

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

УДК 621.78:519.6
doi: 10.18101/2304-5728-2016-3-15-22

© А. А. Александров

Математическое моделирование процесса охлаждения заготовок из алюминиевых сплавов при термообработке

В статье рассмотрены вопросы определения нестационарного теплового поля заготовки из алюминиевых сплавов при термообработке. Основной проблемой при определении теплового поля является определение коэффициента теплоотдачи, поэтому предложена расчетно-экспериментальная модель теплового поля, позволяющая рассчитывать коэффициент теплоотдачи и нестационарное тепловое поле.

Ключевые слова: расчетно-экспериментальная модель, метод конечных разностей, термическая обработка, остаточные термические напряжения, маложесткие детали.

© А. А. Alexandrov

Mathematical modeling of process of cooling of billets of aluminum alloys during heat treatment

In the article the questions of determination of non-stationary thermal field of a workpiece of aluminum alloys during heat treatment. The main problem in determining the thermal field is the determination of the heat transfer coefficient, therefore, the proposed calculation-experimental model of the thermal field, which allows to calculate the heat transfer coefficient and non-stationary thermal field.

Keywords: calculation-experimental model, finite difference method, heat treatment, residual thermal stresses, malaiesti details.

Введение

Термическая обработка заготовок из алюминиевых сплавов, широко используемых при производстве крупногабаритных маложестких деталей, заключается в проведении закалки и искусственного старения [1]. В процессе закалки происходит быстрое неравномерное охлаждение заготовки, которое формирует уровень температурных напряжений, превышающий предел текучести материала, что в свою очередь приводит к возникновению неравномерных пластических деформаций заготовки. При полном охлаждении заготовки до равномерной температуры по всему телу, неравномерные пластические деформации приводят к возникновению термических остаточных напряжений (ОН). Данные напряжения после механической обработки приводят к возникновению коробления деталей и их

дорогостоящему браку. Следовательно, решение задач исследования процессов формирования остаточного напряженно-деформированного состояния (НДС) на основе математического моделирования является актуальной задачей.

На сегодняшний день, вопрос остаточных деформаций исследован на достаточно высоком уровне. Использование математических моделей, предложенных В.В. Абрамовым, И.А. Биргером, С.И. Ботвенко, Г. Бюлером, С.П. Гинкулом, Н.Н. Давиденковым, Ю.И. Замащиковым, С.И. Ивановым, С.К. Каргапольцевым, С.И. Ключниковым, В.Е. Койре, А.В. Лившицем, А.И. Промптовым, позволяет определять, как локальные, так и общие деформации маложестких деталей. При этом, узкое место исследований остаточного НДС, заключается в определении исходных данных для моделирования остаточных деформаций – определении термических остаточных напряжений. На сегодняшний день, указанные напряжения определяются либо разрушающими методами, что удорожает процесс производства, либо неразрушающими методами, использующими голографическую интерферометрию, электронную спекл-интерферометрию, рентгеновские и ультразвуковые методы измерения, которые имеют значительную (15-30%) погрешность измерения. Результаты работ, посвященных математическому моделированию остаточных напряжений, имеют узкую специфику. Примером являются работы Д.А. Мирзаева (моделирование ОН в поковках) [2], С.Л. Лебского (моделирование ОН после дробнаклепа) [3], С.А. Макеева (моделирование ОН в тонкостенном прокате) [4], И.Н. Кравченко (моделирование ОН при формировании плазменных покрытий) [5], С.И. Каратушин (моделирование ОН при цементации) [6] и т.д. Это объясняется значительными отличиями физики протекающих процессов и нестационарностью параметров. На сегодняшний день наиболее перспективным, при моделировании нестационарных тепловых процессов является использование программных комплексов (MSC Nastran, Ansys и т.д.), реализующих численные методы расчета, которые являются мощными инструментами решения подобных прикладных задач. При этом, их использование в каждом конкретном случае так же связано с необходимостью трудоемкого определения специфических параметров процесса (таких как, коэффициент теплоотдачи, кривые ползучести материала в диапазоне температур обработки, распределение углерода по толщине при цементации и другие). В случае расчета нестационарного теплового поля в основу численных математических моделей положено уравнение теплопроводности (1) с соответствующими граничными условиями [2].

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_w(x, y, z, t, T) = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность, c – удельная теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности, $Q_w(x, y, z, t, T)$ – мощность внутренних источников тепловыделения.

Применительно к моделированию процесса охлаждения в процессе закалки, вызывающей термические остаточные напряжения, необходимо отметить, что предлагаемые различными исследователями [7, 8, 9] работы не избавлены от основной проблемы расчета – определение температурозависимого коэффициента конвективной теплоотдачи, изменяющего в широких пределах ($500-10000 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$), что тормозит дальнейшее изучение процесса формирования остаточных напряжений. Таким образом, задача формирования математической модели процесса с целью определения значений коэффициента теплоотдачи при различных условиях проведения термической обработки является актуальной.

Расчетно-экспериментальная модель процесса охлаждения заготовки при термической обработке

Для случая заготовки типа плиты, у которой ширина и длина значительно превышают толщину, справедливо перейти к одномерному уравнению теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < L. \quad (2)$$

Начальные и граничные условия описываются следующим образом:

$$t = 0: T = T_0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad (3)$$

$$x = 0: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_1 (T - T^{e1}), \quad t > 0, \quad \alpha_1 > 0, \quad (4)$$

$$x = L: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2 (T - T^{e2}), \quad t > 0, \quad \alpha_2 > 0, \quad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, T^{e1} и T^{e2} – температура внешней среды, T – начальная температура заготовки, α_1 и α_2 – коэффициент теплоотдачи.

Так как процесс закалки происходит при опускании заготовки вертикально, коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 и температура внешней среды T^{e1} и T^{e2} равны.

Коэффициент теплоотдачи, характеризующий процесс охлаждения заготовки в процессе закалки, зависит от значительного числа факторов, поэтому определить его значения расчетным способом представляется весьма трудной задачей, а справочные данные отсутствуют.

Учитывая вышесказанное, предложена расчетно-экспериментальная модель (6) нестационарного теплового поля, представляющая собой урав-

нение Фурье-Кирхгофа с соответствующими начальными, граничными условиями и экспериментальными зависимостями изменения температуры в процессе закалки в различных сечениях исследуемой заготовки, позволяющая рассчитать коэффициент теплоотдачи и систему нестационарных тепловых полей, возникающих в процессе закалки.

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \text{ где } 0 < x < L \\ \text{начальные условия: при } t = 0, 0 \leq x \leq L: T = T_0 \\ \text{граничные условия: при } x = 0: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_1 (T - T^{e1}), \text{ где } t > 0, \alpha_1 > 0, \\ \text{при } x = L: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2 (T - T^{e2}), \text{ где } t > 0, \alpha_2 > 0, \\ T_i = f_i(x_i, t), \text{ где } i = [1, 2, 3, 4, 5], t > 0, \end{array} \right. \quad (6)$$

где $T_i = f_i(x_i, t)$, где $i = [1, 2, 3, 4, 5]$ – экспериментальные кривые охлаждения, характеризующие изменение температуры в сечениях исследуемого тела по толщине.

Расчет системы нестационарных тепловых полей осуществляется методом конечных разностей, на постоянной сетке, по неявной четырехточечной разностной схеме.

Определение коэффициента теплоотдачи, учитывая нелинейно изменяющиеся параметры, входящие в граничные условия, представляется весьма трудной задачей. Поэтому расчет температурно-зависимого коэффициента теплоотдачи по кривым охлаждения осуществляется численным методом последовательного приближения в соответствии с разработанным алгоритмом (рисунок 1).

Расчет коэффициента теплоотдачи в конкретный момент времени закалки производится для условно стационарного состояния теплового поля и ведется на всем температурном интервале термообработки с заданной дискретностью. При этом, в расчетах используются экспериментально установленные значения температуры тела в сечениях заготовки на заданной глубине с использованием разработанного устройства [11].

Использование предложенной расчетно-экспериментальной модели и разработанного на ее основе алгоритма (рисунок 1) позволило определить значения температурозависимого коэффициента теплоотдачи. Для случая заготовки с габаритами 390*260*38 из сплава В95 $\alpha(t)$ имеет вид, представленный на рисунке 2. Процесс изменения коэффициента теплоотдачи при термообработке протекает в четыре этапа, в соответствии с изменением режимов кипения закалочной среды.

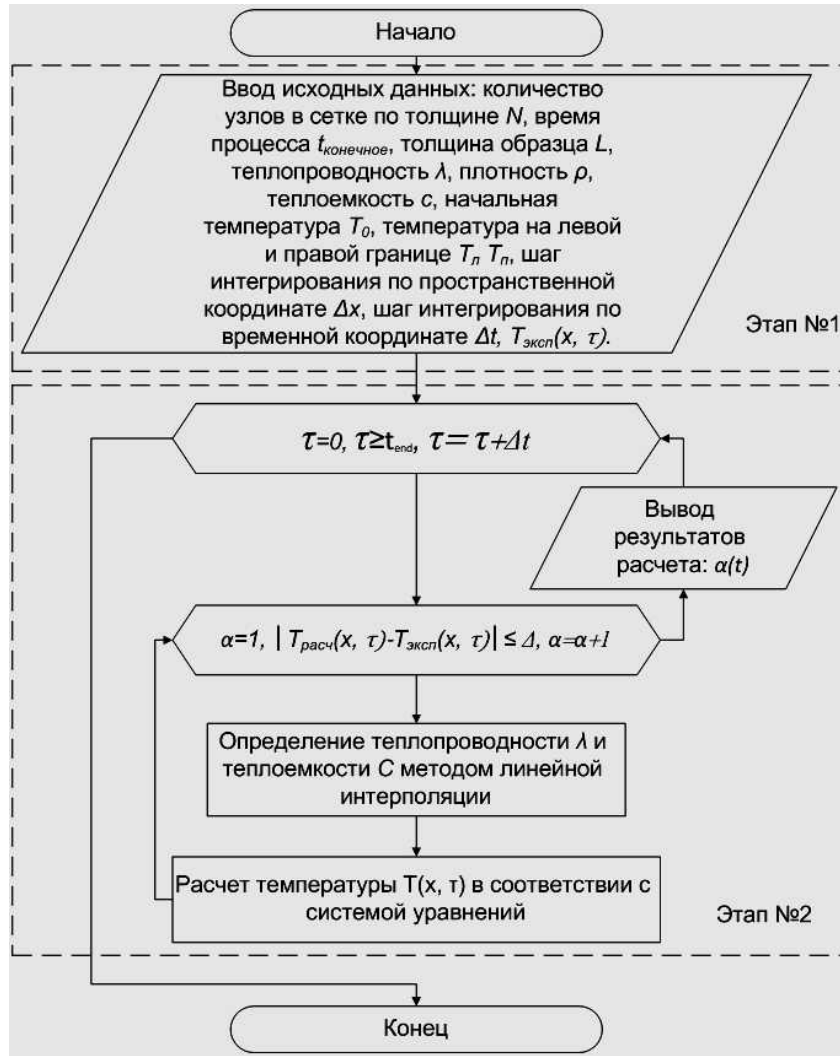


Рис. 1. Алгоритм определения коэффициента теплоотдачи по кривым охлаждения

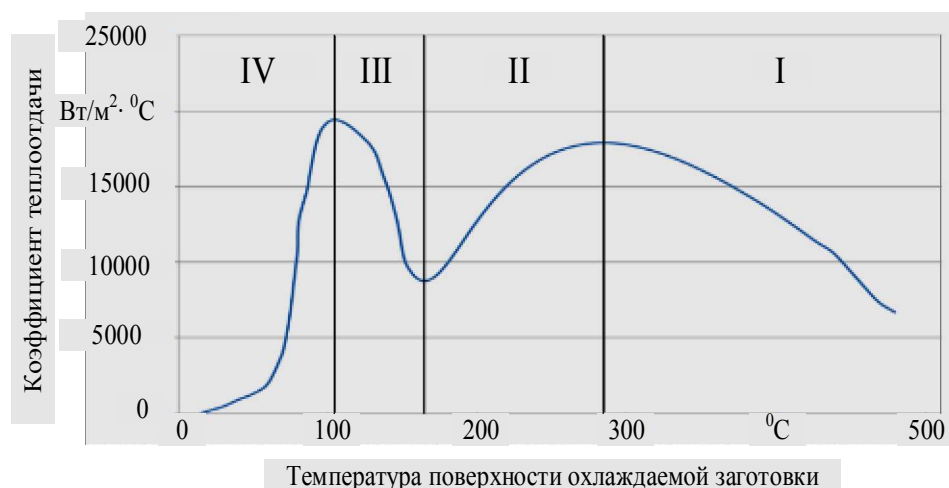


Рис. 2. Температурно-зависимый коэффициент теплоотдачи

Заключение

Использование вышеприведенного коэффициента при расчете нестационарного теплового поля и термических остаточных напряжений дает расхождение с не превышающее 3,76 % с экспериментальными значениями, приведенными в работах [1, 12, 13], и может быть использовано в практических расчетах. Таким образом, впервые предложенные расчетно-экспериментальная модель и алгоритм расчета позволяют перейти от физических методов определения термических остаточных напряжений к расчету напряжений еще на этапе проектирования изделий и, соответственно, обеспечить снижение себестоимости продукции.

Литература

1. Лившиц А. В. Прогнозирование локальных остаточных деформаций при проектировании технологического процесса изготовления маложестких деталей: Дисс. ... канд. техн. наук. — Иркутск, 1999. — 185 с.
2. Мирзаев Д. А., Шабуров А. Д., Чернявский А. О. Анализ термоупругих напряжений в поковках с учетом эффекта релаксации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». — 2014. — №3. — С. 40 – 47.
3. Лебский С. Л., Лебский Д. С. Влияние параметров технологического процесса дробенаклепа на эпюру остаточных напряжений // Известия ВолгГТУ. — 2013. — №15(118). — С. 61 – 64.
4. Макеев С. А., Колмаков Д. М. Моделирование остаточных напряжений в тонкостенном прокате трапециевидного сечения // Омский научный вестник. — 2014. — №1(127). — С. 69 – 73.
5. Кравченко И. Н., Сельдяков В. В., Бобряшов Е. М., Пузряков А. Ф. Математическое моделирование процесса развития остаточных напряжений при формировании плазменных покрытий // Современные наукоемкие технологии. — 2013. — №11. — С. 77 – 80.

6. Каратушин С. И., Спиридонов Д. В., Плешанова Ю. А. Моделирование остаточных напряжений при цементации // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2012. — №3. — С. 65 – 68.

7. Кузнецов Г. В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности. — Томск: Изд-во ТПУ, 2007. — 172 с.

8. Бачурин А. С., Бобин К. Н., Матвеев К. А., Курлаев Н. В. Численное моделирование влияния припуска на величину остаточных напряжений в деталях летательных аппаратов после закалки // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. — 2013. — №3. — С. 123 – 128.

9. Ампилогов А.Ю. Прогнозирование структуры и свойств сталей в объеме изделия при закалке и отпуске: Дисс. ... канд. техн. наук. — Москва, 2008. — 145 с.

10. Применение SYSWELD для моделирования закалки в 2D постановке / Делкам – Урал [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.delcam-ural.ru/cae/tehnologicheskij_analiz/sysweld_modelirovanie_zakalki.

11. Устройство для определения коэффициентов теплоотдачи. Патент на полезную модель №155337 / А.А. Александров, А.В. Лившиц, Н.Г. Филиппенко, С.И. Попов, С.Н. Филатова // Патентообладатель: ФГБОУ ВПО ИрГУПС. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 10.10.2015.

12. Каргапольцев С. К. Минимизация остаточных деформаций методом дискретного моделирования при фрезеровании маложестких деталей. Дисс. ... канд. техн. наук. — Иркутск, 1990. — 136 с.

13. Ключников С. И. Минимизация остаточных деформаций методом дискретного моделирования при фрезеровании маложестких деталей. Дисс. ... канд. техн. наук. — Иркутск, 1998. — 154 с.

References

1. Livshic A. V. Prognozirovanie lokal'nyh ostatochnyh deformatsij pri proektirovanii tehnologicheskogo processa izgotovlenija malozhestkih detalej: Diss. ... kand. tehn. nauk. — Irkutsk, 1999. — 185 s.

2. Mirzaev D. A., Shaburov A. D., Chernjavskij A. O. Analiz termouprugih naprjazhenij v pokovkah s uchetom jeffekta relaksacii // Vestnik JuUrGU. Serija «Metallurgija». — 2014. — №3. — S. 40 – 47.

3. Lebskij S. L., Lebskij D. S. Vlijanie parametrov tehnologicheskogo processa drobenaklepa na jepjuru ostatochnyh naprjazhenij // Izvestija VolgGTU. — 2013. — №15(118). — S. 61 – 64.

4. Makeev S. A., Kolmakov D. M. Modelirovanie ostatochnyh naprjazhenij v tonkostennom prokate trapecievidnogo sechenija // Omskij nauchnyj vestnik. — 2014. — №1(127). — S. 69 – 73.

5. Kravchenko I. N., Sel'djakov V. V., Bobrjashov E. M., Puzrjakov A. F. Matematicheskoe modelirovanie processa razvitiya ostatochnyh naprjazhenij pri formirovanii plazmennyh pokrytij // *Sovremennye naukoemkie tehnologii*. — 2013. — №11. — S. 77 – 80.

6. Karatushin S. I., Spiridonov D. V., Pleshanova Ju. A. Modelirovanie ostatochnyh naprjazhenij pri cementacii // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*. — 2012. — №3. — S. 65 – 68.

7. Kuznecov G. V., Sheremet M.A. Raznostnye metody reshenija zadach teploprovodnosti. — Tomsk: Izd-vo TPU, 2007. — 172 s.

8. Bachurin A. S., Bobin K. N., Matveev K. A., Kurlaev N. V. Chislen-noe modelirovanie vlijaniya pripuska na velichinu ostatochnyh naprjazhenij v detaljah letatel'nyh apparatov posle zakalki // *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*. — 2013. — №3. — S. 123 – 128.

9. Ampilogov A.Ju. Prognozirovaniye struktury i svojstv stalej v ob#eme izdelija pri zakalke i otpuske: Diss. ... kand. tehn. nauk. — Moskva, 2008. — 145 s.

10. Primenenie SYSWELD dlja modelirovanija zakalki v 2D postanovke / Delcam – Ural [Jelektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: http://www.delcam-ural.ru/cae/tehnologicheskij_analiz/sysweld_modelirovanie_zakalki .

11. Ustrojstvo dlja opredelenija koeficientov teplootdachi. Patent na poleznuju model' №155337 / A.A. Aleksandrov, A.V. Livshic, N.G. Filippenko, S.I. Popov, S.N. Filatova // *Patentoobladatel': FGBOU VPO IrGUPS. Zaregistrirvano v Gosudarstvennom reestre poleznyh modelej Rossijskoj Federacii 10.10.2015.*

12. Kargapol'cev S. K. Minimizacija ostatochnyh deformacij metodom diskretnogo modelirovanija pri frezerovanii malozhestkih detalej. Diss. ... kand. tehn. nauk. — Irkutsk, 1990. — 136 s.

13. Kljuchnikov S. I. Minimizacija ostatochnyh deformacij metodom diskretnogo modelirovanija pri frezerovanii malozhestkih detalej. Diss. ... kand. tehn. nauk. — Irkutsk, 1998. — 154 s.

Александров Андрей Алексеевич, старший преподаватель кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: andreyalexandrov2008@ya.ru.

Alexandrov Andrey Alexeyevich, senior teacher, Automation of production processes Department, Irkutsk State University of Railway Engineering.