

## **КОЕФИЦИЕНТИ НА КОНЦЕНТРАЦИЯ В ЪГЛОВ ЗАВАРЪЧЕН ШЕВ С НАТОВАРВАНЕ ПО НАПРАВЛЕНИЕ НА ШЕВА**

*Иван Коларов*  
[ikolarov@vtu.bg](mailto:ikolarov@vtu.bg)

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

**Ключови думи:** *Напрежение и концентрация в ъглов заваръчен шев с натоварване по направлението на шева.*

**Резюме:** *Проблемът с ускореното възникване на уморни пукнатини в заваръчни шевове е широко известен и е една от причините за намаляване на ресурса на заварени метални конструкции.*

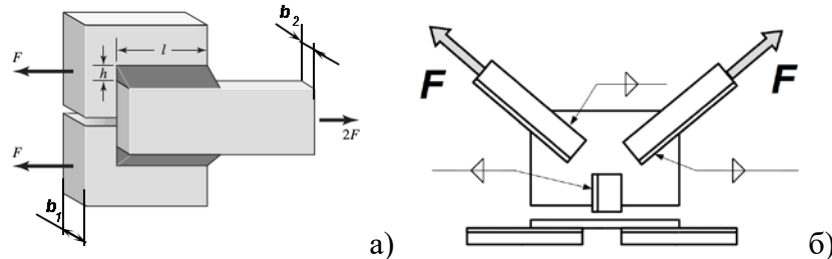
*Цел на настоящата разработка е да определи коефициентите на концентрация в ъглов заваръчен шев, формиран по направление на външно приложената сила. Разгледани са често срещани в практиката конструктивни разновидности за съединяване на плоски изделия: чрез припокриване и чрез допълнителни планки.*

*Целта се постига чрез провеждане на виртуален експеримент за определяне на напрегнатото състояние в различни участъци в заваръчния шев. За целта в компютърна инженерна среда е направен 3D модел на заварената конструкция от конструкционна стомана. Елементите са съединени чрез шев с максимален размер на катета. Моделът се натоварва статично чрез метод на крайните елементи (FEA) и са получени стойности на напрежението по широчина и дължина на заваръчния шев в опасното сечение. Получени са решения при еднаквост на еластични свойства на заваряваните материали и шева. Отчитат се външното натоварване и размери на съединяваните елементи. Не се отчитат структурни промени в зоната на термично влияние на шева.*

*Установено е значителна разлика между напрегнатото състояние в шева, получено по класическата теория и чрез FEA. Анализирани са концентрациите на напрежения в шева и е установено, че те зависят от конструкцията и коравината на заварените елементи, а така също и от големината на приложеното външно натоварване. Неравномерността на натоварването в шева е значителна и може да превиши срещани в научната литература препоръчителни стойности. Получени са концентрации в шева в диапазона 2.9 – 7.9. Не винаги по-малката концентрация следва до благоприятно натоварване и увеличен ресурс на съединението.*

## ВЪВЕДЕНИЕ

В специализираната литература широко се дискутира коефициентите на концентрации в заварени съединения. Те имат важно значение при динамично натоварени конструкции, тъй като в резултат на локално преминаване на граничното напрежение в претоварената зона възникват и се развиват микро пукнатини [1]. Те предизвикват разрушаване на шева.



фиг. 1. Схема на примерна конструкция на в ъглов заваръчен шев, формиран по направление на външното натоварване (а) и конструктивен вариант за приложение на натоварването на шева (б).

На фиг. 1 а) е показана схема на примерна конструкция на в ъглов заваръчен шев, формиран по направление на външното натоварване. Така изобразена задачата е симетрична и заваръчните шевове са подложени на еднакво натоварване. Всеки шев е с формата на правоъгълен триъгълник с катет  $h$  и е натоварен със сила  $F$  по своята дължина  $l$ . Опасното сечение се намира по височината на триъгълника и е с големина  $S = h^2 \cdot \cos 45^\circ$ . Възниква напрежение на срязване със средна стойност  $\tau_{cp}$ :

$$\tau_{cp} = \frac{F}{S} \cdot \quad (1)$$

В тази зависимост не е отчетено напрежението на огъване от огъващ момент, възникващ от разстоянието  $\frac{b_1 + b_2}{2}$  между направлението на външните сили в заварените елементи. Огъващият момент предизвиква огъване на заварените елементи и теоретичното определяне на напрегнатото състояние е причина за допускане на методична грешка.

Концентрациите на напрежение  $K_\sigma$  се изчисляват по зависимостта:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{екв.макс}}{\tau_{cp}}, \quad (2)$$

$\sigma_{екв.макс}$  е максималната стойност на еквивалентно напрежение  $\sigma_{екв}$  в шева. В [1] за тази конструкция се препоръчва  $K_\sigma = 2.9$ .

В направеното проучване не са установени подробни данни за концентрацията в шевове с подобна конструкция. В същото време те се използват широко с общо или специфично техническо предназначение, като процесът на възникване на пукнатини се изследва в някои случаи и чрез експерименти с опитни образци [4].

Методите за определяне на коефициенти на концентрации се основават на класическата теория за оценка на еквивалентно напрежение в еластична среда и [1] и чрез изследване на деформационното поведение на еластичната среда чрез специализирани инженерни продукти [1 - 3].

В [2] е предложено параметрично определяне на коефициентът на концентрация в двустранно формиран челен заваръчен шев. Като метод на изследването е използван метод на крайните елементи (FEM), като формата на шева се моделира в компютърна среда. В работата се отчита линейни и ъглови размери на шева, външното натоварване. Тези фактории са използване за получаване на емпирична зависимост за

концентрацията в диапазона до 5. Резултатите са сравнени със стойности, получени от други изследователи.

Изследване на коефициента на концентрация в ъглов заваръчен шев за съединяване на тръбна конструкция е показано в [3]. Конструкцията е моделирана в 3D среда, след което тя е разделена на крайни елементи и натоварена с външни експлоатационни сили. Получени са резултати за коефициента на концентрация в диапазона от 8 до 14.

На базата на горните данни се правят следните изводи:

- Конструкции, създадени чрез заваряване на елементи по направление на външното натоварване се използват често в машиностроителната практика.

- Неравномерността на натоварването в ъглов заваръчен шев, формиран по направление на външното натоварване не е добре изучено. Налице са данни за коефициента на концентрация в шевове с друг вид конструктивно изпълнение и натоварване.

- В научната литература напрегнатото състояние в заваръчни шевове се определя с достатъчни подробности чрез метода на крайните елементи. Това осигурява оценка на концентрациите при отчитане на възможни конструктивни и технологични особености на шева.

Цел на настоящата разработка е да изследва натоварването в ъглов заваръчен шев, формиран по направление на външното натоварване. Поради наличието на широк кръг от конструктивни особености, тук изследването е насочено към съединяване на с близка форма метални елементи при осигуряване на максимална якост на шева.

### ПОСТАНОВКА ЗА РЕШАВАНЕ НА ЗАДАЧАТА

Целта се постига чрез провеждане на виртуален експеримент за определяне на напрегнатото състояние в различни участъци в ъглов заваръчен шев, формиран симетрично по направление на външното натоварване (фиг. 2 а). Тази конструкция се използва за съединяване на челно разположени елементи. За сравнение са показани резултати и при едностранно разположение на шева спрямо елементите (подобно на фиг. 1 а), използвана за съединяване на елементи чрез припокриване. Образците са моделирани с размери  $b_1 = 80$  mm,  $b_2 = 100, 120$  и  $140$  mm, дължината на шева е  $l = 80$  mm, а дебелината на листовите детайли -  $s = 10$  mm. Геометрични размери и особености на образците са показани в табл. 1. Максималното напрежение на опън в заварените елементиг 1 и 2 зависи от конструктивните размери е  $\sigma_{on.i} = F / (M \cdot s \cdot b_i)$ ,  $M$  е коефициент, отчитащ броя на елементите с приложената външна сила  $F$ ,  $M = 1; 2$ . Заваръчния шев е с равномерна форма по външната повърхнина, формирана от две части с постоянен радиус на закръгление  $R = 14$  mm (фиг. 2 б). Той е моделиран като трето тяло между заварените детайли с условен катет на триъгълник 10 mm, така че да се осигури максимална якост. Напрегнатото състояние в шева е направено в три зони съгласно схемата на фиг. 2 в).

Табл. 1. Размери и особености на изследваните образци

Образец №	$b_1$ , mm	$b_2$ , mm	$l$ , mm	Натоварване $F$ , kN	Разположение на шева
1	80	100	80	10	Едностранно
2	80	120	80	10 и 100	Симетрично
3	80	140	80	100	Симетрично
4	80	120	40	100	Симетрично
5	80	120	140	100	Симетрично

Задачата се решава при следните предпоставки:

- не се вземат предвид вътрешни напрежения в шева, получени от температурни деформации и структурни промени в шева и зоната на термично влияние, резултатите са получени за модул на Юнг  $E = 2.1 \cdot 10^{11}$  МПа и коефициент на Поансон 0.28;

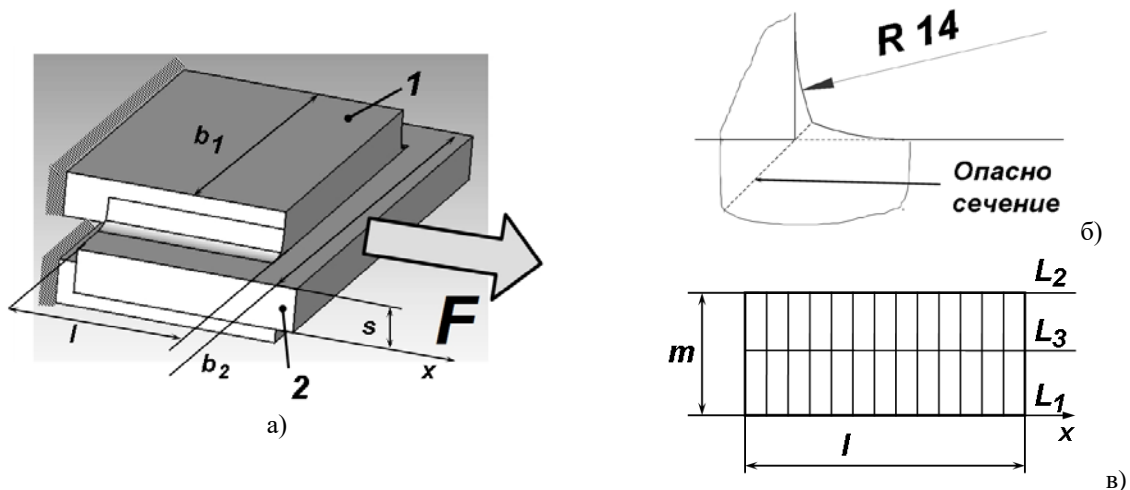
- измерено е еквивалентното напрежение  $\sigma_{екв}$ , което се използва за оценка на уморната якост на съединението;

- заварените елементи и шевът притежават еднакви механични свойства и са изпълнени критериите на Von Mises за определяне на еквивалентното напрежение в еластична среда;

- външната сила е статично приложена и е налице права пропорционалност между напрежение и деформации;

- заваръчният шев е изпълнен с равномерно изменяща се форма, така че се реализира шев с максимална якост и се пренебрегват концентрации, дължащи се на промяната на формата на шева;

- концентрацията  $K_\sigma$  е определена спрямо теоретичното натоварване на срязване.

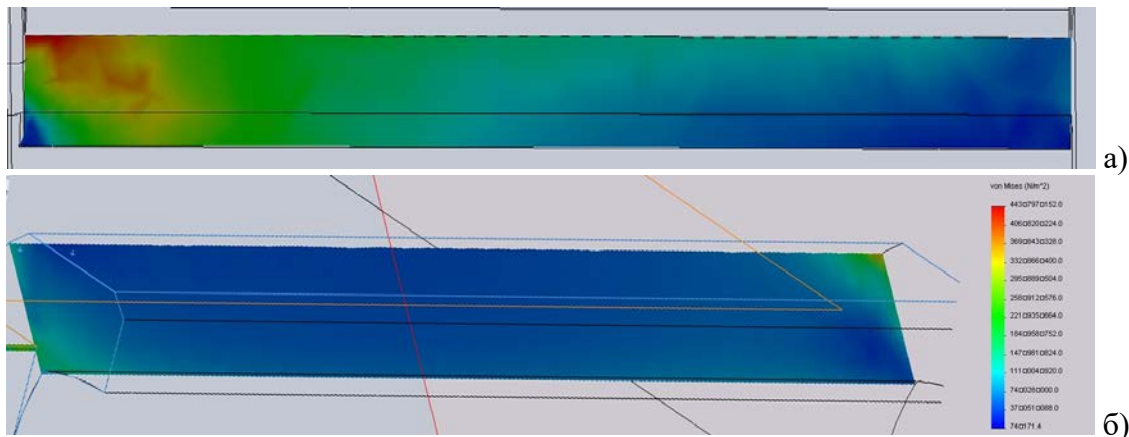


Фиг. 2. Схема на ъглов заваръчен шев, формиран симетрично на централния елемент по направление на външното натоварване (а), форма на външната повърхнина на заваръчния шев (б) и означение на зоните за определяне на напрегнатото състояние:  $L_1$  - вътрешна (към средата на елементите),  $L_2$  - външна зони и в средата ( $L_3$ ) на шева (в).

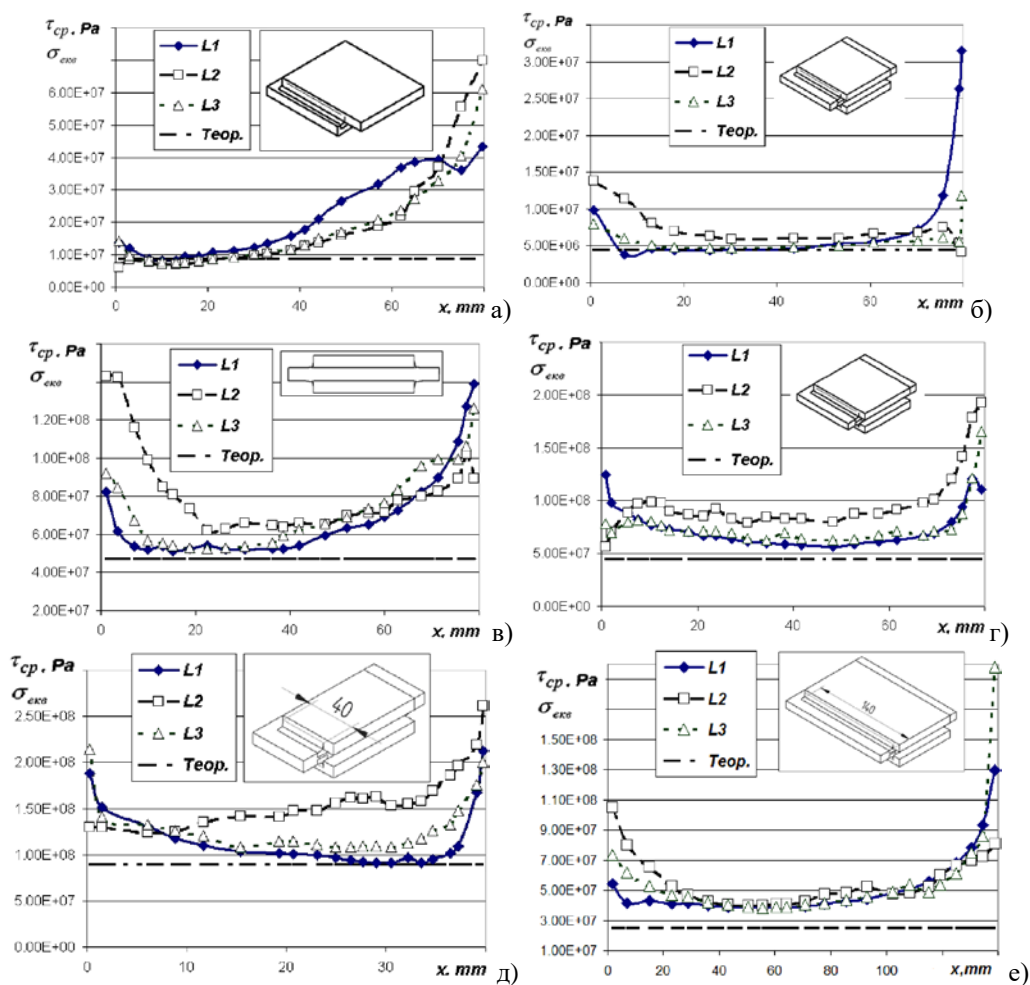
## РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

На фиг. 3 са показани резултати с цвятова индикация за напрегнатото състояние в образец 1 при средно напрежение на срязване 8.9 МПа (а) и образец 2 при средно напрежение на срязване 4.46 МПа (б). Напрегнатото състояние е неравномерно разпределено по дължина и широчина на заваръчния шев.

Резултатите за еквивалентното напрежение в графичен вид са показани на фиг. 4. На същите графики са изобразени теоретичните стойности на  $\tau_{ср}$ , получени по зависимост (1). Налице е разлика в натоварването по зоните на измерване ( $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$ ). Обикновено по-тежко е натоварването по външната зона на шева ( $L_2$ ).



Фиг. 3. Типични резултати за еквивалентното напрегнато състояние в образец 1 а) и в образец 2 б) при различни стойности на напрежението на срязване.



Фиг. 4. Резултати от изследването на образци със средно напрежение: а) - образец 1 при 8,9 МПа; б) - образец 2 при 4.46 МПа; в) - образец 2 при 44.6 МПа; г) - образец 3 при 44.6 МПа; д) - образец 4 при 89 МПа; е) – образец 5 при 25.5 МПа.

Наблюдава се значителна разлика между  $\tau_{ср}$  и  $\sigma_{екв}$ . Тя зависи от големината на външното натоварване. За образец 2 с  $\tau_{ср} = 4.46$  МПа за  $x$  в диапазона от 20 до 60 mm е регистрирано  $\sigma_{екв} \approx \tau_{ср}$  (фиг. 4 б), а при  $\tau_{ср} = 44.6$  МПа (фиг. 4 в) резултатът е  $\sigma_{екв} > \tau_{ср}$  в целия диапазон на  $x$ . За образец 3 при  $\tau_{ср} = 44.6$  МПа на фиг. 4 г) е измерено

$\sigma_{екв} \approx 2 \cdot \tau_{ср}$ . За всички образци са налице пикове на  $\sigma_{екв}$  в краищата на съединенията. Изчислени са стойности  $K_{\sigma}$  в диапазона 2.9 - 7.9. Данни за  $\tau_{ср}$ , максималната стойност на еквивалентното напрежение  $\sigma_{екв.макс}$  и за  $K_{\sigma}$  са показани в табл. 2. В таблицата са показани и напреженията на опън  $\sigma_{оп.и}$  в заварените елементи 1 и 2, което позволява да се сравни тяхната якост с тази на шева.

Табл. 2. Стойности на  $\tau_{ср}$ ,  $\sigma_{екв.макс}$  и  $K_{\sigma}$ .

Обр. №	$\sigma_{оп.1}$ , МПа	$\sigma_{оп.2}$ , МПа	$\tau_{ср}$ , МПа	$\sigma_{екв.макс}$ , МПа	$K_{\sigma}$
1	12.5	10	8.9	70	7.86
2	3.12	10	4.66	32	6.87
2	31.3	83.3	46.6	142	3.05
3	31.3	71.4	46.6	200	4.29
4	31.3	80.3	89	251	2.82
5	31.3	80.3	25	192	7.68

### ИЗВОДИ

На базата на направените изследвания се установяват следните изводи:

- Налице е неравномерно натоварване в заваръчния шев, което зависи от конструкцията на съединението и от големината на приложеното външно натоварване. Еквивалентното напрежение в шева е по-голямо от средното напрежение на срязване. Разликата между тези напрежения зависи от големината на външното натоварване.

- За разглежданите съединения с конкретни конструктивни размери са установени концентрации в шева в диапазона 2.9 – 7.9. За конструкции с близки размери е възможно да се получат и други стойности.

- За динамично натоварени заваръчни съединения с подобни конструктивни особености е необходимо да се отчетат комплексно напреженията в елементите и в шева. Не винаги по-малката концентрация следва до по-благоприятно натоварване и увеличен ресурс на съединението.

Получените резултати могат да послужат за оценка на якостта на шева и за обосновка на общ коефициент на концентрация в заваръчен шев за подобни конструкции заваръчни съединения.

### ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Mechanical Engineering. Shigley's Mechanical Engineering Design, Eighth Edition Budynas–Nisbett. ISBN: 0–390–76487–6
- [2] Yuxiao Luo, Renle Ma, Seiichiro Tsutsumi. Parametric Formulae for Elastic Stress Concentration Factor at the Weld Toe of Distorted Butt-Welded Joints. Materials 2020, 13, 169.
- [3] Fouathial A., A. Mekroud, A. Benmeddour, K. Bellagh. Calculation of the Factor of Stress Concentration in the Junction's Welded Tube Subjected to Combined Loadings. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 2, Issue 11, November 2012. ISSN 2250-2459.
- [4] Резултати от проект: Fatigue Strength of Fillet-Welded Transverse Stiffeners with Undercuts – 2002 г. - Center for Transportation Research The University of Texas at Austin 3208 Red River, Suite 200, Austin, TX 78705-2650

**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.*

## CONCENTRATIONS IN FILLET WELDS LOADED IN THE DIRECTION OF THE WELD

*Ivan Kolarov*

[ikolarov@vtu.bg](mailto:ikolarov@vtu.bg)

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

*Keywords:* Stress and concentration in fillet weld with load in the direction of the weld.

**Abstract:** *The problem of accelerated fatigue cracks in welds is well known and is one of the reasons for reducing the life of welded metal parts.*

*The aim of the present study is to analyze the concentrations in an fillet weld formed in the direction of the externally applied force. Common in practice structural variants for joining flat products by overlapping and by additional plates are discussed. The goal is achieved by a virtual experiment to determine the stress in different sections of the weld. In CAD a 3D model of the welded parts is made of structural steel. The parts are welded so as to provide maximum strength of the weld. The model is loaded by static force and by FEA the stress in the dangerous section of the weld is calculated. Solutions were obtained for uniform elastic properties of the parts and the weld. The external load and dimensions of the connected parts are taken into account. No structural changes are taken into account in the area of thermal influence and in the weld.*

*There is a significant difference between the stress state in the weld, obtained by classical theory and by FEA. The stresses concentrations in the weld were analyzed and it was found that they depend on the construction and stiffness of the welded parts, as well as on the magnitude of the applied external load. The unevenness of the load in the seam is significant and may exceed the recommended values found in the scientific literature. Concentrations in the range 2.9 - 7.9 were obtained. The lower concentration is not always is precondition to a more favorable load and increased service life of the welded parts.*