Д. А. Потянихин, Е. М. Дубенко

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАКЛЕПОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО С ПОМОЩЬЮ АЗОТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЗАКЛЕПКИ

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

Аннотация. Рассматривается способ создания заклепочного соединения с помощью азотного охлаждения заклепок. В цилиндрическое отверстие в пластине, находящейся при комнатной температуре, помещается охлажденная до криогенной температуры заклепка. Нагреваясь до комнатной температуры, заклепка подвергается тепловому всестороннему расширению и создает посадку с натягом. Моделирование термомеханического поведения заклепочного соединения производится в конечно-элементном программном комплексе ANSYS. Решается несвязанная задача в осесимметричной постановке. На первом этапе находится распределение температуры в системе заклепка-пластина. Полученное температурное поле используется как параметр на втором этапе при решении деформационной задачи. Учитывается зависимость свойств материалов от температуры. Получены поля остаточных деформаций и остаточных напряжений в пластине и заклепке.

Ключевые слова: ANSYS, деформации, напряжения, конечно-элементное моделирование, термоупругопластичность, контактная задача, заклепочное соединение.

УДК: 539.3

Введение. Неразъемные заклепочные соединения находят широкое применение в машиностроении, в частности, в производстве летательных аппаратов. К соединениям предъявляются требования прочности, жесткости и герметичности в зависимости от их назначения, регламентируемые отраслевыми стандартами. Отверстия под заклепки в деталях получают продавливанием или сверлением. Поверхности таких отверстий

[©] Потянихин Д. А., Дубенко Е. М., 2018

Потянихин Дмитрий Андреевич

e-mail: potyanikhin@mail.ru, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

Дубенко Екатерина Михайловна

e-mail: katerina.dubenko@bk.ru, студент, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМиМ ДВО РАН №007-00285-18-00 Поступила 10.08.2018

могут иметь дефекты в виде трещин, шероховатостей или острых кромок, что уменьшает герметичность и прочность соединения на срез. Одним из способов преодоления таких последствий поверхностных дефектов является горячая клепка. Стальную заклепку нагревают до 1100 °C и вставляют в отверстие соединяемых элементов. При остывании заклепка укорачивается и плотно стягивает соединяемые детали.

Однако в конструкциях из алюминиевых сплавов допускается только холодный способ клепки, при этом сплав заклепки и сплав соединяемых элементов должны быть близкими по химическому составу для предотвращения коррозии. В работе [1] предложен способ создания заклепочного соединения с помощью азотного охлаждения заклепок. В отверстия соединяемых элементов чуть меньшего диаметра, чем у заклепки, находящихся при комнатной температуре, помещают предварительно охлажденную в азоте заклепку. Нагреваясь до комнатной температуры, заклепка подвергается тепловому всестороннему расширению и создает посадку с натягом. Затем производится расклепывание обычным способом.

«Холодная» посадка в основных чертах подобна широко изученной и регламентированной горячей посадке. Однако метод горячей посадки предполагает возможность нагрева внешнего элемента сборки. При посадке заклепки в отверстие в пластине нагревать алюминиевый сплав запрещается. Поэтому натяг можно обеспечить, наоборот, охлаждением внутреннего элемента. Моделирование процесса «холодной» посадки заклепки проводилось в работе [2]. В статьях [3,4] изучалась горячая посадка кольца в кольцо. Также изучались процессы горячей посадки муфты на вал [5] и трубы на трубу [6]. В указанных работах учитывалась зависимость предела текучести от температуры.

В настоящем исследовании представлены результаты моделирования теплового расширения предварительно охлажденной в азоте заклепки, помещенной в отверстие пластины в конечно-элементном пакете ANSYS. Считается, что поверхность отверстия идеально гладкая, без дефектов. В рамках данной работы при моделировании использовались заклепки 3–8–Ан.Окс с плоско-скругленными головками с компенсаторами, изготовленные по ОСТ 1 34040–79 из сплава B65 [7]. В начальный момент времени заклепка имеет температуру кипения азота. Диаметр отверстия равен диаметру охлажденной заклепки. Учитывается теплообмен с окружающей средой. Материал пластины B65. Учитывается зависимость параметров материала от температуры.

Решение задачи производилось в два этапа в расчетной платформе конечноэлементного анализа ANSYS Workbench. Длительность процесса задавалось равной 5 с. Этого времени практически достаточно для установления теплового равновесия материала с окружающей средой. На первом этапе в модуле Transient Thermal решалась нестационарная температурная задача в системе заклепка-пластина с начальными и граничными температурными условиями. Результатом вычислений является нестационарное распределение поля температуры. Это температурное поле передавалось в качестве параметра в модуль нестационарного прочностного расчета Transient Structural.

1. Математическая модель и граничные в задаче о распределении температуры. На рис. 1 представлена геометрическая модель заклепки 3–8–Ан.Окс–ОСТ 1 34040-79 [7] (тело *I*) и пластины (тело *II*), выполненная в CAD-редакторе ANSYS

DesignModeler. Заклепка и пластина считаются выполненными из алюминиевого сплава B65 [8]. Для решения задачи в осесимметричной постановке достаточно рассмотреть половину осевого сечения, ось заклепки *AB* является осью симметрии задачи. Толщина пластины 3 мм, диаметр 23 мм.



Рис. 1. Геометрическая модель системы «заклепка-пластина»

Внутри материала распределение температуры Т описывается уравнением

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \left(\lambda T_{,j}\right)_{,j},\tag{1}$$

где t – время. Плотность ρ , удельная теплоемкость c и коэффициент теплопроводности λ зависят от температуры. По повторяющемуся индексу здесь и далее производится суммирование.

В начальный момент времени заклепку, охлажденную до температуры $T_0^I = -196$ °C, помещают в цилиндрическое отверстие диаметром 3 мм в пластине, находящейся при комнатной температуре $T_0^{II} = T^e = 22$ °C. Предполагается, что диаметры заклепки и отверстия совпадают, и тела вступают в тепловой контакт. Такое предположение не противоречит реальности, потому что стандарт предполагает наличие отклонения диаметра заклепки до 0,04 мм в большую сторону. Значит, при криогенных температурах диаметры заклепки и отверстия действительно будут равны. В силу симметрии задачи граница AB рассматривается как теплоизолированная:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{AB} = 0. \tag{2}$$

Контактными поверхностями считаются ломаные линии *CDGF* со стороны заклепки и *CGF* со стороны пластины. Теплообмен происходит по закону Ньютона-Рихмана:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{II} = \varkappa (T^{II} - T^{I}). \tag{3}$$

На всех оставшихся поверхностях теплоотдача также заданы условия третьего рода:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{I,II} = \varkappa_e (T^{I,II} - T^e). \tag{4}$$

В граничных условиях (3) и (4) \varkappa – коэффициент теплопередачи на контактной поверхности, \varkappa_e – коэффициент теплоотдачи с поверхности тела в окружающую среду, T^{I} и T^{II} – температура заклепки и пластины на соответствующей контактной границе в текущий момент времени.

Решая уравнение (1) с граничными условиями (2)-(4) методом конечных элементов в модуле нестационарного теплового анализа ANSYS Transient Thermal, получаем распределение поля температуры в зависимости от времени. При решении температурной задачи температурные деформации не учитываются и условия контакта сохраняются.

2. Математическая модель и граничные условия в задаче о распределении напряжений и деформаций. При решении задачи о распределении параметров напряженно-деформированного состояния в модуле ANSYS Transient Structural для разделения полных деформаций на обратимую и необратимую составляющие используется алгебраическое соотношение

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon^e_{ij} + \varepsilon^p_{ij}.\tag{5}$$

Упругие деформации связаны с напряжениями законом Дюамеля-Неймана

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{ij}^e + \left(\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_{kk}^e - \frac{E}{1-2\nu} \alpha_T (T-T_0)\right) \delta_{ij}.$$
 (6)

Здесь σ_{ij} и ε_{ij}^e – компоненты тензоров напряжений и обратимых деформаций, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, α_T – коэффициент линейного температурного расширения, δ_{ij} – символ Кронекера. Константы материала зависят от температуры. Температурные деформации считаются равными нулю при температуре $T_0 = 22$ °C. Критерием появления пластических деформаций выбрано условие текучести Мизеса, которое в главных осях имеет вид

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_T^2,$$
(7)

где σ_T – предел текучести материала при одноосном напряженном состоянии, также зависящий от температуры. Для описания напряженно-деформированного состояния заклепки и пластины используется идеальная упруго-пластическая модель без упрочнения.

На рис. 2 приведена двумерная конечно-элементная сетка. Пластина составлена из 1340 плоских прямоугольных 8-узловых элементов PLANE183 с промежуточными узлами [9]. Каждый узел сеточной модели имеет две степени свободы (перемещения в направлении осей X и Y). Плоскость элемента PLANE183 не искривляется, а сам он применим для моделирования осесимметричных напряжений, поддерживает большие перемещения и большие деформации. Область заклепки состоит из 693 прямоугольных 8-узловых и треугольных 6-узловых элементов PLANE183.

В отличие от тепловой задачи, в механической задаче задается единственная контактная поверхность AB. Как будет видно из анализа решения, этот шаг абсолютно оправдан, так как при тепловом расширении головка заклепки отдаляется от поверхности пластины. На общей границе задан коэффициент сухого трения 0,1. Контактная и целевая поверхности моделируются с применением контактных элементов CONTAC172 и TARGET169, соответственно, по 40 элементов каждого типа. Контакт учитывает поведение обоих тел как упругопластических.

На оси симметрии заклепки задан запрет радиальных перемещений (в направлении оси X). В точке K осевого сечения пластины (рис. 1) запрещены аксиальные перемещения (в направлении оси Y), что соответствует физической постановке задачи, при



Рис. 2. Сеточная модель системы «заклепка-пластина»

которой пластина лежит на ровной поверхности, опираясь на нее нижним ребром. Таким образом, единственной причиной возникающих напряжений и деформаций является температурное расширение заклепки.

Результаты расчетов. В табл. 1 приведены значения теплофизических и механических коэффициентов сплава B65 в зависимости от температуры, которые использовались для вычислений [8,10,11]. Между крайними значениями они изменяются по линейному закону. Из-за недостатка информации о свойствах сплава B65 некоторые значения взяты из справочников для сплава Д16Т, также широко используемого в авиастроении.

Параметр	Температура, °С	
	-196	22
Модуль Юнга E , ГПа	51	44
Коэффициент Пуассона ν	0,33	0,31
Предел текучести, МПа	420	290
Плотность $ ho$, кг/м ³	2850	2800
Коэффициент температурного расширения α_T , °C ⁻¹	$2, 0 \cdot 10^{-5}$	$2,28 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент теплопроводности λ , BT/(м ·°C)	61	120
Удельная теплоемкость c , Дж/(кг ·°C)	376	755
Коэффициент теплопередачи \varkappa , Вт/(м ² · ° C)	10000	
Коэффициент теплоотдачи \varkappa , Вт/(м $^2 \cdot ^{\circ}$ С)	1000	

Таблица 4. Механические и теплофизические свойства материалов

На рис. 3 показано распределение поля температуры в моменты времени 0,1 с, 0,5 с, 2 с и 5 с после возникновения теплового контакта. Видно, что температура в системе выравнивается достаточно быстро. Процесс деформирования рассматривается на протяжении 5 секунд. Этому моменту времени соответствуют все представленные ниже графики и изополя остаточных напряжений и деформаций.



Рис. 3. Распределение температуры в моменты времени 0,1 с (а); 0,5 с (б); 2 с (в); 5 с (г).

На рис. 4 показано изменение температуры в зависимости от радиальной координаты в серединной поверхности пластины и соответствующем сечении заклепки на временном промежутке от 0,01 до 1 секунды.

Рис. 5 иллюстрирует поле остаточных эквивалентных упругих деформаций (по Мизесу)

$$\varepsilon_{\scriptscriptstyle \mathsf{9KB}}^{e} = \frac{1}{1+\nu} \left(\frac{(\varepsilon_{1}^{e} - \varepsilon_{2}^{e})^{2} + (\varepsilon_{2}^{e} - \varepsilon_{3}^{e})^{2} + (\varepsilon_{3}^{e} - \varepsilon_{1}^{e})^{2}}{2} \right)^{1/2}.$$
(8)



Рис. 4. Распределение температуры в заклепке и пластине на уровне серединной поверхности после установления теплового контакта: a) через 0,01 c; б) через 0,1 c; в) через 0,5 c; г) через 1 с.



Рис. 5. Остаточные деформации (эквивалентные по Мизесу)

Пластические деформации в системе при заданных параметрах не возникают. На рис. 6 показано распределение остаточных эквивалентных напряжений (по Мизесу)

$$\sigma_{_{3\mathrm{KB}}} = \left(\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}\right)^{1/2}.$$
(9)



Рис. 6. Остаточные напряжения (эквивалентные по Мизесу)

На рис. 7 приведены графики радиальных перемещений заклепки и пластины для аксиальных координат, соответствующих верхней, нижней и серединной поверхностям пластины. По горизонтальной оси отложена радиальная координата в недеформированном состоянии. Графики перемещений нижней и верхней поверхностей практически не отличаются друг от друга. На границе двух тел графики имеют излом, свободная граница вследствие общего охлаждения тела смещается в отрицательном направлении.



Рис. 7. Радиальные перемещения точек заклепки и пластины для аксиальных координат, соответствующих: a) нижней поверхности; б) верхней поверхности; в) серединной поверхности пластины.

Заключение. Методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS решена термомеханиеская контактная задача о тепловом расширении предварительно охлажденной заклепки, помещенной в цилиндрическое отверстие в пластине, находящейся при комнатной температуре. Постановка задачи максимально приближена к реальности, учитывается теплообмен металлических деталей с окружающей средой, а также зависимость теплофизических и механических параметров материала от температуры. Найдено нестационарное поле температуры, поля остаточных деформаций и остаточных напряжений в пластине и заклепке. Несмотря на то, что в постановке задачи предполагалось возникновение пластических деформаций в материале взаимодействующих тел, уровень возникающих напряжений оказался недостаточным для их появления. Остаточные напряжения и деформации в системе заклепка–пластина обеспечивают посадку с натягом, следовательно, соединение герметично. Значит, рассмотренный способ может оказаться полезным в технологической практике. Однако самым главным его недостатком является очень большая скорость теплообмена металлических деталей с окружающим воздухом. Следовательно, время между извлечением заклепки из жидкого азота и установкой в отверстие должно быть минимальным.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Патент 1718440 СССР, МПК В 21 J 15/02. Способ клепки заклепками с компенсатором / В. Д. Аксютин, Л. Г. Гладышева, Д. В. Плауцин; заявитель и патентообладатель Самарский филиал науч.-исслед. ин-та технологии и организации производства двигателей. № 4788888/27; заявл. 06.02.1990; опубл. 30.10.1994. 3 с.

[2] Ткачева А. В., Соснин А. А. Математическое моделирование горячей посадки заклепки в отверстия // Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций: материалы II Дальневосточной школы-семинара, Комсомольск-на-Амуре, 11-15 сент. 2017 г. / редкол. : А. И. Евстигнеев (отв. ред.) и др. Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2017. С. 79–81.

[3] Bengeri M., Mack W. The influence of the temperature dependence of the yield stress on the stress distribution in a thermally loaded shrink fit // Acta Mech. 1994. Vol. 103(1-4). P. 243–257.

[4] Kovacs A. Residual stresses in thermally loaded shrink fits // Periodica Polytechnica. Ser. Mech. Eng. 1996. Vol. 40, №2. P. 103–112.

[5] Буренин А. А., Ткачева А. В., Щербатюк Г. А. К расчету неустановившихся температурных напряжений в упругопластических телах // Вычислительная механика сплошных сред. 2017. Т. 10. №5. С. 245–259.

[6] Дац Е. П., Ткачева А. В. Технологические температурные напряжения в процессах горячей посадки цилиндрических тел при учете пластических течений // ПМТФ. 2016. Т. 57. №3. С. 208–216.

[7] ОСТ 1 34040-79. Заклепки с плоско-скругленной головкой с компенсатором.

[8] Промышленные алюминиевые сплавы : Справочник / С. Г. Алиева, М. Б. Альтман, С. М. Амбарцумян и др.; Справочник; Отв. редакторы Ф. И. Квасов, И. Н. Фридляндер. 2-е изд., перераб. и доп. М. :Металлургия, 1984. 527 с.

[9] Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера: практическое руководство. М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 272 с.

[10] Таблицы физических величин: справочник / под ред. И. К. Кикоина. М. : АТОМИЗДАТ, 1976. 1100 с.

[11] Физические величины: справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М. : ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1991. 1232 с.

D. A. Potianikhin, E. M. Dubenko

CALCULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A RIVET JOINT OBTAINED WITH NITROGEN COOLING OF A RIVET

Institute of Machinery and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-na-Amure, Russia.

Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure, Russia.

Abstract. A method for creating a rivet connection using nitrogen cooling rivets is considered. A rivet cooled to a cryogenic temperature is placed in a cylindrical hole in a plate located at room temperature. During heating to room temperature, the rivet undergoes thermal expansion and creates a tight fit. Simulation of the thermomechanical behavior of a riveted joint is performed in the ANSYS finite-element software package. The uncoupled problem is solved in the axisymmetric formulation. At the first stage, the temperature distribution in the rivet-plate system is found. The obtained temperature field is used as a parameter in the second stage when deformation problem is solved. The dependence of the properties of materials on temperature is taken into account. The fields of residual deformations and residual stresses in the plate and rivet were obtained.

Keywords: ANSYS, deformations, stresses, finite element simulation, thermo-elastoplasticity, contact problem, rivet joint.

REFERENCES

[1] Patent 1718440 SSSR, MPK B 21 J 15/02. Sposob klepki zaklepkami s kompensatorom / V. D. Aksyutin, L. G. Gladysheva, D. V. Plaucin; zayavitel' i patentoobladatel' Samarskij filial nauch.-issled. in-ta tekhnologii i organizacii proizvodstva dvigatelej. № 4788888/27; zayavl. 06.02.1990; opubl. 30.10.1994. 3 s. (in Russian)

[2] Tkacheva A. V., Sosnin A. A. Matematicheskoe modelirovanie goryachej posadki zaklepki v otverstiya // Fundamental'naya mekhanika v kachestve osnovy sovershenstvovaniya promyshlennyh tekhnologij, tekhnicheskih ustrojstv i konstrukcij: materialy II Dal'nevostochnoj shkoly-seminara, Komsomol'sk-na-Amure, 11-15 sent. 2017 g. / redkol. : A. I. Evstigneev (otv. red.) i dr. Komsomol'sk-na-Amure : FGBOU VO «KnAGTU», 2017. S. 79–81. (in Russian)

[3] Bengeri M., Mack W. The influence of the temperature dependence of the yield stress on the stress distribution in a thermally loaded shrink fit // Acta Mech. 1994. Vol. 103(1-4). P. 243–257.

[4] Kovacs A. Residual stresses in thermally loaded shrink fits // Periodica Polytechnica. Ser. Mech. Eng. 1996. Vol. 40, №2. P. 103–112.

Potianikhin Dmitrii Andreevich

e-mail: potyanikhin@mail.ru, Cand. Sci. Phys. & Math., Senior Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-na-Amure, Russia.

Dubenko Ekaterina Mikhailovna

e-mail: katerina.dubenko@bk.ru, Master Student, Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure, Russia.

[5] Burenin A. A., Tkacheva A. V., SHCHerbatyuk G. A. K raschetu neustanovivshihsya temperaturnyh napryazhenij v uprugoplasticheskih telah // Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred. 2017. T. 10. №5. C. 245–259. (in Russian)

[6] Dac E. P., Tkacheva A. V. Tekhnologicheskie temperaturnye napryazheniya v processah goryachej posadki cilindricheskih tel pri uchete plasticheskih techenij // PMTF. 2016. T. 57. №3. C. 208–216. (in Russian)

[7] OST 1 34040-79. Zaklepki s plosko-skruglennoj golovkoj s kompensatorom. (in Russian)

[8] Alieva S. G., Al'tman M. B., Ambarcumyan S. M. i dr.Promyshlennye alyuminievye splavy : Spravochnik; Otv. redaktory F. I. Kvasov, I. N. Fridlyander. 2-e izd., pererab. i dop. M. :Metallurgiya, 1984. 527 s. (in Russian)

[9] Kaplun A. B., Morozov E. M., Olfer'eva M. A. ANSYS v rukah inzhenera: prakticheskoe rukovodstvo. M. : Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2009. 272 s. (in Russian)

[10] Tablicy fizicheskih velichin: spravochnik / pod red. I. K. Kikoina. M. : ATOMIZDAT, 1976. 1100 s. (in Russian)

[11] Fizicheskie velichiny: spravochnik / pod red. I. S. Grigor'eva, E. Z. Mejlihova. M. : EHNERGOATOMIZDAT, 1991. 1232 s. (in Russian)