

НАПРЕГНАТО СЪСТОЯНИЕ В ЗАВАРЪЧЕН ШЕВ С ЛИНЕЕН И ТОЧКОВ КОНЦЕНТРАТОР

Иван Коларов
ikolarov@vtu.bg

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

***Ключови думи:** Напрегнато състояние в заваръчен шев с концентратор от линеен и точков вид.*

***Резюме:** Якостта на заваръчен шев зависи от разнородни фактори, в т.ч. и от наличието на несъвършенства в него (допустими или недопустими).*

Цел на настоящата разработка е да изследва напрегнатото състояние в точков концентратор в заваръчен шев при въздействието на променливо поле на напрежение от линеен концентратор.

Целта се постига чрез провеждане на виртуален експеримент с челен и с Т заваръчни шевове с линеен концентратор, в зоната на влияние на които се формира точков концентратор от вида на пора, който променя локално напрежението. За решаване на задачата се използва хипотеза за мултиплициране на въздействието на концентраторите върху напрегнатото състояние в шева. За точков концентратор се използва пора със сферична форма. За оценка на влиянието на формата са показани данни и за пора с ръбатост (използвана е шестостенна призма).

Хипотезата е валидирана чрез числен експеримент и сравняване на резултатите, получени чрез директно измерване и чрез мултиплициране влиянието на концентраторите. Установена е добра сходимост между тях.

Еквивалентното напрежение за конкретна конструкция заваръчно съединение се определя чрез произведение от номиналното напрежение, големината на точковия концентратор и зависи от неговото отстояние от линейния концентратор. Наличието на остри ръбове от пресичане на стени на концентратора е причина за известни отклонения поради нехомогенност на напрежението около него.

ВЪВЕДЕНИЕ

Якостта на заваръчен шев зависи от разнородни фактори, като: механични свойства на заваряваните елементи и на добавъчния материал, технология на заваряване, геометрични размери на шева и наличието на несъвършенства в него (допустими или недопустими). За осигуряване на качеството на шева принос имат широк кръг от специалисти по технология на заваряването и металургия, конструктори, сертифициран персонал по заваряване, контрол на качеството и др. Въпреки това поради технологични отклонения от различно естество е възможно в шева да възникнат

нецялостности и геометрични отклонения на формата на шева. Докато формата на заваръчния шев подлежи на визуален контрол, то вътрешните нецялостности се оценяват по условен размер и тяхната допустимост се регламентира от нормативни документи [1, 2].

При инженерно пресмятане се изчислява средното напрежение на заваръчния шев. На практика заваръчният шев се натоварва неравномерно. Налице са препоръки за големината на концентрацията на напрежението, която зависи от промяната на формата готовото изделие [3]. Тя предизвиква локално нарастване на напрежението и за

нормално натоварване се отчита чрез коефициент на концентрация $K_{\sigma} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$, тук

σ_{max} е максимална стойност на напрежението, а σ_{nom} - номинална стойност. При обемно разглеждане на задачата напрегнатото състояние σ_{eq} в една точка се определя от зависимостта:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{0.5} \quad (1)$$

Тук σ_x , σ_y и σ_z са нормалните напрежения по осите x, y и z, а τ_{xy} , τ_{yz} и τ_{zx} са тангенциалните напрежения в направление, съответстващо на индексите.

Напрежението σ_{eq} е максимално в участък от концентрацията и се променя с отдалечаване от нея. Градиентът $\text{grad} \sigma_{eq}$ на еквивалентното напрежение се определя

от общата зависимост $\text{grad} \sigma_{eq} = \frac{d\sigma_{eq}}{dr}$, r е радиус вектор от концентратора до точка от еластичната среда, т.е. около концентратора се създава променливо поле на напрежение.

Проблемът с определяне на напрегнатото състояние в заваръчен шев е съществен при динамично натоварени съединения и оценяване на експлоатационния ресурс, който те осигуряват. Докато стойността на коефициента на концентрация K_{σ} подлежи на аналитично определяне, то наличието на нецялостност в съединението променя напрегнатото състояние и следва то да бъде оценено.

Цел на настоящата разработка е да изследва напрегнатото състояние в точков концентратор в заваръчен шев при въздействието на променливо поле на напрежение от линеен концентратор.

ПОСТАНОВКА ЗА РЕШАВАНЕ НА ЗАДАЧАТА

За решаване на задачата се използва хипотеза за мултиплициране на въздействието на концентраторите върху напрегнатото състояние в шева. За точков концентратор се използва пора със сферична форма. За оценка на влиянието на формата са показани данни и за пора с ръбатост (използвана е шестостенна призма).

Задачата се решава при следните предпоставки:

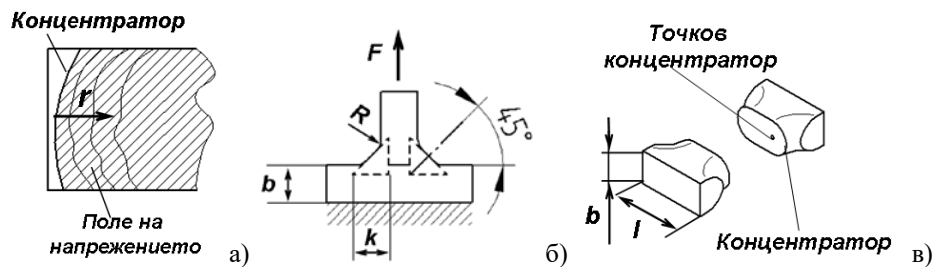
- Напрегнатото състояние в заваръчния шев е в диапазона до границата на провлачване;
- Полето на напрежение на концентраторите се определя в образец от средно въглеродна стомана чрез помощта на инженерни продукти за провеждане на виртуален експеримент;
- Пренебрегват се структурните различия на шева и на зоната на термично влияние;

- Задачата се опростява чрез идеализиране на формата на шева, като се пренебрегват нейните възможни отклонения, получавани при заваряването;
- Търси се напрегнатото състояние в заваръчния шев и то се сравнява с данните, получени за средното напрежение чрез класическата теория;
- При численото решаване на задачата се търси сходимост на резултатите, като времето за итерация се ограничава до 15 min.

Целта се постига чрез провеждане на виртуален експеримент с челен и с Т заваръчни шевове с линеен концентратор с големина K_{σ} , в зоната на влияние на които се формира точков концентратор от вида на пора, създаващ $K_{\sigma,p}$ пъти нарастване на локално напрежението. Конструирани са 3D модели на заваръчни шевове с максимална якост, в които се формира точков концентратор в различно местоположение. В средата на FEA на конструкциите се поставя опорна реакция, натоварват се с външна сила и се анализира напрегнатото състояние в шева.

Постановка на задачата при оценка на напрегнатото състояние около линеен концентратор е показана на фиг. 1 а). Полето около концентратора е представено с обща площ, получена от зони с относително малка разлика в напрегнатото състояние. В компютърна среда се измерва напрежението на разстояние r от линейния концентратор, т.е. определя се функцията:

$$\sigma_{eq,r} = f(K_{\sigma}, \sigma_{nom}, r). \quad (2)$$



Фиг. 1. Постановка на задачата (а); схеми на Т- шев (б) и на челен шев (в) за валидиране на модела.

Тогава еквивалентното напрежение $\sigma_{eq,p}$ в областта на точковия концентратор ще се определя от зависимостта:

$$\sigma_{eq,p} = K_{\sigma,p} \cdot \sigma_{eq,r}. \quad (3)$$

Анализът на горния израз показва, че при наличие на точков концентратор максималното напрежение в заваръчния шев се определя от стойностите на K_{σ} , $K_{\sigma,p}$, σ_{nom} , r .

На фиг. 1 б) и в) са показани конструкции на заваръчни шевове за валидиране на модела в (3), а размерите и вида на използвания точков концентратор са показани в табл. 1. За образец № 1 линейния концентратор възниква вследствие на неравномерното натоварване по височина на заваръчния шев, а за образци 2 и 3 – на недобро заваряване в краищата на челния шев.

Елементите на заваръчните шевове се натоварват равномерно от външна сила F , която съгласно [3] за конструкциите от фиг. 1 б) и в) създава, съответно, напрежение на срязване τ_{cp} и нормално напрежение σ , както следва:

$$\tau_{cp} = \frac{F}{2 \cdot \cos 45^{\circ} \cdot k \cdot l} \text{ и } \sigma = \frac{F}{S}. \quad (4)$$

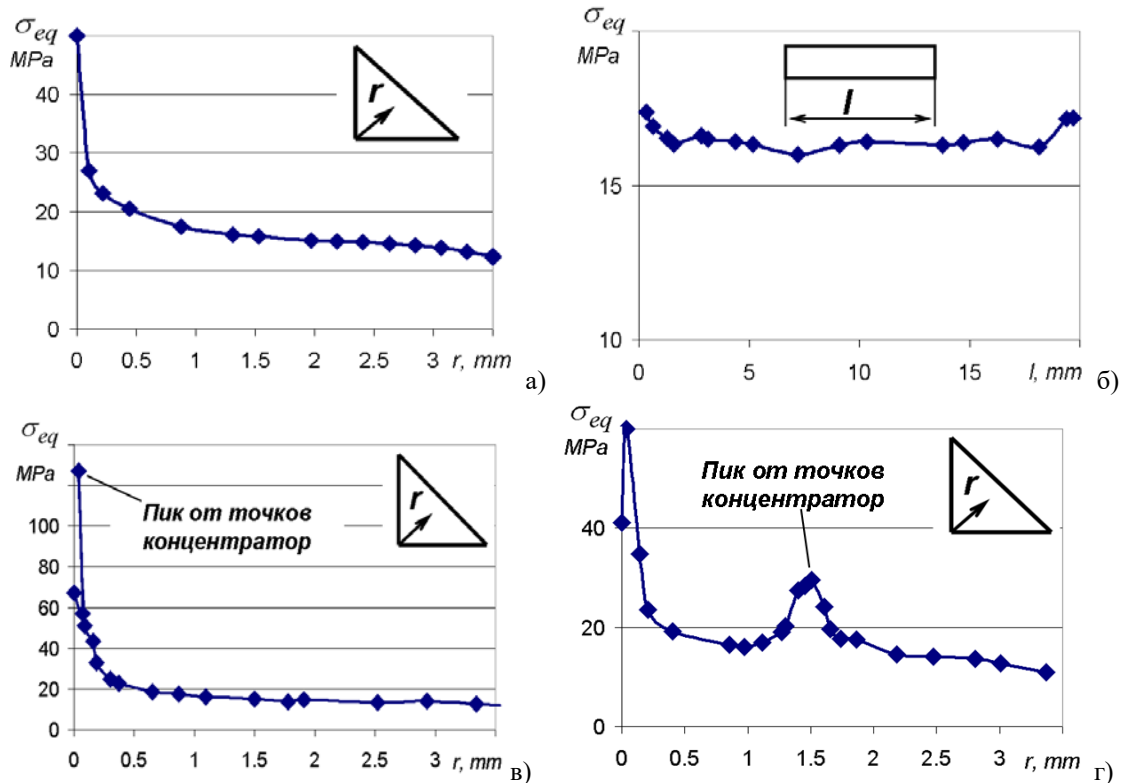
Тук с l е означена дължината на шева от фиг. 1 б), а с S - лицето на плътното сечение на шева от фиг. 1 в).

Табл. 1. Конструктивно описание на заваръчните шевове за валидиране на модела.

Образец №	Конструкция	b, mm	l, mm	Точков концентратор
1	Г - шев	5	20	Сфера
2	Челен	5	10	Призма
3	Челен	5	20	Сфера

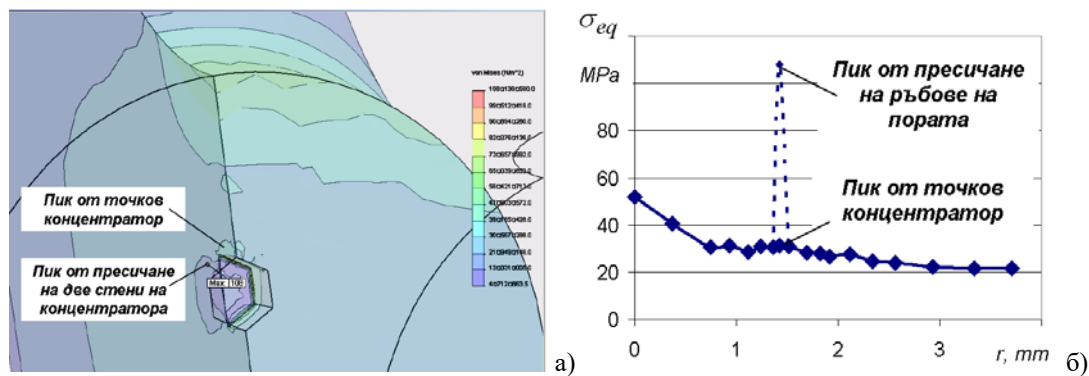
РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

На фиг. 2 са показани резултати от изследване на образец №1 с приложена външна сила $F = 2000\text{ N}$. Средната стойност на τ_{cp} в шева е 14.1 MPa . Отчетено е еквивалентното напрежение и концентрация 3.5, като максимума на напрежението е във върха на шева (фиг. а). На разстояние $r > 1.5\text{ mm}$ стойността на $\text{grad}\sigma_{eq}$ намалява, а σ_{eq} се доближава до средната стойност на τ_{cp} . Неравномерността на σ_{eq} , определена по дължината на шева е 1.05 (фиг. 2 б), което е значително по-малка от концентрацията във върха на шева. Напрежението σ_{eq} е определено и при наличието на пора (точков концентратор от сфера) с диаметър 0.5 mm . За нея е установено предварително, че тя създава концентрация $K_{\sigma,p} = 1.95$. На фиг. 2 в) и г) са показани резултати за σ_{eq} разположение на пората във върха на шева и на разстояние $r = 1.56\text{ mm}$. Забелязва се, че около пората възниква пик с амплитуда, пропорционална на вече изчислената стойност на $K_{\sigma,p}$. При разположение на пората непосредствено до върха на шева, в зона около нея възниква напрежение σ_{eq} , което значително превишава теоретичната стойност, създавана от линейния концентратор.



Фиг. 2. Резултати от изследването на Г – шев; без точков концентратор в напречно (а) и надлъжно (б) на шева направление, с точков концентратор във върха на шева (в) и на разстояние $r=1.56\text{ mm}$ от него (г).

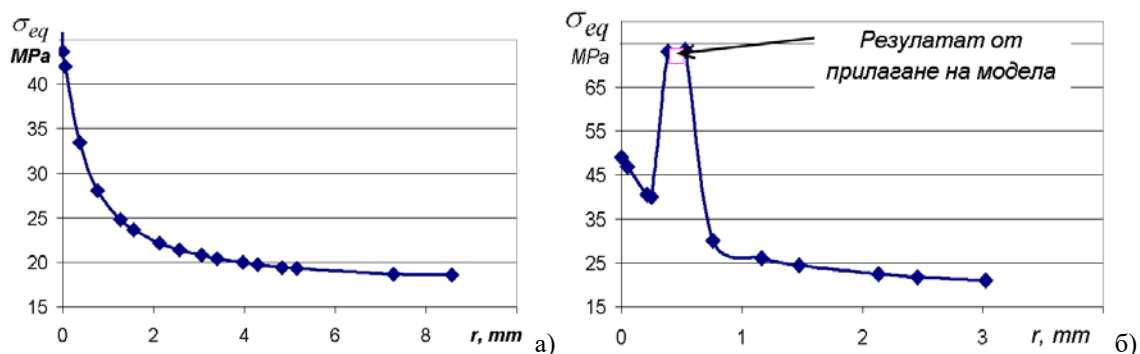
На фиг. 3 а) и б) са показани резултати от изследване на образец №2 с пора, отстояща на разстояние $r = 1.5 \text{ mm}$ от близкия край на линейния концентратор. Образецът е натоварен на опън със сила 1000 N. В заваръчния шев е симулирана пора с формата на шестостенна призма с радиус на закръгление на ръбовете 0.2 mm. В този случай около стените и ръбовете на точков концентратор се формират концентрации, които променят полето на линейния концентратор. Максималната концентрация е в точката на пресичане на две стени от призмата и тя е оценена около 4.25, като нейната ефективна зона на действие е в рамките на 0.04 mm. Не са регистрирани максималните напрежения в пресечната точка на три ръба. В зоната на пората се отчета пик на σ_{eq} в резултат на действието на $K_{\sigma,p}$. Установено е сравнително непоследователно изменение на напрежението вследствие нехомогенност на напрежението около точков концентратор. Следователно при неправилна форма на пората максималното напрежение ще зависи не само от разстоянието r , но и от нейната ориентация спрямо линейния концентратор.



Фиг. 3. Резултати от изследването на образец № 2; а) – разрез през концентратора, б) – напрежнато състояние през точков концентратор, разположен на разстояние $r=1.5 \text{ mm}$ от края на линейния концентратор.

На фиг. 4 са показани резултати от изследването на образец № 3 на опън от сила 2000 N без точков концентратор (а) и с такъв при $r = 0.42 \text{ mm}$ между линейния концентратор и близкия край на пората. При отсъствие на концентратор при диапазон на изменение на r до 8.56 mm за $\sigma_{eq}(r)$ е получен изразът:

$$\sigma_{eq}(r) = (0.000365.r^6 - 0.00993.r^5 + 0.10408.r^4 - 0.53695.r^3 + 1.44125.r^2 - 1.99435.r + 2.27915).\sigma_{nom} \quad (5)$$



Фиг. 4. Резултати от изследване на напрежнатото състояние на образец № 3 без точков концентратор (а) и с точков концентратор на разстояние $r=0.42 \text{ mm}$ от края на линейния концентратор (б).

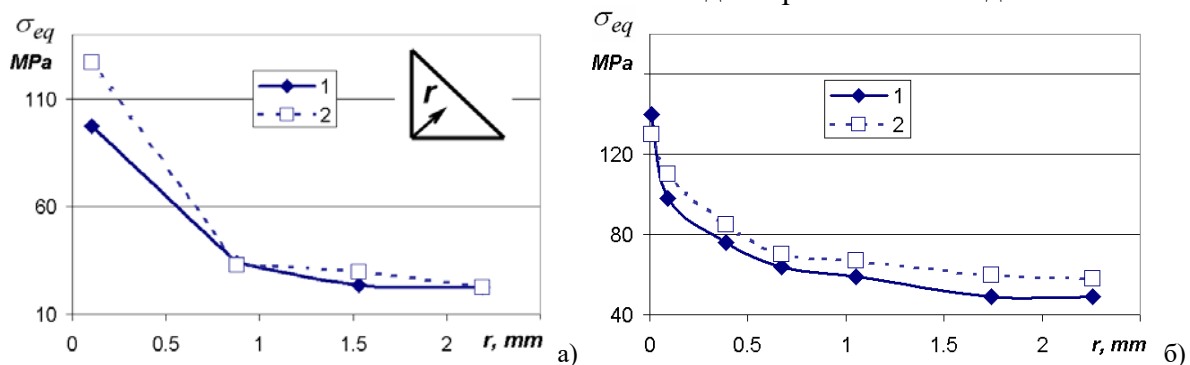
В зоната на точковия концентратор се наблюдава пик с максимална стойност, определена за $r = 0.42$ mm от:

$$\sigma_{eq,p} = K_{\sigma,p} \cdot \sigma_{eq}(r=0.42), \quad (6)$$

като е получено $\sigma_{eq}(r=0.42) = 33.18$ МПа. За сравнение на фиг. 4 б) е показан резултат, получен по зависимост (6), като се има предвид, че $K_{\sigma,p} = 1.95$.

ВАЛИДИРАНЕ НА МОДЕЛА И ИЗВОДИ

Валидирането на хипотезата за мултиплициране на влиянието на концентраторите се извършва за образци №№ 1 и 3. На фиг. 5 с „1” са показани резултати за максималните стойности на σ_{eq} в зона на точковия концентратор, определени последователно чрез якостен анализ за съответното разположение на концентратора на разстояние r , а с „2” са показани резултатите, получени по (3), като се следва последователността на работа от (5-6). Наблюдава се сходимост на резултатите. Регистрира се известно отклонение между тях, като това се отдава на точността на отчитане и използваните числени методи за решаване на задачата.



Фиг. 5. Резултати от сравнението на данни, получени чрез виртуален експеримент (1) и чрез прилагане на модела в (3) (изобразени с 2) за образец № 1 (а) и за образец № 3 (б).

На базата на направените изследвания се установяват следния извод: Потвърждава се хипотезата за мултиплициране влиянието на линейен и точков концентратор върху напрегнатото състояние в заваръчен шев. Максималното еквивалентно напрежение за конкретна конструкция заваръчно съединение се определя чрез произведение от номиналното напрежение, големината на точковия концентратор и зависи от неговото отстояние от линейния концентратор. Наличието на остри ръбове от пресичане на стени на концентратора е причина за известни отклонения поради нехомогенност на напрежението около него.

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] Mechanical Engineering. Shigley's Mechanical Engineering Design, Eighth Edition Budynas–Nisbett. ISBN: 0–390–76487–6

Допълнителна информация: 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.

STRESS IN WELDING WITH LINEAR AND POINT CONCENTRATOR

Ivan Kolarov
ikolarov@vtu.bg

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

Keywords: Maximum stress in welding with concentrator of linear and point type

Abstract: The strength of a weld depends on various factors, incl. and the presence of imperfections in it (admissible or inadmissible).

The aim of the paper is to study the stress in a point concentrator in a weld under the influence of an alternating stress field from a linear concentrator.

The aim is achieved by a virtual experiment with butt and T welds with a linear concentrator, in the area of influence of which a point concentrator of the pore type is formed and changes the local stress. To solve the problem, a hypothesis is used to multiply the effect of concentrators on the stress state in the welding. A spherical pore is used as a point concentrator. To assess the influence of the shape, data are also shown for a pore with a ridge (a hexagonal prism was used).

The hypothesis was validated by numerical experiment and comparison of the results obtained by direct measurement and by multiplying the influence of the concentrators. A good convergence between them has been noticed.

The maximum equivalent stress for a particular welded joint construction is determined by the product of the nominal stress, the value of the point concentrator and depends on its distance from the linear concentrator. The sharp edges in the point concentrator formed by the intersection of the walls is a reason for some deviations due to inhomogeneity of the stress around it.