

DOI: 10.15593/2499-9873/2019.1.03

УДК 621.78.011

Е.В. Кузнецова, Н.С. Подкина

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ КОЛЕСА СПИРАЛЬНО-КОНИЧЕСКОГО РЕДУКТОРА ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ

Проведена симуляция термообработки криволинейной конической передачи промежуточного редуктора вертолета в программах Deform-3D и ANSYS, предложены методы предупреждения изменения геометрических размеров детали в процессе термообработки. Это, в свою очередь, позволит улучшить показатели ремонтопригодности. В условиях повышенной нагрузки, ответственности, боевых действий Ми-28Н должен «выживать» и нормально функционировать в различных условиях окружающей среды, при воздействии сильных разрушающих факторов, таких как перегрузка, высокая скорость, ударные, вибрационные нагрузки и т.п. В связи с этим редукторам тоже приходится работать в условиях высоких нагрузок. Назначение главного редуктора – это распределение мощности между механизмами вертолета, которая передается двигателями. Также главный редуктор необходим, чтобы обеспечивать силу тяги, достаточную для полетных режимов. При этом основную долю мощности потребляет несущий винт, который установлен на вал главного редуктора. Управление шагом и вращением рулевого винта осуществляется хвостовым редуктором, у которого передаточное отношение, как и у промежуточного редуктора, небольшое, а передача осуществляется под углом 90°. С учетом всех параметров рассмотрены важнейшие вопросы отрасли вертолетостроения, решение которых позволит увеличить надежность и долговечность аппаратов, снизить металлопотери и повысить экономичность производства при изготовлении деталей.

Ключевые слова: термообработка, спирально-конический редуктор вертолета, численное моделирование, изменение геометрических размеров, меры предупреждения.

E.V. Kuznetsova, N.S. Podkina

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

NUMERICAL CALCULATION OF THE CHANGE OF GEOMETRY OF THE WHEEL OF THE SPIRAL-CONICAL REDUCER AT HEAT TREATMENT

In work simulation of heat treatment of krivozuby conic transfer of an intermediate reducer of the helicopter in the Deform-3D and ANSYS programs is carried out, methods of the prevention of change of the geometrical sizes of a detail in the course of heat treatment are offered. It in turn will allow to improve maintainability indicators. In the conditions of the raised loading, responsibility, military operations of Mi-28H has to "survive" and normally function in various conditions of environment, at influence of the strong destroying factors, such as an overload, high speed, shock loadings, vibration, etc. In this

regard reducers too should work in the conditions of high loadings. Purpose of the main reducer is a distribution of power between helicopter mechanisms which is transferred by engines. Also, the main reducer is necessary to provide the draft force sufficient for the flight modes. Thus consumes the main share of power bearing the screw which is installed on a shaft of the main reducer. Management of a step and rotation of the steering screw is carried out by a tail reducer at which the transfer relation as well as an intermediate reducer small, and transfer is carried out at an angle 90° . Taking into account all parameters the major and topical questions in branch of helicopter engineering which decision will allow to increase reliability and durability, to reduce metallosses and to increase profitability of production at production of details are considered.

Keywords: heat treatment, spiral bevel gearbox of a helicopter, numerical simulation, change in geometric dimensions, measures of warning.

Качество изготовления зубчатых передач существенно влияет на эксплуатационные свойства элементов машин и механизмов. Одной из областей применения механизмов зубчатых передач в редукторах является вертолетостроение. Одной из заключительных стадий производства редуктора является термическая обработка деталей, которая предполагает упрочнение поверхности деталей. Однако, как показывает опыт [1, 2], после термообработки происходит необратимое изменение геометрических размеров и деталь перестает удовлетворять геометрическим размерам, указанным в конструкторской документации, и следовательно, расчетным показателям прочности, надежности и долговечности.

Цель исследования. Цель исследования состоит в том, чтобы выявить законы, по которым смещается центр распределения значений отклонения геометрических размеров, указанных в конструкторской документации, так как это позволит увеличить точность изготовления, улучшить соответствие деталей конструкторской документации, а значит, и расчетным показателям прочности, надежности, долговечности. Кроме того, в этом случае увеличится ремонтпригодность деталей, снизятся металлопотери при производстве деталей, что, в свою очередь, повысит экономичность производства.

Материал и методы исследования. В работе проведен анализ результатов экспериментальных исследований, проведенных при производстве и термической обработке спирально-конического колеса редуктора, которые показали, что после термической обработки отклонение монтажного размера диска редуктора от расчетного имеет нормальный закон распределения. При этом среднее отклонение с наиболее высокой частотностью – это 1,57 мм, а по внутренней длине – 1,68 мм.

Применены методы термической обработки, а именно:

- предварительная закалка при температуре 870°C с отпуском при температуре 500°C ;
- меднение;

- цементация при температуре 870 °С и отпуск при 650 °С;
- деталь размедняют и отправляют на закалку при температуре 830 °С;
- обработка холодом и отпуск.

На всех этапах термической обработки наблюдается изменение размеров и деформация формы как в процессе нагрева, так и при охлаждении.

В качестве предположения причин деформаций при термообработке в ходе исследования было предложено численное моделирование процесса обработки с учетом термоупругих напряжений, а также структурных превращений и возможных изменений механических свойств материала.

Все отклонения расположены со смещением эксцентриситета в сторону от нулевого значения. Отклонения, полученные после термообработки, составляют приблизительно 55 % от допуска.

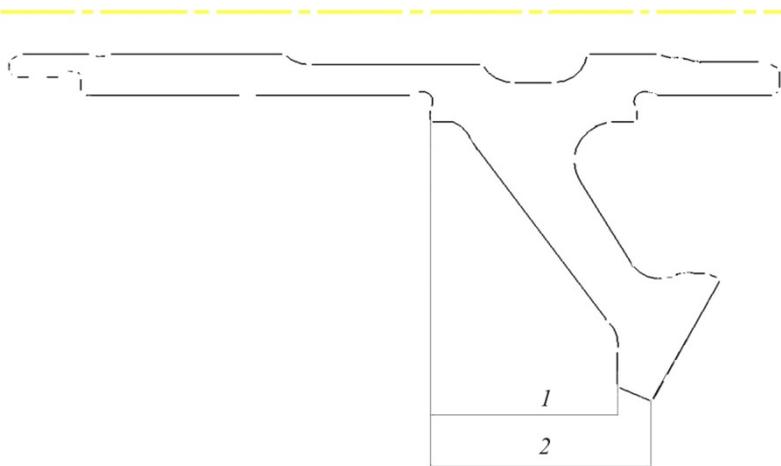


Рис. 1. Схема спирально-конического зубчатого колеса:
1 – внутренняя длина; 2 – монтажный размер [3]

При расчете температурного поля применяем математическую модель поля нагревательного диска. Используемая модель основана на численном решении уравнения нестационарной теплопроводности, в котором учитывается симметрия поля температуры относительно продольной оси диска:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(r, z, t), \quad (1)$$

где T – температура; t – время; ρ , C , λ – массовая плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность стали; Q – теплота, сопровождающая процессы превращения в стали; r , z – координаты вдоль радиуса и продольной оси диска.

На поверхности диска используется граничное условие

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{\text{пов}} = \alpha_k (T_G - T_{\text{пов}}) + \sigma (T_G^4 - T_{\text{пов}}^4), \quad (2)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией от потока греющих (охлаждающих) газов или жидкостей к поверхности диска; T_G – температура греющей среды; $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности диска, принимаемая одинаковой вдоль всей поверхности валка; σ – коэффициент теплообмена излучением.

Система уравнений (1), (2) дополняется начальным условием

$$T(r, z, 0) = T_0. \quad (3)$$

Решение системы уравнений (1)–(3) осуществляется с учетом зависимости коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры с использованием известных экспериментальных данных для данной стали. Определение термических напряжений в диске редуکتора в процессе термообработки осуществляется в соответствии с основными положениями теории термовязкоупругости [4].

Уравнения (1)–(3) дополняются уравнением равновесия

$$\frac{\partial \sigma_s}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_s}{r} = 0 \quad (4)$$

и уравнением взаимосвязи средних значений деформаций и напряжений с локальным изменением температуры

$$\varepsilon = N\sigma + \alpha\delta T, \quad (5)$$

где N , ε , σ – средние значения деформаций и напряжений, $N = \frac{1-\nu}{E}$; τ –

время релаксации, определяемое по формуле Френкеля: $t = \frac{\eta}{G}$, где η – коэффициент вязкости стали; G – модуль сдвига; E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона.

Решение системы уравнений (1)–(5) при известном изменении поля температур позволяет рассчитать компоненты тензора деформаций при соблюдении условия симметрии всех переменных относительно продольной оси диска. Детальное изложение методики расчета термических напряжений в нагреваемых деталях представлено в работе [5].

Результаты исследования и их обсуждение. После проведения численных расчетов в программных комплексах Deform-3D [6] и ANSYS [7–9] с учетом только термообработки (рис. 2 и рис. 3 соответственно) согласно технической документации было получено увеличение всех размеров образца примерно на 0,3 мм. Увеличение размеров сохранялось при различной густоте сетки. Таким образом, значения деформаций при численном расчете получились одного порядка с данными экспериментальных исследований, однако численная модель не выявила «раскрытия» венца, а показала только объемное расширение всего образца. Полученные данные соответствуют простейшему случаю теплового расширения, т.е. изменению размеров тела при изменении его температуры.

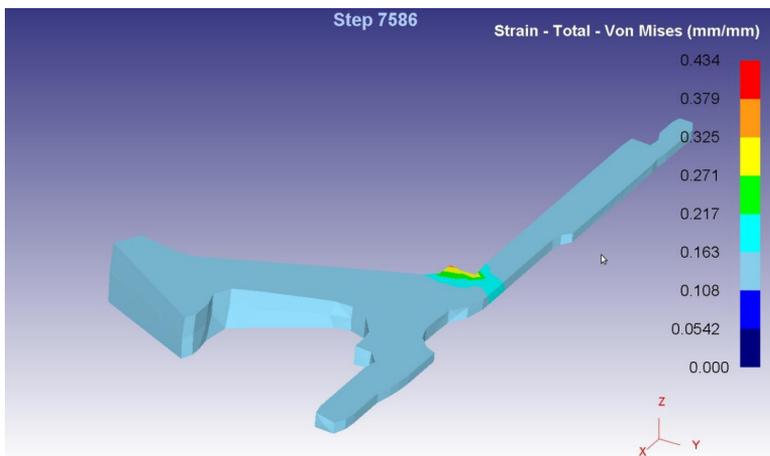


Рис. 2. Поля деформации при численном моделировании в программном комплексе Deform-3D

Было выдвинуто предположение, что на опускание и «раскрытие» венца спирально-конического диска редуктора вертолета влияет положение детали в печи при термообработке. В случае приложения силы тяжести к детали были получены результаты, схожие с экспериментальными: опускание и «раскрытие» венца. Порядок деформаций также соответствует экспериментальным данным (рис. 4).

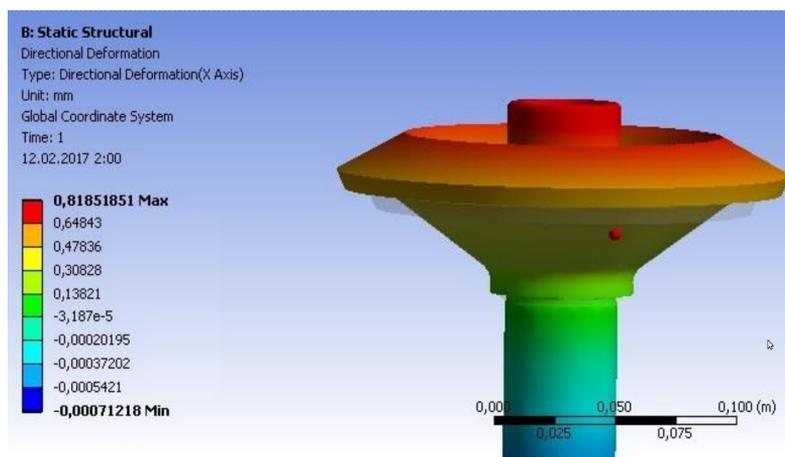


Рис. 3. Поля деформаций при численном моделировании в ANSYS

Как было показано выше, изменение геометрии детали может быть связано с положением детали в печи, т.е. «раскрытие» венца диска происходит исключительно из-за его большего веса относительно валовой части диска и под силой тяжести.

В этом случае следует изменять положение детали в печи от этапа к этапу для равномерного изменения размеров детали. Правильный подбор процесса изменения положения в печи положительно повлияет на «раскрытие» конуса диска, а значит, уменьшит отклонение геометрических размеров от конструкторской документации.

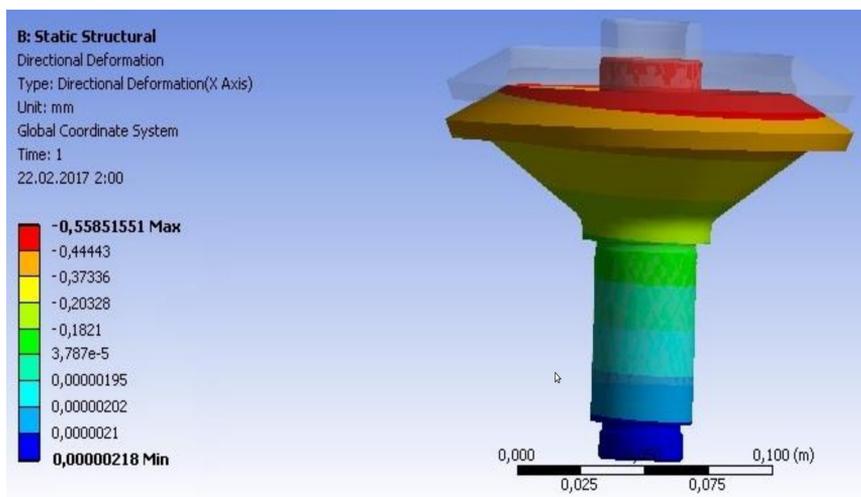


Рис. 4. Поля деформации при численном моделировании термообработки при учете сил тяжести в ANSYS

Специализированные устройства для закалки металлических изделий повышают качество термообработки за счет уменьшения коробления изделий. Фиксирование изделия осуществляется непосредственно после нагрева, а при охлаждении изделие освобождают от фиксации. Недостатком устройства является тот факт, что фиксация производится только на отдельных этапах термообработки, т.е. после нагрева. Но если до фиксации или после освобождения изделия происходит коробление, то оно непременно сохраняется после термообработки, что ухудшает качество готового изделия.

Заключение. В работе выполнено моделирование процесса термообработки с учетом сил тяжести заготовки криволинейной конической передачи промежуточного редуктора вертолета.

Предложены следующие меры предупреждения изменения геометрических размеров деталей после термообработки: расчет начальной геометрии с помощью специальных пакетов, изменение положения детали в печи, подбор новой схемы процесса термообработки, – которые позволят повысить прочность и долговечность деталей. В предположении значительного действия собственного веса массивной части конического колеса было принято решение моделировать процесс термообработки в программном комплексе ANSYS с учетом собственного веса детали [10–12].

Результаты численного анализа показали, что на уровень и распределение деформаций спирально-конического зубчатого колеса действительно существенно влияет собственный вес колеса редуктора, а также недостаточный контур кожуха закрепления при термообработке.

Полученные в работе численные результаты адекватны теории [13, 14] и эксперименту и могут быть использованы для усовершенствования процессов термообработки деталей промежуточного редуктора вертолета [15]. Показана необходимость изменения формы и контура кожуха закрепления редуктора при термообработке с целью уменьшения влияния собственного веса конического колеса редуктора на необратимые изменения геометрии детали при термообработке.

Список литературы

1. Калашников С.Н., Калашников А.С., Коган Г.И. Производство зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.
2. Решетиллов Д.Н. Детали машин. – М.: Машиностроение, 1974. – 656 с.

3. Расчет деформаций конического зубчатого колеса в процессе термообработки / Д.Н. Токаев, А.С. Горбунов, Е.В. Кузнецова, Н.С. Подкина // Прикладная математика и вопросы управления. – 2016. – № 3. – С. 51–59.
4. Сагарадзе В.С. Повышение надежности цементуемых деталей. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.
5. Теплухин Г.Н., Гропянов А.В. Металловедение и термическая обработка / СПбГТУ РП. – СПб., 2011. – 169 с.
6. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D / В.С. Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов [и др.]. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.
7. Денисов М.А. Компьютерное проектирование. ANSYS. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 77 с.
8. Иванов Д.В., Доль А.В. Введение в Ansys Workbench. – Саратов: Амирит, 2016. – 56 с.
9. Жидков А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. – Нижний Новгород: Изд-во НГУ им. Н.И. Лобачевского, 2006. – 115 с.
10. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. – М.: Либроком, 2015. – 272 с.
11. Основы работы в Ansys 17 / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – М.: ДМК-пресс, 2016. – 226 с.
12. Моделирование систем. Лабораторные работы в оболочке ANSYS WORKBENCH: учеб.-метод. пособие / О.В. Голубева, С.Г. Ехилевский, Ю.Ф. Пастухов, Д.Ф. Пастухов. – Полоцк: Изд-во Полоцк. гос. ун-та, 2017. – 43 с.
13. Силаев Б.М. Расчет и конструирование деталей авиационных механических передач. – Самара: Изд-во СГАУ, 2001. – 150 с.
14. Вулгаков Э.Б. Авиационные зубчатые передачи и редукторы. – М.: Машиностроение, 1981. – 374 с.
15. Технология агрегатно-сборочного производства вертолетов / Е.С. Гольберг, В.М. Михайликов, В.М. Швачун, С.Н. Шевцов, М.Б. Флек, А.А. Филиппов; ДГТУ. – Ростов-на-Дону, 2005. – 107 с.

References

1. Kalashnikov S.N., Kalashnikov A.S., Kogan G.I. Proizvodstvo zubchatykh koles [Production of cogwheels]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 464 p.
2. Reshetilov D.N. Detali mashin [Details of cars]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 656 p.
3. Tokaev D.N., Gorbunov A.S., Kuznetsova E.V., Podkina N.S. Raschet deformatsiy konicheskogo zubchatogo kolesa v processe termoobrabotki [Calculation of deformations of a conic cogwheel in the course of heat treatment] – *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2016, no. 3, pp. 51-59.

4. Sagaradze V.S. Povyshenie nadezhnosti cementuemykh detalej [Increase of reliability of the cemented details]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 216 p.
5. Tepluhin G.N., Gropjanov A.V. Metallovedenie i termicheskaja obrabotka [Metallovedeniye and heat treatment]. Saint Petersburg, Publ. of Saint Petersburg state technical university, 2011, 169 p.
6. Parshin V.S., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I. i d.r. Prakticheskoe rukovodstvo k programmnomu kompleksu DEFORM-3D [Practical guidance to the program DEFORM-3D complex]. Yekaterinburg, URFA Publ., 2010, 266 p.
7. Denisov M.A. Komp'yuternoe proektirovanie. ANSYS. [Computer design. ANSYS]. Yekaterinburg, Ural University Publ., 2014, 77 p.
8. Ivanov D.V., Dol' A.V. Vvedenie v Ansys Workbench [Introduction to Ansys Workbench]. Saratov, Amirit, Publ., 2016, 56 p.
9. Zhidkov A.V. Primenenie sistemy ANSYS k resheniju zadach geometricheskogo i konechno-jelementnogo modelirovanija [Use of ANSYS system to the solution of problems of geometrical and final and element modeling]. Nizhny Novgorod, NGU im. N.I. Lobachevskogo Publ., 2006, 115 p.
10. Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva M.A. ANSYS v rukah inzhenera. Prakticheskoe rukovodstvo [ANSYS in the engineer's hands. Practical guidance]. Librokom Publ., 2015, 272 p.
11. Fedorova N.N., Val'ger S.A., Danilov M.N., Zaharova Ju.V. Osnovy raboty v Ansys 17 [Work bases in Ansys 17]. DMK-press Publ., 2016, 226 p.
12. Golubeva O.V., Ehilevskij S.G., Pastuhov Ju.F., Pastuhov D.F. Modelirovanie sistem. Laboratornye raboty v obolochke ANSYS WORKBENCH [Modeling of systems. Laboratory works in ANSYS WORKBENCH cover]. ucheb.-metod. posobie. Polotsk, PGU Publ., 2017, 43 p.
13. Silaev B.M. Raschet i konstruirovaniye detalej aviacionnykh mehanicheskikh peredach [Calculation and designing of details of aviation mechanical transfers]. Samara: SGAU Publ., 2001, 150 p.
14. Vulgakov Je.B. Aviacionnye zubchatye peredachi i reduktoryje [Aviation tooth gearings and reducers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 374 p.
15. Gol'berg E.S., Mihajlikov V.M., Shvachun V.M., Shevcov S.N., Flek M.B., Filippov A.A. Tehnologija agregatno-sborochnogo proizvodstva vertoletov [Tekhnologiya of modular and assembly production of helicopters]. Rostov-na-Donu, Izd. centr DGTU Publ., 2005, 107 p.

Получено 16.02.2019

Об авторах

Кузнецова Елена Владимировна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mellen75@mail.ru).

Подкина Наталья Сергеевна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Динамика и прочность машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mellen75@mail.ru).

About the authors

Elena V. Kuznetsova (Perm, Russia) – Ph.D. in Engineering, Assistant professor, Department of Dynamics and strength of machines, Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky av., Perm, Russian Federation, e-mail: mellen75@mail.ru).

Natalya S. Podkina (Perm, Russia) – Graduate Student, Department of Dynamics and strength of machines, Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky av., Perm, Russian Federation, e-mail: podkina_ns@mail.ru).