

## Прогнозирование температурного поля для определения остаточных напряжений возникающих при термообработке алюминиевых сплавов.

# 07, июль 2014

DOI: 10.7463/0714.0717560

Лившиц А. В.<sup>1</sup>, Александров А. А.<sup>1,a</sup>

УДК 621.78:519.6

<sup>1</sup>Россия, Иркутский государственный университет путей сообщения

<sup>a</sup>[andreyalexandrov2008@ya.ru](mailto:andreyalexandrov2008@ya.ru)

Повышение качества производства летательных аппаратов, снижение их стоимости и веса, а также повышение надежности, одни из ключевых задач современного машиностроения, которое невозможно без управления сложным напряженно-деформированным состоянием на всех этапах производства и эксплуатации машин. В работе рассмотрены вопросы определения остаточных напряжений возникающих в процессе производства при помощи математического моделирования процессов, вызывающих их появление. Процесс производства деталей включает комплекс термической обработки. Комплекс термической обработки включает закалку с последующим проведением искусственного старения. В процессе закалки происходит нагрев и неравномерное охлаждение, в результате которого возникают остаточные напряжения. Процесс охлаждения имеет нестационарный характер, так как на него влияет большое количество факторов. Среди которых можно отметить: изменяющиеся теплофизические свойства материала, в диапазоне закалочных температур характеризующие коэффициент теплоотдачи, температура закалочной жидкости, изменение агрегатного состояния закалочной среды, изменение температурного напора между заготовкой и охлаждаемой средой, режимы кипения охлаждающей жидкости, каждый из которых изменяет коэффициент теплоотдачи. Так же необходимо учитывать совокупное воздействие всех этих факторов друг на друга и процесс охлаждения заготовки. Учитывая вышеперечисленные факторы мы имеем возможность произвести расчет нестационарного температурного поля, для дальнейшего расчета сложного напряженно-деформированного состояния детали учитывая изменение механических свойств и температурной нагрузки.

**Ключевые слова:** остаточные термические напряжения, метод конечных элементов, метод конечных разностей, термическая обработка, маложесткие детали.

### Введение

Согласно федеральной целевой программе «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002-2010 годы и на период до 2015 года» [1], предусмотрено проведение научных исследований по развитию летательных аппаратов, в том числе обеспечение не-

обходимой прочности конструкций летательных аппаратов в течении заданного заказчиком сроком службы. Прочность конструкции оказывает большое влияние на ее вес, что негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках летательных аппаратов, поэтому проектирование конструкции летательных аппаратов очень сложная задача, к которой необходим системный подход, обеспечивающий высокие эксплуатационные свойства в сочетании с низкой стоимостью и весом. Для самолетных конструкций изменение прочности в процессе эксплуатации можно охарактеризовать величиной остаточной прочности, которая равна статической прочности конструкции летательного аппарата в момент времени  $t$  после действия переменных нагрузок в течение предыдущего времени эксплуатации [2]. Согласно графикам (рисунок 1, рисунок 2) [2], остаточная прочность зависит от времени эксплуатации самолета  $t$  и длины трещин  $l$ , так как остаточная прочность уменьшается из-за уменьшения сечения силовых элементов, возникающих при длительном знакопеременном нагружении. Необходимо отметить влияние остаточных напряжений, образованных в процессе производства, на длину трещин  $l$  и соответственно на остаточную прочность летательного аппарата. В процессе эксплуатации летательных аппаратов под воздействием знакопеременных нагрузок происходит перераспределение остаточных напряжений. Подобная упругая деформация может привести к снижению выносливости и долговечности изделия, образованию хаотичного, неуправляемого сложного напряженно-деформированного состояния, а так же к образованию микротрещин сокращающих остаточный ресурс и надежность летательного аппарата в целом.

Поэтому видится целесообразным на всех этапах проектирования, производства и эксплуатации летательных аппаратов учитывать и контролировать остаточные напряжения, образованные в процессе технологического процесса производства деталей и перераспределяющихся в процессе рабочего нагружения.

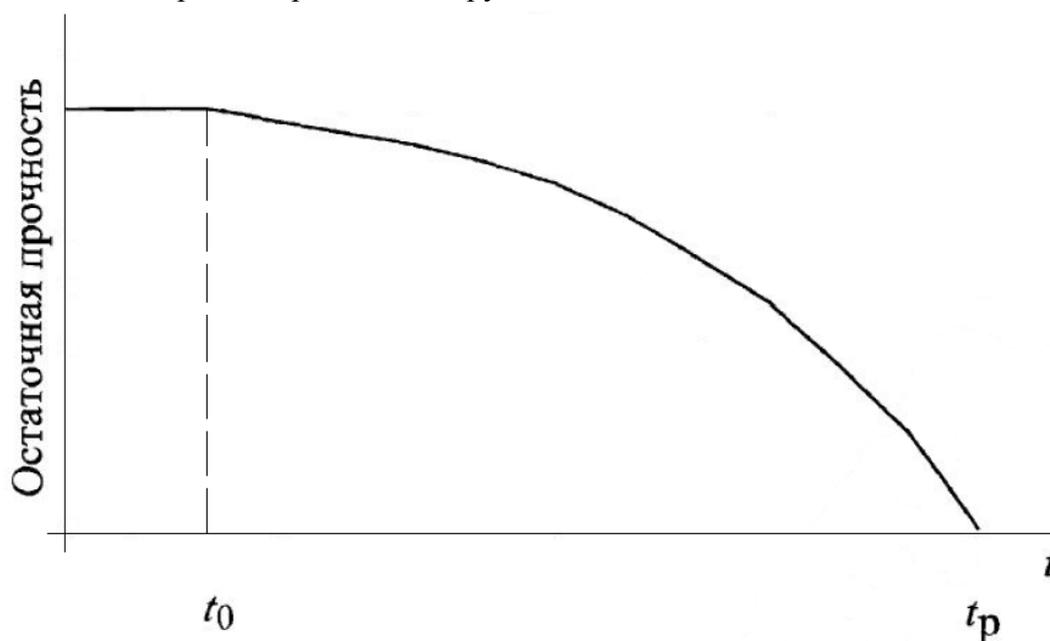


Рис. 1. Изменение остаточной прочности конструкции в процессе эксплуатации

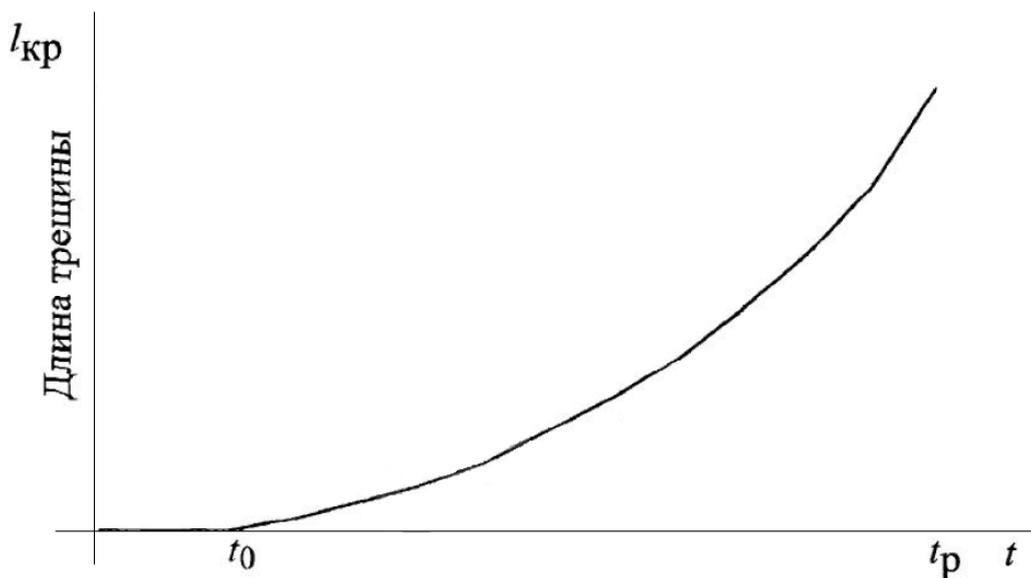


Рис. 2. Изменение длины трещины в конструкции в процессе эксплуатации

### 1. Определение остаточных напряжений

Процесс образования и перераспределения остаточных напряжений неразрывно связан с этапами технологического процесса обработки заготовки. Технологический процесс производства маложестких деталей включает в себя термическое упрочнение заготовок из алюминиевых сплавов для получения требуемых механических, химических и физических свойств, затем механическую обработку этих заготовок для придания им требуемой конфигурации заданных размеров и показателей поверхностей.

Одним из основных алюминиевых сплавов использующихся в процессе производства маложестких деталей является высокопрочный сплав В95 системы алюминий-цинк-магний-медь, который применяется для изготовления высоконагруженных конструкций. На этапе термического упрочнения заготовки подвергают закалке и искусственному старению. Для сплава В95 закалка заключается в нагревании до температуры  $470 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , выдержке при этой температуре в течении 70 минут с последующим охлаждением в воде при температуре  $15^{\circ}\text{C}$ . Искусственное старение протекает при температуре  $143^{\circ}\text{C}$  в течении 16 часов. На этапе термической обработки возникают остаточные напряжения из-за неравномерного охлаждения по толщине плиты. Поэтому есть необходимость получения картины напряженно-деформированного состояния заготовки, для проведения прочностных расчетов деталей и конструкций, полученных из термообработанных заготовок, а так же предотвращения деформирования деталей под воздействием остаточных напряжений на этапе механической обработки, которая проводится для получения определенной конфигурации детали и требуемых параметров поверхности.

Определение напряженно-деформированного состояния заготовки осуществляется различными методами [3]:

- косвенные методы
- физические методы

- механические методы.

Физические и косвенные методы определения напряженного состояния, к которым относятся галографическая интерферометрия, электронная спекл-интерферометрия, рентгеновские и ультразвуковые методы измерения, не требуют разрушения исследуемого объекта, но имеют большую (15-30 %) погрешность измерения напряжений, а так же наличие дорогостоящего оборудования.

Механические (разрушающие) методы определения заключаются в механической обработке (фрезерование, точение, сверление) в результате которых происходит перераспределение напряжений и деформация заготовки или детали, которые фиксируются при помощи тензометрических датчиков. На основании измерений деформаций производят вычисления остаточных напряжений по установленным методикам. Механические методы определения остаточных напряжений, имеют высокую (3...10%) точность, но в ходе которых необходимо разрушение заготовки, которая впоследствии не может быть использована для производства деталей [3].

Из-за высокой стоимости заготовок, на производственных объединениях не определяют остаточные напряжения, поэтому существует необходимость в недорогом неразрушающем и точном методе определения остаточных напряжений, погрешность которого не будет превышать 10 %. Один из способов достижения этого результата является, построение математической модели формирования остаточных напряжений в процессе термической обработки, составление методики прогнозирования остаточных напряжений и деформаций.

Определение остаточных напряжений является сложной задачей, которая делится на два этапа. Этап №1 – определение температурного поля пластины в процессе закалки при охлаждении пластины с температуры закалки до температуры закалочной среды. Этап №2 – определение сложно-деформированного состояния пластины в зависимости от неравномерного распределения температур.

## 2. Математическая модель термической обработки

В соответствии с [4] температурное поле в заготовке из высокопрочного алюминиевого сплава В95 описывается уравнением Фурье:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < L. \quad (1)$$

Начальные и граничные условия описываются следующим образом:

$$t = 0: T = T_0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad (2)$$

$$x = 0: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_1 (T - T^{e1}), \quad t > 0, \quad (3)$$

$$x = L: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2 (T - T^{e2}) \quad (4)$$

$$t > 0, \quad \alpha_2 > 0,$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $T^{e1}$  и  $T^{e2}$  – температура внешней среды,  $T$  – начальная температура заготовки,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи.

Так как процесс закалки происходит при опускании заготовки вертикально, коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и температура внешней среды  $T^{e1}$  и  $T^{e2}$  равны.

Коэффициент теплоотдачи, характеризующий процесс охлаждения, зависит от разности температур охлаждающей среды и заготовки, а так же свойств материала заготовки, которые изменяются в зависимости от температуры, поэтому для точного определения температурного поля эти факторы необходимо обязательно учитывать. В нашем случае, если рассматривать закалку заготовок из алюминиевого сплава В95 в воде с температурой 15 °С, температура заготовки намного выше температуры кипения закалочной среды, поэтому при погружении заготовки в закалочную среду, охлаждение заготовки происходит при интенсивном парообразовании. Процесс кипения при охлаждении металла, температура которого превышает температуру кипения среды охлаждения, имеет пять режимов, которые влияют на коэффициент теплоотдачи [5]. Применительно к процессу закалки заготовок из сплава В95 наблюдаются 4 режима: 4 – режим равномерного охлаждения заготовки при постоянном коэффициенте теплоотдачи малой величины (170  $Bm/m^2K$ ) (рисунок 3, поз. 4), 3 – режим, соответствующий быстрому возрастанию коэффициента теплоотдачи (со 189 до 36000  $Bm/m^2K$ ) с уменьшением температурного напора (данный режим обеспечивает наибольший градиент температур по объему заготовки), 2 и 1 – режимы соответствующие постепенному уменьшению коэффициента теплоотдачи до значения  $\Delta t = 0$  при пузырьковом кипении воды и конвекционном теплопереносе соответственно.

Согласно [5] определяется коэффициент теплоотдачи при охлаждении в воде. Так как в процессе охлаждения вода принимает тепло, а заготовка его теряет, температурный напор изменяется и поэтому изменяется зависящий от него коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  [ $Bm/m^2K$ ]. Согласно режимам термообработки максимальная температура нагрева заготовки составляет 475 °С, а температура закалочной жидкости 15 °С, поэтому максимальный температурный напор  $\Delta t = 460$  °С. Согласно графика (рисунок 3) [5], коэффициент теплоотдачи при охлаждении колеблется от 182 до 37000  $Bm/m^2K$ .

Если учитывать, что закалка проводится в безгранично большой емкости, можно принять допущение о том, что температура воды не изменяется, поэтому коэффициент теплоотдачи заготовки, характеризующий процесс охлаждения, зависит только от температуры самой заготовки. Зависимый от температуры коэффициент теплоотдачи, характеризующий процесс охлаждения заготовки при закалке, описывается графиком (рисунок 3). График (рисунок 3) можно аппроксимировать системой уравнений при помощи программных пакетов, MS Excel, Mathcad со среднеквадратическим отклонением  $R^2 \geq 0,9998$ .

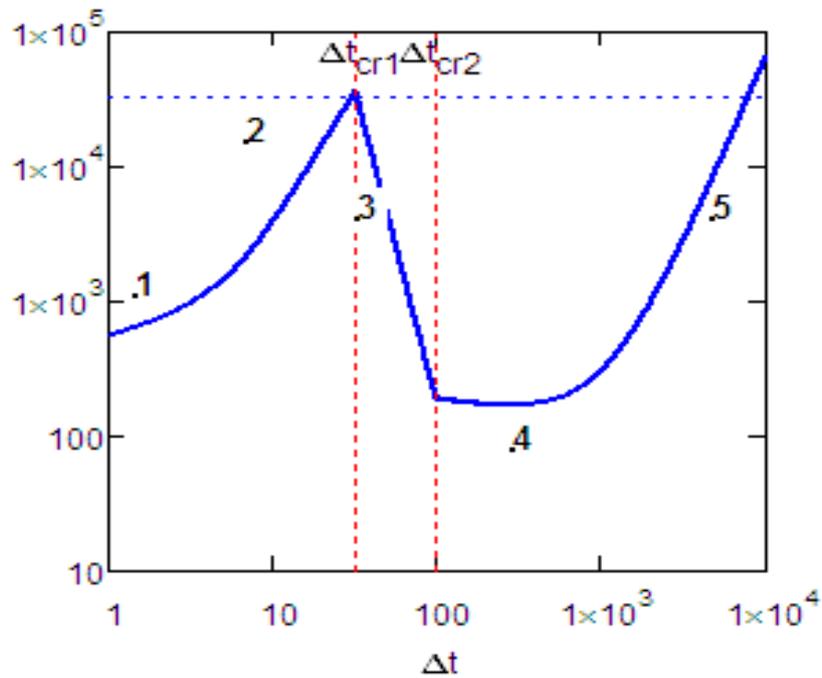


Рис. 3. График зависимости коэффициента теплоотдачи от температурного напора

$$\alpha(t) = \begin{cases} \alpha = -4 \cdot 10^{-5} \cdot x^6 + 0.0042 \cdot x^5 - 0.1886 \cdot x^4 + 4.1363 \cdot x^3 - 8.5384 \cdot x^2 + 17293 \cdot x + 40176 \\ \text{при } 0 < t \leq 32, R^2 = 1 \\ \alpha = 8 \cdot 10^{-6} \cdot x^6 - 0.0035 \cdot x^5 + 0.6342 \cdot x^4 - 60.248 \cdot x^3 - 32025 \cdot x^2 - 90727 \cdot x + 10^6 \\ \text{при } 33 < t \leq 99, R^2 = 0,9998 \\ \alpha = 4 \cdot 10^{-14} \cdot x^6 - 8 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 + 7 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0.0078 \cdot x^2 - 1.2373 \cdot x + 2584 \\ \text{при } 99 < t \leq 460, R^2 = 0,9998 \end{cases} \quad (5)$$

Дифференциальное уравнение (1) видится целесообразным решать численно. Чаще всего для решения подобных задач используются методы конечных разностей (МКР) или метод конечных элементов (МКЭ). Метод конечных разностей достаточно прост применительно к тепловым задачам нагрева и охлаждения. Для расчета сложного напряженно-деформированного состояния деталей в работах ряда авторов [6, 7] применяется МКЭ.

Имея в наличии лицензию на продукты компании MSC Software, представляется возможным расчет в этой системе.

Расчет теплового поля изменяющегося во времени, учитывающий изменение температуры заготовки и соответственно коэффициента теплоотдачи по зависимости (2) видится целесообразным получить в программном пакете MSC Sinda, осуществляющего расчет МКР, который специализируется на расчете тепловых полей.

На рисунках 4, 5, 6 представлены результаты расчета теплового поля при охлаждении заготовки из алюминиевого сплава В95 нагретой до температуры 4750С, размерами 390\*240\*20 мм, при проведении закалки в пресной воде с температурой 150С. Рисунок 4 соответствует режиму 4 с небольшой разницей температуры по объему (400С), рисунок 5 соответствует режиму 3 с наибольшей разницей температуры по объему заготовки

(1680С), рисунок 6 соответствует режиму 1, с равномерным распределением температуры по объему заготовки.

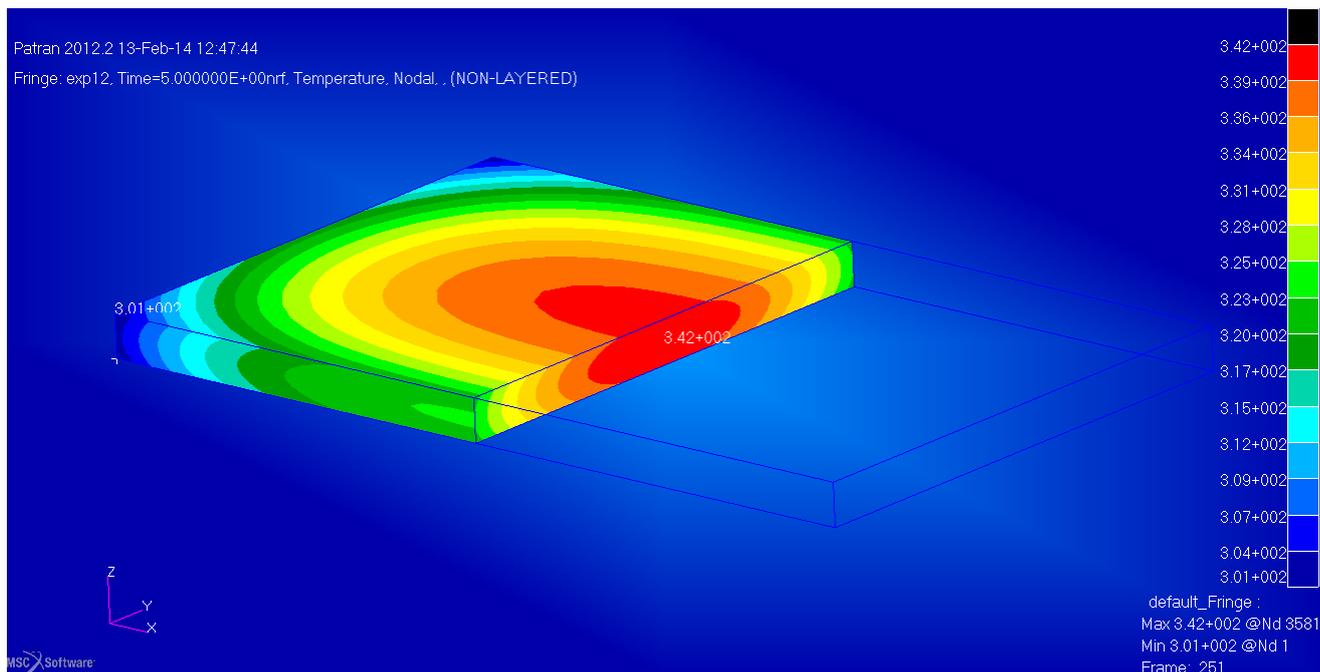


Рис. 4. Температурное поле заготовки в момент времени  $t=6$  секунд

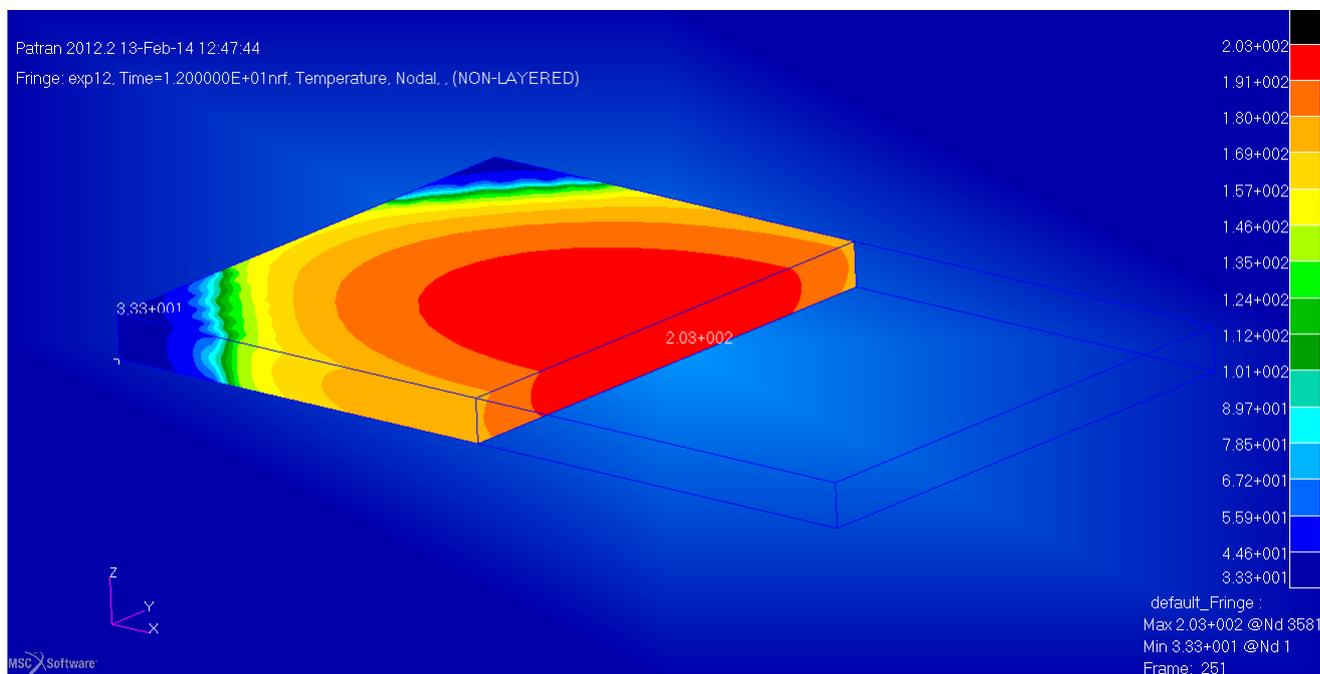
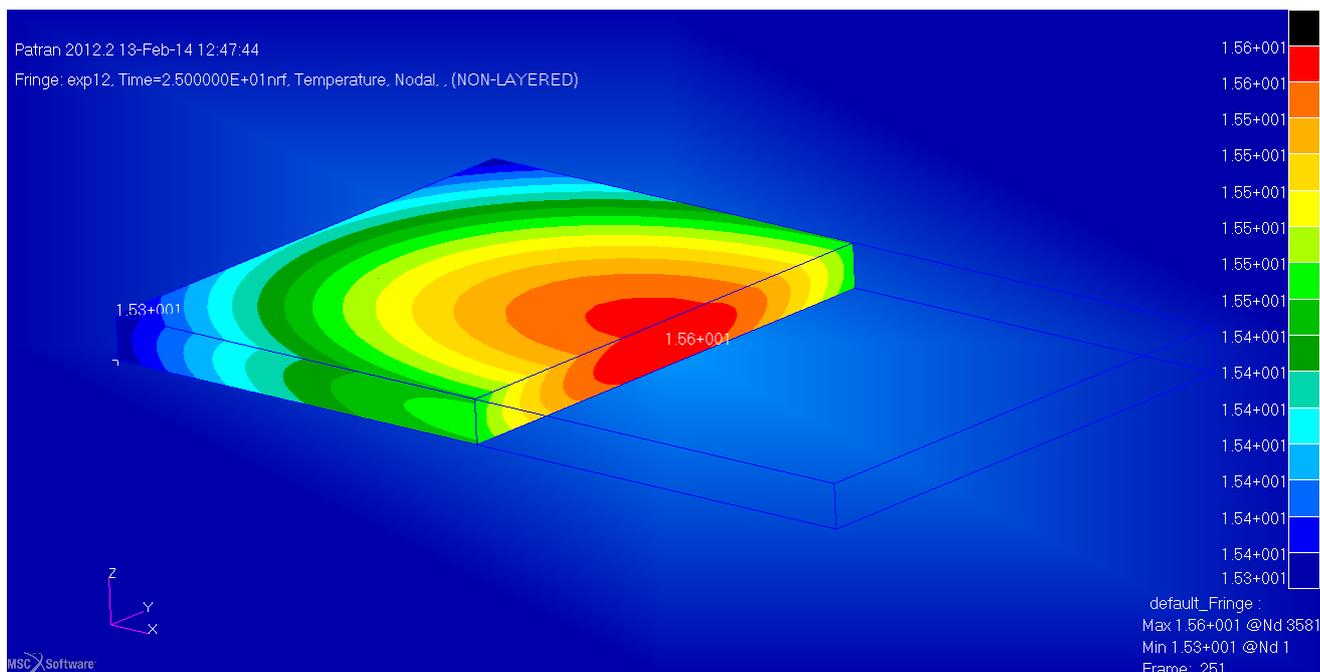
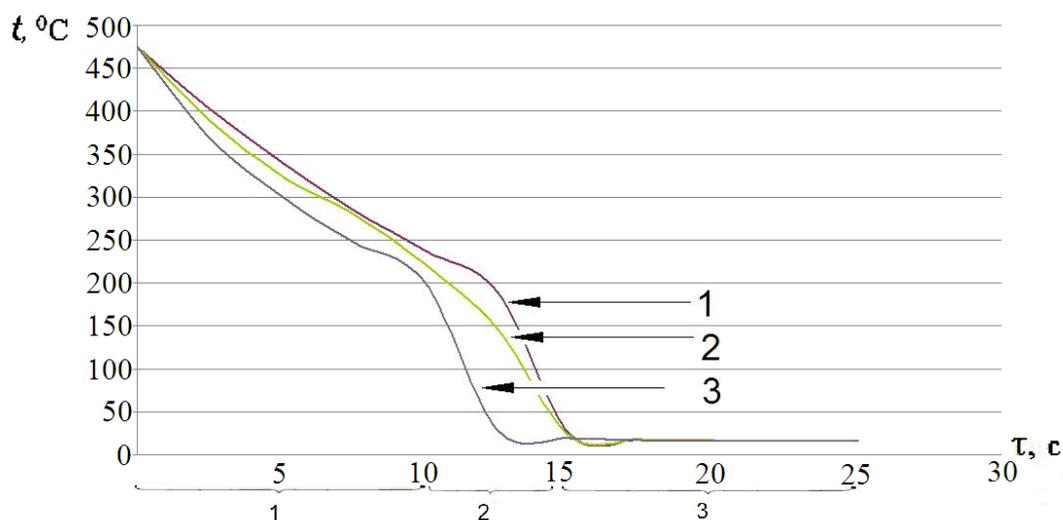


Рис. 5. Температурное поле заготовки в момент времени  $t=12$  секунд



**Рис. 6.** Температурное поле заготовки в момент времени  $t=25$  секунд

Изменение температуры в разных участках заготовки, в процессе охлаждения, представлено на рисунке 7. Опираясь на данные динамики охлаждения заготовки можно выделить три зоны. 1 и 3 зона характеризуются равномерным распределением температуры по объему заготовки, а 2 зона максимальным градиентом температур. Интересно заметить, что на значительном диапазоне охлаждения заготовки зоны 3 градиент температур является постоянным. Напрашивается вывод о том, что остаточные напряжения в угловых частях заготовки будут максимально отличаться от общей картины напряженного состояния исследуемого образца, что подтверждает технологические рекомендации о необходимости удалении краевых зон подвергшихся закалке заготовок [3, 8, 9].



**Рис. 7.** Графики характеризующие изменение температуры в разных частях заготовки, где 1 – температура в центре заготовки, 2 – максимальная температура боковой грани, 3- минимальная температура боковой грани

## Заключение

Подводя итог вышеизложенному можно констатировать факт, что использование пакета MSC Sinda дает возможность расчета температурных полей с учетом изменения теплофизических свойств материала и коэффициента теплоотдачи в зависимости от температуры исследуемого объекта, что позволяет говорить об успешном решении 1 этапа расчетов термических остаточных напряжений. С практической точки зрения, полученные результаты позволяют использовать численные данные теплового расчета при моделировании сложного напряженно-деформированного состояния термообработанной заготовки в пакете MSC Marc в нелинейной постановке задачи.

## Список литературы

1. Федеральная целевая программа. Развитие гражданской авиационной техники России на 2002-2010 годы и на период до 2015 года: [утв. постановлением Правительства РФ от 15 октября 2001 года №728]. М., 2001.
2. Адегова Л.А. Повышение усталостной долговечности высоконагруженных зон конструкций самолетов: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2009. 158 с.
3. Лившиц А.В. Прогнозирование локальных остаточных деформаций при проектировании технологического процесса изготовления маложестких деталей: дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 1999. 185 с.
4. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.
5. Солодов А.П. Теплообмен при кипении // Теплообмен в энергетических установках: электронный курс. М., МЭИ, 2009. Режим доступа: [http://twt.mpei.ac.ru/solodov/HMT-eBook\\_2009/HMT\\_E-Book/E-book/Chapt\\_18\\_Pool\\_Boiling.pdf](http://twt.mpei.ac.ru/solodov/HMT-eBook_2009/HMT_E-Book/E-book/Chapt_18_Pool_Boiling.pdf) (дата обращения 01.06.2014).
6. Напряженно-деформированное состояние металла корпусов фонтанной арматуры до и после наплавки / В.В. Настека, А.Ф. Коренякин, Н.Ф. Низамов, Е.Ю. Чирков, В.М. Кушнарченко, С.В. Каменев // Вестник ОГУ. 2013. № 1. С. 212-218.
7. Трещев А.А., Петров А.А., Теличенко В.Г. Напряженно-деформированное состояние тонких прямоугольных пластин из разносопротивляющихся материалов в условиях термосилового нагружения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. Вып. 1. С. 110-117.
8. Бюлер Г. Полное определение остаточных напряжений в сплошных и полых металлических цилиндрах // Остаточные напряжения в металлах и металлических конструкциях: сб. статей: пер. с англ. / под ред. В.Р. Осгуда. М.: Иностранная литература, 1957. С. 48-61.
9. Иванов С.И. Зона включения остаточных напряжений в полоске // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: сб. трудов КуАИ. Вып. 39. Куйбышев: КуАИ, 1968. С. 158-170.

---

**Temperature Field Prediction for Determining the Residual Stresses Under Heat Treatment of Aluminum Alloys**

# 07, July 2014

DOI: 10.7463/0714.0717560

A. V. Livshits<sup>1</sup>, A.A. Alexandrov<sup>1,a</sup><sup>1</sup>Irkutsk State University of Railway Transport, Irkutsk,  
664074, Russian Federation<sup>a</sup>[andreyalexandrov2008@ya.ru](mailto:andreyalexandrov2008@ya.ru)

---

**Keywords:** [thermal processing](#), [FEM](#), [residual thermal stresses](#), [low-hard details](#)

---

The article is devoted to non-stationary temperature field blanks from aluminum alloys during heat treatment. It consists of the introduction and two smaller paragraphs. In the introduction the author concerns the influence of residual stresses arising in the manufacturing process of details, on the strength of the whole aircraft construction and, consequently, on their technical and economic parameters, such as weight, reliability, efficiency, and cost. He also notes that the residual stresses appeared during the production of parts change their location, size and direction under the influence of the elastic deformations that occur during the exploitation of aircraft. Re-distributed residual stresses may have a chaotic distribution that may cause overlap of these stresses on the stresses caused by the impact of workload of constructions and destruction or damage of aircraft components.

The first paragraph is devoted to the existing methods and techniques for determining the residual stresses. The presented methods and techniques are analyzed to show the advantages and disadvantages of each of them. The conclusion is drawn that the method to determine the residual stresses is necessary, its cost is less than those of existing ones, and an error does not exceed 10%.

In the second section, the author divides the problem of determining the residual stresses into two parts, and describes the solution methods of the first one. The first problem is to define the temperature field of the work piece. The author uses a Fourier equation with the definition of initial and boundary conditions to describe a mathematical model of the heat cycle of work piece cooling. He draws special attention here to the fact that it is complicated to determine the heat transfer coefficient, which characterizes the process of cooling the work piece during hardening

because of its dependence on a number of factors, such as changing temperature-dependent material properties of the work piece, temperature head between the work piece and the cooled medium, as well as coolant boiling regimes dependent on the temperature head. With reference to the other authors' works, the author of this article, to calculate the unsteady temperature field, uses the heat transfer coefficient depending on the temperature head and considering boiling conditions of coolant. The author proposes to solve a differential equation numerically using finite-difference methods, via automated systems engineering (CAE) analysis. In the second paragraph the calculation results of the thermal field are marked and the prospects are presented for their further use to determine the stress-strain state.

## References

1. Federal'naia tselevaia programma. Razvitie grazhdanskoi aviatsionnoi tekhniki Rossii na 2002-2010 gody i na period do 2015 goda (utv. postanovleniem Pravitel'stva RF ot 15 oktiabria 2001 goda No. 728) [Federal Target Program. The Development of Civil Aviation in Russia in 2002-2010 and for the period up to 2015 (approved by RF Government Decree from October 15, 2001 No.728)]. Moscow, 2001. (in Russian).
2. Adegova L.A. *Povyshenie ustalostnoi dolgovechnosti vysokonagruzhennykh zon konstruksii samoletov. Kand. diss.* [Increased fatigue life capability of high-load areas of aircraft design. Cand. diss.]. Novosibirsk, 2009. 158 p. (in Russian).
3. Livshits A.V. *Prognozirovaniye lokal'nykh ostatochnykh deformatsii pri proektirovanii tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniia malozhestkikh detalei. Kand. diss.* [Predicting of local residual deformations in designing of technological process of manufacturing of low-rigidity parts. Cand. diss.]. Irkutsk, 1999. 185 p. (in Russian).
4. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. *Raznostnye metody resheniia zadach teploprovodnosti* [Difference methods for solving heat conduction problems]. Tomsk, TPU Publ., 2007. 172 p. (in Russian).
5. Solodov A.P. *Teploobmen pri kipenii* [Boiling heat transfer]. In: *Teplomassoobmen v energeticheskikh ustanovkakh: elektronnyi kurs* [Heat and mass transfer in power plants: the e-course]. Moscow, MPEI, 2009. Available at: [http://twf.mpei.ac.ru/solodov/HMT-eBook\\_2009/HMT\\_E-Book/E-book/Chapt\\_18\\_Pool\\_Boiling.pdf](http://twf.mpei.ac.ru/solodov/HMT-eBook_2009/HMT_E-Book/E-book/Chapt_18_Pool_Boiling.pdf) , accessed 01.06.2014. (in Russian).
6. Nasteka V.V., Koreniakin A.F., Nizamov N.F., Chirkov E.Iu., Kushnarenko V.M., Kamenev S.V. [The metal's intense-deformed condition of the gas fitting's cases before and after facing]. *Vestnik OSU*, 2013, no. 1, pp. 212-218. (in Russian).

7. Treshchev A.A., Petrov A.A., Telichenko V.G. [Stress-strain state of thin rectangular plates of various -resistant materials in thermopower loading conditions]. *Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2008, iss. 1, pp. 110-117. (in Russian).
8. Osgood W.R., ed. *Residual Stresses in Metals and Metal Construction*. Reinhold Publishing Corporation, New York, 1954. (Russ. ed.: Osgood V.P., ed. *Ostatocnyye napriazheniia v metallakh i metallicheskih konstruktsiakh*. Moscow, Inostrannaia literature Publ., 1957, pp. 48-61.).
9. Ivanov S.I. [Inclusion zone in residual stresses in the strip]. *Voprosy prochnosti elementov aviatsionnykh konstruktsii: sb. trudov KuAI. Vyp. 39* [Durability problems of components of aircraft structures: collection of papers of KuAI]. Kuibyshev, KuAI Publ., 1968, pp. 158-170. (in Russian).