

NUMERICAL SIMULATION OF LASER BEAM WELDING APPLIED TO POLYMERS¹

Assist. Prof. Ivo Draganov, PhD

Department of Technical Mechanics,

University of Ruse, Bulgaria

Phone: 082 888 224

E-mail: iivanov@uni-ruse.bg

Abstract: A numerical model of laser welding of a polymer joint has been created. The nonlinear properties of the material are taken into account. The model includes convective and radiative heat transfer. The heat flux generated by the laser source is defined as volume-distributed by a Goldac function, which is a double ellipsoid. Results were obtained for the temperature field, displacements, strains and stresses, under different welding modes. A study was performed for convergence of the obtained results.

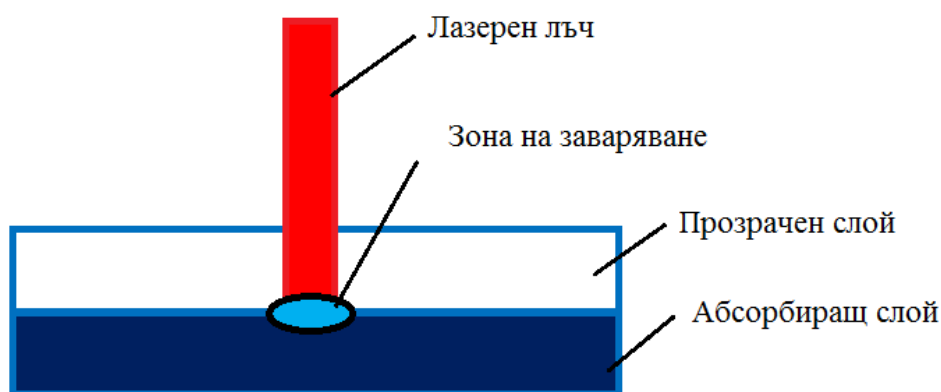
Keywords: Laser beam welding, Numerical modelling, FEM, Polymer, Goldac function

ВЪВЕДЕНИЕ

Лазерното заваряване на полимери е все по-широко разпространяващ се технологичен процес, който намира приложение при производство на светлини за автомобили, корпуси на електронни устройства, в медицинската техника (Russek 2003), (Cherdron 2004), (Grewell 2003), (Chen 2005). Реализира се чрез лазерен лъч на основата на CO₂, Nd:YAG, диоди или оптически влакна (fiber laser).

Материали, за които този метод е приложим, са найлон, полипропилен, поликарбонат, полистерен, АБС (акрилонитрил-бутадиен-стирен), политетрафлуоретилен (известен с търговското си наименование Тефлон), полиметилметакрилат (известен с търговското си наименование Плексиглас).

В настоящата работа се разглежда заваряването на два слоя полимери – фиг. 1, горният, от които е прозрачен и пропуска лазерния лъч, а долния абсорбира енергията от лъча и това води до повишаване на температурата над тази на втечняване (Mayboudi 2007), (Olowinsky 2012), (Ge 2013), (Normann 2016). В резултат на топлопренасянето между двата слоя, се нагрява и прозрачния слой. Това води до образуването на споделена втечнена зона, която след изстиване осигурява свързаността на двата детайла (Frewin 1999).



Фиг. 1. Схема на процеса

¹ Докладът е представен в секция Механика и машиностроителни технологии на 13-ти ноември 2020 с оригинално заглавие на български език: ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ НА ЛАЗЕРНО ЗАВАРЯВАНЕ НА ПОЛИМЕРИ.

Редица автори създават числени модели на разпределение на температурното поле (Haire 2001), (Mayboudi 2007), (Ho 2008), (Normann 2016) като изхождат от разбирането за симетрично разпределение на топлината в двата слоя. Някои изследователи пренебрегват физичната нелинейност на задачата, други не вземат под внимание конвективния и радиационния топлообмен. Голяма част от изследователите се интересуват от зоната, в която температурата надвишава тази на втечняване, като същевременно следят тя да не надхвърля температурата на деградация на полимера. Съществуват работи, в които лазерния лъч е неподвижен, като той може да е с различна форма.

Целта на настоящата работа е да се създаде числен модел на заваряването на поликарбонат с помощта на метода на крайните елементи, чрез който да се отчетат физичната нелинейност на материала, при подвижен лазерен лъч, моделиран като обемно разпределен източник на топлина. Чрез така получения модел да се определят разпределението на температурното поле и разпределението на остатъчните деформации и напрежения.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Топлинна задача

Разглежда се задача за нестационарен топлообмен, описван чрез закона за топлопроводността на Фурие:

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

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.

Конвективният топлообмен се описва чрез закона Нютон:

$$q_c = h(T_s - T_0), \quad (2)$$

където T_s и T_0 са съответно температурата на повърхността на тялото и определящата температура на въздуха, а h е Нютоновия коефициент.

Лъчистият топлообмен се описва чрез закона на Стефан-Болцман:

$$q_r = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_0^4), \quad (3)$$

където ε е коефициента на чернота, а σ е константата на Стефан-Болцман.

Началната температура на тялото и на околната среда е:

$$T(\mathbf{x}, t = 0) = 27^\circ\text{C}. \quad (4)$$

Лазерния лъч е зададен като обемен източник на топлина в абсорбиращия слой:

$$q_l = \begin{cases} 0 & \text{— прозрачен слой} \\ (1 - R_a)Kq(\mathbf{x}, t) & \text{— абсорбиращ слой} \end{cases} \quad (5)$$

където с R_a е отбелязан коефициента на отражение на абсорбиращия материал, K е коефициента на абсорбция, \mathbf{x} е вектора с координатите, а t е времето.

Тъй като законът на Буге-Ламберт-Беер (Siegel 1992), описващ поглъщането на светлината, е експоненциален, то за разпределението на топлината от лазерния лъч са използвани две функции. Едната е гаусово разпределение (Lindgren 2007):

$$q = \frac{T_t P}{\pi r_0^2} \exp\left(-c_g \frac{r^2}{r_0^2}\right), \quad (6)$$

където T_t е трансмисионния коефициент, P е мощността на лазера, r_0 е радиуса на лазера, c_g е коефициента на наклона на гаусовата функция, а r — текущ радиус, определян от координатите в равнината на заваряване.

Втората функция на разпределение на топлинния поток е двоен елипсоид на Голдак (Goldak 2005), (Flint 2017):

$$q(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}f_f T_t P}{a_f c_b \pi^{3/2}} e^{-3x^2/c^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3\xi^2/a_f^2}, \quad (7a)$$

описваща топлинния поток в предната част на полето и

$$q(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}f_r T_t P}{a_r c_b \pi^{3/2}} e^{-3x^2/c^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3\xi^2/a_r^2}, \quad (7b)$$

описваща топлинния поток в задната част на полето. В последните две уравнения са използвани означенията: ξ за подвижната координата в посока на заваряването, a_r и a_f за размера на заваряваната зона преди и след центъра на топлинния поток, b е ширината, а c е дълбочината на заваряваната зона, f_f и f_r са плътностите на топлинния поток преди и след центъра.

Деформационна задача

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

$$\varepsilon_{ij}^{(T)} = \alpha(T - T_0)\delta_{ij}, \quad (8)$$

където α е коефициента на температурно разширение, а δ_{ij} е делта функцията на Кронекер.

Температурната деформация участва в уравнението за изменението на общата деформация

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{(E)} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{(P)} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{(T)}, \quad (9)$$

където $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(E)}$ и $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(P)}$ са измененията на еластичната и пластичната деформации (Bathe 2006).

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

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{ij}, \quad (10)$$

където C_{ijkl} е тензора с материалните характеристики.

Определянето на остатъчните деформации и напрежения е извършено чрез използването на критерия на Друкер-Прагер (Drucker 1952), който е подходящ за полимери:

$$f(\sigma_{ij}) = J + \sigma_H \operatorname{tg}(\beta) - k, \quad (11)$$

където β е ъгъла на триене за материала, k е кохезията на материала, σ_H е напрежението в меридианната равнина, а J се определя по зависимостта

$$J = \frac{1}{2}D \left[1 + \frac{1}{L} - \left(1 - \frac{1}{L} \right) \left(\frac{r}{D} \right)^3 \right]. \quad (12)$$

В последната зависимост с D е означена дисторсията, а с L – съотношението между границата на провлачване на опън и натиск.

Крайноелементен модел

Решаването на задачата за нестационарен топлообмен по метода на крайните елементи става чрез матричното уравнение (Bergheau 2008)

$$[C] \cdot \{\dot{T}\} + [K_T] \cdot \{T\} = \{F\}, \quad (13)$$

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

$$\{\dot{T}(t + \Delta t)\} = \frac{\{T(t + \Delta t)\} - \{T(t)\}}{\Delta t}, \quad (14)$$

където Δt е инкремента във времето.

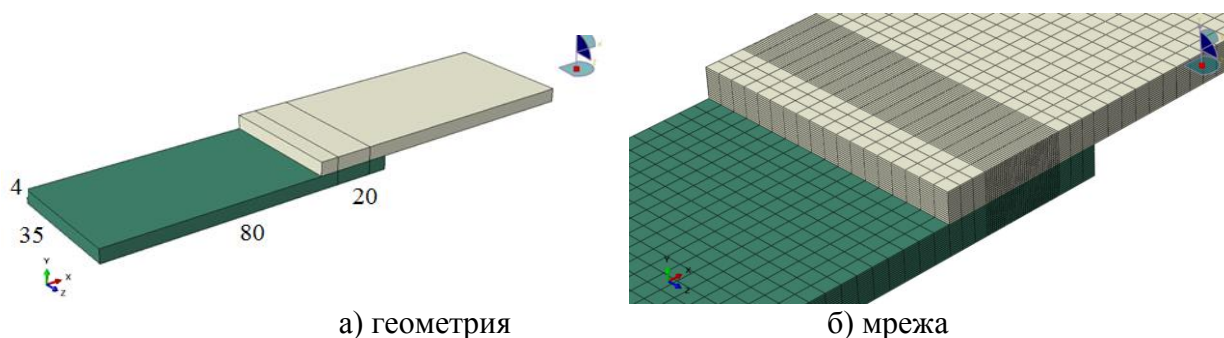
Задачата за напрегнатото и деформирано състояние се решава чрез матричното уравнение

$$[K_f] \cdot \{U\} = \{P_M\} + \{P_T\}, \quad (15)$$

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

Създаден е компютърен модел в средата на програма Абакус (ABAQUS), като са използвани данни от работата на Ачержий (Acherjee 2012). Построена е геометрията – фиг. 2а и е извършена дискретизация с осемвъзлови хексаедърни крайни елементи C3D8T – фиг. 2б. Времето за заваряване е 1,4 s.



Фиг. 2. Геометричен модел и дискретизация на заваряваните детайли

Параметрите на граничните условия са дадени в таблица 1. За реализиране на подвижен топлинен източник в Абакус е създадена подпрограма – DFLUX. Закрепването е реализирано по късата страна на абсорбиращото тяло.

Материалните характеристики за поликарбонат са дадени в таблица 2. Константата на Стефан-Болцман е $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ kg/m}^3\text{K}^4$, а за температурата на втечняване е приета 145°C . Параметрите на модела на Друкер-Прагер са дадени в таблица 3.

Таблица 1. Параметри на граничните условия

Параметър	Мерна единица	Стойност
Температура на околната среда	$^\circ\text{C}$	27
Мощност на лазера	W	100
Нютонов коефициент	$\text{W/m}^2\text{K}$	5
Коефициент на чернота	-	0,92

Таблица 2. Материални характеристики

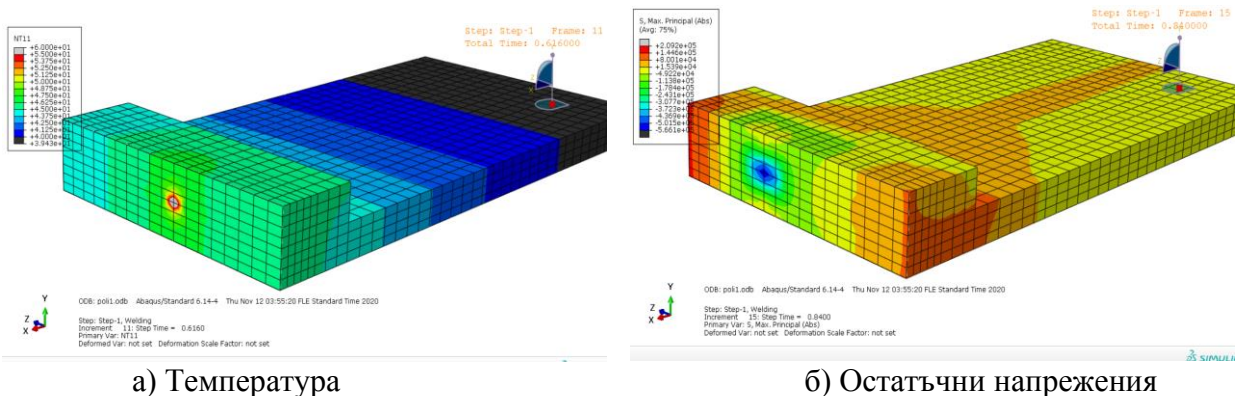
Материална характеристика	Температурен интервал	Температура, $^\circ\text{C}$	Стойност
Плътност, kg/m^3	от 27°C до 145°C	27	1198
		145	1161
	над 145°C	150	1104
Специфичен топлинен капацитет, J/kg.K	от 27°C до 140°C	400	933
		27	1213
	от 141°C до 147°C	140	1599
		141	1625
Коефициент на топлопроводност, W/m.K	от 27°C до 145°C	147	1789
		148	1800
	над 148°C	400	2246
Модул на еластичност, МРа	от 27°C до 145°C	27	0,19273
		145	0,22215
	над 145°C	150	0,22171
		400	0,20788
Коефициент на Поасон, -	до 140°C	20	1832
		140	1838
	от 140°C до 150°C	150	2
Коефициент на линейно температурно разширение, K^{-1}	над 150°C	400	2
		от 27°C до 400°C	-
	от 27°C до 400°C	-	$1,11 \cdot 10^{-4}$

Таблица 3. Параметри на модела на Друкер-Прагер

Параметър	Стойност
Ъгъл на триене на материала	32
Съотношението между границата на провлачване на опън и натиск	1
Дилатационен ъгъл	0

Резултати

Получени са резултати за температурното поле – фиг. 3а, и остатъчните напрежения – фиг. 3б.



а) Температура

б) Остатъчни напрежения

Фиг. 3. Резултати

Параметричен анализ

Извършена е проверка за сходимостта на решението от дискретизацията на пространството – таблица 4 и на времето – таблица 5. Използвано е локално сгъстяване на мрежата, като в колоната от таблица 4 с големината на елементите, стойността пред наклонената черта показва размера на елементите в отдалечените зони, а стойността след нея – големината на елементите в зоната на заваряване. Решенията от таблица 5 са извършени при дискретизация с големина на елементите в зоната на заваряване 1 mm.

Всички изчисления са извършени на преносим компютър с процесор Интел i3-7130U. В последната колона на таблици 4 и 5 е дадено времето за работа на системата.

Изследвано е влиянието на коефициента на наклона при гаусово разпределение (фиг. 4) на топлинния поток – таблица 6 и коефициентите на формата и плътността на топлинния поток при двоен елипсоид – таблици 7 и 8.

Таблица 4. Влияние на дискретизацията на пространството при гаусово разпределение

Решение	Големина на елементите, mm	Максимална температура, °C	Разлика спрямо предното решение, %	Максимално главно напрежение, МПа	Разлика спрямо предно решение, %	Време за изчисление, s
1	2	301	-	2,698	-	83
2	2/1	319	5,98	3,069	13,8	231
3	2/0,5	316	-0,94	3,294	7,3	768
4	2/0,25	316	0,00	3,368	2,2	3929

Таблица 5. Влияние на дискретизацията на времето при гаусово разпределение

Решение	Брой на стъпките във времето, бр.	Максимална температура,	Разлика спрямо предно решение	Време за изчисление, s
1	25	319	-	231
2	50	282,2	-11,54	392
3	100	248	-12,12	719

Таблица 6. Влияние на коефициента на наклона при гаусово разпределение

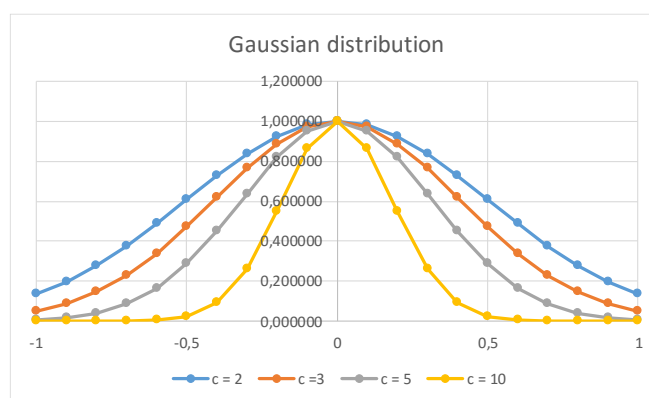
Решение	Коефициент на наклона (c_g), -	Максимална температура, °C	Максимално главно напрежение, МПа
1	2	387,50	4,22
2	3	319,00	3,069
3	5	272,13	2,609
4	10	244,21	2,293

Таблица 7. Влияние на съотношението между размерите a_f и a_r

Решение	Относителен дял на a_f	Максимална температура, °C	Максимално главно напрежение, МПа
1	0,1	244,87	2,279
2	0,2	307,7	3,032
3	0,4	358,7	3,182
4	0,6	350,2	3,557

Таблица 8. Влияние на съотношението между коефициентите на плътността f_f и f_r

Решение	Относителен дял на f_f	Максимална температура, °C	Максимално главно напрежение, МПа
1	1,2	315,3	3,121
2	1,4	311,1	3,076
3	1,6	307,7	3,032
4	1,8	303,9	2,9875



Фиг. 4. Коефициент на наклона при гаусово разпределение

ИЗВОДИ

Получените резултати за разпределението на температурата съответстват на представените от други автори.

Влиянието на дискретизацията на времето е по-ясно изразено от това на дискретизацията на пространството.

Задаването на лазерния лъч като гаусово разпределен топлинен поток води до по-широки граници на получаваните резултати от тези при двойния елипсоид на Голдак.

При използване на двоен елипсоид на Голдак, влиянието на съотношението на преден-заден елипсоид е по-голямо от влиянието на плътността на разпределение на топлинния поток, в тези зони.

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 No 2020 – МТФ – 02 „СЪЗДАВАНЕ НА ОПТИМИЗАЦИОННИ АЛГОРИТМИ ЗА МЕХАНИЧНИ, ТЕРМИЧНИ И ТЕРМОМЕХАНИЧНИ ЧИСЛЕНИ МОДЕЛИ“.

REFERENCES

- ABAQUS. Analysis User's Manual. ver. 6.14, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- Acherjee B., A. Kuara, S. Mitraa, D Misra. (2012). Modeling of laser transmission contour welding process using FEA and DoE. *Optics & Laser Technology* 44, 1281–1289.
- Bathe K. (2006). *Finite Element Procedures*. Prentice-Hall, Pearson Education, Inc.
- Bergheau J., R. Fortunier. (2008). *Finite Element Simulation of Heat Transfer*. John Wiley & Sons, Ins.
- Chen, J. W., Zybko, J. (2005). Diode Laser Bonding of Planar Microfluidic Devices, Moems, Biomems, Diagnostic Chips and Microarrays. *Proc. SPIE*, 5718, pp. 92–98.
- Cherdron, M. (2004). Industrial Applications for Laser Welding of Plastics. SPE, ANTEC, pp. 1261–1264.
- Drucker, D. C. and Prager, W. (1952). *Soil mechanics and plastic analysis for limit design*. Quarterly of Applied Mathematics, vol. 10, no. 2, pp. 157–165.
- Flint T., J. Francis, M. Smith, J. Balakrishnan. (2017). Extension of Double-Ellipsoidal Heat Source Model to Narrow-Groove and Keyhole Weld Configurations. *Journal of Materials Processing Technology*, pp 1-28.
- Frewin M., D. Scott. (1999). Finite Element Model of Pulsed Laser Welding. *Welding Research Supplement*, pp. 15-22.
- Ge T., F. Pierce, D. Perahia, G. Grest, M. Robbins. (2013). Molecular Dynamics Simulations of Polymer Welding: Strength from Interfacial Entanglements. *Phys. Rev. Lett.* 110, 098301.
- Goldak J., M. Akhlaghi. (2005). *Computational Welding Mechanics*. Springer.
- Grewell, D., Benatar, A. (2003). Experiments in Micro-Welding of Poly-carbonate With Laser Diodes. SPE, ANTEC, pp. 1039–1044.
- Haire K., A. Windle. (2001). Monte Carlo simulation of polymer welding. *Computational and Theoretical Polymer Science* 11, pp. 227–240.
- Ho C., M. Wen, C. Ma. (2010). *Computer Simulation for Laser Welding of Thermoplastic Polymers*. Second International Conference on Computer Engineering and Applications, pp. 362-364.
- Hopmann C., S. Kreimeier. (2016). Modelling the Heating Process in Simultaneous Laser Transmission Welding of Semicrystalline Polymers. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Polymers*, Volume, pp. 1-11.
- Lindgren L. (2007). *Computational Welding Mechanics. Thermomechanical and microstructural simulation*. Woodhead publishing Limited, Cambridge, England.
- Mayboudi L, A. Brik, G. Zak, P. Bates. (2007). Laser Transmission Welding of a Lap-Joint: Thermal Imaging Observations and Three-Dimensional Finite Element Modeling. *Journal of Heat Transfer*, Vol. 129, pp. 1177-1186.
- Olowinsky A., A. Rösner. (2012). Laser Welding of Polymers. Established process but still not at its best. *Plastics welding LTJ*, No. 2, pp. 52-56.
- Rusek, U.-A., Poggel, M., Otto, G., and Koeppel, A. (2003). Advances in Laser Beam Welding of Polymers and Automotive Prospects. Proceedings of the 9th International Conference: TPOs in Automotive, pp. 51–60.
- Siegel, R., and Howell, J. R. (1992). *Thermal Radiation Heat Transfer*, 3rd ed., Taylor and Francis, London, UK.