



---

## **ДИАПАЗОН НА ИЗМЕНЕНИЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА КОНЦЕНТРАЦИЯ В ЪГЛОВ ЗАВАРЕН ШЕВ, ФОРМИРАН ПО НАПРАВЛЕНИЕТО НА НАТОВАРВАНЕ. КОНСТРУКТИВНИ ПРЕПОРЪКИ ЗА ОПТИМИЗАЦИЯ**

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

*Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“  
София, ул. „Гео Милев № 158  
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ*

**Ключови думи:** *концентратор на напрежение и конструктивни решения за оптимизация на ъглов заваръчен шев, формиран по направление на шева.*

**Резюме:** *Конструкции, формиращи чрез ъглови заваръчни шевове, натоварени по направление на шева се използват в транспортното машиностроене и нормативно регулират по отношение на стойността на допустимото напрежение на срязване. Виртуални изследвания чрез използване на инженерни методи показват, че се формират коефициенти на концентрация с различна стойност в участъци от шева. Това налага допълнителни изследвания на проблема и анализ на причините, респективно, създаване на конструктивни решения, спомагащи за намаляването на концентрациите в динамично натоварени съединения.*

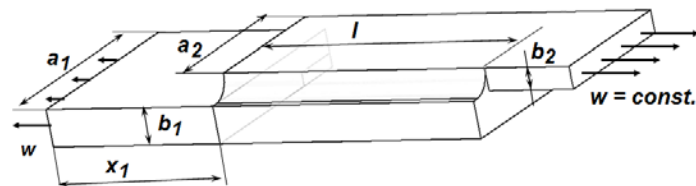
*Цел на настоящата разработка е да се изследва големината на коефициента на концентрация в ъглов заваръчен шев, формиран по направление на външно приложената сила в зависимост от конструкцията на заварените елементи. Изследвани са шевове за съединяване на изделия чрез припокриване.*

*Целта се постига чрез провеждане на виртуален експеримент за определяне на напрегнатото състояние в участъци от заваръчен шев между елементи с различна конструктивна конфигурация. Елементите са моделирани в компютърна среда и съединени чрез шев с максимален катет на шева съгласно действащи в областта нормативни документи. Формата на шева е моделирана, така че да съответства на типични резултати от изследване на аналогични по конструкция шилфове. Елементите са съединени чрез шев с максимален размер на катета. За материал на всички елементи от модела е зададена заваряема конструкционна стомана. Моделът се натоварва статично чрез метод на крайните елементи (FEA) до напрежения препоръчвани от нормативи в областта на конструирането на метални конструкции за създаване на мостови съоръжения и за конструиране на ж.п возила. Измерено е еквивалентното напрежение в различни участъци по дължината на шева. Чрез получените резултати е изчислен коефициентът на концентрация в края на съединението.*

Налице е значителна разлика между напрегнатото състояние в шева, получено по класическата теория и чрез FEA. В краищата на съединенията са налице участъци, в които преобладаващо нормалното натоварване. Изчислени са еквивалентните напрежения в шева и е установено, че те зависят от конструкцията и коравината на заварените елементи, а така също и от приложеното външно натоварване. Неравномерността на натоварването в шева е значителна и може да бъде намалена чрез увеличаване на еластичността на заваряваните елементи в участъците с концентрация на напрежение.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Конструкции, формирани чрез ъглови заваръчни шевове, натоварени по направление на шева се използват в транспортното машиностроене и нормативно регулират по отношение на стойността на допустимото напрежение на срязване [1 и 2]. Виртуални изследвания чрез инженерни методи за изчисления показват, че се формират коефициенти на концентрация с различна стойност в участъци от шева [3, 4]. Това налага допълнителни изследвания на проблема и анализ на причините, респективно, създаване на конструктивни решения, спомагащи за намаляването на концентрациите в динамично натоварени съединения.



Фиг. 1. Схема на ъглов заваръчен шев, формиран по направление на външното натоварване.

На фиг. 1 а) е показана схема на 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  $F = w \cdot a_2$  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  $\tau_{cp}$ :

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

В тази зависимост не е отчетено напрежението на огъване от огъващ момент  $M = \frac{1}{2} F \cdot b$ , възникващ от разстоянието  $b = \frac{b_1 + b_2}{2}$  между направлението на външната сила  $F$  в заварените елементи (в частен случай  $b_1 = b_2 = b$ ). Огъващият момент предизвиква напрежение на огъване

$$\sigma_{ог} = \frac{M_{ог}}{6 \cdot b^2 \cdot a} = \frac{F}{12 \cdot b \cdot a} \quad (2)$$

От [1-3] е известно, че напрежението е неравномерно разпределено в шева, което се отчита с коефициент на концентрация  $K_\sigma$  [3,4] или се задава допустимо напрежение на срязване  $\tau_{cp}$  в шева [1,2].

В резултат на действието на силата  $F$  в съединените елементи възниква напрежение на опън  $\sigma_{оп}$ :

$$\sigma_{on} = \frac{F}{a.b} . \quad (3)$$

Тогава нормалното напрежение в шева и съединените елементи ще се определи от:

$$\sigma = \sigma_{on} + \sigma_{o2} .$$

В [4] е установено, че стойностите на  $K_\sigma$  зависят не само от конструкцията, но и от начина на прилагане на силата и съединяване на заварените елементи към общата конструкция. Заваръчният шев се натоварва неравномерно не само по направление на приложената външна сила, но и в напречно направление.

При двумерно напрегнато състояние се изчислява еквивалентното напрежение  $\sigma_{екв}$  от зависимостта:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma^2 + 3.\tau_{cp}^2} . \quad (4)$$

Изследването в [4] дава основание да се разглежда, че в количествено отношение нормалните и тангенциалните напрежения за конкретна зона на шева се променят независимо едно от друго.

Ресурсът на шева следва да се определи на базата на полученото еквивалентно напрежение  $\sigma_{екв}$ . При нормативно заложените стойности на тангенциалното напрежение  $[\tau_{cp}]$  е удачно концентрациите на напрежение  $K_\sigma$  да се изчислят по зависимостта:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{екв}}{\sigma_{cp}} , \quad (5)$$

като  $\sigma_{cp}$  е заложеното от конструктора средно напрежение в шева.

Задача на конструктора на динамично натоварени заварени съединения е да осигури достатъчен ресурс на конструкцията. От една страна след нормативното ограничаване на заложеното от конструктора натоварване на шева може да се приеме, че шевът е правилно оразмерен. От друга страна са налице допълнителни фактори, които променят реалното натоварване в зони на шева и с помощта на тяхното оптимално задаване да се увеличи ресурса на конструкцията.

Цел на настоящата разработка е да изследва големината на коефициента на концентрация в ъглов заваръчен шев, формиран по направление на външно приложената сила в зависимост от конструкцията на заварените елементи и да предложи конструктивни подходи за неговото намаляване.

## ПОСТАНОВКА ЗА РЕШАВАНЕ НА ЗАДАЧАТА

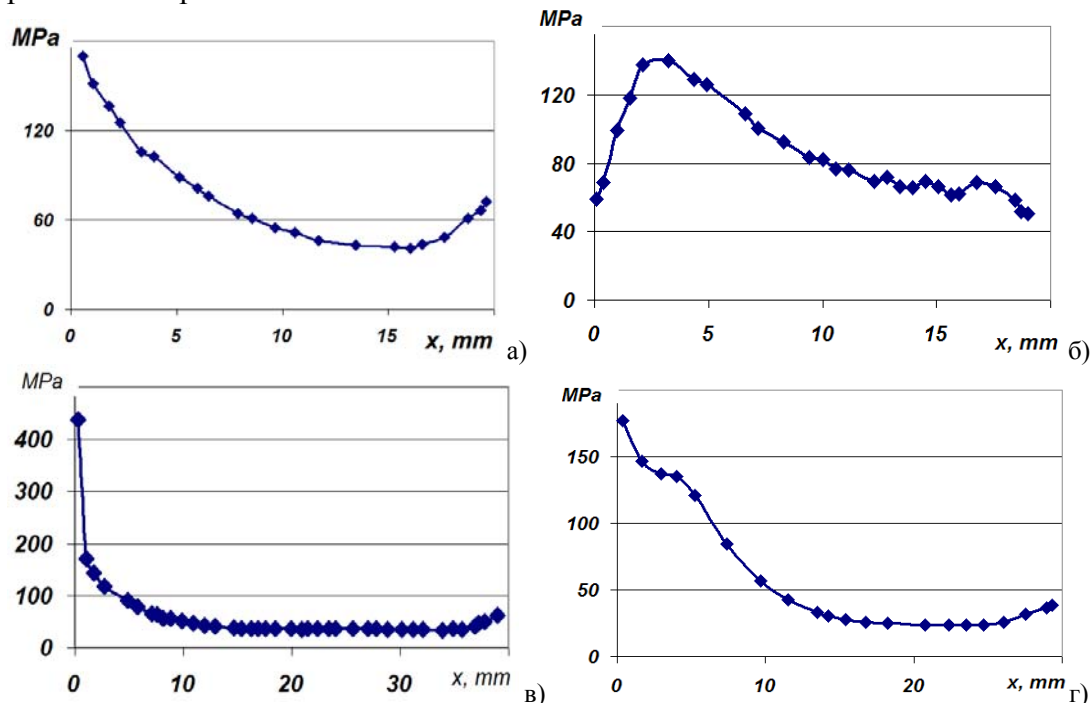
Изследвани са конструкции шевове от фиг. 1 с дебелина на  $b = 6 \text{ mm}$ . Свързаните елементи са с размери, осигуряващи достатъчна якост на съединяваните елементи и шева [3 и 5] с ограничено преоразмеряване. Елементите са съединени чрез шев с максимален размер на катета. За материал на всички елементи от модела е зададена нисковъглеродна заваряема конструкционна стомана. Моделът се натоварва статично чрез метод на крайните елементи (FEA) до напрежения препоръчвани от нормативи в областта на конструирането на метални конструкции за създаване на мостови съоръжения и за конструиране на ж.п возила. Измерено е еквивалентното напрежение в различни участъци по дължината на шева в опасното сечение. Размерите на образците съгласно фиг.1 и приложеното външно натоварване са показани в табл. 1.

Табл. 1. Описание на размерите на опитните образци.

№	$a_1$ , mm	$a_2$ , mm	$b_1$ , mm	$b_2$ , mm	$l$ , mm	$x$ , mm	$F$ , N
1	9	26	6	6	20	5	5000
2	9	26	6	6	40	5	5000
3	9	26	6	6	30	5	7000
4	16	36	6	6	42	5	10000
5	16	36	6	6	60	5	10000
6	83	101	6	6	308	5	50000
7	83	101	6	6	408	5	50000
8	166	184	6	6	414	5	100000
9	166	184	6	6	440	5	100000
10	166	184	6	6	440	5	100000
11	166	184	6	6	440	220	100000

### РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

На фиг. 2 са показани резултати от изследването на образци 1-3, като на фиг. 2 а) и б) стойностите се отнасят за средата и повърхностната област на шева от образец 1, за фиг. 2 в) и г) – за средите на шевове, съответно, за образци 2 и 3. Там характерът на изменение на напрежението може да се представи като парабола, например, описваща деформационната крива на съединението от приложения огъващ момент, а дължината на участъка зависи от големината на силата, респективно, на огъващия момент. Извън този участък напрежението е относително постоянно, като в края на шева е налице концентратор около 1.3 - 1.5. Изменението на напрегнатото състояние не е еднакво. То е голямо откъм страната с по-голяма коравина. Налице е известна разлика в натоварването на шева по повърхността и в дълбочина. Следователно при оптимизация на конструкцията е необходимо анализът да бъде извършван след единен подход за измерване на напрегнатото състояние.

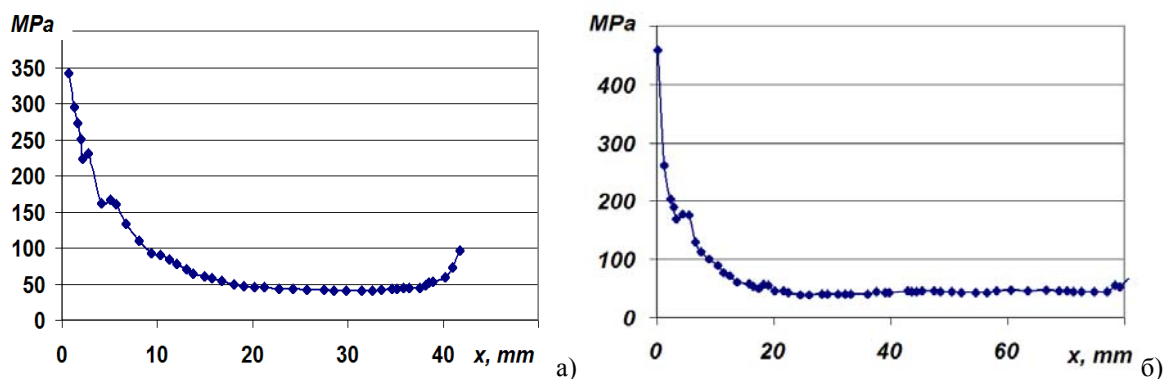


Фиг. 2. Резултати от изследване на образци № 1 (а и б), 2,(в) и 3 (г).

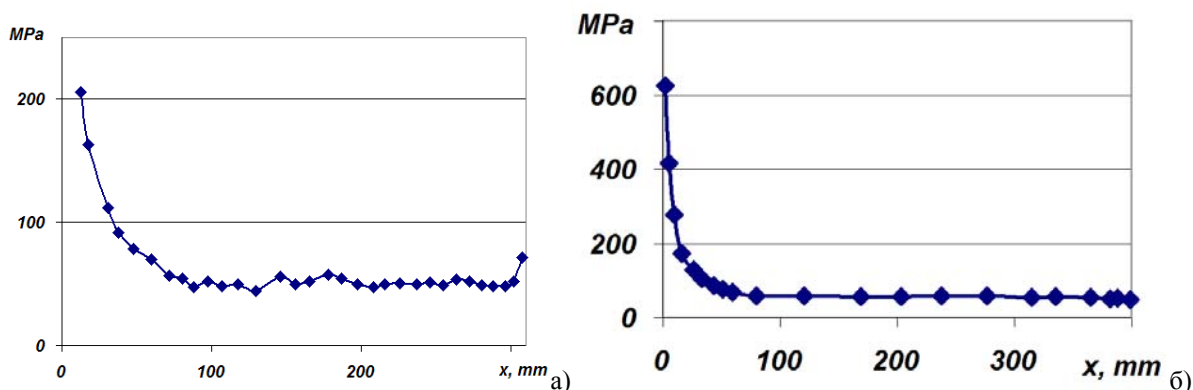
Чрез подробно изследване на напрегнатото състояние в крайната зона на основата на шева откъм страната с голяма коравина са регистрирани еквивалентни напрежения в диапазона 350 – 450 МПа, които при регулярно точково отчитане не

винаги са забележими. Тези стойности са получени за шев без челно закръгление и не зависят от средното напрежение в шева, а от коравината на участъка за съединяване, т.е. за концентратор на напрежение е неуместно да се говори. За намаляване на локалното напрежение е удачно да се вземат мерки, които намаляват коравината на елементите в този участък.

На фиг. 3 и 4 са показани резултати от изследването на образци, респективно, 4, 5 и 6,7. Тук могат да се направят аналогични на горните изводи. В участъка с голяма коравина е налице параболично изменение на напрежението в шева, като максималните стойности достигат до 350 - 400 МПа.



Фиг. 3. Резултати от изследване на образци № 4 (а) и 5 (б).



Фиг. 4. Резултати от изследване на образци № 6 (а) и 7 (б).

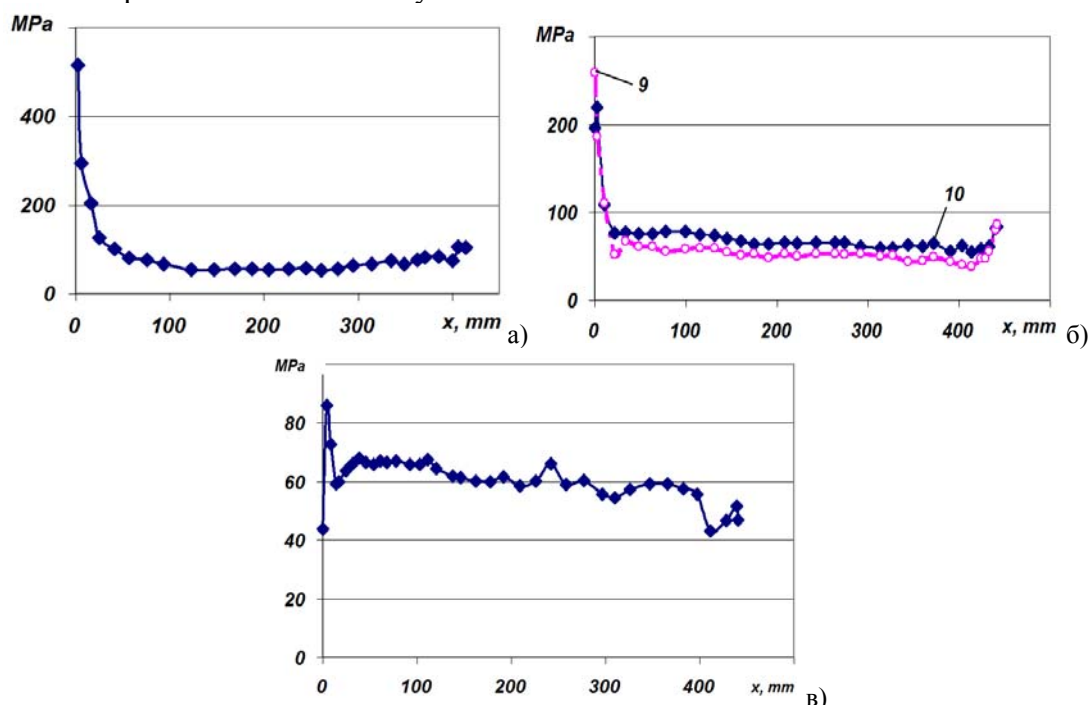
### ПОДХОД ЗА НАМАЛЯВАНЕ НА НЕРАВНОМЕРНОСТТА

Подходът за намаляване на неравномерността се основава на намаляване на коравината на заварените елементи в участъците с увеличено механично натоварване, използван в ж.п. метални конструкции, както и за тяхното изчисление на умора по предварително създадени методики [6-9]. За конструкцията от фиг. 1 е илюстриран на фиг. 5. Модифициран е образец № 8 от табл. 1. Олекотяването е формирано чрез плавна промяна на формата с цел избягване на допълнителни концентратори на напрежение, като се осигурява достатъчна механична якост в олекотените участъци на заварените елементи. Дълбочината на олекотяване на един край е с дълбочина 166 mm, като изрязаните участъци са заварени с различна дължина, както следва: за образец № 9 – по контура, съвпадащ с направлението на приложената външна сила; за образци № 10 и 11 – по целия олекотен контур.



Фиг. 5. Подход за оптимизиране на неравномерността на натоварване в заваръчния шев.

Резултатите от проведеното изследване са показани на фиг. 6. Те са измерени за повърхността на шевове. Отчетени са средни еквивалентни напрежения в диапазона 45 – 55 МПа, а средните напрежения на срязване са определени 27 МПа. Забелязаната разлика може да се обясни чрез влияние на нормалното напрежение. Отчетени са пиковете в краищата на съединенията и са изчислени стойностите на  $K_\sigma$  за съединението откъм запънатата страна (имитиращ участък с голяма коравина) и откъм страната на приложената сила. Резултатите са показани в табл. 2.



Фиг. 6. Резултати от изследване на образци № 8 (а), 9, 10 (б) и 11 (в).

Табл. 2. Резултати за  $K_\sigma$

Образец №	Стойности на $K_\sigma$ за съединението откъм страна на	
	Запъната част	Приложена сила
8	6.43	1.87
9	4.1	1.83
10	2.92	1.29
11	1.32	1

## ИЗВОДИ

В резултат на оптимизацията на съединението чрез намаляване на коравината на конструкцията в краищата на заваряваните елементи е постигнато намаляване на от 1.45 до 2 пъти. Въпреки това при значителна локална коравина в заварявания елемент (образци 9 и 10) е налице значително увеличение на еквивалентното напрежение. При намаляване на коравината, например, чрез удължаване на заварявания елемент (образец

11) коефициентът намалява значително, в случая от 2.92 на 1.32. Удачно е при проектиране на отговорни заварени съединения, формирани по направлението на натоварване да бъдат проектирани не само чрез използване на средното напрежение на срязване, но и геометричните и деформационни свойства на заваряваните елементи. Удачно е за намаляване на неравномерностите в напрегнатото състояние на шева да бъдат прилагани оптимизационни процедури от вида в [10].

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

- [1] Gestaltung und Dauerfestigkeitsbewertung von Schweißverbindungen mit Stählen im Schienenfahrzeugbau. DVS – DEUTSCHER VERBAND FÜR SCHWEISSEN UND VERWANDTE VERFAHREN E.V.
- [2] Structural Welding Code—Steel, AWS D1.1:2000
- [3] Load and Resistance Factor Design for Highway Bridge Superstructures. Reference Manual. Federal Highway Administration, US Department of Transportation, 1698 p. 2015.
- [4] Коларов И. Концентрация в заваръчни съединения от наличието на пори в шева. Списание „Механика, Транспорт, Комуникации”, том 18, брой 3/1, 2020 г. ISSN 1312-3823
- [5] Mechanical Engineering. Shigley’s Mechanical Engineering Design, Eighth Edition Budynas–Nisbett. ISBN: 0–390–76487–6
- [6] Ralev V., D. Atmadzhova. FAILURE ANALYSIS IN PASSENGER BOGIES FROM THE RAILWAY SYSTEM OF THE REPUBLIC OF BULGARIA. X International Conference “Heavy Machinery-HM 2021”, Vrnjačka Banja, June 2021.
- [7] Atmadzhova D., Ralev V. STRENGTH ANALYSIS OF PASSENGER BOGIE ELEMENTS OPERATED IN BULGARIAN STATE RAILWAYS. RAIL TRANSPORT IN THE MODERN WORLD. Higher Education Railway School of Professional Studies Belgrade, Serbia. College of Railway Transport of the USURT faculty, Yekaterinburg, Russian Federation.
- [8] Ралев В. Методи за изчисление на уморна якост на елементи от вагонна талига. Списание „Механика, Транспорт, Комуникации”, том 18, брой 3/1, 2020 г. ISSN 1312-3823
- [9] Ралев В. Изчисление на уморна якост на рама от пътническа талига. Списание „Механика, Транспорт, Комуникации”, том 18, брой 3/1, 2020 г. ISSN 1312-3823.
- [10] Тончев Н., М. Иванов. ЗА ИНСТРУМЕНТИТЕ НА МНОГО ПАРАМЕТРИЧНА АПРОКСИМАЦИЯ И МНОГОКРИТЕРИАЛНА ОПТИМИЗАЦИЯ. Списание „Механика, Транспорт, Комуникации”, том 15, брой 3/1, 2017 г. ISSN 1312-3823

***Благодарности:** Работата е създадена при разработване на научноизследователски проект «Коефициент на концентрация в заварени съединения в транспортното машиностроене и внедряване на резултатите в лекционна зала “Машинни елементи”», подкрепен от МОН.*

**RANGE OF CHANGE OF THE CONCENTRATION IN WELDS FORMED IN THE  
DIRECTION OF LOADING. CONSTRUCTIVE RECOMMENDATIONS FOR  
OPTIMIZATION**

**Ivan Kolarov**  
[ikolarov@vtu.bg](mailto:ikolarov@vtu.bg)

***Todor Kableshkov University of Transport  
Sofia, 158 Geo Milev Str.  
THE REPUBLIC OF BULGARIA***

***Key words:*** stress concentrator and design solutions for optimization of angular weld formed in the direction of the weld.

***Abstract:*** The aim of study is to investigate the concentration in an angular weld formed in the direction of the externally applied force depending on the construction of the welded elements. Seams for joining products by overlapping were investigated. The goal is achieved by conducting a virtual experiment to determine the stress state in sections of the weld between elements with different structural configuration. The elements are modeled in a computer environment and joined by a seam with a maximum seam leg according to current regulations in the field. The concentration coefficient at the end of the compound was calculated from the obtained results.