

FRI-1.417-1-MEMBT-09

NUMERICAL MODELING AND CALIBRATION OF STEEL PLATE WELDING IN VACUUM⁹

Assist. Prof. Ivo Draganov, PhD

Department of Technical Mechanics,
University of Ruse, Bulgaria
Phone: 082 888 224
E-mail: iivanov@uni-ruse.bg

Assist. Prof. Nikolay Ferdinandov, PhD

Department of Material Science and Technology,
University of Ruse, Bulgaria
Tel.: 082 888 316
E-mail: nferdinandov@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Danail Gospodinov, PhD

Department of Material Science and Technology,
University of Ruse, Bulgaria
Tel.: 082 888 205
E-mail: dgospodinov@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Rossen Radev, PhD

Department of Material Science and Technology,
University of Ruse, Bulgaria
Tel.: 082 888 778
E-mail: rradev@uni-ruse.bg

Eng. Stiliyana Mileva

Department of Technical Mechanics,
University of Ruse, Bulgaria
Phone: 082 888 513
E-mail: smileva@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Yulian Angelov, PhD

Department of Technical Mechanics,
University of Ruse, Bulgaria
Phone: 082 888 313
E-mail: julian@uni-ruse.bg

Abstract: *The present work deals with the process of welding of steel plate by the TIG method in vacuum. A numerical model was created using the finite element method taking into account the nonlinear properties of the material. The heat flux from the weld arc is set to the surface as linear function, and volumetric, with a double ellipsoid distribution (Goldak). Results were obtained for the temperature field and the strain state of the plate. Experimental data were obtained for the shape and dimensions of the welding pool and the heat affected zone, which were used to calibrate the numerical model. The results of the weld plate displacements obtained from the simulation are compared with the results from the experiment.*

Keywords: *Vacuum welding, Numerical simulation, Finite element method, Model calibration.*

⁹ Докладът е представен в секция Механика и машиностроителни технологии на 25 октомври 2019 с оригинално заглавие на български език: КАЛИБРОВКА НА МОДЕЛА ЗА ЧИСЛЕНО СИМУЛИРАНЕ ПРИ ЗАВАРЯВАНЕ НА СТОМАНЕНА ПЛОЧА ВЪВ ВАКУУМ.

ВЪВЕДЕНИЕ

Заваряването във вакуум е аргументирано или от спецификата на използвания метод, както е при дифузионното заваряване (Казаков 1968) или от спецификата на средата, както е при ремонтни дейности в космическото пространство (Jayakumar 2017).

Съществуват няколко заваръчни метода, приложими в безвъздушното пространство на космоса, като най-често се използват лазерното заваряване (Arata 1985) и електродъговото заваряване (Miller 1985), (Тоуа 2006). Предимство на първия метод е възможността за получаване на заваръчни шевове с по-дълбок провар, а вторият е подходящ при необходимост от по-ниски стойности на заваръчните ток и напрежение.

Образуването на значителни остатъчни напрежения и деформации, при дъговото заваряване, налага тяхното предварително определяне. При серийно производство е възможно това да стане чрез измерване на опитен образец, но при единично производство и ремонт определянето може да стане само чрез изчисления. Аналитичните решения са възможни само в малък брой случаи, което налага използването на числени методи. Най-подходящ е метода на крайните елементи (МКЕ) (Bergheau 2008), който е най-разпространения в системите за автоматизирано проектиране.

МКЕ позволява задаването на подвижен топлинен източник (Aarbogh 2010). Възможно е да се решават, както двумерни (Димитров 2017), така и тримерни задачи (Fu 2012), (Fadaei 2015), като физичните характеристики могат да бъдат функции на температурата.

Подробен обзор на напредъка в симулирането на заваръчните процеси може да бъде намерен в (Draganov 2018).

Целта на настоящата работа е да се създаде и калибрира числен модел на заваряване на стоманена планка при отсъствие на добавъчен материал и конвективен топлообмен.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Натурни експерименти

За провеждане на натурните експерименти е използвана съществуваща лабораторна уредба за вакуумно заваряване – фиг. 1, чието подробно описание може да се намери в работата на Фердинадов и колектив (Ferdinandov 2017).



Фиг. 1. Вакуумна камера за електродъгово заваряване във вакуум

Общи въпроси по числения модел

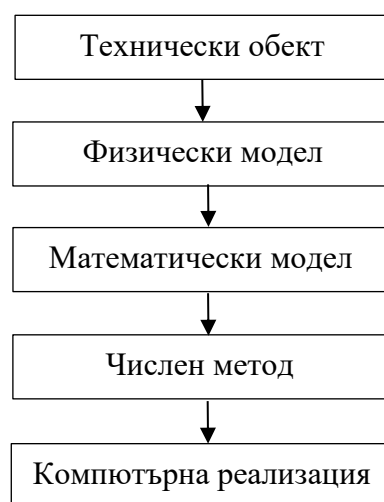
Задачата за численото моделиране на заваръчния процес се основава на преминаването през няколко етапа – фиг. 2, което води до загуба на информация.

Изхожда се от техническия проблем – заваръчен процес. В настоящата работа се разглежда получаването на заваръчен шев върху планка от стомана S235 в условията на вакуум. Физическите закони, които имат отношение към този технически проблем, са от областта на механиката на твърдото деформируемо тяло, топлообмена, механика на флуидите и електромагнетизма. Тъй като всички тези закони действат по едно и също време, е необходимо те да бъдат спрегнати. Това води до получаване на задача, чието решение на този етап е невъзможно.

В настоящата работа е прието, че най-съществени се явяват уравненията от механиката на деформируемото твърдо тяло и топлообмена, които са предмет на изучаване в термопластичността. Това разбиране е в основата на съществуващия стандарт СД CEN ISO/TS 18166:2016.

Математическият модел, на избраното физическо описание, представлява система от диференциални уравнения, включващи участващите физически величини като функции на времето и пространствените координати и известните начални и гранични условия. Аналитичното решаване на тези уравнения, в общ вид, не е възможно, което налага използването на подходящ числен метод. В настоящата работа е избран метода на крайните елементи, тъй като той е използван в много програми за автоматизирано проектиране.

Всеки програмен продукт използва различни алгоритми за реализиране на МКЕ. В настоящата работа е предпочетена програмата Абакус (ABAQUS), тъй като тя позволява вграждането на потребителски код.



Фиг. 2. Схема на етапите на моделиране

Топлинна задача

Процесът на заваряване представлява нестационарен топлообмен, който се описва чрез условието за температурно равновесие и закон на Фурие

$$\text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(T)) + Q = V\rho\dot{U}, \quad (1)$$

където λ е тензора с топлопроводните материални характеристики, които са функция на температурата T , Q е количеството топлина в разглеждания обем, а U е специфичната енталпия.

Разглежданият процес на заваряване протича във вакуум, поради което липсва конвекция. Лъчистият топлообмен е описан чрез закона на Стефан-Болцман.

Електрическата дъга е зададена като подвижен топлинен поток

$$q = q(x, t), \quad (2)$$

където векторът x описва положението във времето t .

Топлинният поток от електрическата дъга е зададен по два начина: като линейно разпределен по линеен закон и като обемно разпределен – фиг. 3. За втория случай е използван

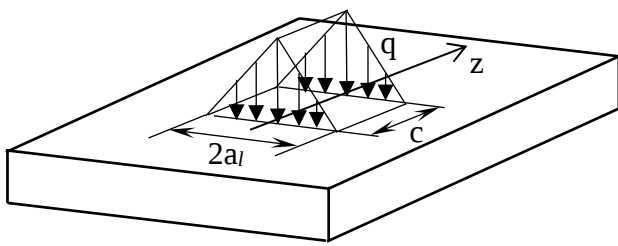
двоен елипсоид, предложен от Голдак (Goldak 1984) и описан, за частта пред центъра на потока, с уравнението

$$q(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q_e}{abc_f \pi^{3/2}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3\xi^2/c_f^2}, \quad (3a)$$

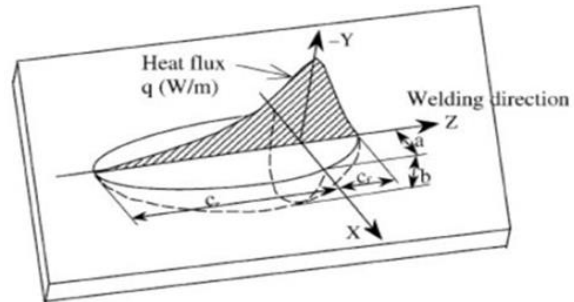
а за частта след потока

$$q(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q_e}{abc_r \pi^{3/2}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3\xi^2/c_r^2}. \quad (3b)$$

В горните уравнения с Q_e е означена ефективната топлина предавана от дъгата, a , b , c_f и c_r са геометричните параметри на двойния елипсоид, ξ е локалната надлъжна координата по направление на шева, а f_f и f_r са коефициенти на плътността на топлинния поток, чиято сума е равна на две.



а) Повърхнинно линейно разпределение



б) Двоен елипсоид (Goldak 1984)

Фиг. 3. Разпределение на топлинния поток

Началната температура на тялото е

$$T(\mathbf{x}, t = 0) = 20^\circ\text{C}. \quad (4)$$

Слабата интегрална форма на нестационарната задача за топлообмен, която се използва за решаването на проблема чрез метода на крайни елементи, има вида (Bergheau 2008)

$$\int_V \rho \dot{U} \delta T dV + \int_V \frac{\partial \delta T}{\partial \mathbf{x}} \cdot \boldsymbol{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} dV = \int_V \delta T r dV + \int_S \delta T q dS, \quad (5)$$

където δT е вариацията на температурата, удовлетворяваща границите условия по външната повърхнина S и обема V .

Деформационна задача

Деформацията, предизвикана от изменението на температурата в тялото, се описва чрез уравнението

$$\varepsilon_{ij}^{(T)} = \alpha(T - T_0)\delta_{ij}, \quad (6)$$

където α е коефициента на температурно разширение, T и T_0 са съответно текущата и началната температура, а δ_{ij} е делта функцията на Кронекер.

Температурната деформация участва в уравнението за изменението на общата деформация

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{(E)} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{(P)} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{(T)}, \quad (7)$$

където $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(E)}$ и $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(P)}$ са измененията на еластичната и пластичната деформации.

Връзката между деформациите и напрежения се дава от обобщения закон на Хук:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl}, \quad (8)$$

където C_{ijkl} е тензор с материалните характеристики.

Крайноелементен модел

Решаването на задачата за нестационарен топлообмен по метода на крайните елементи става чрез матричното уравнение

$$[C] \cdot \{\dot{T}\} + [K_T] \cdot \{T\} = \{F\}, \quad (9)$$

където $[C]$ е капацитетната матрица, $[K_T]$ е топлопреносната матрица, а $\{F\}$ е вектора, описващ топлинния поток.

Численото интегриране по времето на уравнение (5) става чрез метода на крайните разлики

$$\{\dot{T}(t + \Delta t)\} = \frac{\{T(t + \Delta t)\} - \{T(t)\}}{\Delta t}, \quad (10)$$

където Δt е инкремента във времето.

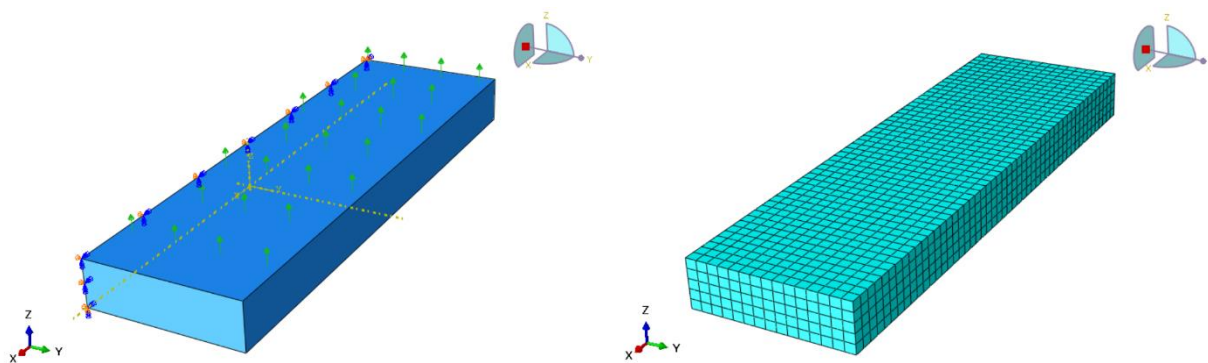
Задачата за напрегнатото и деформирано състояние се решава чрез матричното уравнение

$$[K_f] \cdot \{U\} = \{P_M\} + \{P_T\}, \quad (11)$$

където $[K_f]$ е коравинната матрица, $\{U\}$ е вектора с възловите премествания, а $\{P_M\}$ и $\{P_T\}$ са възловите вектори съответно на механичните и термичните товари.

Компютърна реализация

Компютърната реализация на модела на заваръчния процес е извършена в средата на специализираната за МКЕ комерсиална програма Абакус. Геометричният модел е построен съобразно формата и размерите на планката (100x60x9 mm) – фиг. 4, като е съобразено, че задачата е симетрична. Дискретизацията е извършена чрез тримерни крайни елементи с един междинен възел - DC3D20 (ABAQUS) и размер h .



а) Геометричен модел и гранични условия

б) Дискретизация

Фиг. 4. Крайноелементен модел

Разглежданата планка е от стомана S235JR по (БДС EN 10025-2:2005). Съществуват известни различия, относно физическите свойства на материала, използвани в работите на отделните автори. В тази работа са приети стойностите за топлофизичните свойства на материала, експериментално определени от (Piszczeck 2013) като е извършена линеаризация на данните – таблица 1. В разглеждания температурен интервал стомана S235JR има две фазови превръщания, които водят до два пика в специфичния топлинен капацитет. Съществуват две възможности за описание на тези пикове. Първият, използван в работата на Мухтаров (Muhtarov 2011), е чрез прякото описание на тази нелинейност в специфичния топлинен капацитет. Това води до получаването на силно физически нелинейна задача и сериозни трудности с реализирането на метода на Нютон-Рафсън. Преодоляването на тази трудност става като се използва втори подход. При него се използва латентната топлина, дължаща се на фазовите превръщания, която се задава при достигане на определени стойности на температурата в процеса на нагряване и друга, в процеса на охлаждане. В настоящата работа е предпочетен вторият подход. Стойностите на латентната топлина и границите ѝ са дадени в таблица 2.

Началната температура на стоманената планка е 20°C. Граничните условия, при решаването на топлинната задача, са радиационния топлообмен и топлинния поток от електрическата дъга. За коефициента на чернота е приета постоянна стойност 0,3, а константата на Стефан-Болцман е $5,57037 \cdot 10^{-8}$. Мощността на електрическата дъга се получава от произведението на тока, равен на 18,5 А и електрическото напрежение, равно на 120 V.

Времето за заваряване е 45,5 s и е дискретизирано в числения модел с брой стъпки, равни на броя на елементите в надлъжно направление. За задаването на топлинния поток е създадена подпрограма DFLUX (ABAQUS). В предходна работа на колектива е определена ефективността на дъгата – 0,46 (Драганов 2018). Параметрите, с които се описва топлинния поток, съгласно уравнения (3а) и (3б) са предмет на калибриране.

Граничните условия, при решаване на деформационната задача, са равнината на симетрия и ограничаването на преместванията в три точки, така че да е възможно свободното деформиране на планката – фиг. 3 а).

Таблица 1. Физически свойства

Материални характеристики	Температура, °C	Стойност
Топлопроводност, W/mK	20	40
	1300	30
	1600	120
Специфичен топлинен капацитет, J/kgK	20	400
	1540	600
Модул на еластичност, GPa	20	210
	1500	5
Коефициент на Поасон, -	всички	0,27
Коефициент на температурно разширение, K ⁻¹	20	1,25.10 ⁻⁶
	1500	1,65.10 ⁻⁶
Граница на провлачване, МРa	20	235
	500	100
	1000	50

Таблица 2. Латентна топлина

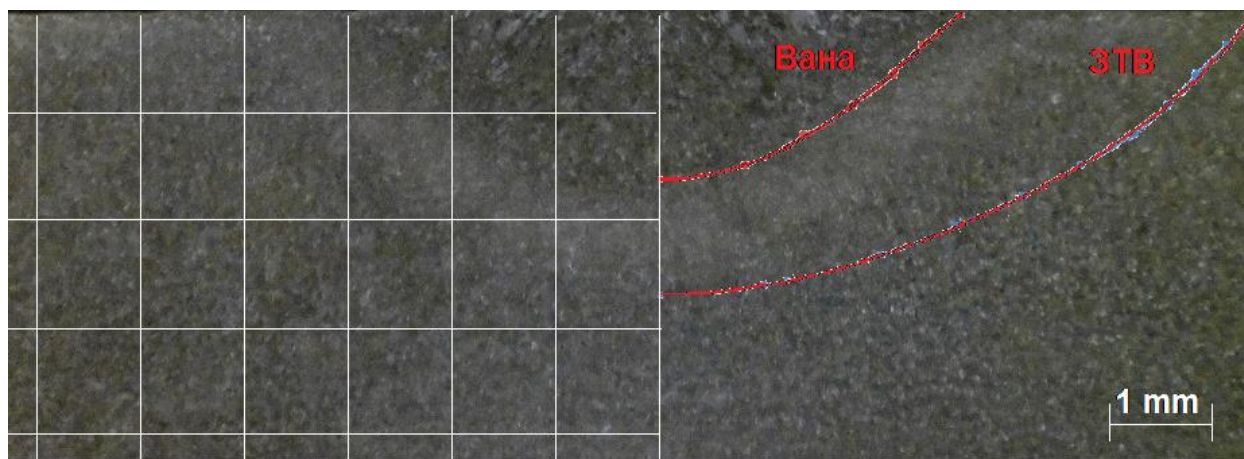
Фазови превръщания	Латентна топлина, kJ	Долна граница, °C	Горна граница, °C
α-γ преход	55	700	800
Твърда - течна фаза	150	1450	1650

Резултати

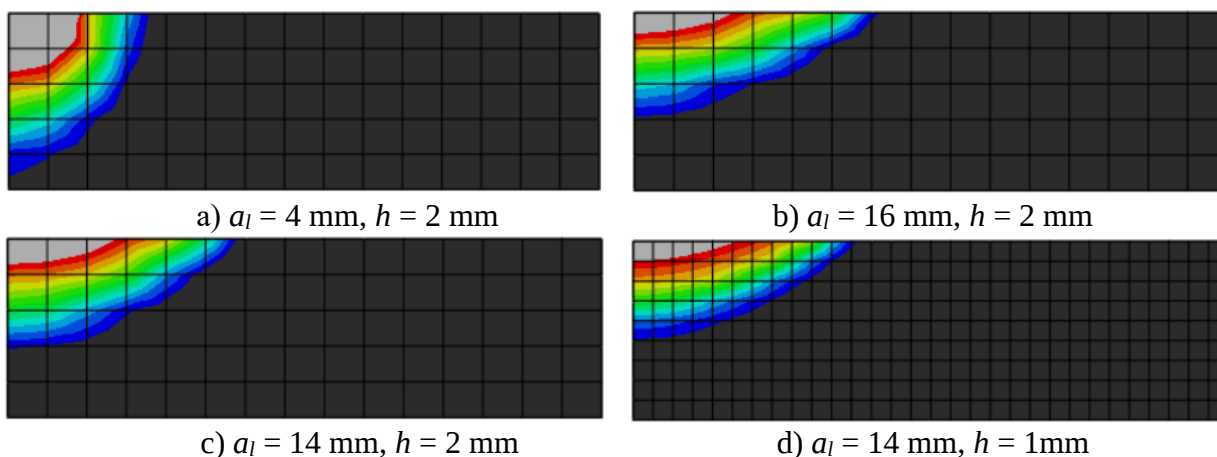
Получени са резултати за температурното поле и преместването в напречно направление на планката. Сравнявани са зоните на заваръчната вана, като е приета температура на топене 1593°C и зоната на термично влияние (ЗТВ), при приета температура на структурно изменение - 723°C.

На фиг. 5 е показан макрошлиф на напречно сечение на планката с проявени заваръчна вана и ЗТВ, чиито граници служат за калибриране на числения модел.

На фиг. 6 са дадени резултатите за температурното поле за напречното сечение, при задаване на топлинния поток като повърхнинно разпределен, чрез линейна функция по ширината на планката. В бял цвят е изобразена заваръчната вана, цветната зона е ЗТВ, а с тъмен – зоната с температура под 723°C. Калибриращ параметър е ширината на топлинния поток - a_l .

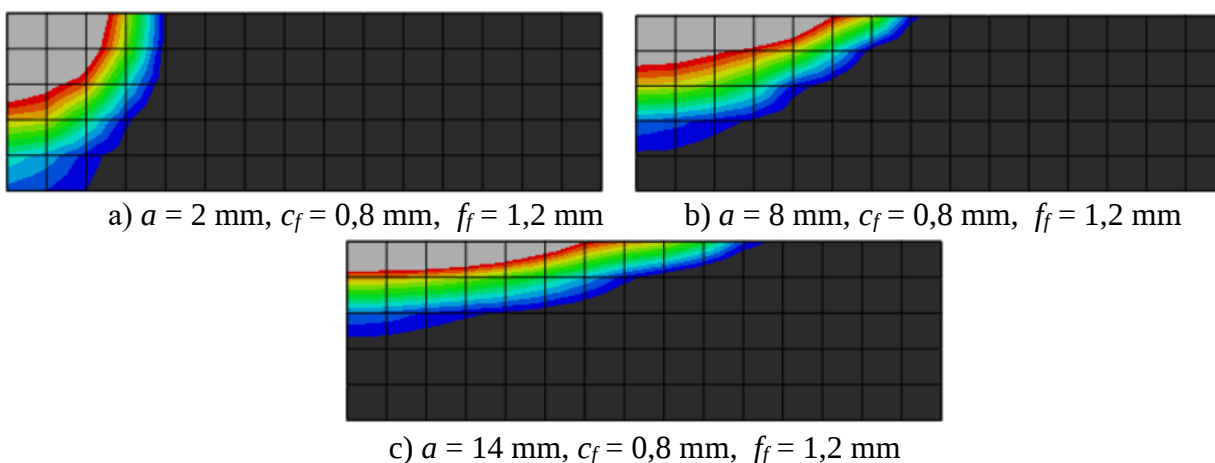


Фиг. 5. Експериментално определени заваръчна вана и ЗТВ



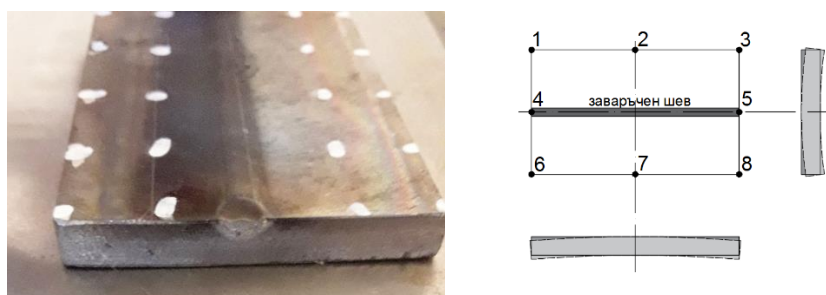
Фиг. 6. Температурно поле при повърхностно зададен топлинен поток

На фиг. 7 са дадени резултати за разпределението на температурата при задаване на топлинния поток като обемно разпределен, чрез двоен елипсоид. Калибриращи параметри са a , c_f и f_f , като последните два определят съответно c_r и f_r като ги допълват до две.



Фиг. 7. Температурно поле при обемно зададен топлинен поток

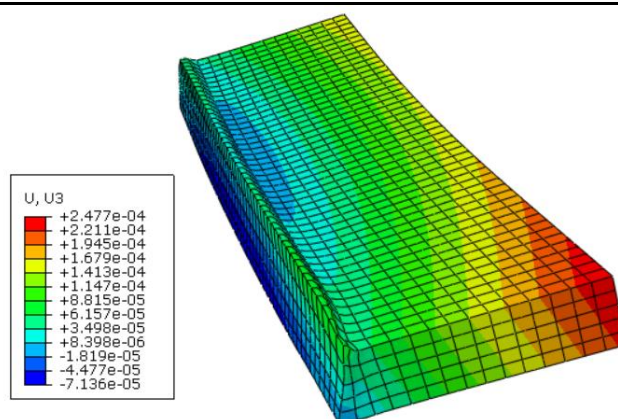
На фиг. 8 е дадена планката с обозначени точки, в които са измервани преместванията в напречно направление. Резултатите са представени в таблица 3. Преместванията, получени при численото моделиране, чрез повърхнинно и обемно разпределение на топлинния поток, са дадени на фиг. 9.



Фиг. 8. Експериментално определени премествания

Таблица 3. Премествания в напречно направление, mm

Метод за определяне на преместването	Точка 1	Точка 2	Точка 3
Натурен експеримент	0,25	0,2	0,25
Повърхнинно линейно разпределение на топлинния поток	0,238	0,189	0,248
Обемно разпределение на топлинния поток по Голдак	0,223	0,174	0,307



Фиг. 9. Напречно премесване при повърхнинен топлинен източник

ИЗВОДИ

Моделирането на процеса на заваряване, чрез линейно повърхнинно разпределение на топлинния поток, дава по-голяма близост на заваръчната вана и ЗТВ до експериментално получените, в сравнение с моделирането чрез обемно разпределение на Голдак. Същото се наблюдава и при резултатите за преместванията.

Числената симулация описва качествено правдоподобно изменението на формата в зоната на заваръчния шев, но трябва да се има предвид, че количественото сравнение е некоректно, поради неотчитането на течната фаза в процеса на заваряване.

БЛАГОДАРНОСТИ

Представените изследвания и участието в настоящата научна конференция са осъществени с финансовата подкрепа на Фонд научни изследвания към Русенски университет «Ангел Кънчев» по договор № 2019-МТФ-01.

REFERENCES

Aarboogh H., M. Hamide, H. Fjaer, A. Mo, M. Bellet. (2010) Experimental validation of finite element codes for welding deformations. *Journal of Material Processing Technology*, Volume 210, Issue 13, pp. 1681-1689.

Abaqus Analysis User's Manual; 11.2.1 Element and contact pair removal and reactivation

Arata Y., N. Abe, T. Oda, N. Tsujii. (1985) *Fundamental phenomena during vacuum laser*

welding. Proc. ICALEO'85 Materials Processing Symp., Laser Inst. of America 44, s. 1-7.

BDS EN 10025-2:2005 Hot rolled products from structural steel. Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels (**Оригинално заглавие:** БДС EN 10025-2:2005 Горещовалицирани продукти от конструкционни стомани. Част 2: Технически условия на доставка за нелегирани конструкционни стомани).

SD CEN ISO/TS 18166:2016 Numerical welding simulation - execution and documentation (ISO/TS 18166:2016) (**Оригинално заглавие:** СД CEN ISO/TS 18166:2016 Числено моделиране на заваръчни процеси. Изпълнение и документация).

Bergheau J., R. Fortunier. (2008) Finite Element Simulation of Heat Transfer. John Wiley & Sons, Ins..

Dimitrov D., M. Manilova. (2017) *Numerical simulation of austenitic steel welding using a concentrated energy source*. Scientific notices of NTSM, Year XXV, Issue 1 (216), pp. 248-250 (**Оригинално заглавие:** Димитров Д., М. Манилова. (2017) Числено симулиране на заваряване на аустенитна стомана посредством концентриран източник на енергия. Научни известия на HTSM, Година XXV, Брой 1 (216), стр. 248-250).

Draganov I., N. Ferdinandov, D. Gospodinov, R. Radev, S. Mileva. (2019) Numerical simulation of titanium alloy welding by hollow cathode arc in vacuum. Mechanical Engineering & Science, pp 29-33. (**Оригинално заглавие:** Драганов И., Н. Фердинандов, Д. Господинов, Р. Радев, С. Милева. (2019) Числено симулиране на заваряване на титанова сплав чрез електродъгов разряд във вакуум., брой 1, стр. 29-33).

Draganov I., Y. Angelov, S. Mileva. (2018) *Overview of the Feasibility of Simulating Welding Processes Using the Finite Element Method*. University of Ruse, Proceedings Volume 57, book2, Mechanical Engineering and Machine-Building Technologies, pp. 18-23.

Fadaei A., Mokhtari H. (2015) Finite element modeling and experimental study of residual stresses in repair butt weld of st-37 plates. *IJST, Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 39, No. M2, pp 291-307.

Ferdinandov N., D. Gospodinov, M. Ilieva. S. Dimitrov. (2017) *Welding of commercial pure titanium grade 1 by hollow cathode arc discharge in vacuum*. 56-th Science Conference of Ruse University, Bulgaria.

Fu G., C. An, M. Laurenço, M. Duan, S. Estefen. (2012) *Finite element modeling of transient temperature and residual stress distribution analysis in multi-pass welding process*. Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, pp. 1-10.

Goldak J., A. Chakravarti, M. Bibby. (1984) A New Finite Element Model for Welding Heat Sources. *Metallurgical Transactions B*, Vol. 15B, pp. 299-305.

Jayakumar V. (2017) Design and Performance Analysis of Vacuum Arc Welding. *IJIRSET*, Vol. 6, Issue 4, pp. 124-127.

Kazakov N. (1968) Diffusion welding in a vacuum. Engineering, Moscow (**Оригинално заглавие:** Казаков Н. (1968) Диффузионная сварка в вакууме. Машиностроение, Москва).

Milkowska-Piszczyk K., M. Korolczuk-Hejnak. (2013) An Analysis of The Influence of viscosity on The Numerical Simulations of Temperature Distribution as Demonstrated The CC Proces. *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 58, Issue 4, pp. 1267-1274.

Miller H. (1985) A Review of Anode Phenomena in Vacuum Arcs. *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, VOL. PR-13, No. 5., pp.242-252.

Muhtarov I. (2011) Residual stresses in thin stainless steel plates subject to TIG welding BulTrans, Sozopol, pp. 246-249 (**Оригинално заглавие:** Мухтаров И. (2011) Определяне на остатъчните напрежения при заваряване на тънки плочи от неръждаема стомана. BulTrans, Sozopol, pp. 246-249).

Toya H., K. Hieda, T. Saitou. (2006) *Preliminary Study on Arc Welding in Vacuum*. XXIIInd Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, pp. 762-765.