

FRI-1.417-1-MEMBT-02

---

## OVERVIEW OF THE FEASIBILITY OF SIMULATING WELDING PROCESSES USING THE FINITE ELEMENT METHOD<sup>2</sup>

---

**Assist. Prof. Ivo Draganov, PhD**  
Department of Technical Mechanics,  
University of Ruse, Bulgaria  
Phone: 082 888 224  
E-mail: iivanov@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

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

***Abstract:** The present paper examines the possibilities of simulation of welding processes by the finite element method. A historical review was made, starting with the application of the electric arc welding. Retrospectively, the progress of the finite element modeling of welding processes is considered. The latest developments in this area have been described.*

***Keywords:** Finite Element Simulation, Welding Processes*

### ВЪВЕДЕНИЕ

Заваряването е технологичен процес за свързване на детайли чрез стопяване, като за дълъг исторически период, единствен способ за получаване на монолитни съединения е коването. Откриването на електричеството създава предпоставки за намиране на друг източник на топлина, нужен за разтопяване на материалите - електрическата дъга. През 1881-1882 Бенардос и Олжевски, независимо един от друг, разработват способ за съединяване на метални изделия чрез електрическа дъга.

Понастоящем съществуват десетки видове методи за заваряване, които могат да се обособят в две основни групи – термомеханични и термични заваръчни процеси. Към първата група заваръчни процеси се числят електросъпротивителното заваряване, дифузионното заваряване, заваряването чрез триене, ултразвуковото и взривното заваряване. Групата на термичните заваръчни процеси може да се раздели на две подгрупи, в зависимост от това, дали се добавя или не допълнителен материал в заваръчния шев. Към първата подгрупа спадат електродъговото заваряване с обмазани електроди, заваряването с метален стопяем електрод в защитна инертна или активна газова среда (МИГ/МАГ), заваряването под слой от флюс, електрошлаковото заваряване, а към втората подгрупа се отнасят газоокислородното заваряване, заваряване с нестопяем електрод в защитна газова среда (ВИГ), плазменото и лазерното заварявания.

---

<sup>2</sup> Докладът е представен в секция Механика и машиностроителни технологии на 26 октомври 2018 с оригинално заглавие на български език: ПРЕГЛЕД НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА СИМУЛИРАНЕ НА ЗАВАРЪЧНИ ПРОЦЕСИ ПО МЕТОДА НА КРАЙНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ

В настоящата работа се разглеждат термични заваръчни процеси, като от гледна точка на численото им моделиране принципната разлика е единствено, дали се добавя или не материал в заваръчния шев.

При заваряване на детайли, в тях възникват деформации и остатъчни напрежения, които са негативно явление и има стремеж за тяхното минимизиране. Системното им изучаване започва още преди Втората световна война (Boulton 1936).

Аналитичните и емпиричните методи за определяне на остатъчните напрежения и деформации не са особено ефективни и прецизни при приложението им за реални конструкции. Това налага прилагането на числени методи, които бурно се развиват през втората половина на двадесети век и особено след масовото навлизане на компютърната техника.

### **ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ТЕМПЕРАТУРНОТО ПОЛЕ, ОСТАТЪЧНИТЕ НАПРЕЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЗАВАРЯВАНЕ ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕТО НА МЕТОДА НА КРАЙНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ**

Ландау и колектив решават чрез метода на крайните разлики задачата за температурните напрежения като отчитат нелинейните физични и механични характеристики на материала (Landau 1960).

Мощно средство за решаване на сложни инженерни задачи се явява методът на крайните елементи (МКЕ), който се реализира компютърно през 50-те години на ХХ век (Bergheau 2008), (Zienkiewicz 2000), (Zienkiewicz 2000-1). През 1966 година Уилсън и Никел решават задачата за топлопроводността в твърдо тяло (Wilson 1966). Същият проблем се третира в дисертацията на Висер от 1968 г. (Visser 1968). Фундаментални, за моделирането на остатъчните напрежения и деформации при заваряване, са работите на Оден и Кнос (Oden 1968) и Маркал (Margal 1969) решаващи съответно термоеластичната и геометрично и физично нелинейните задачи чрез използването на МКЕ.

Опирайки се на решените през 60-те години проблеми в МКЕ, през 1973 г. Хибит представя модел на заварена конструкция (Hibbitt 1973). Задачата, която решава, има два етапа. В първия се решава задачата за топлообмен, като отчита конвекцията по закона на Нютон и радиацията, чрез закона на Стефан-Болцман. Физичните характеристики са приети за линейни. Като резултат от този етап, получава разпределението на температурата в тялото. Във втория етап се решава задачата за напрегнатото и деформирано състояние, като натоварването е температурното поле от предходния етап. Тялото е свободно подпряно. Приема, че материалът е идеално еласто-пластичен. Той разглежда челно и ротационно-симетрично стоманени съединения, като решава едномерна и двумерна задачи. Използва четири възлови елементи, като решението му не е съпроводено с конкретни натурни изпитания.

През 1975 г. Фридман представя двумерен модел на челно заваръчно съединение, в който се отчитат нелинейните физични и механични свойства на материала (Friedman 1975). Използва биквадратни изопараметрични крайни елементи. При решаването на топлинната задача задава топлинния поток като нормално разпределен. Този въпрос се изследва по-подробно от Голдак (Goldak 1984), като той прави опити с различни функции на топлинния поток: гаусово разпределение, сферична, елиптична и двойно елиптична.

Някои автори, като Линдгрен (Lindgren 1986) и Канас (Canas 1996), решават температурната задача аналитично и задават резултатите за температурното поле като вход за решаване на задачата за напреженията и деформациите чрез МКЕ.

През 80-те години навлизат комерсиалните програми за реализиране на МКЕ. Това дава възможност на по-голям брой изследователи да решават задачата за определяне на напрегнатото и деформирано състояние в заваръчни съединения, отчитайки температурното влияние (Parazoglou 1982). През последните години се използват универсални програми за МКЕ като Ансис (ANSYS) - (Bai 2017), Абакус (ABAQUS) - (Duncheva 2015), Ниса (NISA) – (Yuen 2006), специализирани за заваръчни симулации като Сисуелд (SysWELD) - (Turner

2016) и такива за автоматизирано проектиране, които имат модул за МКЕ като Солидейдж (Solid Edge) – (Stasiuk 2014) и Солидуъркс (SolidWorks) - (Златева 2014).

Възможността за моделиране на заваръчни съединения по МКЕ, като се отчитат възможно най-много от параметрите на заваряване, поставя все по-остро въпросите за достоверността на получаваните резултати и за броя и вида на самите параметри, с които се описва заваръчния процес. Това налага числените симулации да са съпроводени с редица натурни експерименти, реализирани най-често в рамките на изследователския екип. По този начин Карлсон установява, че е целесъобразно да се работи не с пълната, а с ефективната енергия на електрическата дъга, която е определена експериментално (Karlsson 1989).

Непрекъснатото усъвършенстване на компютърната техника и увеличението на възможните изчислителни работи дава възможност за моделиране на многопроходни шевове, както това е направено в работата на Фрии и Гоф (Free 1989) и до решаване на тримерната задача (Karlsson 1990), при което се получава разпределението на температурното поле и напреженията в направлението на движение на температурния източник.

Решаването на пространствената задача налага да се задава движението на топлинния източник, което се реализира от Браун и Сонг (Brown 1992) като се създадат крайни елементи, които се активират при определени условия (“birth and death”). В първоначалния момент, техните характеристики са зададени така, че те не указват влияние върху топлинното и напрегнато-деформираното състояние на конструкцията. При преминаване на дъгата през тях, което е условно, те се активират и се включват в анализа.

Моделирането на остатъчните напрежения и деформации в заваръчни съединения по МКЕ е свързано и с някои неуспехи (Yang 1995) и (Lejeail 1995), дължащи се основно на грешното разбиране за физическата същност на процеса на заваряване.

Решаването на температурната задача дава възможност да се определи заваръчната вана, както това е направено в работите (Friedman 1975), (Shim 1992), (Brown 1992), (Turner 2016).

Най-често влиянието на деформацията върху температурата и на скоростта на деформацията върху напреженията се пренебрегват, но някои автори вземат тези връзки под внимание (Tsirkas 2003).

В стремежа за по реалистично симулиране на заваръчни процес Борсоум и Лундбек моделират заваряването на детайли, като отчитат разстоянието между тях (Barsoum and Lundbäck 2009). Ганън и колектив се интересуват от последователността на заваряване и влиянието ѝ върху остатъчните напрежения и деформации (Gannon 2010).

Степента на функцията на формата за елементите в статичния анализ трябва да е с едно по-висока, от тази на елементите в температурния анализ (Lindgren 2001). За нелинейни задачи се предпочитат линейни елементи и затова се използват линейни елементи и за двата анализа. Квадратните елементи са за предпочитане пред триъгълните.

Освен симулиране на заваряването на различни видове стомана, съществуват изследвания и за други материали, като алуминиеви сплави (Canas 1996), титанови сплави (Turner 2016), мед – (Златева 2014).

Тсиркас и колектив (Tsirkas 2003) се опитват да подобрят материалните модели, отчитайки металургичните процеси водещи до структурни преобразувания, които съществуват в процеса на заваряване. Същата идея е използвана и в работите (Smith 2012) и (Yaghi 2013). Хаинце (Hainze 2012) използва библиотека с материални характеристики от специализирана програма за симулиране на заваръчни процеси - Сисуелд.

Мичеларис и колектив разглеждат проблема за развитие на пукнатина в заваръчно съединение (Michaleris 1997), основавайки се на методите на механика на разрушението. Други автори също работят по този проблем (Barsoum 2009), (Mohamed 2015).

Непрекъснато расте разнообразието и сложността от заварени конструкции, които са предмет на изследване чрез МКЕ (Liang 2005). Най-често, за сравняване на резултатите от симулация чрез МКЕ и експериментални данни се използват челно, Т-образно и тръбно съединения. Някои автори използват и други, като Н-образно в (Lejeail 1995) и Y-образно в (Jiang 2012).

Независимо, че авторите най-често се интересуват от остатъчните напрежения в завареното съединение, често се докладват резултати за температурните полета, зоните на термично влияние, заваръчната вана и преместванията.

Обстоен преглед и анализ на напредъка, свързан със симулирането на заваръчните процеси през XX-ти век, прави Линдгрен в своите работи (Lindgren 2001), (Lindgren 2001-1) и (Lindgren 2001-2). Авторът представя данни за нарастването на обема на изчислителната работа през годините.

Дойнов (Дойнов 2006) описва вижданията си за текущото състояние и перспективите за симулиране на заваръчни процеси за инженерните нужди в България. Всички местни технически университети имат колективи, които се занимават с моделирането на заваряване по МКЕ - (Hristov 1978), (Lazov 2009), (Petrov 2010), (Zlateva 2014), (Duncheva 2015).

## ИЗВОДИ

Интензивното развитие на изчислителната техника обуславя напредъка на алгоритмите и програмите за симулиране на заваръчните процеси.

Симулирането на заваръчни процеси по МКЕ позволява да бъдат получени резултати за формата и размерите на заваръчната вана, зоната на термично влияние, температурното поле, преместванията, заваръчните напрежения и деформации.

Съществуващите комерсиални програми дават възможност за числено симулиране на сложни по конфигурация заварени съединения. Това позволява да бъде изследвано влиянието на параметрите на заваряването като геометрия на заваръчния шев и заваряваните детайли, физическите характеристики на материалите, последователността на заваряване и т.н.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Проведените изследвания и участието в настоящата научна конференция са осъществени с финансовата подкрепа на Фонд научни изследвания към Русенски университет «Ангел Кънчев» по договор № 2018-МТФ-02.

## REFERENCES

Bai R., Z. Guo, Z. Lei. *Prediction of Welding Deformation and Residual Stress of Stiffened Plates Based on Experiments*. 1-st International Workshop on Materials Science and Mechanical Engineering, 281, 2017.

Barsoum Z., A. Lundbäck. (2009). Simplified FE welding simulation of fillet welds - 3D effects on the formation residual stresses. *Engineering Failure Analysis* 16, 2281-2289.

Barsoum Z., I. Barsoum. (2009). Residual stress effects on fatigue life of welded structures using LEFM. *Engineering Failure Analysis*, 16:449-67.

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

Boulton N., L. Martin. (1936). Residual Stresses in Arc Welded Plates, *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, Vol. 133, pp. 295-339.

Brown S., Song H. (1992). Finite Element Simulation of Welding of Large Structures. *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 114, pp. 441- 451.

Canas J., R. Picon, F. Raris, A. Blazquez, J. Marin. (1996). A Simplified Numerical Analysis of Residual Stresses in Aluminum Welded Plates. *Computers & Structures* Vol. 58, No. I, pp. 59-69.

Dojnov N. (2006). Application of numerical simulation in welding. *СЮ*, vol. 9. (**Оригинално заглавие:** Дойнов Н. 2009. Приложение на численото симулиране в заваряването, *СЮ*, бр. 9).

Duncheva G., J. Maximov, N. Ganey, M. Ivanova. (2015). Fatigue life enhancement of welded stiffened S355 steel plates with noncircular openings. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 112, pp. 93-107.

Free J., R. Goff (1989). Predicting residual stress in multipass weldments with the finite element method. *Computer & Structures*, 32(2), pp. 365-378.

- Friedman E. (1975). Thermomechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method. *J. Pressure Vessel Technol* 97(3), 206-213.
- Gannon L., Y. Liu, N. Pegg, M. Smith. (2010). Effect of welding sequence on residual stress and distortion in flat-bar stiffened plates. *Marine Structures* 23, pp. 385-404.
- Goldak J., A. Chakravarti, M. Bibby. (1984). A New Finite Element Model for Welding Heat Sources. *Metallurgical Transactions B*, Vol. 15B, pp. 299-305.
- Hainze C., C. Schwenk, M. Rathmeier. (2012). Numerical calculation of residual stress development of multi-pass gas metal arc welding. *Journal of Constructional Steel Research* 72, pp. 12–19, 2012.
- Hibbitt H., P. Marcal. (1973). A numerical, thermo-mechanical model for the welding and subsequent loading of a fabricated structure. *Computers & Structures*, Vol. 3, pp. 1145-1174.
- Hristov D. Study of temperature, displacements and stresses created by an instant linear welding heat source. Ruse, 1978 (**Оригинално заглавие:** Христов Д. Изследване на температурата, преместванията и напреженията, създавани от мигновен линеен заваръчен източник на топлина. Русе, 1978).
- Jiang J., M. Zhao. (2012). Influence of residual stress on stress concentration factor for high strength steel welded joints. *Journal of Constructional Steel Research* 72, 20–28.
- Karlsson C. (1989). Finite element analysis of temperatures and stresses in a single-pass butt-welded pipe - influence of mesh density and material modelling. *Engineering Computations*, Vol. 6 Iss 2, pp. 133 - 141.
- Karlsson C., B. Josefson. (1990). Three-Dimensional Finite Element Analysis of Temperatures and Stresses in a Single-Pass Butt-Welded Pipe. *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 112, pp. 76-84.
- Landau H., J. Weiner, E. Zwicky. (1960). Thermal Stress in a Viscoelastic-Plastic Plate with Temperature-Dependent Yield Stress. *Journal of Applied Mechanics*, pp. 297-302.
- Lazov L., I. Muhtarov, P. Petrov. (2009). Modeling of Temporary and Residual Stresses and Strains in Arc Welded Joints. *Journal of the Technical University Sofia, branch Plovdiv "Fundamental Sciences and Applications"*, Vol. 14, pp. 173-178.
- Lejeail Y., M. Cabrilat. *Simulation of a stainless steel multipass weldment*. 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, pp. 229-234, 1995.
- Liang W., D. Deng, H. Murakawa. (2005). Measurement of Inherent Deformations in Typical Weld Joints Using Inverse Analysis (Part 2) Prediction of Welding Distortion of Large Structures. *Trans JWRI*, pp.11.
- Lindgren L. (1986). Temperature fields in simulation of butt-welding of large plates. *Communications in Applied Numerical Methods*, Vol. 2, pp. 155-164.
- Lindgren L. (2001). Finite element modeling and simulation of welding part I: Increased complexity. *Journal of Thermal Stresses*, 24:2, pp. 141-192.
- Lindgren L. (2001). Finite element modeling and simulation of welding part 2: Improved material modeling. *Journal of Thermal Stresses*, 24:3, pp. 195-231.
- Lindgren L. (2001). Finite element modeling and simulation of welding part 3: Efficiency and integration. *Journal of Thermal Stresses*, 24:4, pp. 305-334.
- Lejeail Y., M. Cabrilat. *Simulation of a stainless steel multipass weldment*. 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, pp 229-234, 1995.
- Marcal P. *Finite element analysis of combined problems of nonlinear material and geometric behavior*. Pro.: ASME Computer Conf. Computational Approaches Appl. Mech. p. 133, 1969.
- Michaleris P., M. Kirk, W. Mohr, T. McLaughy. (1997). Incorporation of residual stress effects into fracture assessment via the finite element method. In: *Underwood JH, Macdonald BD, Mitchell MR, editors. Fatigue and fracture mechanics. ASTM STP 1321*, vol. 28. American Society for Testing and Materials.
- Mohamed M., Y. Manurung, F. Ghazali, A. Karim. (2015). Finite element-based fatigue life prediction of a load-carrying cruciform joint. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, Vol. 8, pp. 1414-1425.

- Papazoglou V., K. Masubuchi. (1982). Numerical analysis of thermal stresses during welding including phase transformation effects. *J. Press. Ves. Technol. ASME* 104, 198-203.
- Petrov M., I. Barzev. (2010). Mathematical Modeling and Optimization of Stator Plate Geometry in the Plasma Welding Process. *International Scientific Conference Gabrovo*, pp. 221-224 (**Оригинално заглавие:** Петров М., И. Барзев. (2010). Математическо моделиране и оптимизация на геометрията на статорна пластина при процеса плазмено заваряване. *International Scientific Conference Gabrovo*, стр. 221-224).
- Shim B., Z. Feng, S. Lee, D. Kim, J. Jaeger, J. Papritan, C. Tsai. (1992). Determination of Residual Stresses in Thick-Section Weldments. *Welding J*, pp 305-312.
- Smith M., P. Bouchard, M. Turski, L. Edwards, R. Dennis. (2012). Accurate prediction of residual stress in stainless steel welds. *Computational Materials Science* 54, pp. 312–328.
- Stasiuk P., A. Karolczuk, W. Kuczko. (2014). Analysis of non-uniform distribution of the equivalent stress by selected multiaxial fatigue criteria in butt-welded joint. *Acta mechanica et automatica*, vol.8 no.2, pp. 79-82.
- Tsirkas S., P. Papanikos, T. Kermanidis. (2003). Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens. *Journal of Meterials Technology* 134, pp. 59-69.
- Turner R., M. Villa, Y. Sovani, C. Panwisawas, B. Perumal, R. Ward, J. Brooks, H. Basoalto. (2016). An Improved Method of Capturing the Surface Boundary of a Ti-6Al-4V Fusion Weld Bead for Finite Element Modeling. *Metallurgical and Materials Transactions B*, Volume 47, Issue 1, pp. 485–494.
- Oden J., D. Knoss. *Analysis of general coupled thermoelastic problems by the finite method*. Proc. 2nd Co& Matrix Methods Struct. Meek AFFDL, October, 1968.
- Visser W. (1968). *The finite element method in deformation and heat conduction problems*. Ph.D. Thesis, Delft.
- Wilson E., R. Nickell. (1966). Application of the finite element method to heat conduction analysis. *Nuclear Engng Design* 4, 276-286.
- Yaghi A., T. Hyde, A. Becker, W. Sun. (2013). Finite element simulation of residual stresses induced by the dissimilar welding of a P92 steel pipe with weld metal IN625. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, pp. 1-14.
- Yang L., Z. Xiao. (1995). Elastic-plastic modelling of the residual stress caused by welding. *Journal of Materials Processing Technology* 48, pp. 589-601.
- Yuen B., F. Taheri, M. Gharghour. (2006). Fatigue life prediction of welded stiffened 350WT steel plates. *Marine Structures* 19, pp. 241-270.
- Zlateva P., K. Jordanov, A. Stoyanova, G. Antonov. (2014). Theoretical-experimental study of thermal processes in TIG welding ( $\sim 41$ ) of copper plates. *Nauchni izvestiya na NTSM*, Year XXII, vol. 1 (150), pp. 420-423 (**Оригинално заглавие:** Златева П., К. Йорданов, А. Стоянова, Г. Антонов. 2014. Теоретико-експериментално изследване на топлинните процеси при ВИГ (141) заваряване на медни пластини. *Научни известия на НТСМ*, Година XXII, брой 1 (150), стр. 420-423).
- Zienkiewicz O., R. Taylor. (2000). *The Finite Element Method. Volume 1: The Basis*. Butterworth-Hainemann.
- Zienkiewicz O., R. Taylor. (2000). *The Finite Element Method. Volume 2: Solid Mechanics*. Butterworth-Hainemann.