на инженерната грешка. Много по-голямо е влиянието на формата на порите върху концентрациите на напрежение

Получените концентрации от пори в заваръчния шев са индикативни и показват големия диапазон, в който те могат да се намират.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Welding of Pipelines and Related Facilities. API Standard 1104 : 2005
- [2] БДС ISO 5817:2014. Заваряване. Заваряване чрез стопяване на съединения от стомана, никел, титан и техните сплави (с изключение на лъчево заваряване). Нива на качество според несъвършенствата.
- [3] Коларов И., П. Ташев. Ултразвуково изследване на нано-модифицирани с Tin слоеве, получени чрез наваряване с тръбен самозащитен тел. Национална научно-техническа конференция „Акустика 2015” стр. 106 – 109. София. (ISSN 1312-4897)
- [4] Plamen Tachev, Hristo Kondov, Mara Kandeva, Elisaveta Tasheva “Wear-resistance study of nano-modified coatings by TIG surfacing process”, Belgrade, Serbia, 13 – 15 May 2015
- [5] Mechanical Engineering. Shigley’s Mechanical Engineering Design, Eighth Edition Budynas–Nisbett. ISBN: 0–390–76487–6
- [6] <https://www.fracturemechanics.org/hole.html>

Благодарности: Работата е създадена при разработване на научноизследователски проект «Напрегнато състояние в характерни зони от еластичната среда в типични конструкции от заваръчни съединения», подкрепен от МОН.

CONCENTRATION IN WELDS DUE TO THE PRESENCE OF PORES

Ivan Kolarov
ikolarov@vtu.bg

*Todor Kableskov University,
158 Geo Milev Str., Sofia, Bulgaria*

Keywords: *Pore stress concentrator with perfect and real shape in the weld*

Abstract: *The possibility of pore formation in the weld is a known problem, which is discussed in a number of regulations.*

The value of the stress concentration coefficient from the presence of one or more pores is studied in the work. The pores are created with an ideal and real shape in 3D CAD module and the stresses are measured in areas close to the concentrations. The maximum concentration (9.6) is obtained for a hexagonal prism-shaped pore at the intersection of three edges with a radius of curvature of 0.01 mm. Maximum concentrations (6.1) were recorded in the edges formed by the walls of the prism, and a value of 2 was obtained in the far zone of these local peaks. For a pore with an irregular rotational shape, 2.24 was obtained, for a pore with a spherical shape – 1.8.

The accuracy of the virtual experiment was evaluated by comparing the results obtained for a classical concentrator with known value.

The obtained values are indicative and show a wide range of concentrations values as a result of the actual shape of the pores in the seam.