

УДК 536.24:517.9

**ВЛИЯНИЕ ЗАКАЛКИ НА ОСТАТОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ДЕТАЛЕЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ***

А. С. Бачурин, К. Н. Бобин, К. А. Матвеев, Н. В. Курлаев

Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: bachurin.a.s@yandex.ru

Проведено численное моделирование процесса закалки с учетом эффекта погружения методом конечных элементов. Моделирование производилось с учетом температурной зависимости характеристик материала и коэффициента конвективного теплообмена. Были получены распределения тепловых полей и напряжений в заготовке в процессе погружения и охлаждения в закалочной среде, распределения остаточных закалочных напряжений и деформаций после закалки. Установлено влияние направления погружения заготовок в закалочную среду на характер и величину образующихся остаточных напряжений. Для подтверждения результатов численного моделирования была проведена серия натурных экспериментов. Результаты, полученные при проведении экспериментов, хорошо согласуются с результатами численного моделирования.

Ключевые слова: численное моделирование, закалка, остаточные напряжения, остаточные деформации.

RESIDUAL DEFORMATION OF AIRCRAFTS ALUMINUM PARTS AT HARDENING

A. S. Bachurin, K. N. Bobin, K. A. Matveev, N. V. Kurlaev

Novosibirsk State Technical University
20 K. Marks prosp., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: bachurin.a.s@yandex.ru

The computational modeling of the hardening process with the account of the effect of submersion was carried out. The modeling was performed with the account of temperature dependence of the material characteristics and the convective heat transfer coefficient. For stability of the numerical solutions with high gradients it was used the relation between the time step, thermal diffusivity and the characteristic size of the grid. There were received the distributions of thermal fields and stresses in the workpiece in the process of submersion and cooling in hardening medium, distribution of the residual hardening stress and deformation after hardening. The influence of the submersion direction of work parts in hardening medium on mode and value of the residual stress was revealed. To proof the results of the computational modeling, the series of the full-scale experiments was held. The experimental results appeared to be in good agreement with theoretical calculations.

Keywords: FEA, hardening, residual stress, residual deformation

Закалка является неотъемлемой операцией при производстве многих деталей летательных аппаратов. Учитывая конструктивные особенности авиационных деталей их можно отнести к деталям средней и малой жесткости [1]. При закалке деталей малой жесткости в виду неравномерности охлаждения и наличия фазовых переходов в материале деталей возникают значительные напряжения, которые могут превышать предел текучести и приводить к образованию остаточных деформаций [1–4]. В связи с этим возникает необходимость оценки уровня остаточных деформаций, появляющихся после закалки.

При закалке деталь должна пройти процесс погружения, который осуществляется с конечной скоростью, а не мгновенно [5]. Процесс погружения может оказывать существенное влияние на образование и распределение напряжений в ходе погружения, а значит и на остаточные напряжения и деформации. Для оценки

влияния погружения на остаточные деформации моделировалась закалка стержневого образца с сечением прямоугольной формы, со средней жесткостью [1].

Постановка задачи численного моделирования: размеры стержня – длина $L = 200$ мм, высота $H = 41$ мм, ширина $A = 18$ мм (рис. 1), температура нагрева стержня 515°C , температура закалочной среды 27°C , закалочная среда – вода. Расчет производился в двух вариантах:

- 1) погружение вдоль размера H – далее «моделирование № 1»;
- 2) погружение вдоль размера A – далее «моделирование № 2».

Решение задачи производилось в плоской постановке с использованием симметрии.

При закалке многие характеристики, как металла, так и закалочной среды, влияют на скорость охлаждения и изменяются нелинейно.

*Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта Министерства образования и науки РФ №7.822.2011.

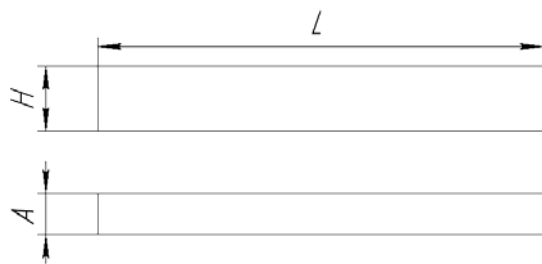


Рис. 1. Эскиз стержня, А-А сечение в котором представлены результаты

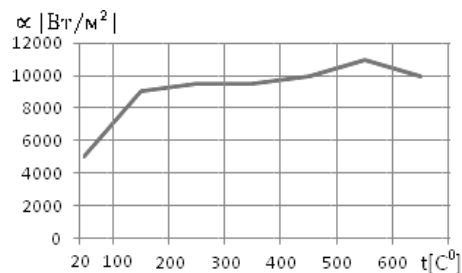


Рис. 2. График зависимости коэффициента конвективного теплообмена α от температуры поверхности теплообмена [7]

Поэтому при численном моделировании для получения достоверных результатов необходимо учитывать нелинейность характеристик материала и коэффициента теплообмена детали с водой, зависящих от температуры. На рис. 2 представлен график зависимости коэффициента теплообмена α , поверхности образца с водой, от температуры, который использовался для численного моделирования [6; 7].

Численное решение задачи было выполнено в программном комплексе Ansys. Решение проводилось в два этапа. Первый этап включал решение нестационарной тепловой задачи, второй – решение квазистационарной структурной задачи.

Так как для решения структурной задачи и учета погружения было необходимо получить распределение температурных полей начиная с первого момента касания образца с закалочной средой и до момента его полного погружения, то авторы написали макрос для среды Ansys, который изменял параметры конвективного теплообмена на поверхности образца в зависимости от времени, координаты и температуры. Погружение в моделировании № 1 происходило в течение 0,6 с, а погружение в моделировании № 2 – 0,4 с. Так как требовалось решение задачи с большими температурными градиентами, то для обеспечения устойчивости численного метода использовались соотношения:

$$ITS = \frac{\Delta^2}{4 \cdot \alpha}, \quad \alpha = \frac{k}{\rho \cdot C},$$

где Δ^2 приведенная длина конечного элемента в направлении наибольшего температурного градиента; k – коэффициент теплоотдачи; ρ – плотность; C – теплопроводность; ITS – начальный шаг по времени. Так как погружение в закалочную среду происходит в течение короткого времени и для структурного анализа необходимы поля распределения температуры в ходе погружения, то был назначен начальный шаг по времени много меньший общего времени погружения и равный 0,01 с. С учетом выбранного шага по времени и используя ранее приведенные соотношения вычислялась длина конечного элемента по направлению наибольшего температурного градиента. Используя полученное значение длины элемента, строилась сетка с наименьшим размером по направлению к центру образца и укрупнялась по мере удаления от границы образца.

На рис. 3 показано распределение температуры для моделирования № 2 в различные моменты времени. Полученные данные говорят о возможности возникновения значительных термических напряжений из-за большого различия в температуре части образца уже находящейся в контакте с закалочной средой от части еще не погружившейся. Термические напряжения могут превысить предел текучести материала, который из-за повышенной температуры снижен относительно значения $\sigma_T = 378$ МПа при 25 °С, вследствие чего могут произойти пластические деформации. Для подтверждения этого проводился структурный анализ, в котором в качестве нагрузки использовались данные теплового анализа – распределение тепловых полей и их изменение с течением времени. В тепловом анализе, как и в структурном, использовались характеристики материала, зависящие от температуры. Для учета эффекта погружения в квазистационарный структурный анализ загружались результаты теплового анализа с шагом 0,01 с.

После решения структурной задачи были получены распределения эквивалентных напряжений, они представлены на рис. 4. Анализируя распределение и изменение эквивалентных напряжений можно сделать вывод об однозначном влиянии погружения стержня в закалочную среду на образование остаточных деформаций.

Анализируя перемещения стержня после закалки (рис. 5) видно, что образец изогнулся в направлении погружения, что качественно подтверждается на практике, а так же упоминается в источниках [2; 3]. Проанализировав эпюры нормальных напряжений, представленных на рис. 6, можно заметить, что из-за быстрого охлаждения материал внешних слоев быстро уменьшается в объеме. Внутренняя же зона охлаждается замедленно и потому препятствует сжатию внешнего слоя. В результате внутренняя зона металла оказывается сжатой, а наружная – растянутой. В последующий период внутренняя зона, охлаждаясь, уменьшается в объеме и тянет к центру наружный слой. Но металл снаружи уже остыл и потому утратил пластичность. Поэтому в заключительный период охлаждения в наружных слоях металла возникнут сжимающие напряжения. Внутренняя же зона металла, будучи связанной с наружными слоями, не сможет уменьшиться в объеме, хотя и будет стремиться к этому. В результате в ней возникают внутренние растягивающие напряжения [4].

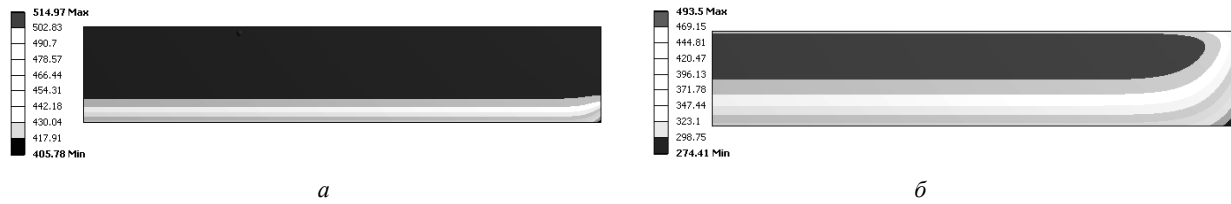


Рис. 3. Распределение температур ($^{\circ}\text{C}$) в стержне для моделирования № 2 в различные моменты времени при погружении в закалочную среду: $a - 0,03$ с; $b - 0,4$ с

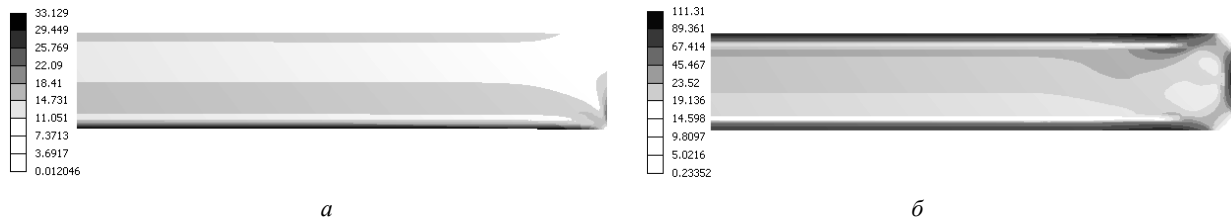


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений (МПа) для моделирования № 2 в стержне в различные моменты времени: $a - 0,03$ с; $b - 0,4$ с



Рис. 5. Перемещения (мм), возникшие в результате закалки (контуром показана недеформированная модель, масштаб увеличен для наглядности)

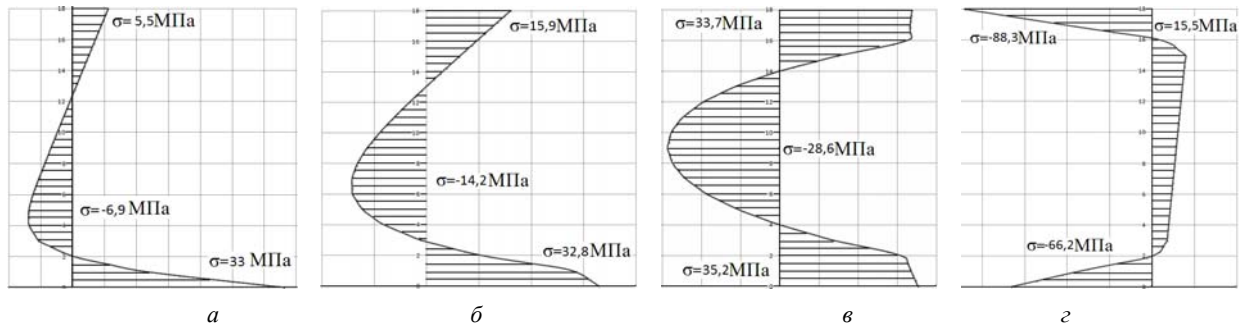


Рис. 6. Эпюры нормальных напряжений σ (МПа) в сечении $A-H$ по оси симметрии стержня в различные моменты времени для моделирования № 2: $a - 0,03$ с; $b - 0,13$ с; $v - 0,4$ с; z – деталь после завершения процесса охлаждения

Для оценки достоверности результатов численного моделирования была проведена серия натурных экспериментов по закалке. Условия проведения эксперимента: температура нагрева стержня 515°C , выдержка в печи 60 минут, температура закалочной среды 27°C , закалочная среда – вода. Образцы были изготовлены на ЧПУ станке из поковок материала АК6 в состоянии поставки Т1. Для изготовления образцов использовался материал из 4-х различных поковок. Для измерения изменения формы образцов на них наноси-

лась сетка. Сетка наносилась механически с помощью чертилки на предварительно отшлифованную грань образца (рис. 7). Измерение размеров сетки производилось с помощью оптического микроскопа Nikon MM-400.

Закалка образцов осуществлялась по двум схемам, с погружением вдоль стороны $H = 41$ мм (эксперимент № 1, 8 образцов) и вдоль стороны $A = 18$ мм (эксперимент № 2, 12 образцов). После закалки сетка, нанесенная на образцах, повторно измерялась и опре-

делялась величина перемещений узловых точек сетки. Измерения производились в течение 4-х часов непосредственно после закалки, чтобы исключить возможность влияния естественного старения на результаты эксперимента. Затем полученные экспериментальные данные обрабатывались с использованием вероятностно-статистической методики. Сравнение результатов численного моделирования и эксперимента представлено на рис. 8.

Как видно из рис. 8 и рис. 6, *а* характер остаточных закалочных «деформаций», полученный числен-

ным моделированием, качественно аналогичен наблюдаемым на практике. Количественно результаты численного эксперимента так же хорошо согласуются с натурным экспериментом. Максимальная достигнутая относительная погрешность составила 23 %, минимальная 4,6 % (рис. 9). Однако, там где относительная погрешность достигала 23 %, абсолютная погрешность не была более 0,01 мм. Стоит отметить, что большая погрешность наблюдалась в эксперименте № 1, то есть при погружении в направлении большей жесткости.

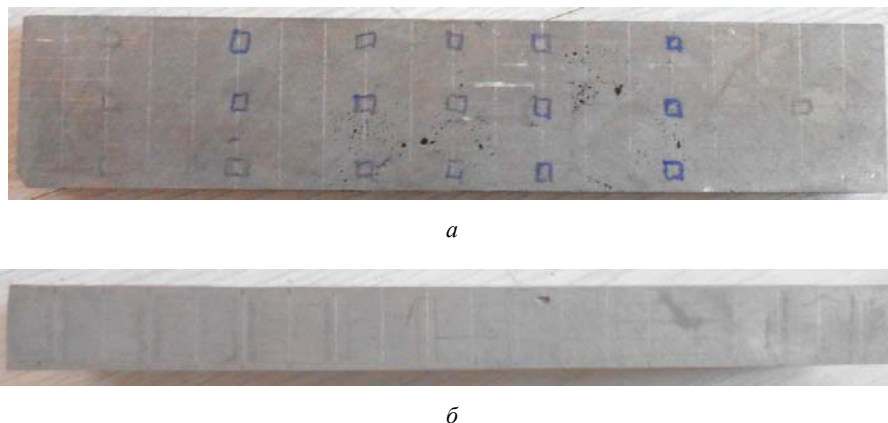


Рис. 7. Общий вид образцов с нанесенной сеткой: *а* – для погружения вдоль $H = 41$ мм; *б* – для погружения вдоль $A = 18$ мм

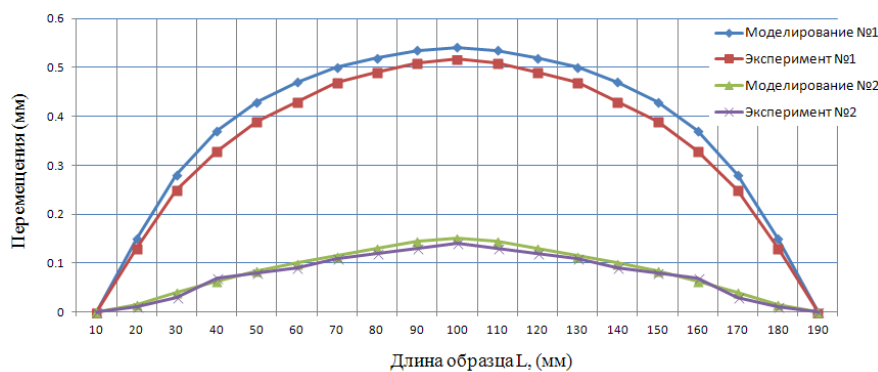


Рис. 8. График изменения перемещений по длине образца

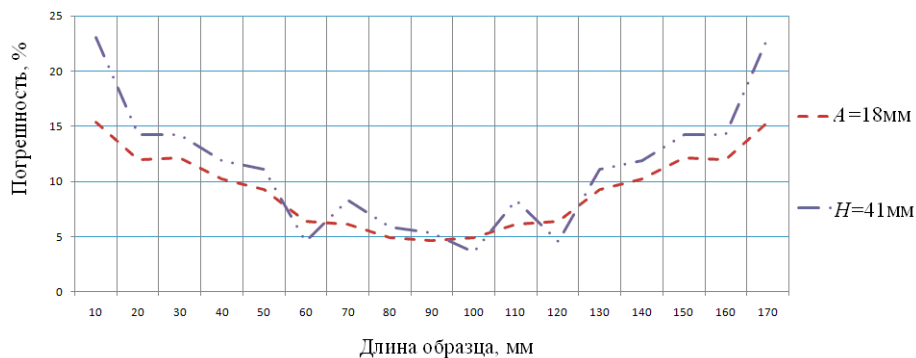


Рис. 9. График изменения относительной погрешности моделирования по длине образца

Таким образом, были достигнуты следующие результаты:

1. Впервые проведено численное моделирование закалки с учетом нелинейности поведения материала и эффекта погружения детали в воду, позволяющее оценивать характер и величину остаточных термических напряжений деталей летательных аппаратов средней и малой жесткости.

2. Численное моделирование показало процесс развития образования напряжений и деформаций во времени, начиная с первых моментов погружения.

3. Установлено влияние направления погружения в закалочную среду при закалке стержней с прямоугольным сечением на характер и величину образующихся остаточных напряжений. Погружение вдоль направления большей жесткости ведет к меньшим остаточным деформациям.

Библиографические ссылки

1. Перебоева А. А. Технология термической обработки металлов : курс лекций. Красноярск : СФУ, 2007. 143 с.
2. Арендарчук А. В., Астафьев А. А., Башнин Ю. А. Термическая обработка в машиностроении : справочник. М. : Машиностроение, 1980. 776 с.
3. Райцес В. Б. Термическая обработка на металлургических заводах. М. : Металлургия, 1971. 248 с.
4. Покровский А. М. Расчет остаточных напряжений в биметаллических опорных прокатных валках после термической обработки // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. С. 186–196.
5. Вопросы закалочного охлаждения. М. : Изд-во «Московский дом научно-технической пропаганды им. Ф. Э. Дзержинского», 1969. 99 с.

6. Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. Тепломассообмен : учеб. пособие для вузов. М. : Изд-во МЭИ, 2005. 550 с.

7. Применение SYSWELD для моделирования закалки в 2D постановке | Делкам – Урал [Электронный ресурс]. URL: http://plmural.ru/cae/tehnologicheskij_analiz/sysweld_modelirovanie_zakalki/ (дата обращения 16.06.2013).

References

1. Pereboeva A. A. *Tekhnologiya termicheskoy obrabotki metallov. Kurs lektsiy* (Heat Treatment Technology of Metals. Course of Lectures). Krasnoyarsk, SFU, 2007, 143 p.
2. Arendarchuk A. V., Astafiev A. A., Bashnin YU. A. *Termicheskaya obrabotka v mashinostroenii: Spravochnik* (Heat Treatment in Machine Building: Reference Book). Moscow, Nauka, 1987, 776 p.
3. Raytses V. B. *Termicheskaya obrabotka na metallurgicheskikh zavodakh* (Heat Treatment at Metallurgical Works). Moscow, Metallurgiya, 1971, 248 p.
4. Pokrovskiy A. M. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. «Mashinostroenie»*, 2012, p. 186–196.
5. *Voprosy zakalochnogo ohlazhdeniya* (Problems of Hardening Cooling). Moscow, Moskovskij dom nauchno-tehnicheskoy propagandy im. F. Je. Dzerzhinskogo, 1969, 99 p.
6. Cvetkov F.F., Grigor'ev B.A. *Teplomassoobmen: Uchebnoe posobie dlja VUZov* (Heat-mass Exchange: Tutorial for Institute of Higher Education). Moscow, MJeI, 2005, 550 p.
7. *Primenenie SYSWELD dlya modelirovaniya zakalki v 2D postanovke | Delkam*. Available at: http://plmural.ru/cae/tehnologicheskij_analiz/sysweld_modelirovanie_zakalki/ (accessed 16 June 2013).

© Бачурин А. С., Бобин К. Н., Матвеев К. А., Курлаев Н. В., 2013

УДК 536.24:517.9

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИПУСКА НА ВЕЛИЧИНУ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕТАЛЯХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ*

А. С. Бачурин, К. Н. Бобин, К. А. Матвеев, Н. В. Курлаев

Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20. E-mail: bachurin.a.s@yandex.ru

Производилось численное моделирование закалки сечений заготовок «рамы оплета фонаря» среднемагистрального самолета. Моделирование производилось с учетом температурной зависимости характеристик материала и коэффициента конвективного теплообмена. Были получены распределения тепловых полей и напряжений в сечениях заготовок с различным припуском. Расчет производился с целью выявления предпочтительного припуска под закалку для детали перед финишной механической обработкой. Установлено влияние величины и формы припуска на остаточные напряжения. Определено, что уменьшение припуска, с целью снижения остаточных напряжений, может производиться за счет минимизации разницы температур на границе и в сердцевине детали. Снижение остаточных напряжений приведет к снижению деформаций детали после финишной механической обработки.

Ключевые слова: метод конечных элементов, закалка, механическая обработка, остаточные напряжения, остаточные деформации.

*Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта Министерства образования и науки РФ №7.822.2011.