

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКАЛКИ АЛЮМИНИЕВЫХ ДЕТАЛЕЙ

А.С. БАЧУРИН, аспирант
К.Н. БОБИН, канд. техн. наук, доцент
К.А. МАТВЕЕВ, доктор техн. наук, профессор
Н.А. РЫНГАЧ, канд. техн. наук, доцент
Н.В. КУРЛАЕВ, доктор техн. наук, профессор
(НГТУ, г. Новосибирск)

Поступила 4 июня 2013 года
Рецензирование 20 августа 2013 года
Принята к печати 5 сентября 2013 года

Бачурин А.С. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: bachurin.a.s@yandex.ru

Производство высокоточных деталей часто сталкивается с необходимостью прогнозирования деформаций, вызываемых термической обработкой. Основная сложность подобных расчетов заключается в наличии нестационарного теплообмена между закалочной средой и деталью, а также в отсутствии достоверной информации о сходимости решений подобных задач с экспериментальными исследованиями. В работе проведено решение связанной задачи нестационарного теплообмена и термической деформации образца из алюминиевого сплава и сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. В расчетах учтена зависимость коэффициента теплообмена между поверхностью детали и закалочной средой от температуры поверхности детали, скорости и направления погружения детали в закалочную среду. В результате расчетов были получены температурные поля в детали, возникающие напряжения и деформации детали. Экспериментальные данные подтвердили характер деформации, полученной при расчете, разность между деформациями, полученными при расчетах и экспериментальными данными, составила 23%.

Ключевые слова: ANSYS, численное моделирование, закалка, закалочные напряжения, закалочные деформации.

Введение

Процесс закалки связан с появлением напряжений, которые в ряде случаев могут привести к короблению и деформации деталей. Также на деформацию влияют материал, размеры, геометрия и толщина закаливаемых деталей, кроме того, детали помещаются в закалочную среду с конечной скоростью, что также вносит вклад в общую деформацию деталей [1, 3]. Эта проблема особенно актуальна в авиастроении, где детали обладают малой жесткостью [4, 9].

В настоящее время борьба с закалочными деформациями ведется следующими способами [3, 6, 7, 8]: рациональное конструирование деталей, фиксация деталей и задание дополнительных припусков на чистовую механическую обработку, выполняемую после термообработки. Однако существующие методики определения закалочных деформаций [3, 5] носят либо качественный характер, либо сложны и не обладают необходимой точностью для нежестких деталей. Отсутствие достоверной методики прогнозирования закалочных напряжений приводит к зна-

чительному количеству бракованных деталей, к которым предъявляются повышенные требования по точности изготовления.

В настоящее время существующее программное обеспечение позволяет производить анализ тепловых деформаций [8, 10, 11, 12], но для моделирования закалки необходимо задать функцию, описывающую теплообмен между поверхностью детали и закалочной средой. Кроме того, для получения достоверных результатов необходимо учитывать изменение теплообмена между закалочной средой и деталью, зависящего от температуры поверхности детали [2], а также направление и скорость погружения детали в закалочную среду. Проведенный анализ доступной литературы [8, 12], посвященной термической обработке, показал, что готовых решений для задач в данной постановке не существует, однако возможно решение подобных задач с применением связанного междисциплинарного анализа. Главной проблемой такого анализа является вопрос сходимости результатов расчетов с экспериментальными данными, поэтому для практического применения результатов

таких расчетов необходимо оценить погрешность путем сравнения тестовых расчетов либо задачами, имеющими известное решение, либо с экспериментальными данными.

Цель данной работы – оценка достоверности результатов связанного анализа теплообмена и термических деформаций образца из алюминиевого сплава.

Численное моделирование процесса закалки

Для моделирования процесса погружения детали в закалочную среду задана расчетная область (рис. 1), представляющая собой параллелепипед с габаритными размерами 200×41×18 мм.

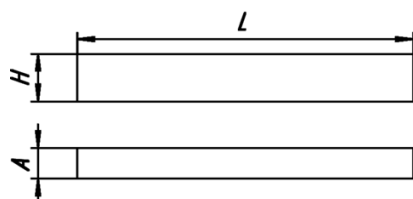


Рис. 1. Эскиз стержневого образца

В качестве начальных условий для расчета были заданы:

- материал детали – алюминиевый сплав АК6,
- начальная температура стержня 515 °С,
- закалочная среда – вода,
- температура закалочной среды 27 °С.

Решение задачи проводилось с помощью конечно-элементного анализа в программе ANSYS 14 в два этапа: первый этап заключался в решении нестационарной тепловой задачи, второй представлял собой расчет перемещений образца под действием напряжений, вызванных локальным нагревом. Кроме того, учитывался нелинейный характер теплообмена между водой и поверхностью детали, зависящий от температуры [2], для чего был написан макрос, изменявший коэффициент теплообмена в зависимости от температуры на поверхности образца.

Для упрощения расчетов и снижения числа конечных элементов использовалась симметрия детали. Погружение в закалочную среду производилось со скоростью 0,05 м/с вдоль размера 41 мм. Для обеспечения устойчивости решения учитывалось условие

$$ITS = \frac{\Delta^2}{4\alpha},$$

где ITS – начальный шаг по времени; Δ^2 – приведенная длина конечного элемента в направлении температурного градиента; α – коэффициент теплопроводности.

Так как процесс погружения детали в закалочную среду продолжается менее 1 с, для расчетов выбран шаг по времени 0,01 с, и исходя из шага

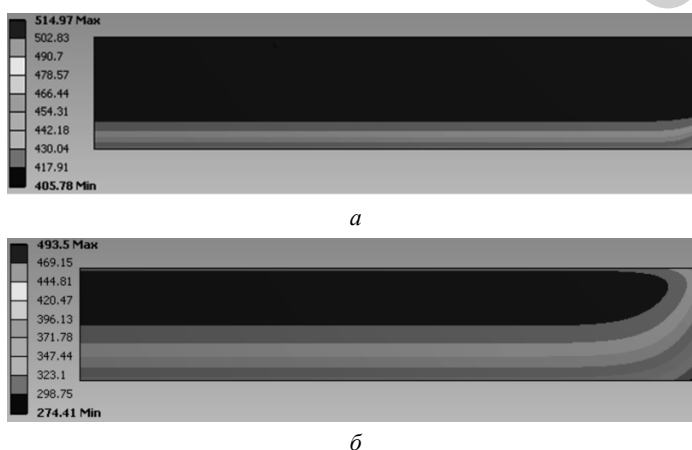


Рис. 2. Распределение температур (°С) в стержне в различные моменты времени при погружении в закалочную среду: а – 0,03 с; б – 0,4 с

по времени задан размер ячейки. В результате проведенных расчетов была получена зависимость распределения температуры по сечению стержня от времени (рис. 2). Расчет показал разницу ~100 °С между отдельными частями образца. Такая разница температур вызывает значительные напряжения в детали, которые могут вызвать пластические деформации, учитывая тот факт, что при нагреве величина предела текучести снижается.

Данные распределения температур, полученные в расчете конвективного теплообмена, были использованы в структурном анализе, в результате чего были получены значения эквивалентных напряжений (рис. 3).

Из распределения напряжений можно сделать вывод, что внешние слои стержня при контакте с закалочной средой охлаждаются и сжимаются, в то время как внутренние слои остаются горячими и препятствуют сжатию внешних слоев. Следовательно, во внешних слоях действуют напряжения растяжения, во внутренних – напряжения сжатия. Далее наружный слой теряет возможность пластически

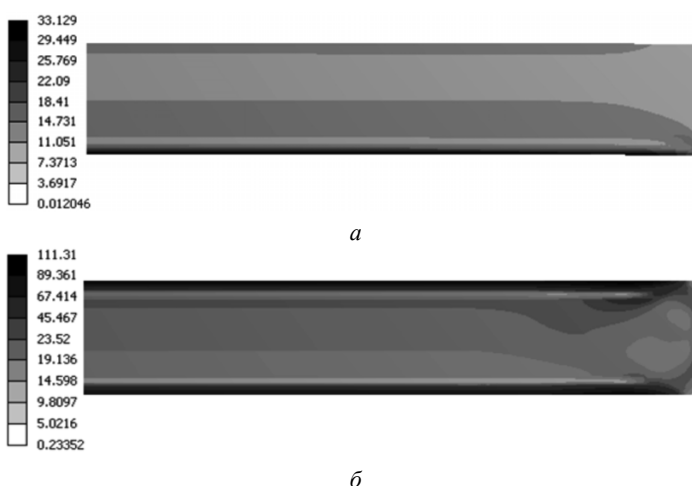


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений (МПа) в расчетной области образца в различные моменты времени: а – 0,03 с; б – 0,4 с



Рис. 4. Деформации закаленного стержня относительно первоначальной формы (масштаб перемещений увеличен)

деформироваться, при этом внутренний объем, охлаждаясь, уменьшается, что приводит к появлению внутри стержня напряжений растяжения. В результате появления напряжений стержень деформируется (рис. 4), что часто встречается в практике термообработки [3].

Результаты и обсуждение

Для оценки достоверности расчетов деформаций проведена экспериментальная закалка образцов. Режимы термообработки и размеры образцов соответствуют начальным условиям расчета. Всего было изготовлено восемь образцов из четырех партий. На поверхность образцов нанесена мерная сетка для оценки деформации. Характер деформации, наблюдаемый при закалке (рис. 5), качественно аналогичен деформациям, полученным при расчете (рис. 4). Измерения образцов проводились после выдержки, исключающей влияние старения.



Рис. 5. Образец с мерной сеткой после закалки

При сравнении экспериментальных результатов с результатами численного моделирования (рис. 6) максимальная относительная погрешность составила 23 %, что соответствует отклонению примерно в 0,01 мм, из чего можно сделать вывод, что результаты численного расчета удовлетворительно сходятся с экспериментальными данными.

Выводы

1. Экспериментальные данные подтвердили характер деформации, полученный при расчете, при этом разность между деформациями, полученными при расчетах и экспериментальными данными, составила не более 23 %.

2. Найденная погрешность позволяет использовать результаты данного анализа для прогнозирования закалочных деформаций и назначения припусков на окончательную механическую обработку детали после проведения термообработки.

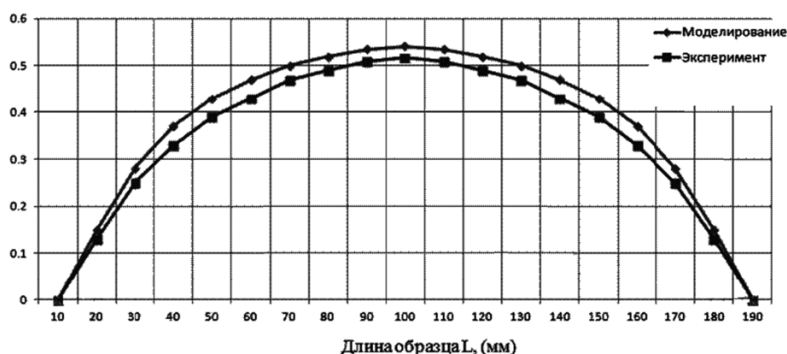


Рис. 6. Сравнение перемещений по длине образца

Список литературы

1. Беляев А.И., Бочвар О.С., Буйнов Н.Н. и др. Металловедение алюминия и его сплавов. – М.: Металлургия, 1971. – 352 с.
2. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 550 с.
3. Арендарчук А.В., Астафьев А.А., Бащинин Ю.А. Термическая обработка в машиностроении. Справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 776 с.
4. Курлаев Н.В., Рынгач Н.А., Нарышева Г.Г. Теоретические основы самолето- и вертолетостроения: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 100 с.
5. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. Расчеты методом расчленения тела. – М.: Машгиз, 1963. – 352 с.
6. Фиргер В.И. Термическая обработка сплавов. Справочник. – Ленинград: Машиностроение, 1982. – 304 с.
7. Лахтин Ю.М., Рахматиди А.Г. Термическая обработка в машиностроении. Справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.
8. George E.T. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. – Ohio: ASM, 2001. – 550 p.
9. Пекариш А.И., Тарасов Ю.М., Кривов Г.А., Громишев А.Г., Матвиенко В.А.. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 303 с.
10. Биленко Г.А. Общие возможности пакета программ Welding Simulation Suite // Металлург. – 2011. – № 5. – С. 28–31.
11. Скиба В.Ю., Корниенко Е.Е., Веселов С.В., Плотнокова Н.В. Определение рациональных режимов электродуговой сварки стали 30ХГСА с помощью конечно-

элементного моделирования в программном комплексе SYSWELD // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. науч. трудов VI межд. науч.-техн. конф. Часть 1. - Липецк: ЛГТУ, 2009. – С. 238–245.

12. Портал технической поддержки пользователей ANSYS: [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://support.ansys.com/portal/site/AnsysCustomerPortal> (дата обращения: 7.10.12)

Obrabotka metallov

N 3 (60), July–September 2013, Pages 94-97

Numerical simulation of aluminum alloy parts quenching process

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

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

Abstract

Production of high-precision parts needs to predict deformation and stresses caused by thermal treatment. The main problem of such calculation is the presence of unsteady heat transfer between the quenching medium and the part as well as the absence of reliable information on the convergence of solutions of such problems with experimental studies. In the paper the solution of the coupled problem of unsteady heat transfer and thermal deformation of an aluminum alloy sample is given and the results are compared with experimental data. The calculations took into account the dependence of the heat transfer coefficient between the workpiece surface and the temperature of the quenching medium surface of the part, the speed and the direction of the dive details in the quenching medium. Temperature fields in detail, resulting stress and strain in details are obtained in consequence of the calculations. Experimental data confirmed the nature of the deformation, obtained by calculating, the total deviation between the strains obtained in the calculations and the experimental data was 23%.

Keywords: ANSYS, numerical simulation, quenching, quenching stress, quenching deformation.

References

1. Beljaev A.I., Bochvar O.S., Bujnov N.N. *Metallovedenie aljuminija i ego splavov* (Physical metallurgy aluminum and aluminum alloys). Moscow, Metallurgija, 1971. 352 p.
2. Cvetkov F.F., Grigor'ev B.A. *Teplomassoobmen: Uchebnoe posobie dlja vuzov* (Heat-mass exchange: Textbook for universities). Moscow, Moscow Power Engineering Institute Press, 2005. 550 p.
3. Arendarchuk A.V., Astaf'ev A.A., Bashnin Ju.A. *Termicheskaja obrabotka v mashinostroenii: Spravochnik* (Heat treatment in machine building: Handbook). Moscow, Mashinostroenie, 1980. 776 p.
4. Kurlaev N.V., Ryngach N.A., Narysheva G.G. *Teoreticheskie osnovy samoletov- i vertoletostroenija: Uchebnoe posobie* (Theoretical basis of aircraft and helicopter: Tutorial). Novosibirsk, NSTU, 2013. 100 p.
5. Abramov V.V. *Ostatochnye naprjazhenija i deformacii v metallah. Raschjoty metodom raschlenenija tela* (Residual stresses and deformations metals. Calculations by a method of dismemberment body). Moscow, Mashgiz, 1963. 352 p.
6. Firger V.I. *Termicheskaja obrabotka splavov: Spravochnik* (Heat treatment of alloys: Handbook). Leningrad, Mashinostroenie, 1982. 304 p.
7. Lahtin Yu.M., Rahshtadt A.G. *Termicheskaja obrabotka v mashinostroenii: spravochnik* (Heat treatment in machine building: Handbook). Moscow, Mashinostroenie, 1980. 783 p.
8. George E.T. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. Ohio, ASM, 2001. 550 p.
9. Pekarsh A.I. Tarasov Yu.M., Krivov G.A., Gromashev, A.G.; Matvienko, V.A. *Sovremennye tehnologii agregatno-sborocnogo proizvodstva samoletov* (Modern technologies of aggregate-assembly production aircraft). Moscow, Agraf-press, 2006. 303 p.
10. Bilenko G.A. Obshhie vozmozhnosti paketa programm Welding Simulation Suite [General capabilities of the software package welding simulation suite]. *Metallurg - Metallurgist*, 2011, no. 5, pp. 28-31.
11. Skeebe V.Yu., Kornienko E.E., Veselov S.V., Plotnikova N.V. *Opreделение racional'nyh rezhimov jelektrodugovoj svarki stali 30HGSA s pomoshh'ju konechno-jelementnogo modelirovanija v programnom komplekse SYSWELD* [The definition of rational modes of arc welding steel 30HGSA using finite-element modeling software package SYSWELD]. *Sovremennaja metallurgija nachala novogo tysjacheletija: sbornik nauchnyh trudov VI mezhduнародной nauchno-tehnicheskoy konferencii*. [Collected scientific papers of the VI International Scientific Conference "Modern metallurgy beginning of the new millennium"]. Lipetsk: LSTU, 2009, Part 1. pp. 238-245.
12. *Portal tehničeskoj podderzhki pol'zovatelej ANSYS* (Portal user support ANSYS) Available at: <https://support.ansys.com/portal/site/AnsysCustomerPortal> (accessed 7 October 2012).