

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. Арндарчук 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. Arndarchuk 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. Baumana. 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.

NUMERICAL SIMULATION OF INFLUENCE OF THE STOCK ALLOWANCE ON THE RESIDUAL STRESSES IN AIRCRAFT PARTS AFTER 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 numerical simulation of hardening stock cross sections of aircraft parts was performed. The modeling was performed with the account of the temperature dependence of the material characteristics and the convective heat transfer coefficient. The authors obtained the distributions of thermal fields and stresses in the blanks with different sections allowance. The calculation was performed in order to identify the preferred allowance for hardening for a detail before the finishing milling. The influence of the value and shape of the allowance on the residual stresses was revealed. It was determined that the decrease in allowance, with the aim to reduce the residual stresses can be done by minimizing the temperature difference at the border and in the core of the part. Reduction of the residual stresses will decrease deformation of a part after finishing machining.

Keywords: finite element analysis, hardening, milling, residual stress, residual deformation.

При производстве деталей летательных аппаратов применяется разделенный технологический процесс механической обработки. То есть после черновых фрезерных операций применяется закалка, с целью улучшения механических характеристик материала [1]. После закалки деталь проходит чистовую механическую обработку, что связано с образованием остаточных закалочных напряжений и, как следствие, деформаций. В связи с этим встает задача выбора припуска, оставляемого после черно-

вой обработки перед закалкой для компенсации остаточных деформаций. Однако при этом остается неясным и вопрос о влиянии величины припуска на остаточные напряжения.

Для оценки влияния величины припуска на остаточные напряжения для моделирования было выбрано сечение детали «рама оплета фонаря» (рис. 1) среднемагистрального самолета, которая изготавливается с применением разделения технологического процесса механической обработки.

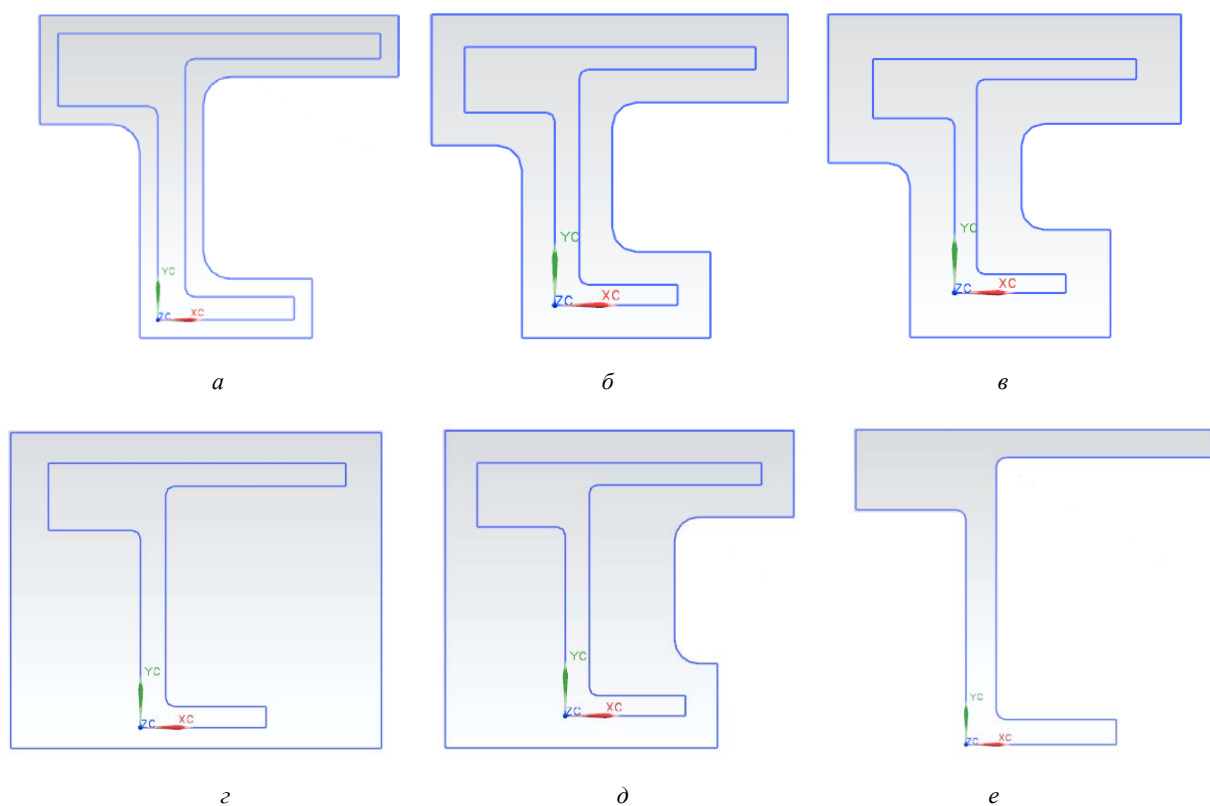


Рис. 1. Общий вид сечения детали с припуском:
 а – равномерный припуск 4 мм; б – равномерный припуск 8 мм; в – равномерный припуск 12 мм;
 г – не равномерный припуск от 8 мм до 18 мм; д – заготовка прямоугольной формы с неравномерным припуском;
 е – сечение детали без припуска

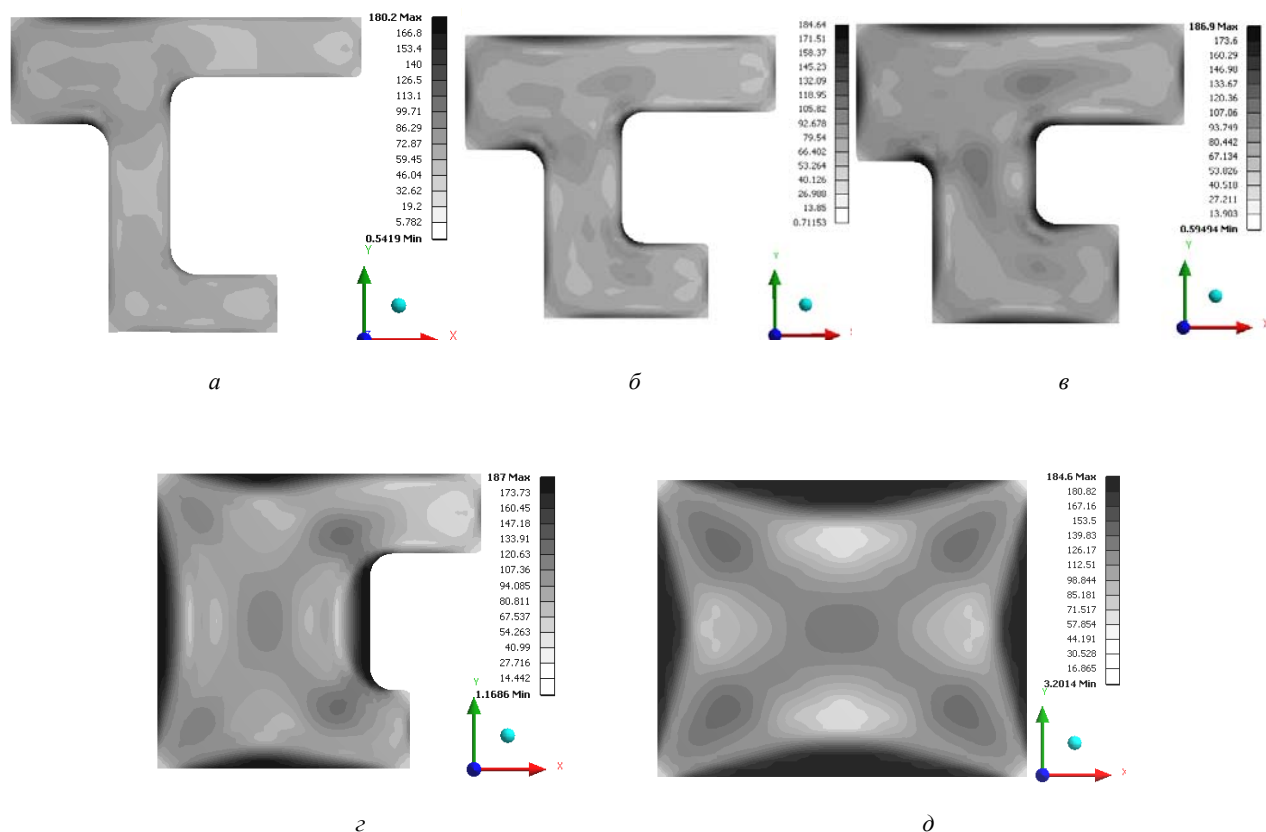


Рис. 2. Эквивалентные напряжения по Мизесу:
a – равномерный припуск 4 мм; *б* – равномерный припуск 8 мм; *в* – равномерный припуск 12 мм;
г – неравномерный припуск от 8 мм до 18 мм; *д* – заготовка прямоугольной формой с неравномерным припуском

В численном моделировании рассматривались 5 вариантов припуска:

- 1) равномерный припуск 4 мм (рис. 2, *a*);
- 2) равномерный припуск 8 мм (рис. 2, *б*);
- 3) равномерный припуск 12 мм (рис. 2, *в*);
- 4) не равномерный припуск от 8–18 мм (рис. 2, *г*);
- 5) заготовка прямоугольной формой с неравномерным припуском (рис. 2, *д*).

На внутренние углы всех заготовок был назначен радиус скругления 6 мм, который образуется на практике при черновой обработке за счет формы металло-режущего инструмента.

Численное решение задачи было выполнено в программном комплексе Ansys в 2D постановке. Решение проводилось в два этапа. Первый этап включал решение нестационарной тепловой задачи, а второй – решение квазистационарной структурной задачи. Для теплового анализа в качестве граничных условий задавались граничные условия 3-го рода (коэффициент конвективного теплообмена [2; 3] задавался в зависимости от температуры). Первоначальное распределение температуры принималось равномерным и равным 515 °С, температура закалочной среды – 25 °С. Характеристики материала задавались как зависящие от температуры, материал детали – алюминиевый деформируемый сплав АК6. Так как входными данными

для структурной квазистационарной задачи являются поля распределения температуры в детали с течением времени, то при решении нестационарной тепловой задачи шаг по времени был выбран равным 0,01 сек. С аналогичным шагом результаты теплового анализа передавались в структурный анализ. В тепловом анализе использовались конечные элементы Plane77 и Surf151, в структурном Plane183.

На рис. 2–3 представлены результаты расчета. На рис. 2 величина максимальных эквивалентных напряжений для каждого варианта припуска различается незначительно. Однако различие в распределении напряжений по сечениям для каждого варианта меняется в значительной степени, даже по сечениям с равномерным припуском (см. рис. 2, *a–в*). С ростом припуска растет площадь сечения, занятой напряжениями в диапазоне от 100 до 180 МПа (см. рис. 2, *г, д*). Применение умеренного значения припуска 4–8 мм (рис. 2, *a, б*) способствует более равномерному распределению напряжений, причем высокий уровень напряжений (более 60 МПа) наблюдается лишь в поверхностных слоях сечения, а по телу сечения преобладают напряжения менее 60 МПа. Так как после закалки последует финишная механическая обработка детали, то применение умеренного равномерного припуска предпочтительнее, потому что в этом случае

будет более низкий уровень остаточных деформаций и напряжений в готовой детали, чем при большем припуске.

Как известно [1; 5], растягивающие напряжения являются более опасными, так как могут привести к образованию трещин. Если пронаблюдать распределение нормальных напряжений σ_x на рис. 3, то можно увидеть, что растягивающие напряжения сосредоточены вблизи поверхности заготовки. Однако с увеличением припуска растут и глубина проникновения растягивающих напряжений, и для случая с прямоугольным сечением заготовки на рис. 3, д может достигать границ детали. При удалении верхних слоев материала, в которых сосредоточены остаточные растягивающие напряжения, в процессе финишной механической обработки произойдет высвобождение средних сжатых слоев материала. Вследствие перераспределения напряжений произойдет повторное образование растягивающих напряжений на поверхности уже готовой детали, а это в свою очередь, повлияет на геометрию изготовленной детали. Таким образом, назначение минимального припуска благоприятным образом сказывается на снижении остаточных деформаций и внутренних напряжений. Вышеуказанному соответствуют варианты с припуском 4–8 мм (рис. 3, а, б).

Распределение пластических деформаций представлено на рис. 4. Видно, что с увеличением припуска зоны пластических деформаций также увеличиваются. Величины пластических деформаций для всех вариантов припуска примерно одинаковы, только для варианта сечения заготовки в форме прямоугольника значительно отличается от остальных, примерно в 1,7 раза. Таким образом, минимизация припуска хоть и не способствует снижению уровня пластических деформаций, но позволяет их локализовать и свести к минимуму зоны подверженные им. Если проанализировать расположение зон пластических деформаций на рис. 4, то можно заметить закономерность в их расположении – наибольшая глубина проникновения пластических деформаций наблюдается в сторонах, сопряженных с открытыми углами, а наибольший уровень пластических деформаций наблюдается в закрытых углах.

На рис. 5 представлен график $\Delta T(t) = T(t)_{\max} - T(t)_{\min}$. Хорошо заметно, что сечение с минимальным припуском имеет минимальное значение ΔT . Это можно легко объяснить тем, что в виду меньшей толщины припуска, внутренние области охлаждаются быстрее и как следствие имеют меньшую разницу в температуре с внешними слоями. Что и приводит в конечном итоге к меньшим остаточным напряжениям.

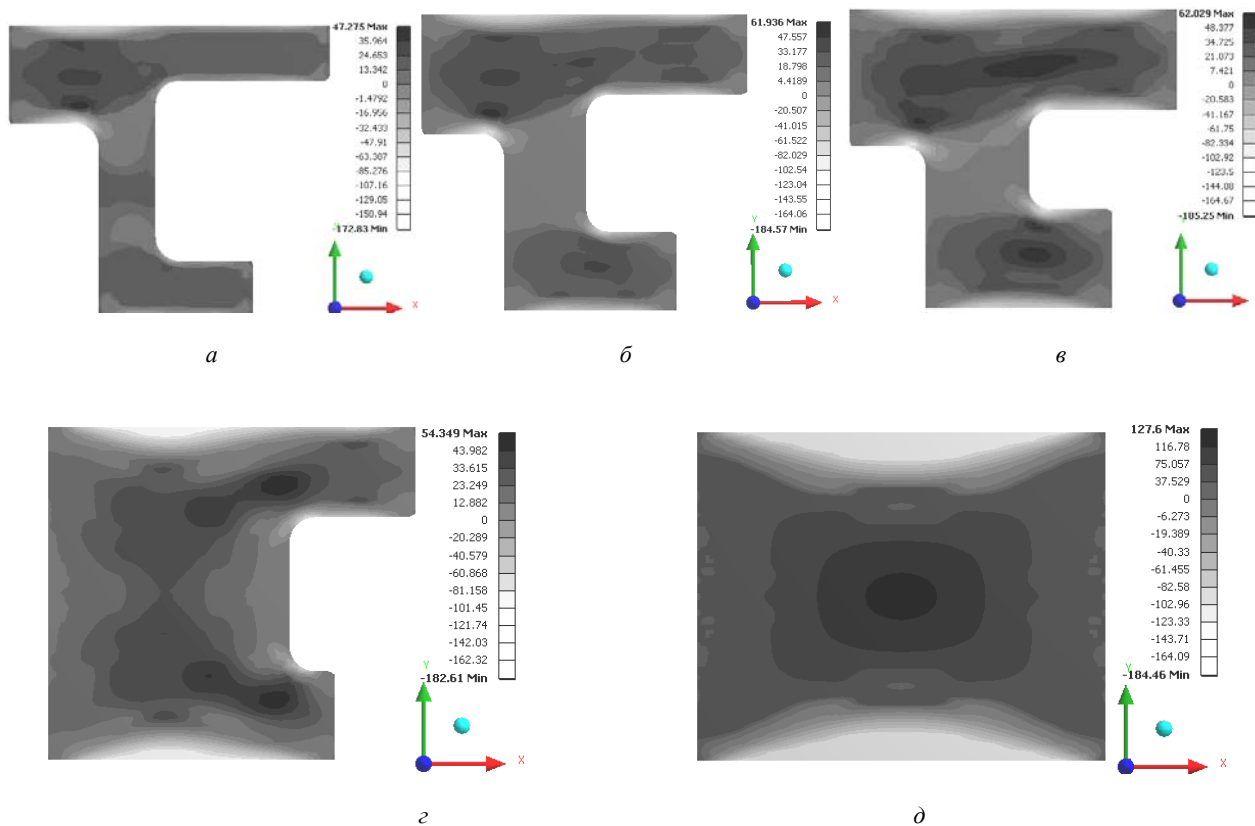


Рис. 3. Нормальные напряжения σ_x :
 а – равномерный припуск 4 мм; б – равномерный припуск 8 мм; в – равномерный припуск 12 мм;
 г – неравномерный припуск от 8 мм до 18 мм; д – заготовка прямоугольной формой с неравномерным припуском

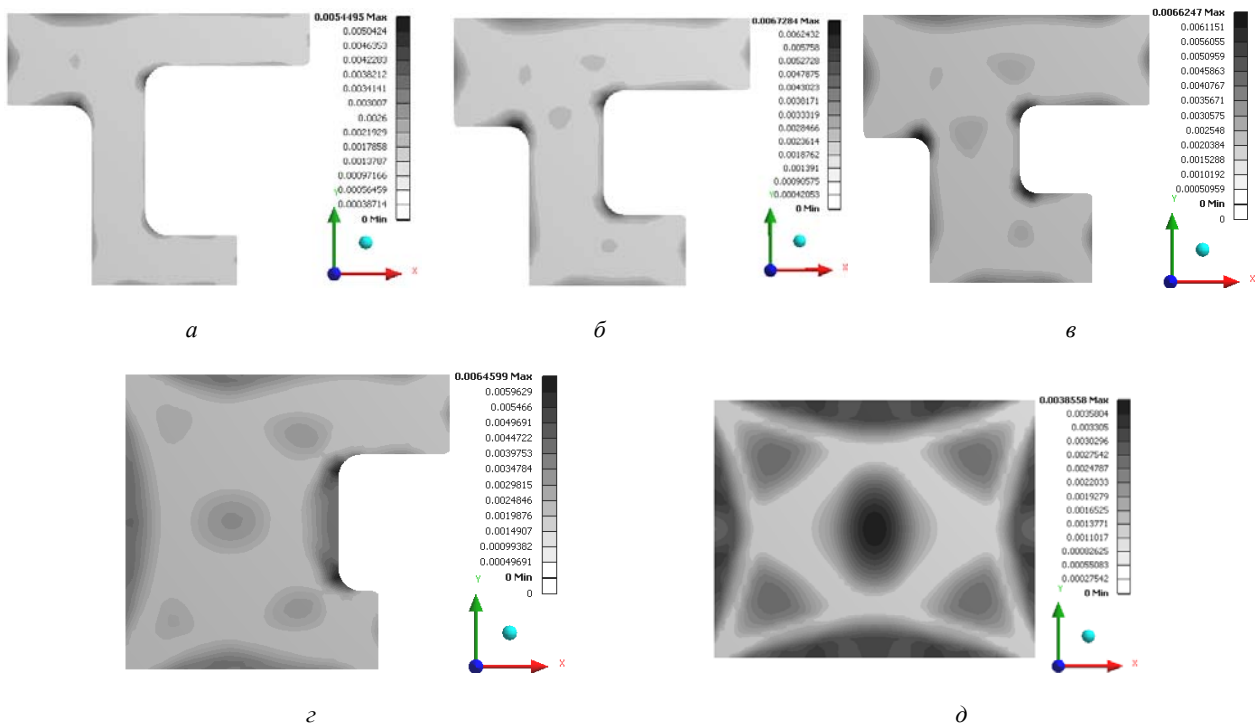


Рис. 4. Распределение пластических деформаций:
 а – равномерный припуск 4 мм; б – равномерный припуск 8 мм; в – равномерный припуск 12 мм;
 г – неравномерный припуск от 8 мм до 18 мм; д – заготовка прямоугольной формы с неравномерным припуском

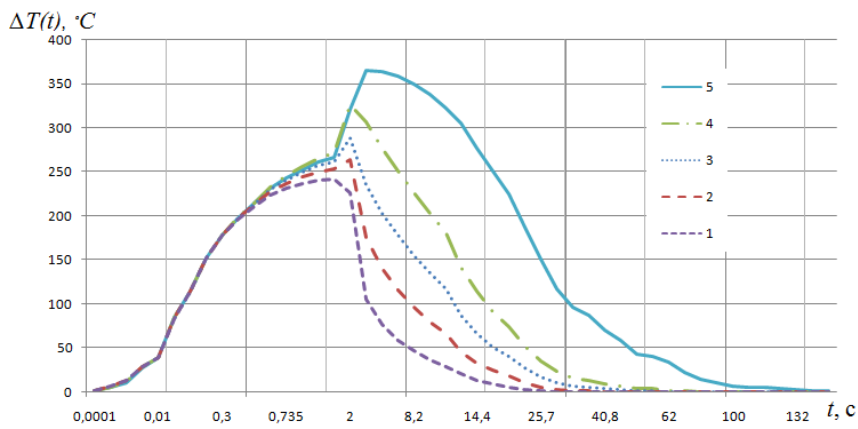


Рис. 5. Изменение $\Delta T(t)$ с течением времени в различных сечениях:
 1 – равномерный припуск 4 мм; 2 – равномерный припуск 8 мм; 3 – равномерный припуск 12 мм;
 4 – неравномерный припуск от 8 мм до 18 мм; 5 – заготовка прямоугольной формы с неравномерным припуском

Таким образом, были достигнуты следующие результаты:

1. Проведенный численный эксперимент по моделированию закалки сечения детали «рама оплета фонаря» среднемагистрального самолета показал влияние величины припуска под закалку на остаточные напряжения.

2. Установлено, что применение минимального припуска под закалку способствует уменьшению размеров областей, подверженных образованию остаточных напряжений. Зоны повышенных напряжений при

минимизации припуска сосредотачиваются вокруг открытых углов и в закрытых углах.

3. Установлено, что при закалке сечения детали «рама оплета фонаря» среднемагистрального самолета вокруг открытых углов при увеличении припуска увеличивается глубина проникновения остаточных напряжений.

4. Установлено, что минимальный припуск под закалку обеспечивает минимальное различие в температуре внешних и внутренних слоев сплава АК6 и приводит к уменьшению уровня остаточных напряжений.

Библиографические ссылки

1. Фиргер И. В. Термическая обработка сплавов. Л. : Машиностроение, 1982. 304 с.
2. 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).
3. Исаченко В. П. Теплопередача : учебник для вузов. М. : Энергоиздат, 1981. 416 с.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике : пер. с англ. под ред. Б.Е. Победря. М. : Мир, 1975. 438 с.
5. Арендарчук А. В., Астафьев А. А., Башнин Ю. А. Термическая обработка в машиностроении : справочник . М. : Машиностроение, 1980. 776 с.

References

1. Firger I. V. *Termicheskaja obrabotka splavov* (Heat Treatment of Alloys). Leningrad, Mashinostroenie, 1982. 304 p.
2. *Primenenie SYSWELD dlya modelirovaniya zakalki v 2D postanovke | Delkam* Available at: http://plmural.ru/cae/tehnologicheskij_analiz/sysweld_modelirovanie_zakalki/ (accessed 16 June 2013).
3. Isachenko V. P. *Teploperedacha: Uchebnik dlya VUZov* (Heat Transfer: Textbook for Institute of Higher Education). Moscow, Energoizdat, 1981. 416 p.
4. Zenkevich O. *Metod konechnyh jelementov v tehnike* (Finite Element Method in Technics). Moscow, Mir, 1975. 438 p.
5. 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.

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

УДК 662.629.05

РАЗВИТИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Е. Н. Голубев, А. О. Николаев

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: gen@iss-reshetnev.ru

Рассматривается актуальная проблема развития и совершенствования методики стендовых испытаний бортового комплекса управления космического аппарата космических аппаратов разработки ОАО «ИСС». Авторами проведен анализ имеющихся средств стендовых испытаний БКУ, а также освещены проблемы исследования и верификации перспективных БКУ с сетевой организацией информационного обмена. Для решения рассматриваемых вопросов обосновывается необходимость разработки методики параллельного контроля процессов, а также диагностического контроля аномальных ситуаций вычислительного модуля в бортовой вычислительной сети. В работе использован объектно-ориентированный анализ, методы построения и анализа алгоритмов, методы моделирования в UML. На основе разработанных алгоритмов испытаний проведен предварительный этап отработки разветвленной сети SpaceWire. Разрабатываемые средства и методы испытаний внедряются при разработке стенда испытаний БКУ перспективных КА и могут быть использованы при отработке и верификации систем управления на основе разветвленных сетей обмена информацией. Разработанные принципы и методики являются основой для проведения наземной экспериментальной отработки БКУ нового поколения.

Ключевые слова: система управления, верификация алгоритмов управления, отработка систем управления, методики испытаний, наземные испытания.

DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF THE ON-BOARD CONTROL SYSTEM TEST METHODS AT TEST BENCH FACILITY

E. N. Golubev, A. O. Nikolaev

JSC “Information Satellite Systems” named after academician M.F. Reshetnev
52 Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: gen@iss-reshetnev.ru

Development and improvement of the On-Board Control System (OCS) test methods, implemented in satellites manufactured by ISS, is considered in this paper.

The authors has analyzed the available bench facilities of OCS test and indicated the problem to investigate and verify the next generation of OCS that based on network organization of data change.