



Получена: 30.12.2022 г.

Приета: 06.02.2023 г.

ОЦЕНКА НА УМОРА В ЗАВАРЕНИ СЪЕДИНЕНИЯ ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ГЕОМЕТРИЧНИ НАПРЕЖЕНИЯ (В ГОРЕЩА ТОЧКА)

В. Захариев¹, М. Милочев²

Ключови думи: геометрични напрежения в гореща точка, умора на материала, машинни компоненти и заварени възли, метод на крайните елементи

РЕЗЮМЕ

Традиционно оценката на умора се извършва с номинални напрежения и криви на умората, дефинирани за определени категории детайли. Приложението на този подход може да се окаже трудно при съединения със сложна геометрия. Настоящият доклад разглежда оценка на заваръчните съединения по т.нар. метод на геометричните напрежения в зоната на концентрация на напрежения. Подходът е приложен и илюстриран при оценка на заваръчните съединения на стенд за изпитване на витла за вятърни турбини. Численият анализ е направен по МКЕ с помощта на програмен продукт ANSYS® 2021 R2 [1]. Приложени са изискванията за гъстота на мрежата от крайни елементи в зоните на концентрация на напреженията, които са препоръчани в публикация [2] на Международния институт по заваряване (IIW) [3]. Получените резултати са представени и са направени съответните заключения.

1. Въведение

Методът за проверка на умора при използване на геометрични напрежения в гореща точка е първоначално разработен за проверка на заварени съединения между

¹ Владимир Захариев, инж., Енейбъл България ЕООД, 1000, София, бул. „Княгиня Мария Луиза“ 2, e-mail: vbz@enabl.dk

² Милко Милочев, инж., Енейбъл България ЕООД, 1000, София, бул. „Княгиня Мария Луиза“ 2, e-mail: mism@enabl.dk

тръбни профили в конструкции, произведени от корабостроителната и офшорната промишленост. Американският петролен институт (API) [4], Американското общество по заваряване (AWS) [5] и министерството на енергетиката във Великобритания публикуват основни правила [6], като в последствие за първи път в предшестващия Еврокод 1993-1-1 стандарт, ENV 1993-1-1, е дефиниран терминът „геометрични напрежения“. Международният институт по заваряване (IIW) публикува препоръки за прилагането на метода през 1995 г., а след ревизия през 2016 г. издава най-актуалната публикация за оценка на заварени съединения по метода на геометричните напрежения.

Въпреки че методът на геометричните напрежения е описан и въведен в употреба още през 60-те години на 20-и век, традиционните методи за проверка на умора при използване на номинални напрежения се запазват като главен способ за проверка на заварени съединения в строителната индустрия. С навлизането на съвременни компютърни технологии и на специализирани програми за изчисление посредством метода на крайните елементи, проверките по метода на геометричните напрежения стават по-лесно изпълними.

2. Метод на геометричните напрежения

2.1. Номинални и геометрични напрежения

Нарастването на местни напрежения може да бъде отчетено като се коригират номиналните напрежения с коефициент за концентрация на напрежението K_f , въпреки че това е възможно само за детайли с ясно дефинирана геометрия, които фигурират в стандарт EN1993-1-9 [7] или в документи, като например *Peterson's Stress Concentration Factors* [8]. Методът на геометричните напрежения е подходящ за проверка на умора в конструкции с комплексна геометрия, в които е трудно да се определят номиналните напрежения.

Задържането от хлъзгане, стесненото усукване и провисването на пояс са местни ефекти, които не могат да бъдат отчетени с анализ на номиналните напрежения. Местното преразпределение на напрежения може да бъде отчетено като бъде направена проверка за умора при използване на геометрични напрежения. Също така този подход значително намалява броя на криви за якост на умора, които трябва да бъдат разгледани, когато се прави анализ на номиналните напрежения, вж. фиг. 1 и 2.

Категория детайл	Конструктивен детайл
100	

Фиг. 1. Проверка с геометрични напрежения според БДС EN1993-1-9:2007, Таб. В.1 [7]

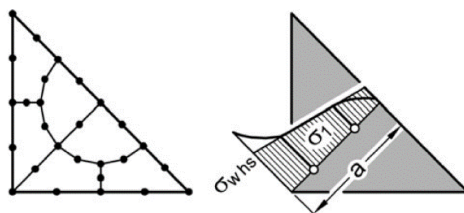
Важно е да се отбележи, че минималната категория на детайл, спомената в Еврокод EN1993-1-9 за проверка с геометрични напрежения, е категория 90. Доказано е експериментално, че тази категория включва в себе си ефекта от местната геометрия на заваръчния шев за много различни видове детайли и че това е най-подходящата категория за проверка с геометрични напрежения [9].

Категория детайл	Конструктивен детайл	
80	$L \leq 50 \text{ mm}$	
71	$50 < L \leq 80 \text{ mm}$	
63	$80 < L \leq 100 \text{ mm}$	
56	$L > 100 \text{ mm}$	
71	$L > 100 \text{ mm}$ $\alpha < 45^\circ$	

Фиг. 2. Проверка с номинални напрежения според БДС EN1993-1-9:2007, Таб. 8.4 [7]

2.2. Поява на пукнатина в дълбочина

Методът на геометричните напрежения се използва за проверка на челни заваръчни шевове с предпоставка за поява на пукнатина в ръба на заваръчния шев. Много често, когато става въпрос за проверка на носещ едностранен или двустранен ъглов шев, съединението трябва да бъде проверено за поява на пукнатини в дълбочина от умора. В такъв случай трябва да се използва друг метод за изчисление или да се моделира геометрията на ъгловия заваръчен шев и да се екстраполират напрежения в равнината на неговата дебелина, вж. фиг. 3.

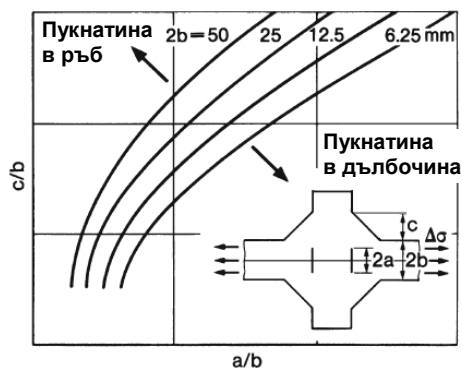


Фиг. 3. Геометрични напрежения в дълбочина на ъглов заваръчен шев [9]

Възможно е да се отхвърли възможността за поява на пукнатина в сърцевината на ъгловия шев като се направи съпоставка между две геометрични съотношения [9]:

- a/b или половината дължина на остатъчния отвор спрямо половината дебелина на заварената плоча;
- c/b или дължината на катета на ъгловия заваръчен шев спрямо половината дебелина на заварената плоча.

Кривите се отнасят към плочи с определена дебелина и разделят графиката на два региона: регион на поява на пукнатина в ръба, вж. фиг. 4 (горе вляво), и регион на поява на пукнатина в сърцевината на заваръчния шев, вж. фиг. 4 (долу вдясно). По-високото съотношение c/b води до по-малка вероятност за поява на пукнатина в сърцевината на заваръчния шев и до по-голяма вероятност за поява в ръба. Обратното важи за съотношението a/b .



Фиг. 4. Криви, определящи позицията на поява на пукнатина [9]

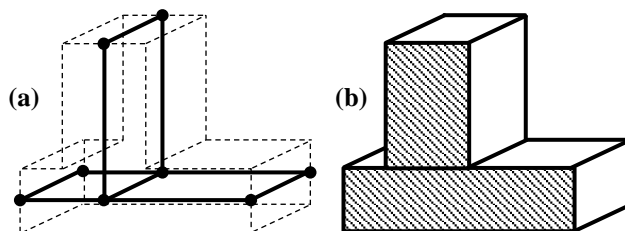
2.3. Геометрични и технологични ефекти

Кривата за якост на умора показва минималния брой товарни цикли, при които се очаква поява на пукнатина спрямо диапазона на главните напрежения на опън в материала. Когато комбинацията от напрежения и брой цикли не преминава кривата, вероятността за поява на пукнатина се равнява на 2 стандартни девиации отклонение от статистическата средна стойност или на 2,3 %. Ефектът от наличието на остатъчни напрежения поради топлинни въздействия, като тези от процеса на заваряване, е отчетен в кривата на съответния детайл. За съединение между компоненти с по-голяма дебелина крайната устойчивост на умора намалява заради геометрични, статистически и технологични ефекти [9]. Допустимите геометрични напрежения за плочи с по-голяма дебелина от 25 mm трябва да се редуцират допълнително с фактор $f(t)$, който зависи от съотношението на дебелините на плочите и от типа на съединението [2].

2.4. Методология

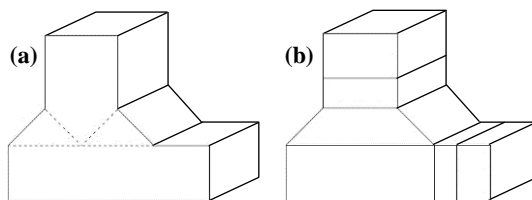
Процесът е разделен на три стъпки – моделиране, създаване на мрежа от крайни елементи и анализ на геометричните напрежения. За целта е показано сечение на съединение между две стоманени плочи от клас S355 със стандартни механични характеристики спрямо стандарт EN1993-1-1 и линейно поведение на материала. Триизмерен поглед върху цялото заварено съединение е показан в раздел 4.3. Допълнителни свойства на модела, като типа на крайните елементи и гъстотата на мрежата, са описани съответно в раздел 4.1 и 4.4.

2.4.1. Моделиране и фрагментиране



Фиг. 5. Геометрия с равнинни (а) или пространствени (б) елементи

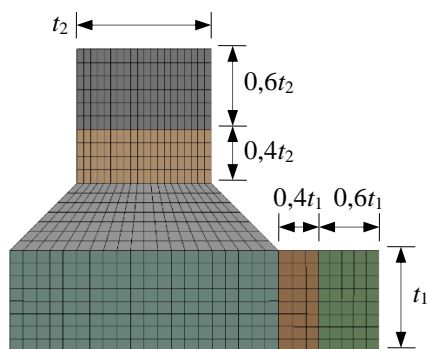
Процесът започва с построяването на модела. За целта могат да бъдат използвани равнинни или обемни елементи, вж. фиг. 5.



Фиг. 6. Цялостна (а) и фрагментирана (b) геометрия на заваръчния шев

Геометрията на детайла може да бъде оформена допълнително като бъде добавена геометрията на заваръчния шев, вж. фиг. 6. Фрагментирането на обема улеснява създаването на качествена мрежа от крайни елементи.

2.4.2. Оразмеряване на крайни елементи



Фиг. 7. Мрежа от крайни елементи в челно заварено съединение

Таблица 1. Размер на крайни елементи в близост до ръба на заваръчния шев

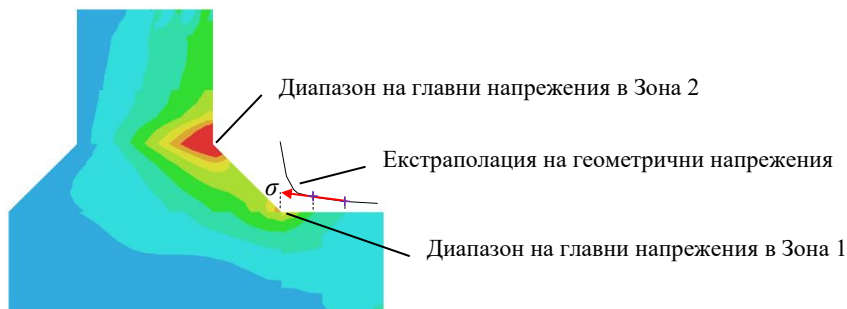
Позиция на напрежения в плочата	Тип геометрични напрежения	Междинни възли	Разстояние на възел от ръб на заваръчен шев		
			Възел 1	Възел 2	Възел 3
	Тип А	Не	$0,4t$	$1,0t$	
	Тип А	Да	$0,5t$	$1,5t$	
	Тип Б	Не	4 mm	8 mm	12 mm
	Тип Б	Да	5 mm	15 mm	

В публикацията на Международния институт по заваряване [2] са посочени правила за оценка по метода на крайните елементи (МКЕ).

При създаване на мрежата се цели възлите на крайните елементи в модела да се намират на определено разстояние от ръба на заваръчния шев. Критериите за определяне на разстоянието са различни в зависимост от това дали се разглеждат геометрични напрежения от Тип А, които се появяват по дългата страна на заваръчния шев, или от Тип Б, които се появяват в ръба на заварената плоча, вж. табл. 1. Когато се разглеждат напрежения от Тип А, размерът на крайните елементи зависи от дебелината на основната плоча. За крайни елементи в близост до ръб на заваръчен шев, в който има поява на напрежения от Тип Б, тази зависимост не съществува, защото е доказано експериментално, че нелинейното изменение на напреженията в близост до ръба в такива позиции не е толкова изразено като това в позиции с напрежения от Тип А. В този случай са дадени конкретни стойности за разстоянията на възлите от ръба. И в двата случая разстоянието зависи от това дали мрежата е съставена от крайни елементи със или без междинни възли.

Препоръчително е съединението да се моделира монолитно с непрекъсната мрежа, като отделните плочи се сливат в едно общо тяло. Ако плочите и заваръчният шев се моделират като отделни части, е важно позициите на възлите на крайните елементи в контактните зони да съвпадат. Това е необходимо, за да има правилно разпределение на усилията и за да може точно да се изчисли напрежението в горещите точки.

2.4.3. Изчисление и анализ на геометрични напрежения

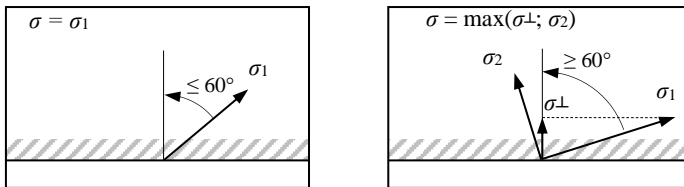


Фиг. 8. Схема на главните напрежения на опън

След като се генерира подходяща мрежа и се реши моделът, трябва да се изчисли промяната в главните напрежения на опън и на натиск от последователните цикли на натоварване, вж. фиг. 8. Нормално е да се появи скок в напреженията в близост до ръба на заваръчния шев. Той е най-изразен в региона между ръба и граница на $0,4t$ до $0,5t$ от ръба на повърхността на плочата, на която се измерва геометрично напрежение от Тип А. Това завишение се пренебрегва, като се прави екстраполация на напреженията линейно в два или нелинейно в три възела, вж. разд. 4.6. Нелинейното изменение на напреженията настъпва заради наличието на рязка промяна в геометрията. Понеже не може предварително да се определи крайната геометрия на ръба на заваръчния шев преди изпълнението му, тези напрежения не се отчитат с метода на геометричните напрежения. Важно е да се отбележи, че те са вече отчетени в кривите за якост на умора.

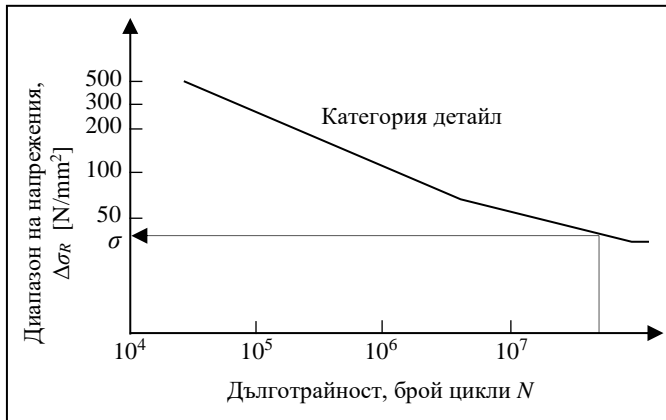
2.4.4. Ъгъл на главните напрежения

Ъгълът на главните напрежения с най-голям диапазон, перпендикулярно спрямо основната плоча, трябва да се провери, преди да се извърши проверка на умора при използването на геометрични напрежения. За целта първо се изчисляват нормални и срязващи напрежения в заварената плоча, които са ориентирани в глобалната координатна система. Тези напрежения се трансформират в главни напрежения посредством кръга на Мор. Следва ъгълът на главната равнина на опън в заварената плоча да се сравни с ъгъла на равнината на основната плоча в глобалната координатна система и да се изчисли разликата. Когато тя е над 60 градуса, е нужно напреженията да се преизчислят като се разложат на компоненти. За изчислителна стойност се приема по-големият от двата диапазона; този на перпендикулярните напрежения σ_{\perp} или този на главните напрежения на натиск σ_2 [2], вж. фиг. 9.



Фиг. 9. Ъгъл на главни напрежения

2.4.5. Определяне на брой цикли до поява на пукнатина



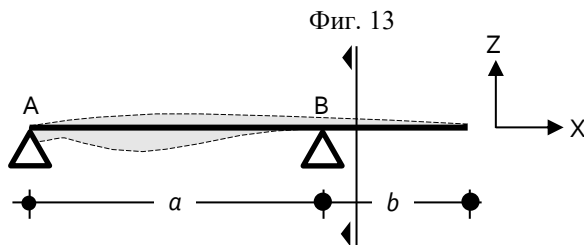
Фиг. 10. Крива за якост на умора

След като се екстраполират геометричните напрежения, в ръба на заваръчния шев се отбелязва допустимият брой цикли на натоварване. За конкретния пример броят цикли е определен предварително, а максималната допустима стойност на изменението в главните напрежения за определената категория детайл е измерена от криви за якост на умора, представени в DNV-RP-C203 [11], стандарт специфичен за корабостроителната и офшорната индустрия. Вместо криви на якост на умора от EN 1993-1-9:2007 са използвани криви от този стандарт поради допълнителни изисквания за дизайн, изграждане и вкарване в употреба на вятърни турбини в морски условия.

Изискването за издръжливост на умора е дефинирано като са зададени максимален брой $4,0E+07$ цикли на натоварване. Позволено е за определени групи от компоненти броят да се намали на $1,5E+07$ цикли, а за болтове – на $1,0E+06$ цикли на натоварване. Изчислено е, че допустимата стойност на главните напрежения с най-голям диапазон в меродавния заваръчен шев е $43,1 \text{ N/mm}^2$.

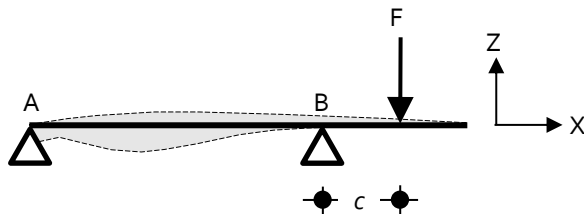
3. Анализ на цялата конструкция

Представена е опростена статическа схема на конструкцията за изпитване на витло, която се състои от две опорни рамки, подпирани витлото по дължина в точка А и точка В, вж. фиг. 11. Витлото е с максимална дължина 56 метра. Сечението на витлото в двете опорни точки е закрепено с помощта на фиксираща скоба, която може да бъде завъртяна с двигателен механизъм около оста Х, вж. фиг. 13.



Фиг. 10. Статическа схема на витло с конзолен участък

Предвидено е витлото да бъде изпитано на умора като се подложи на периодичен променлив вертикален товар на разстояние c от втората опора в конзолния участък. Товарът е със средна стойност от 300 kN и амплитуда от 1000 kN . Товарът се прилага със стоманени въжета, които са предварително прикрепени към витлото. Въжетата се опъват вертикално надолу или нагоре по направлението Z.

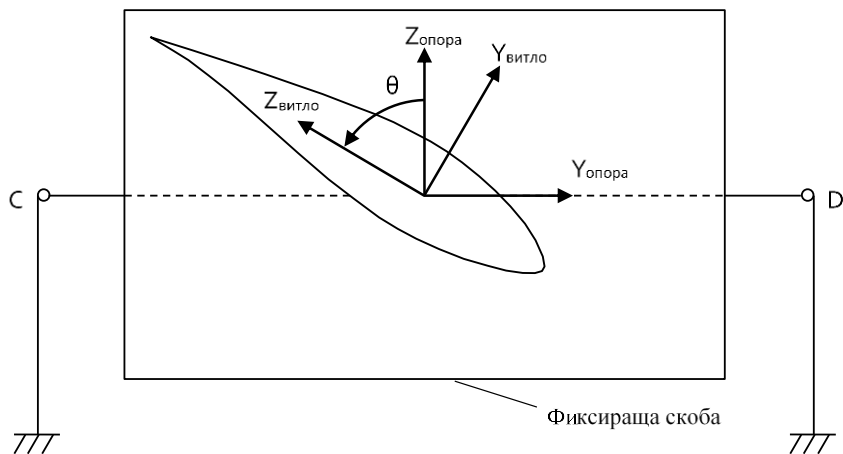


Фиг. 11. Схема на натоварване

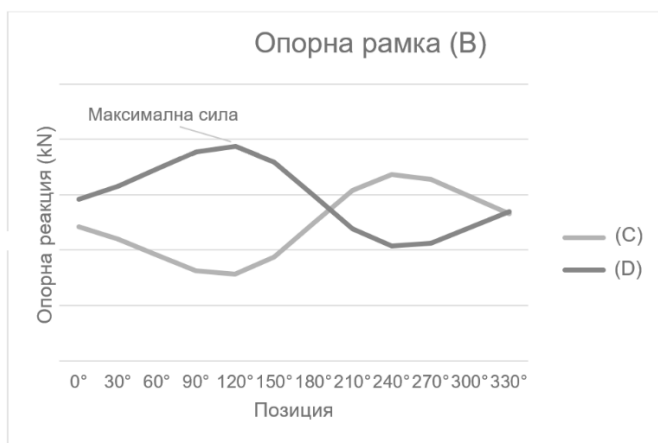
3.1. Реакции в опорната рамка

За да се изчисли реакцията в опорната рамка В, е прието максимално разстояние c на приложения променлив товар от опората според изискванията за проектиране на конструкцията. Геометрията на сечението на витлото води до вариация в инерционните и съпротивителните моменти спрямо ос $Y_{\text{опора}}$ и ос $Z_{\text{опора}}$ в зависимост от ъгъла θ на завъртане на сечението около надлъжната ос Х на витлото. То е значително по-кораво в направлението $Z_{\text{витло}}$ отколкото в направлението $Y_{\text{витло}}$. Поради особеностите на сечението и начина на прикрепяне към носещата конструкция се получава разминаване във

величината на опорните реакции в зоните C и D. Опорните реакции за 12 различни позиции на витлото са пресметнати, а най-високите стойности са използвани в числения анализ. вж. фиг. 14.



Фиг. 12. Опорна рамка В



Фиг. 13. Вариация на опорни реакции в зони C и D спрямо ъгъл θ

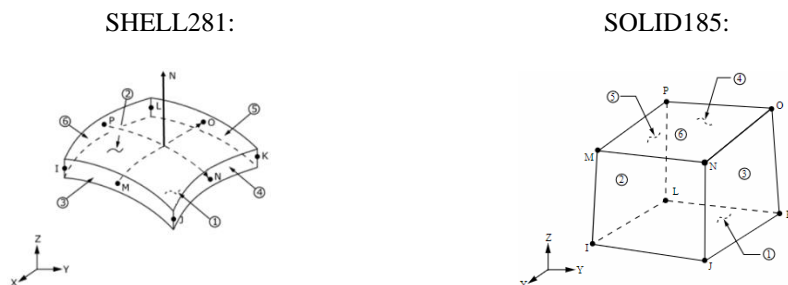
4. Частичен анализ

4.1. Модел и крайни елементи

Използвана е единна глобална геометрия за създаването на три местни модела с различни крайни елементи, вж. табл. 2, които са сравнени, за да се определи най-прецизният подход. Зоните C и D представляват група от машинни компоненти, които предават само вертикални усилия в колоните. Това е възможно с помощта на лагери и плъзгащи се плочи, които освобождават завъртанятията и изместванията в хоризонталните направления. Само най-напрегнатите заварени съединения в тези две зони са разгледани.

Таблица 2. Модел и тип крайни елементи

Модел №	Тип крайни елементи	Определение
1	SHELL281	Равнинни крайни елементи с 8 възела
2	SOLID185	Обемни шестостенни елементи с 8 възела
3	SOLID185	Обемни шестостенни елементи с 8 възела



Фиг. 15. Равнинни и обемни елементи тип SHELL281 и SOLID185

Модел 1 се различава от Модели 2 и 3 по типа на крайните елементи. Модели 2 и 3 се различават геометрично само в зоната на съединението, вж. разд. 4.3.

4.2. Особенности на числения анализ

Методът на проверка на умора при използване на геометрични напрежения е развит специфично за работа с използване на Метод на крайните елементи (МКЕ) [9].

Проведеният анализ е изпълнен с помощта на софтуерния продукт ANSYS® 2021 R2, който може да бъде приложен за числен анализ. В случая е проведен нелинеен статичен анализ на конструкцията по метода на Нютон Рафсън.

Повърхностен контакт на триене е зададен между определени плочи, закрепени с болтове в опорните рамки. Този вид контакт налага нелинейно поведение, защото може да има промяна в състоянието му по време на изчислението от затворен (активен) в отворен (пасивен) или обратното, което води до промяна в коравината на връзката и съответно в матрицата на коравината на цялата конструкция.

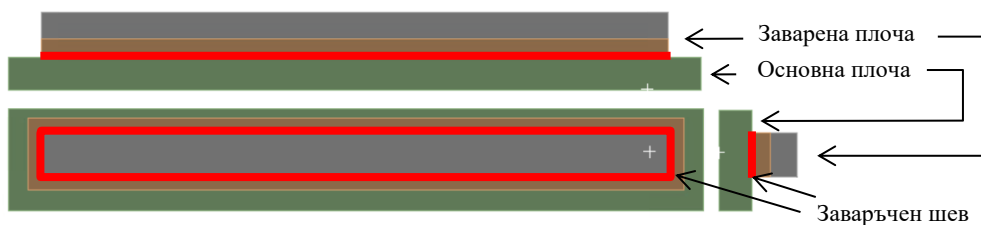
4.3. Геометрия на местните модели

Геометрията на съединението, което подлежи на проверка, включва част от основна плоча и част от заварена плоча, която е директно подложена на цикличен товар. Основната и заварената плоча са с дебелини 30 mm и 40 mm съответно. Катетът на ъгловите шевове, усилващи челния заваръчен шев с двустранно симетрично скосяване, е с дължина 10 mm.

Показана е геометрията на трите модела в три различни изгледа. Заваръчният шев е показан с червен контур. В Модел 1 заваръчният шев е идеализиран като линейно съединение между плочите. В Модел 2 контактната повърхност между двете плочи играе ролята на заваръчен шев, а в Модел 3 е добавена обемната геометрия на ъгловите шевове и на челния шев.



Фиг. 14. Геометрия на Модел 1



Фиг. 15. Геометрия на Модел 2



Фиг. 16. Геометрия на Модел 3

4.4. Създаване на мрежата от крайни елементи

4.4.1. Размер на крайните елементи

Таблица 3. Размер на крайните елементи в Модел 1, 2 и 3

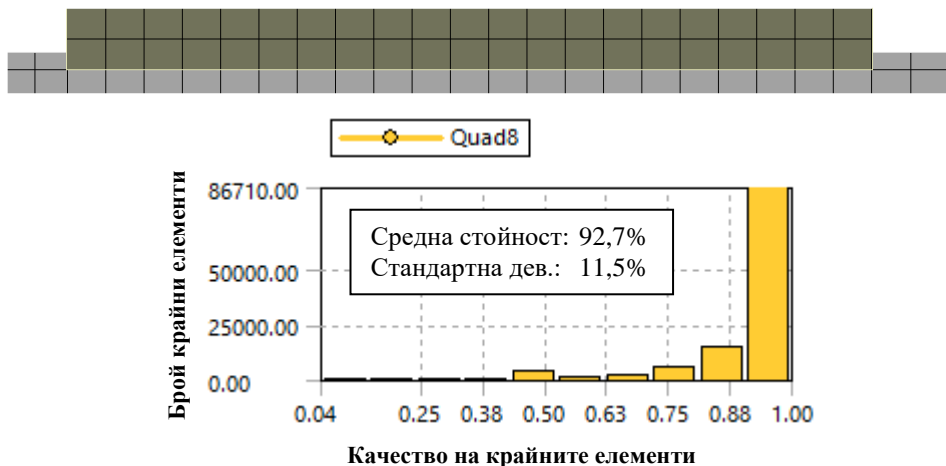
Модел №	Разстояние на възлите от ръба на заваръчния шев (mm)	Дебелина на плочата (t)	Размер на крайните елементи
1	0,5t и 1,5t	40 mm	40 mm × 40 mm
2	0,4t и 1,0t	40 mm	4 mm × 4 mm
3	0,4t и 1,0t	40 mm	4 mm × 4 mm

Размерът на мрежата в Модел 1 се различава от размера на мрежата в Модел 2 и 3, защото главната цел на този модел е намирането на концентрации на напрежения в завареното съединение. Според [2] в такива модели може да бъде използвана по-груба мрежа, като размерите на елементите не трябва да надвишават дебелината на плочата по дължина или по ширина.

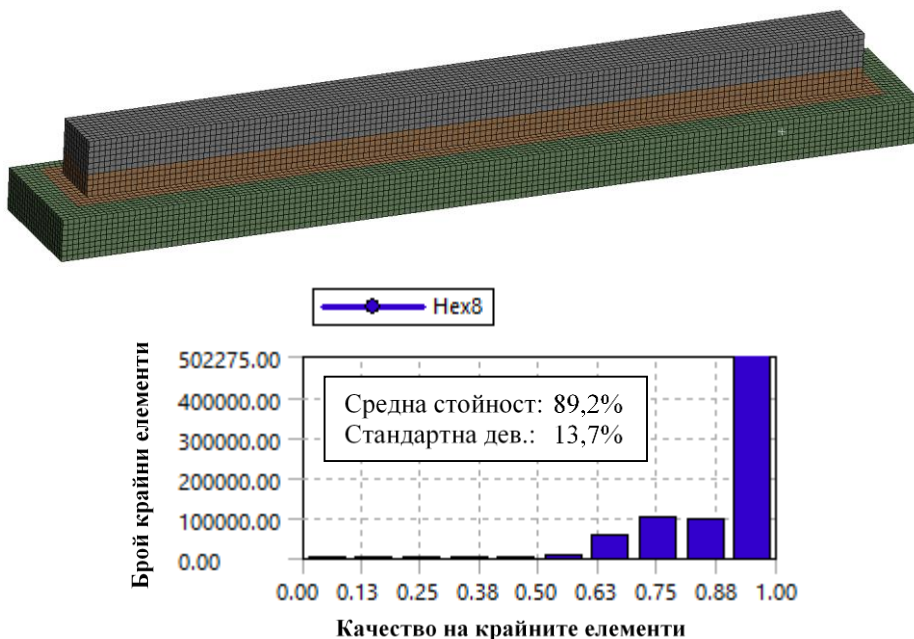
В Модели 2 и 3 е зададен по-малък размер на крайните елементи, за да може да се уеднаквят размерите на елементите в двете съседни плочи с различна дебелина. Пosingната мрежа позволява да бъдат направени по-детайлни графики и да се покаже ясно позицията на скока на напреженията в близост до ръба на заваръчния шев.

Изискванията за позицията на възлите за екстраполация на напрежения са спазени и в трите модела. В Модел 1 това е постигнато заради наличието на междинни възли, а в Модели 2 и 3 заради фрагментирането на обема.

4.4.2. Анализ на качеството на мрежата



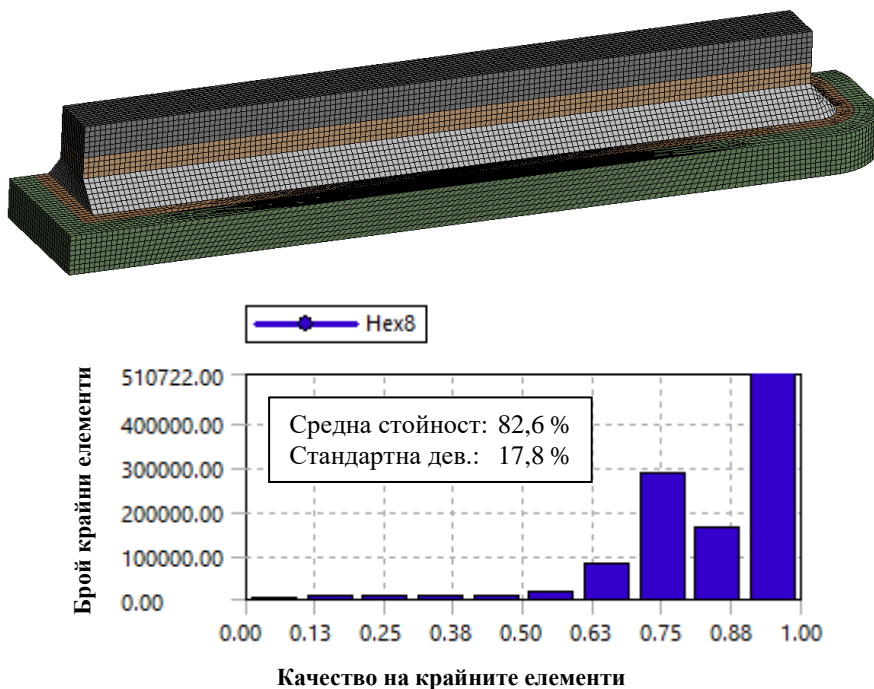
Фиг. 17. Мрежа от крайни елементи и качество на мрежата на Модел 1



Фиг. 18. Мрежа от крайни елементи и качество на мрежата на Модел 2

Проверката на качеството на мрежата е важна част от числения анализ, която позволява да се направи предварителна оценка за качеството на крайните резултати. Качеството на елементите в мрежата се определя с формула, която сравнява формата на равнинните елементи с квадрат, а тази на обемните елементи с куб [12]. Елементите с пониско качество притежават нерегулярна изкривена геометрия.

Не съществува конкретно предписание за качество на мрежата, а само долен лимит за статичен анализ с 1D (0,75), 2D (0,01) и 3D ($5 \cdot 10^{-6}$) крайни елементи. Ако качеството на крайните елементи падне под тази стойност, изчислението не може да продължи. Счита се за добра практика, когато съществуват елементи с ниско качество, те да бъдат идентифицирани. В случай че са разпръснати, а не концентрирани в един регион, наличието на тези елементи няма да породи значителна промяна в цялостната коравина на съединението.

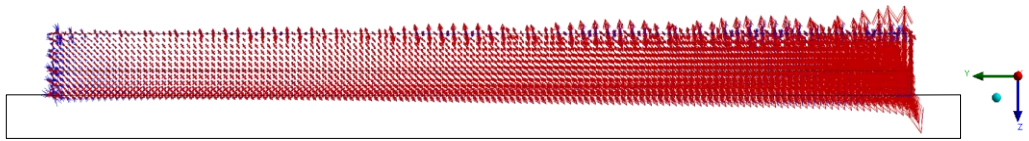


Фиг. 21. Мрежа от крайни елементи и качество на мрежата на Модел 2

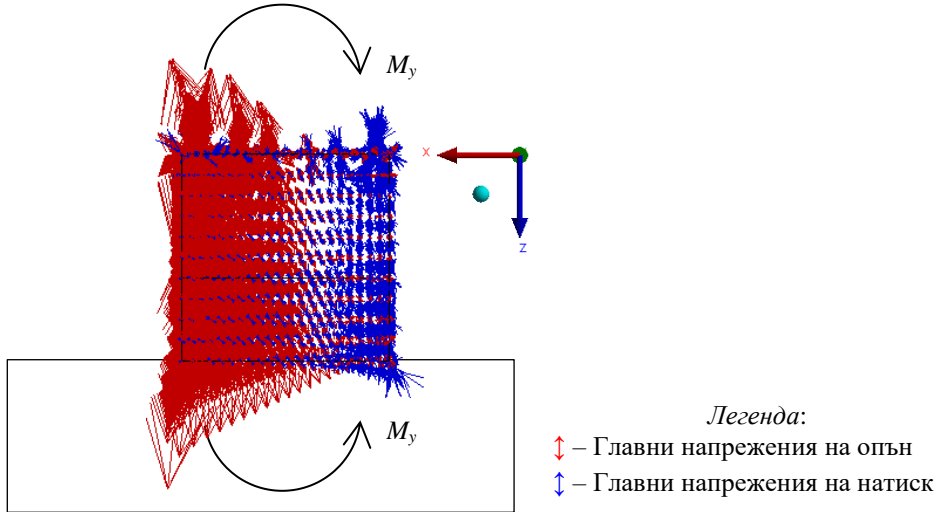
4.5. Анализ на главните напрежения

В частичния анализ се наблюдава огъване на двете плочи извън равнините им. Допълнителен анализ на векторите на главните напрежения на опън и на натиск в региона на най-напрегнатото заварено съединение показва, че в десния ръб има съществена промяна в главните напрежения на опън по направление Z . Скокът в главните напрежения се дължи на местен огъващ момент M_y , вж. фиг. 22 и 23.

Главните напрежения на опън и натиск са ясно изразени от двете страни на заварената плоча и са почти перпендикулярни на основната плоча. Това поведение се наблюдава и в трите модела. От това следва, че главните напрежения с най-голям диапазон директно могат да бъдат използвани за екстраполиране и за сравнение с допустимите стойности.



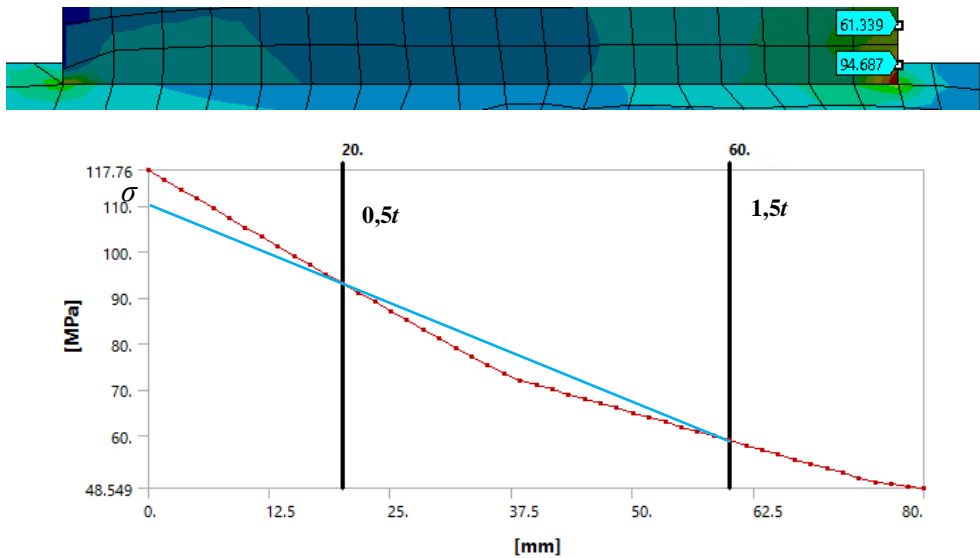
Фиг. 19. Главни напрежения на опън и натиск в завареното съединение



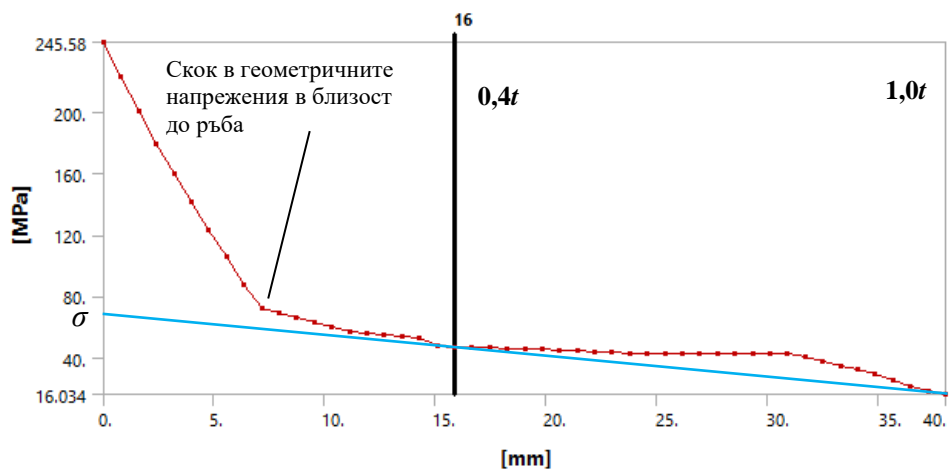
Фиг. 20. Главни напрежения на опън и натиск в завареното съединение

4.6. Анализ на геометричните напрежения

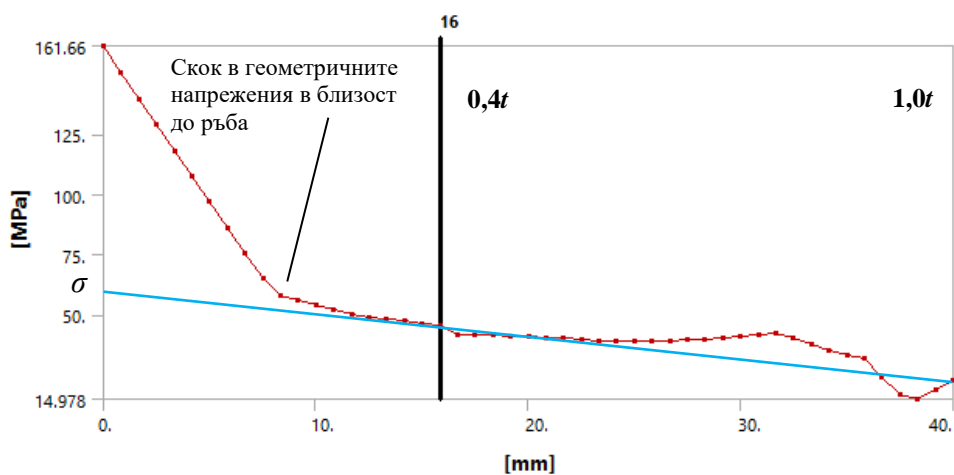
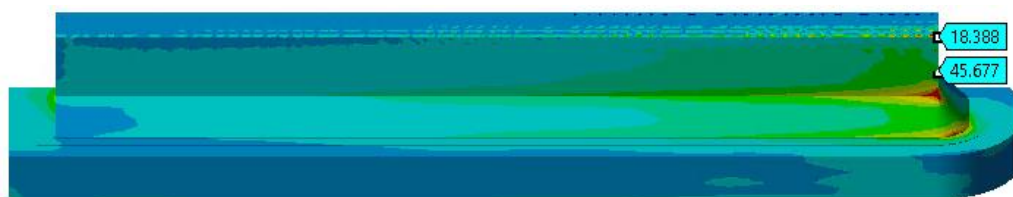
4.6.1. Екстраполация на геометричните напрежения



Фиг. 21. Екстраполация на напрежения в Модел 1



Фиг. 22. Екстраполация на напрежения в Модел 2



Фиг. 23. Екстраполация на напрежения в Модел 3

Формули за намиране на стойността на геометричните напрежения в ръба на заваръчния шев са дадени в множество публикации и лесно могат да бъдат изведени като се приравни увеличението в напрежението за стъпка $(0,5t - 0,0t)$ с това за стъпка $(1,5t - 0,5t)$, а след това се реши за σ . Същото може да се направи за екстраполацията със стъпки $0,4t$ и $0,6t$. Следват формулите за екстраполирането на геометрични напрежения в Модел 1, вж. форм. (1), и в Модели 2 и 3, вж. форм. (2).

$$\sigma = 1,5\sigma_{0,5t} - 0,5\sigma_{1,5t}, \quad (1)$$

$$\sigma = 1,67\sigma_{0,4t} - 0,67\sigma_{1,0t}, \quad (2)$$

където σ са напрежения в N/mm^2 .

Таблица 4. Геометрични напрежения в Модели 1, 2 и 3

Модел №	Напрежения във възел 1 (N/mm^2)	Напрежения във възел 2 (N/mm^2)	Геометрични напрежения σ (N/mm^2)
1	61,34	94,69	111,36
2	18,79	52,50	75,08
3	18,39	45,68	63,96

5. Заключение

И в трите модела се наблюдава покачване на напреженията в близост до ръба на заваръчния шев. В Модел 1 се наблюдава сравнително плавно и линейно увеличение, докато в Модели 2 и 3 има изразен скок в напреженията. Разликата в разпределението на повърхностните напрежения се дължи на типа на крайните елементи, на размера на крайните елементи и на липсата или наличието на допълнителни геометрични белези на съединението.

В Модел 1 равнинните крайни елементи не преразпределят усилията извън равнината толкова прецизно, колкото обемните крайни елементи в Модели 2 и 3. Въпреки че завишението в геометричните напрежения в Модел 1 спрямо Модели 2 и 3 е значимо, решението все пак е полезно заради това, че е консервативно и че помага да се определят критичните зони с най-напрегнати заварени съединения. Това от своя страна позволява прецизирането на резултати само в тези зони с помощта на производни модели. Освен това, построяването на модел от равнинни елементи спомага по-бързата конвергенция заради по-малкия общ брой възли в мрежата.

Напреженията в Модели 2 и 3 са близки по величина във възлите и като краен резултат от екстраполацията. В Модел 3 се наблюдава допълнителен спад от 11 N/mm^2 или подобрене от 15 % в геометричните напрежения. Тук геометричните свойства на съединението са отразени коректно, като контактната площ на повърхността между двете плочи е два пъти по-голяма, което влияе на разпределението на усилията. Също така, увеличението на обема на материала в съединението води до увеличение на коравината му.

Крайните геометрични напрежения и в трите модела са по-високи от допустимите $41,3 \text{ N/mm}^2$, вж. разд. 2.4.5, и затова се налага промяна в геометрията на съединението или в размерите на компонентите, за да се достигне предвидената якост на умора.

Благодарности

Настоящата статия е реализирана с подкрепата на инженерния отдел на „ЕНЕЙБЪЛ България“ ЕООД.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.ansys.com/it-solutions/platform-support/previous-releases>.
2. Niemi, E. et al. Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components, IIW Collection, DOI 10.1007/978-981-10-5568-3.
3. The International Institute of Welding (IIW), <http://iiwelding.org/>.
4. The American Petroleum Institute (API), <https://www.api.org>.
5. The American Welding Society (AWS), <https://www.aws.org/home>.
6. Marshall, P. W. Design of welded tubular connections. Basis and use of AWS code provisions. Dev. Civ Eng. 37,412. Elsevier (1992).
7. BDS EN 1993-1-9, 2007 EVROKOD 3: Proektirane na stomaneni konstrukcii. Chast 1-9: Umora.
8. Walter D. Pilkey et al. Peterson's Stress Concentration Factors, Wiley, ISBN 1119532523, 9781119532521.
9. Pedersen, M. M. 2018. Introduction to Metal Fatigue. Department of Engineering, Aarhus University. Denmark. 91 pp. – Technical report ME-TR-11.
10. Fricke, W. IIW Guideline for the Assessment of Weld Root Fatigue Table of Contents. IIW Doc. XIII-2380r3-11, 2012.
11. DNV-RP-C203, April 2010, Fatigue design of offshore steel structures, Det Norske Veritas, <http://www.dnv.com>.
12. <https://ansyshelp.ansys.com/>.

HOT SPOT FATIGUE ASSESSMENT OF WELD CONNECTIONS

V. Zahariev¹, M. Milochev²

Keywords: hot spot stress, fatigue, machine components and welded connections, FEM

ABSTRACT

Traditionally the fatigue assessment of structures and connections is performed by the nominal stress approach using S-N curves defined for certain categories of connection details. This approach, however, may be difficult to apply for connections with complex geometry. The current paper presents an assessment of welded joints by the geometric stress approach at the corresponding stress hot spot location. The method is applied for assessment of the welded joints of a test rig for wind turbine blades. The structural analyses are performed using the ANSYS software package. The requirements for mesh size at the stress hot spot, given in the relevant design guidelines, are applied. The results from the assessment are presented and conclusions are drawn.

¹ Vladimir Zahariev, Structural Engineer, Enabl Bulgaria Ltd, Sofia1000, 2 Maria Luiza Blvd., e-mail: vbz@enabl.dk

² Milko Milochev, Structural Engineer, Enabl Bulgaria Ltd, Sofia1000, 2 Maria Luiza Blvd., e-mail: mism@enabl.dk