
OPPORTUNITIES FOR HEAT TREATMENT PROCESSES SIMULATOIN⁶

Iliyan Danev, PhD Student

Department of Materials Science & Technology,
“Angel Kanchev” University of Ruse, Bulgaria
E-mail: idanev@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Danail Gospodinov, PhD

Department of Materials Science & Technology,
“Angel Kanchev” University of Ruse, Bulgaria
E-mail: dgospodinov@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Rossen Radev, PhD

Department of Materials Science & Technology,
“Angel Kanchev” University of Ruse, Bulgaria
E-mail: rradev@uni-ruse.bg

Abstract: The article describes some new opportunities to simulate heat treatment processes in the industry. Different software packages and procedures are considered in the paper. The advantages and disadvantages of the actual solutions are indicated. Examples of using in industrial practice also are pointed.

Keywords: Heat treatment, Modelling and simulation, Microstructure prediction

ВЪВЕДЕНИЕ

Термичното обработване е технологичен подход за обработване на материалите чрез топлинно въздействие. Това е най-често използвания метод за промяна на структурата на материалите, с цел получаване на подходящи свойства, гарантиращи надеждната и продължителна работа на изделията. Поради голямото разнообразие на детайли по отношение материал, форма, размери, условия, при които те работят (определящи изискванията към техните механични свойства) съществува и голямо разнообразие от термични операции и процеси гарантиращи получаването на желана, предварително избрана структура. Спецификата на процесите протичащи в материалите при нагряване и охлаждане е предпоставка формирането на окончателното структурно състояние да е съпроводено с протичането на процеси, оказващи негативно влияние върху качеството на термообработваните изделия. Най-често отклоненията в качеството, при правилно избрани параметри на останалите преходи на нагряване и задържане, се развиват в последния преход на термично обработване, а именно в прехода на охлаждане. Причините за това са свързани с необходимостта този преход да удовлетворява две противоречащи си изисквания, а именно формиране на желаната структура при гарантиране на ниски нива на остатъчните напрежения. При големи скорости на охлаждане, свързани с необходимост от получаване на неравновесни структури, изпълнението на тези две изисквания се гарантира с правилен и компетентен избор на охлаждаща среда и условия на охлаждане. Сложността на задачата произтича от факта, че действителната скорост на охлаждане не се определя само от вида на избрания охладител, но и от условията, при които той работи, материала, формата, размерите, начина на подреждане на изделията, наличието на приспособления и др. фактори. В редица случаи скоростта на охлаждане на изделието и разпределението на температурните полета в него са неизвестни и правилният избор на условия на охлаждане се определя по аналогия от подобни технологични

⁶ Докладът е представен в секция Механика и машиностроителни технологии на 25 октомври 2019 с оригинално заглавие на български език: ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА СИМУЛИРАНЕ НА ПРОЦЕСИ НА ТЕРМИЧНО ОБРАБОТВАНЕ

решения за термично обработване. Познаването на изменението на температурата в охлаждащите изделия би довело до възможност за обоснован избор на охлаждаща среда и значително намаляване на вероятността от възникване на отклонения в качеството след термично обработване. Известните подходи за изследване на изменението на температурата в процеса на охлаждане се основават на: непосредствено измерване на температурата в охлаждащите обекти; симулиране на процесите на охлаждане.

Непосредственото измерване на температурата има няколко съществени недостатъка – измерването става в една или няколко избрани точки от изделието, при което получаваме локални стойности за нея; изисква се нарушаване на целостта на изделието, за поместване в него на средствата за измерване; за да се получи информация за структурната картина след термично обработване получените за температурата стойности трябва да се наложат върху термокинетичните диаграми на разпадане на преохладения аустенит за използвания материал.

От друга страна симулирането на процеса на охлаждане създава възможност за определяне на температурата във всяка материална точка от симулираните обекти във всеки момент от охлаждането (Busetti, F., 2003; Chotěborský, R., 2015; Fabian, P., 2017; Lee, S., 2010; Lingamanaik, N., 2011; Mackerle, J., 2003; Mahnken, R., 2011; Risso, J., 2001; Rohde, J., 2000; Simsir, C., 2008; Srinivasan, V., 2010; Stavrev, D., 2012; Trzaska, J. 2013). Като по-важни предимства на симулирането на топлинните процеси (при нагряване или охлаждане) могат да се отбележат:

- съкращаване на времето за проектиране на даден технологичен процес, както и по-добро осмисляне на параметрите на процеса;
- лесна и бърза промяна на симулираните технологични параметри и на геометрията на изследваните (симулираните) тела;
- дава възможност за бързо проиграване на различни варианти на технологичният процес;
- намалява броя на неуспешните резултати от типа „проба – грешка“;
- намалява времето за проектиране;
- подобрява качеството на изделията.

Тук трябва да се отбележат и някои недостатъци на предлаганите на пазара софтуерни продукти за симулиране:

- разходи за закупуване на софтуер и обучение;
- достоверност на получените чрез симулиране резултати;
- ненадеждност на входните данни от литературни източници;
- необходимост от сериозен изчислителен ресурс, особено при голямогабаритни изделия и изделия със сложна форма.

Последният недостатък до скоро ограничаваше използването на симулирането при разработване на нови и оптимизиране на вече съществуващи производствени процеси. Съвремените средства за извършване на изчисления в големи обеми позволиха масовото навлизане на процесите на симулиране в инженерната практика. Като резултат в последните години се наблюдава създаването на множество софтуерни продукти за симулиране на производствени процеси.

Основна цел на доклада е проучване, анализиране и класифициране на съществуващи решения (под формата на софтуерни продукти) свързани с възможности за симулиране на термични процеси и формулиране на препоръки за тяхното използване.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Анализа на съществуващите решения за симулиране на процеси на термично обработване показва, че съвремените софтуерни продукти не се ограничават само до получаване на резултати свързани с разпределението на температурното поле в обема на изделията във функция от времето. Въз основа на получените за температурата резултати разглежданите продукти могат да предоставят и допълнителна информация, най-често свързана с: структура, механични свойства, напрежения, деформации и др.

Същевременно симулирането на топлинни процеси притежава и някои особености, които до голяма степен определят ограниченията при неговото използване и коректността на получаваните резултати:

- Необходимост от познаване на топлофизичните константи на материала в използвания температурен интервал;
- Необходимост от познаване на характеристиките на охлаждащата среда по отношение на способността ѝ да извлича топлина от нагрятия обект (коректно определен коефициент на топлопредаване (heat transfer coefficient HTC));
- Необходимост от експериментално потвърждаване на получените от симулациите резултати.

Коректното пресмятане на изменението на температурата във функция от времето е от първостепенно значение за верността на получаваните резултати. Всички останали възможности на софтуерните продукти (табл.1), свързани с предсказване на микроструктура, механични свойства, напрежения и др. зависят от резултатите за изменение на температурата. Поради тази причина всички фактори, водещи до създаване на предпоставки за некоректно определяне на температурните полета във времето трябва да бъдат взети под внимание. Най-голямо влияние върху получаваните резултати оказва коефициента на топлопредаване (Heat Transfer Coefficient), който определя топлинното взаимодействие между нагретия обект и охлаждащата среда. Този коефициент е температурно зависим, като стойностите му могат да се изменят в много голям интервал, в зависимост не само от температурата, но и от вида на охладителя, размерите и формата на охлаждаемия обект и др. фактори (Draganov, I., 2018; Draganov, I. & Radev, R., 2018; Hardin, R., 2011; Krustev, Kr., 2010; Liščić, B., 2010; Ramírez-López, A., 2010; Sanchez Sarmiento, G., 2011; Smoljan, B., 2005).

Познаването на разпределението и изменението на температурата в целия обем при нагряване и охлаждане дава възможност за оптимизиране на процесите на термично обработване от гледна точка на тяхната себестойност и повишаването на качеството на термообработваните изделия. Това може да се реализира чрез обосноваване от получените от симулацията резултати промяна на технологичните параметри (скорости на нагряване и охлаждане, времена за задържане при високи температури и др.).

Класификация на продуктите за симулиране на топлинни процеси може да се извърши по много признаци. В работата те са квалифицирани според тяхната универсалност и според тяхното приложение. Според универсалността си тук те са разделени на:

- софтуерни продукти за автоматизирано проектиране: SolidWorks, AutoCAD и др. CAD/CAM/CAE продукти, които разполагат с модули даващи възможност за извършване на симулации на топлинни процеси;
- софтуерни продукти, най-често работещи по метод на крайните елементи: ANSYS, ABAQUS, COMSOL и др., при които могат да се извършват различни видове симулации, в зависимост от нуждите на потребителя.

Характерна особеност и на двете групи софтуерни продукти, е че резултатите от тях се ограничават до симулиране на разпределението на температурните полета в процеса на нагряване или охлаждане, без тези резултати да се обвързват със структурни промени, механични свойства и др.

Според втория признак (приложението) могат да бъдат разделени на:

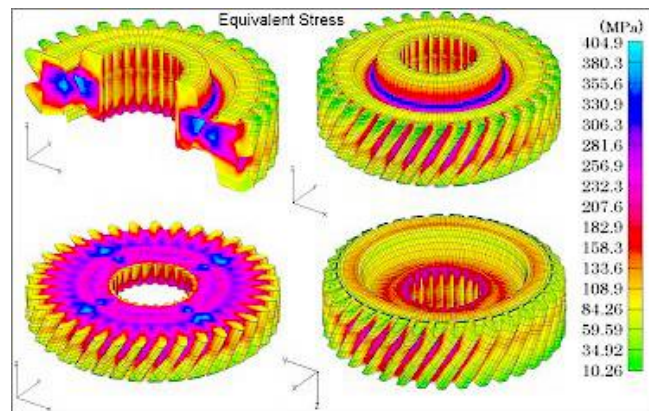
- технологични (в помощ на инженерната практика) – тези софтуерни продукти са по-специализирани и са ориентирани към симулиране на различни технологични процеси (леене, заваряване, пластично деформиране, термично обработване, рязане и др.), като дават допълнителна информация, свързана с особеностите на съответния технологичния процес;
- изследователски (научно – развойни) – тук отново попадат софтуерните продукти според класификацията по-горе – ANSYS, ABAQUS, COMSOL.

Таблица.1 Възможности на софтуерните продукти, разглеждани в работата (www.qform3d.com, wildeanalysis.co.uk, www.ita-tech.cz, www.ideamap.co.jp, www.thermocalc.com, www.sentessoftware.co.uk, www.simufact.com, whhttp://kimeca.com.mx)

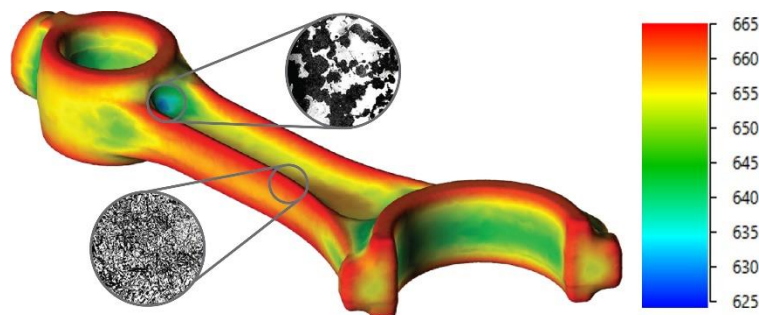
Възможности	Софтуерни продукти						
	Simufact	Qform 3d/2d	Deform	Dante	Jmatpro	Cosmap	QTSteel
Фазови превръщания при нагряване и охлаждане	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Определяне на количество и разпределение на получаваните равновесни/ неравновесни фази (структури)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Предсказване на механични свойства (твърдост, якост)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Прогнозиране на напрежения и деформации	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Определяне на вероятността за образуване на пукнатини при закаляване	✓	✓			✓		✓
Предсказване на размери на структурните съставляващи	✓		✓				
Прогнозиране на химични свойства	✓				✓		
Възможност за работа със сплави на	Fe, Al, N Mg, Cu, и др.	Fe	Fe	Fe	Fe, Al, Ni, Mg, C, и и др	Fe	Fe
Симулиране на процеси на химико-термично обработване	✓	✓					

Обект на разглеждане в настоящата статия са технологичните софтуерни продукти за симулиране на процеси на термично обработване. Информация относно възможностите на част от предлаганите на пазара софтуерни решения е показана в табл.1. От нея се вижда, че всички разглеждани продукти разполагат с възможност за предсказване на вида на получаваните структури в целия обем на симулираните обекти, както и процентното им съотношение. Въз основа на предсказаните структури се получават и прогнозни резултати за механичните свойства, като най-често те се ограничават до твърдост и якост на опън. Всички разглеждани продукти разполагат също и с възможност за прогнозиране на възникващите в процеса на обработване напрежения и предизвикваните от тях деформации, а някои от тях могат да предсказват вероятността от възникване на пукнатини. В част от разглежданите продукти са налице възможности за предсказване на размерите на получаваните структурни съставляващи. Възможно е и симулиране на процеси на насищане с различни елементи, най-често въглерод и азот, както и симулиране на процеси на повърхностно високоскоростно нагряване (www.simufact.com; www.transvalor.com).

На фиг.1 и 2 са показани резултати от симулиране на процеси на термично обработване, свързани с предсказване на разпределението и големината на възникващите напрежения (фиг.1) и с вида на получаваните структури и разпределението на твърдостта в обема на различни изделия (фиг.2)



фиг.1. Разпределение на напреженията в симулираният обект
(<http://www.ideamap.co.jp>)



Фиг.2. Разпределение на предсказаната твърдост след закаляване (показаните стойности са по Викерс)(www.qform3d.com)

ИЗВОДИ

1. Към настоящи момент на разположение са голямо разнообразие от технологични софтуерни продукти за термично обработване, като тук, поради ограничения обем, са разгледани само част от тях.
2. Разгледаните продукти предлагат възможности свързани с предсказване на микроструктура, механични свойства, напрежения и деформации, имащи пряко отношение към качеството на термообработваните обекти.
3. Разгледаните продукти са близки по възможности, като съществуват и такива предлагащи по-специфични решения например за реализиране на процеси на насищане или високоскоростно, повърхностно нагряване.
4. Основна предпоставка за достоверно предсказване на структурата и свойствата на изделията след термично обработване е коректното въвеждане на входните за симулациите данни. Тук от първостепенно значение е коректното определяне на коефициента на топлопредаване (НТС).
5. Разгледаните продукти нямат ограничения по отношение на форма и размери на симулираните обекти. Съществуват ограничения по отношение на вида на материала, свързани със съпътстващите продукта бази данни за температурно зависещите константи. При липса на такива е налице възможност за тяхното ръчно въвеждане и обогатяване на базите данни на продуктите.

REFERENCES

- Busetti, F. (2003). Simulated annealing overview. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.66.5018&rep=rep1&type=pdf>. (Accessed on 29.09.2019).
- Chotěborský, R., Linda, M. (2015). Predictions of mechanical properties of quench hardening steel. *Scientia agriculturae bohémica*, 46(1), 26-32.
- Draganov, I., Gospodinov, D. (2018). Experimental data and simulation by the finite element method of the cylindrical steel shaft quenching in water. *International scientific journal 'Materials science non-equilibrium phase transformations'*, Year IV, Issue 3, pp. 96-98, ISSN 2367-749X.
- Draganov, I., Gospodinov, D., & Radev, R. (2018). Numerical modeling and experimental data for copper sphere cooling. *Journal of Thermotechnics*, 13, 18-23, ISSN 1314-2550.
- Fabian, P., Meško, & J., Nikolić R. (2017). Simulation of Quenching Process of Steels Creating Complex Carbides. *FME Transactions*, 45(4), 510-516.
- Hardin, R. (2011). Three dimensional Simulation of heat transfer and stresses in a steel slab caster. *Proceedings of the 4th International Conference on Modeling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking*, Paper No. STSI-71, Steel Institute VDEh, Düsseldorf, Germany.
- Krustev, Kr., Gospodinov, D., & Danev, Pl. (2010). Cooling Modeling and Simulation of Rotary Symmetric Steel Parts During Quenching, 19th International Conference on Metallurgy and Materials, METAL'2010, Roznov pod Radhostem, Czech Republic.
- Lee, S., Pavlina, E., & Van Tyne, J. (2010). Kinetics modeling of austenite decomposition for an end-quenched 1045 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 527(13-14), 3186-3194.
- Lingamanaik, N., Chen, C. (2011). Thermo-mechanical modelling of residual stresses induced by martensitic phase transformation and cooling during quenching of railway wheels. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(9), 1547-1552.
- Lišić, B., Singer, S., & Smoljan, B. (2010). Prediction of Quench-Hardness within the Whole Volume of Axially-Symmetric Workpieces of any Shape. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 56(2), 104-114.
- Mackerle, J. (2003). Finite element analysis and simulation of quenching and other heat treatment processes. *Computational Materials Science*, 27(3), 313-332.
- Mahnken, R., Schneidt, A., & Tschumak S., Maier H. J. (2011). On the simulation of austenite to bainite phase transformation. *Computational Materials Science* 50(6), 1823-1829.
- Ramírez-López, A., Aguilar-López, R., & Palomar-Pardavé M., Romero-Romo, M., Muñoz-Negrón D. (2010). Simulation of heat transfer in steel billets during continuous casting, *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 17(4), 403-416.
- Risso, J., Cardona, A., & Anca, A. (2001). A simplified model for heat treatment simulation. *Mechanica Computacional Vol. XXIII*, pp. 2443-2458.
- Rohde, J., Jeppsson, A. (2000). Literature review of heat treatment simulations with respect to phase transformation, residual stresses and distortion. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 29(2), 47-62.
- Sanchez Sarmiento, G., Gaston, A, Totten, G. (2011). Computational Modeling of heat treating processes by use of HT – MOD and ABAQUS. *Latin American Applied Research*, 41, 217-224.
- Simsir, C., Gur, C. (2008). 3D FEM simulation of steel quenching and investigation of the effect of asymmetric geometry on residual stress distribution. *Journal of materials processing technology*, 207(1-3), 211-221
- Smoljan, B., Tomaši, N., & Rubeša, D., Smokvina Hanza, S. (2005). Simulation of hardness distribution in quenched steel specimen. 13-th international scientific conference on achievements in mechanical and materials engineering, May16-19, Gliwice-Wista, Poland, 597-600.
- Srinivasan, V., Moon, K., & Greif, D., Wang, D., Kim, M. (2010). Numerical simulation of immersion quench cooling process using an Eulerian multi-fluid approach. *Applied Thermal Engineering*, 30(5), 499-509.
- Srinivasan, V., Moon, K., & Greif, D., Wang, D., Kim M. (2010). Numerical simulation of immersion quenching process of an engine cylinder head. *Applied Mathematical Modelling*, 34(8), 2111-2128.

Stavrev, D., Shtarbakov, V.(2012). Numerical Modeling and Investigation of Isothermal Annealing Process. *Machines, Technologies, Materials*, VI(7), 85-88.

Trzaska, J. (2013). Calculation of the steel hardness after continuous cooling. *Archives of Materials Science and Engineering*, 61(2), 87-92.

Wołowicz, E., Kula, P., & Korecki, M., Olejnik, J. (2011). Simulation and control of tool steel quenching process. 25th European Conference on Modelling and Simulation, ECMS 2011, June 7-10, Krakow, Poland.

<https://www.qform3d.com/products/qformht> (Accessed on 04.10.2019).

www.ita-tech.cz/en/products-services/heat-treatment/software-qtsteel (Accessed on 04.10.2019).

http://www.ideamap.co.jp/cosmap/e_product_cosmap020_example.html#080 (Accessed on 04.10.2019).

<https://www.wildeanalysis.co.uk/wp-content/uploads/2016/07/DEFORM-HT-Product-Brochure-PDF.pdf> (Accessed on 04.10.2019).

<https://www.sentsoftware.co.uk/jmatpro> (Accessed on 04.10.2019).

<https://www.simufact.com/heat-treatment.html> (Accessed on 04.10.2019).

<https://kimeca.com.mx/index.php/dante-solutions/> (Accessed on 04.10.2019).

<https://www.simufact.com/news-detail/simulate-inductive-heating-and-case-hardening-with-simufact-forming-15.html> (Accessed on 04.10.2019).

<https://www.transvalor.com/en/cmspages/simheat.97.html> (Accessed on 04.10.2019).