

УДК 621.785.533

Кравцов В. В.

аспирант Национального университета «Запорожская политехника»,
Запорожье, Украина, e-mail: ki70791@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ПОВТОРНОГО ЦИКЛА НИТРОЦЕМЕНТАЦИИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТОЛЕТНОЙ ТРАНСМИССИИ НА СКЛОННОСТЬ К ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЮ

Цель работы. Оценка степени влияния повторного цикла нитроцементации зубчатого колеса из стали 14XHCН2МА вертолетной трансмиссии на склонность к трещинообразованию.

Методы исследования. Микроструктура образцов зубчатого колеса из стали 14XHCН2МА вертолетной трансмиссии исследовалась на оптическом металлографическом микроскопе модели «Axio Observer. Dtm» (фирма «Karl Zeiss», производитель Германия), оснащенного камерой ARTCAM-300MI (3M pixels progressive USB2/0 COLOR CMOS CAMERA); съемка образцов выполнена в отраженном свете по методам светлого поля.

Полученные результаты. В работе, на основе результатов экспериментальных исследований, показано влияние повторного цикла нитроцементации на микроструктуру, твердость, микротвердость и эффективную глубину нитроцементированного слоя зубчатого колеса из стали 14XHCН2МА вертолетной трансмиссии.

Качество материала зубчатого колеса после нитроцементации, а также после повторного цикла нитроцементации, аналогичное.

Научная новизна. В данной работе экспериментально установлено влияние повторного цикла нитроцементации зубчатого колеса из стали 14XHCН2МА вертолетной трансмиссии на склонность к трещинообразованию. Методом горячего травления трещины напряжений на зубчатом колесе после нитроцементации и после повторного цикла нитроцементации не обнаружены.

Результаты определения микротвердости по сечению нитроцементированного слоя со стороны профилей зубьев и со стороны впадин зубчатого колеса после одного и после повторного цикла нитроцементации показали, что после повторного цикла нитроцементации показатели по сечению нитроцементированного слоя выше, чем после одного цикла нитроцементации.

Практическая ценность. На основании полученных результатов данного эксперимента возможно разработать рациональный технологический процесс изготовления зубчатых колес из стали 14XHCН2МА вертолетной трансмиссии, обеспечивающий высокие эксплуатационные характеристики.

Микроструктурный анализ показал, что структура нитроцементированного слоя, как на образце № 1 (после одного цикла нитроцементации), так и на образце № 2 (после повторного цикла нитроцементации), аналогична, представляет собой мартенсит и дисперсные карбонитриды, удовлетворительная для нитроцементированной стали 14XHCН2МА в нормально термообработанном состоянии. Крупные избыточные карбонитриды, а также микротрещины в поверхностном слое не обнаружены. Микроструктура сердечника – малоуглеродистый мартенсит.

Для выявления растягивающих напряжений фрагмент зубчатого колеса после одного цикла нитроцементации и фрагмент, прошедший повторную нитроцементацию, подвергались травлению в концентрированной (50%) соляной кислоте, нагретой до температуры ~ 90 °С. В результате последующего осмотра под бинокулярным микроскопом образование поверхностных трещин на протравленных фрагментах не обнаружено, что свидетельствует об отсутствии растягивающих напряжений.

Ключевые слова: вертолетная трансмиссия; зубчатое колесо; повторный цикл нитроцементации; микроструктурный анализ; выявление растягивающих напряжений; травление в концентрированной соляной кислоте; глубина нитроцементированного слоя; главный вертолетный редуктор; экспериментальные данные.

ВВЕДЕНИЕ

Технология производства зубчатых колес вертолетной трансмиссии является одной из сложных и проблемных задач, требующей наличия специального дорогостоящего оборудования, технологической оснастки и специалистов высокой квалификации. Совершенствование технологичес-

ких процессов изготовления зубчатых колес в части решения проблемных вопросов повышения качества и производительности обработки сводится не только к анализу и обобщению мирового опыта, но и к необходимости постоянного проведения теоретических, экспериментальных и производственных исследований, характерных для отечественного машиностроения [1].

© Кравцов В. В., 2019

DOI 10.15588/1727-0219-2019-1-9

Для химико-термического упрочнения тяжело нагруженных деталей в машиностроении применяют процессы газовой цементации и нитроцементации, вакуумную и ионную ХТО, высокотемпературную цементацию и обработку с насыщением в азотных атмосферах и в кипящем слое. Однако на отечественных заводах и за рубежом для упрочнения высоконагруженных деталей и, прежде всего, зубчатых колес в основном используется цементация и нитроцементация [2].

Данная статья посвящена исследованию влияния повторного цикла нитроцементации зубчатых колес вертолетной трансмиссии на склонность к трещинообразованию. Так как работоспособность зубчатых колес в решающей степени зависит от точности изготовления и качества поверхностного слоя зубьев, которое должно быть высоким, чтобы в условиях действия больших контактных напряжений, сил трения и контактных температур рабочие поверхности могли противостоять повреждению и усталостному разрушению, в сфере вертолетостроения данный вопрос является актуальным [3–4].

1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Процесс газового цианирования (нитроцементация) осуществляется в газовой среде, содержащей углерод и азот. По сравнению с жидкостным цианированием нитроцементация имеет ряд преимуществ:

- не нужно применять ядовитые цианистые соли;
- ниже себестоимость обработки, так как затраты на аммиак и науглероживающий газ ниже, чем на цианистые соли;
- меньше необходимые производственные площади, так как не нужны помещения для хранения и расфасовки цианистых солей, а также оборудование для нейтрализации отходов и деталей;
- можно автоматизировать регулирование состава газовой атмосферы [5].

Варьируя параметры процесса, то есть состав газовой смеси, температуру, время обработки, можно изменять глубину воздействия. Исследования показали, что с повышением температуры увеличивается скорость диффузии углерода и азота в глубину металла. Глубина проникновения атомов газа в металл регулируется временем выдержки нагретого изделия в рабочей среде. Нитроцементация существенно изменяет характеристики тонкого наружного слоя металла, его твердость и износостойкость.

В связи с пониженной температурой и сравнительно небольшой продолжительностью процесса не происходит рост зерна, поэтому детали после нитроцементации подстуживают до 850–

880 °С и закаливают в масле. Затем проводят низкий отпуск при температуре 160–170 °С. Окончательная структура стали после нитроцементации и термической обработки состоит: в поверхностном слое – из азотистого мартенсита; в сердцевине – из тростомартенсита или мартенсита. Твердость поверхностного слоя 600–1000HV.

Глубина слоя зависит от температуры и продолжительности процесса и составляет обычно 0,25–2,5 мм. Нитроцементации подвергают зубчатые колеса из сталей 12Х2Н4АШ, 18Х2Н4МА и др. Чем меньше углерода в стали, тем толще должен быть нитроцементированный слой.

При оптимальных условиях насыщения структура нитроцементированного слоя должна состоять из мартенсита, небольшого количества карбонитридов и некоторого количества остаточного аустенита, структура сердцевины из тростосорбита, бейнита или малоуглеродистого мартенсита. В нитроцементированном слое нередко допускается повышенное количество остаточного аустенита [6].

По сравнению с цементацией нитроцементированный слой обладает более высоким сопротивлением износу, большей твердостью, лучше сопротивляется коррозии, повышает предел выносливости, поскольку в слое, как и при цементации и азотировании, наводятся остаточные напряжения [7–8].

С помощью нитроцементации обрабатывают детали, которые в процессе своей эксплуатации подвергаются значительным нагрузкам. Сюда, в частности, относятся валы и шестерни, сердцевина которых должна отличаться не только достаточной прочностью, но и достаточной вязкостью. Формирования именно таких характеристик и добиваются при нитроцементации [9].

Среди достоинств нитроцементации можно отметить высокую технологичность процесса, простоту и удобство регулировки параметров. Подбирая температурный режим, состав газовой смеси и, в особенности, времени обработки, можно легко регулировать толщину насыщаемого слоя в зависимости от предъявляемых требований. Низкая температура обработки снижает риск деформации изделия и упрощает дальнейшую закалку, поскольку необходимо лишь минимальное время для снижения температуры заготовки. Таким образом уменьшается время технологического цикла производства продукции. Обработанные изделия имеют высокое качество поверхности и отличные физико-механические свойства. У низколегированных сталей после обработки наблюдается повышение коррозионной стойкости [10].

2 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы – оценка степени влияния по-

собой мартенсит и дисперсные карбонитриды, удовлетворительная для нитроцементированной стали 14ХНСН2МА в нормально термообработанном состоянии (рис. 3, 4). Крупные избыточные карбонитриды, а также микротрещины в поверхностном слое не обнаружены. Микроструктура сердечника – малоуглеродистый мартенсит.

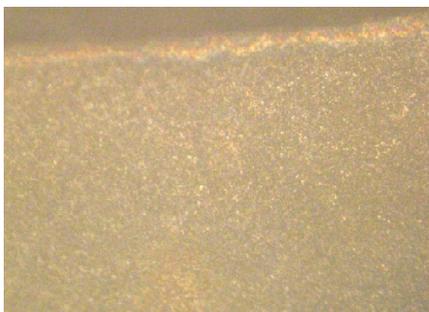


Рисунок 3. Образец № 1 (после одного цикла нитроцементации), × 400



Рисунок 4. Образец № 2 (после повторного цикла нитроцементации), × 400

Глубина нитроцементированного слоя, определенная под оптическим микроскопом при увеличении × 100 и под бинокулярным микроскопом при увеличении × 16, составляет:

- образец № 1 (после одного цикла нитроцементации) – 0,7 мм;
- образец № 2 (после повторного цикла нитроцементации) – 0,75 мм,

Следует отметить, что на образце-свидетеле без предварительной нитроцементации, обработанном совместно с образцом № 2, глубина слоя составила 0,35 мм, структура слоя удовлетворительная, что свидетельствует о нормально проведенной нитроцементации на слой 0,3...0,4 мм.

Таблица 1. Твердость нитроцементированного слоя и твердость сердцевины исследуемого зубчатого колеса

Наименование детали	Твердость нитроцементированного слоя, HRN15	Твердость сердцевины, HRA
Образец №1 (после одного цикла нитроцементации)	91,0	71
Образец №2 (после повторного цикла нитроцементации)	91,0	71
Нормы по чертежу для исследуемого зубчатого колеса	89...91,5	65...71

5.3 Твердость

Твердость нитроцементированного слоя, определенная на поверхности профилей зубьев образцов №1 (после одного цикла нитроцементации) и № 2 (после повторного цикла нитроцементации), и твердость сердцевины представлена в таблице 1.

5.4 Микротвердость и эффективная глубина нитроцементированного слоя

Результаты определения микротвердости по сечению нитроцементированного слоя со стороны профилей зубьев и со стороны впадин представлены в таблицах 2, 3. Эффективная глубина нитроцементированного слоя образцов зубчатого колеса, соответствующая 500HV, представлена в таблице 4.

Из полученных результатов оценки микроструктуры, твердости, микротвердости и эффективной глубины нитроцементированного слоя следует, что качество материала образца № 1 (после одного цикла нитроцементации) и образца № 2 (после повторного цикла нитроцементации) аналогичное.

5.5 Выявление растягивающих напряжений

Для выявления растягивающих напряжений фрагмент зубчатого колеса после одного цикла нитроцементации и фрагмент, прошедший повторную нитроцементацию, подвергались травлению в концентрированной (50%) соляной кислоте, нагретой до температуры ~ 90 °С.

В результате последующего осмотра под бинокулярным микроскопом образование поверхностных трещин на протравленных фрагментах не обнаружено, что свидетельствует об отсутствии растягивающих напряжений.

ВЫВОДЫ

Качество фасок на зубчатом колесе после нитроцементации удовлетворительное.

Качество материала зубчатого колеса после нитроцементации, а также после повторного полного цикла нитроцементации, аналогичное.

Трещины на зубчатых колесах после нитроцементации и после повторного цикла нитроцементации, методом горячего травления, не обнаружены. Таким образом, можно сделать вывод, что повторная нитроцементация не приводит к наведению растягивающих напряжений и не способствует образованию трещин.

Таблица 2. Результаты определения микротвердости по сечению нитроцементированного слоя со стороны профилей зубьев и со стороны впадин зубчатого колеса после одного цикла нитроцементации

	Расстояние от поверхности, мм								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	Значения микротвердости, HV								
Со стороны профиля зуба	732,5	707,0	645,0	631,5	619,5	578,5	534,5	516,5	474,5
Со стороны впадины зуба	662,5	657,5	635,5	595,5	576,5	549,0	527,0	480,5	–

Таблица 3. Результаты определения микротвердости по сечению нитроцементированного слоя со стороны профилей зубьев и со стороны впадин зубчатого колеса после повторного цикла нитроцементации

	Расстояние от поверхности, мм								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	Значения микротвердости, HV								
Со стороны профиля зуба	747,5	699,0	665,0	638,0	619,5	585,0	553,0	530,5	479,0
Со стороны впадины зуба	691,9	675,0	652,5	643,0	631,0	606,0	525,5	495	–

Таблица 4. Эффективная глубина нитроцементированного слоя, соответствующая 500HV

	Эффективная глубина нитроцементированного слоя, мм	
	Образец № 1 (после одного цикла нитроцементации)	Образец № 2 (после повторного цикла нитроцементации)
Со стороны профиля зуба	0,85	0,85
Со стороны впадины зуба	0,75	0,75

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клепиков В. В. Технология обработки зубчатых колес: моногр. / В. В. Клепиков. – М. : ИНФРА-М, 2017. – 409 с.
2. Обработка зубчатых колес: учеб. пособие / сост. Пегашкин В. Ф.; Мин-во образования и науки РФ: ФГАОУ ВО «УрФУ им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. Технол. Ин-т (фил.). – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2016. – 132 с.
3. Елисеев Ю. С. Научные основы совершенствования технологии изготовления зубчатых колес ГТД / Елисеев Ю. С. // Двигатель. – 2001. – № 4 (16). – С. 10–13.
4. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей: Произв. – практ. издание / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, И. П. Нежурин и др.; под ред. Ю. С. Елисеева. – М. : Высшая школа, 2001. – 493 с.
5. Основы конструирования, производства и эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок в системе CALS технологий / Н. Н. Сиротин, Е. Ю. Марчуков, А. С. Новиков, А. Г. Пайкин и др. – 2-е изд. – М. : Наука, 2011. – 431 с.
6. Нитроцементация стали [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://stankiexpert.ru/spravochnik/materialovedenie/nitrocementaciya.html>. – 07.12.2018 г.
7. Райцес В. Б. Химико-термическая обработка деталей / В. Б. Райцес, В. М. Литвин. – К. : Техника, 1980. – 152 с.
8. Кораблев А. И. Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач / А. И. Кораблев, Д. Н. Решетов. – М. : Машиностроение, 1968. – 288 с.
9. Нитроцементация стали : цель, виды, технология [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pellete.ru/stal/nitrocementaciya-stali.html>. – 07.12.2018 г.
10. Степанова Т. Ю. Технология поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие / Т. Ю. Степанова ; Иван. Гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2009. – 64 с.

Статья поступила в редакцию 20.02.2019

Кравцов В. В.

аспірант Національного університету «Запорізька політехніка»,
Запоріжжя, Україна, e-mail: ki70791@gmail.com

ВПЛИВ ПОВТОРНОГО ЦИКЛУ НІТРОЦЕМЕНТАЦІЇ ЗУБЧАТИХ КОЛІС ВЕРТОЛІТНОЇ ТРАНСМІСІЇ НА СХИЛЬНІСТЬ ДО УТВОРЕННЯ ТРІЩИН

Мета роботи. Оцінка ступеня впливу повторного циклу нітроцементациї зубчатого колеса із сталі 14XHCH2MA вертолітної трансмісії на схильність до утворення тріщин.

Методи дослідження. Мікроструктура зразків зубчатого колеса із сталі 14XHCH2MA вертолітної трансмісії досліджувалась на оптичному металографічному мікроскопі моделі «Axio Observer. Dlm» (фірма «Karl Zeiss», виробник Німеччина), оснащеному камерою ARTCAM-300MI (3M pixels progressive USB2/0 COLOR CMOS CAMERA); зйомка зразків виконана у відбитому світлі за методами світлого поля.

Отримані результати. В роботі, на основі результатів експериментальних досліджень, показано вплив повторного циклу нітроцементациї на мікроструктуру, твердість, мікротвердість та ефективну глибину нітроцементованого шару зубчатого колеса із сталі 14XHCH2MA вертолітної трансмісії.

Якість матеріалу зубчатого колеса після нітроцементациї, а також після повторного циклу нітроцементациї, є аналогічною.

Наукова новизна. В даній роботі експериментально встановлено вплив повторного циклу нітроцементациї зубчатого колеса із сталі 14XHCH2MA вертолітної трансмісії на схильність до утворення тріщин. Методом гарячого травлення тріщини напруг на зубчатому колесі після нітроцементациї і після повторного циклу нітроцементациї не виявлено. Результати визначення мікротвердості по перетину нітроцементованого шару зі сторони профілів і зі сторони впадин зубчатого колеса після одного і після повторного циклу нітроцементациї показали, що після повторного циклу нітроцементациї показники по перетину нітроцементованого шару вищі, ніж після одного циклу нітроцементациї.

Практична цінність. На основі отриманих результатів даного експерименту можливо розробити раціональний технологічний процес виготовлення зубчатих коліс із сталі 14XHCH2MA вертолітної трансмісії, який забезпечує високі експлуатаційні характеристики.

Мікроструктурний аналіз показав, що структура нітроцементованого шару, як на зразку №1 (після одного циклу нітроцементациї), так і на зразку №2 (після повторного циклу нітроцементациї), аналогічна, представляє собою мартенсит та дисперсні карбонітриди, задовільна для нітроцементованої сталі 14XHCH2MA в нормально термообробленому стані. Великих надлишкових карбонітридів, а також мікротріщин в поверхневому шарі не виявлено. Мікроструктура осердя – маловуглецевий мартенсит. Для виявлення розтягуючих напруг фрагмент зубчатого колеса після нітроцементациї та фрагмент, який пройшов повторний цикл нітроцементациї, піддавались травленню в концентрованій (50%) соляній кислоті, нагрітій до температури ~ 90 °С. В результаті наступного огляду під бінокулярним мікроскопом виникнення поверхневих тріщин на протравлених фрагментах не виявлено, що свідчить про відсутність розтягуючих напруг.

Ключові слова: вертолітна трансмісія; зубчате колесо; повторний цикл нітроцементациї; мікроструктурний аналіз; виявлення розтягуючих напруг; травлення у концентрованій соляній кислоті; глибина нітроцементованого шару; головний вертолітний редуктор; експериментальні дані.

Kravtsov V. V.

postgraduate student of National University «Zaporizka politeknika»,
Zaporozh'ye, Ukraine, e-mail: ki70791@gmail.com

INFLUENCE OF CARBONITRIDING RECYCLE OF HELICOPTER TRANSMISSION GEAR WHEEL ON THE INCLINATION TO THE CRACK FORMATION

Objective. Estimation of the influence degree of carbonitriding recycle of helicopter transmission gear wheel from 14XHCH2MA steel on the inclination to the crack formation.

Methods of research. Microstructure of helicopter transmission gear wheel models from 14XHCH2MA steel was investigated on the optical metallurgical microscope «Axio Observer. Dlm» (firm «Karl Zeiss», producer Germany), equipped by ARTCAM-300MI camera (3M pixels progressive USB 2/0 COLOR CMOS CAMERA); surveying of models was made in reflected light with the help of light background.

Received results. In the work, on the basis of experimental research results, influence of carbonitriding recycle on the microstructure, hardness, microhardness and effective depth of carbonitrided layer of helicopter

transmission gear wheel from 14XHCH2MA steel was shown.

Material quality of gear wheel is similar after carbonitriding as well as after carbonitriding recycle.

Scientific novelty. It was experimentally established the influence carbonitriding recycle of helicopter transmission gear wheel from 14XHCH2MA steel on the inclination to the crack formation. When using the thermal etching method, stress cracks were not detected after carbonitriding and after carbonitriding recycle.

The results of determining microhardness over the cross section of carbonitrided layer from the side of the tooth profiles and from the side of the gear wheel cavities after the first cycle and after the carbonitriding recycle showed that performances over the cross section of carbonitrided layer after carbonitriding recycle are higher than after one cycle of carbonitriding.

Practical value. On the basis of the received results of this experiment it is possible to develop the rational manufacturing process of helicopter transmission gear wheel production from 14XHCH2MA steel, provided high operational characteristics.

Microstructural analysis showed, that structure of carbonitrided layer both on the sample No.1 (after one cycle of carbonitriding) and on the sample No.2 (after carbonitriding recycle) is similar. The structure consists of martensite and dispersed carbonitrides. The structure is satisfactory for carbonitrided 14XHCH2MA steel in normal heat-treated condition. Large excess carbonitrides as well as microcracks were not detected in the surface layer. The microstructure of the core is low-carbon martensite. To reveal tensile stresses, fragment of the gear wheel after one cycle of carbonitriding and the fragment, that underwent carbonitriding recycle, were etched in concentrated (50%) hydrochloric acid, that was heated to 90°C. As a result of subsequent inspection under binocular microscope, the formation of surface cracks on the etched fragments was not detected that indicated the absence of tensile stresses.

Key words: helicopter transmission, gear wheel, carbonitriding recycle, microstructural analysis, to reveal tensile stresses, etching in concentrated hydrochloric acid, depth of the carbonitriding layer, main helicopter gear box, experimental data.

REFERENCES

1. Klepikov V. V. (2017) Tehnologija obrabotki zubchatyh koles: monogr. M. : INFRA-M, 409.
2. Obrabotka zubchatyh koles: ucheb. posobie / sost. Pegashkin V.F.; Min-vo obrazovaniya i nauki RF: FGAOU VO «UrFU im. Pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'cina», Nizhnetagil. Tehnol. In-t (fil.). Nizhnij Tagil: NTI (filial) UrFU, 2016, 132.
3. Eliseev Ju.S. (2001) Nauchnye osnovy sovershenstvovaniya tehnologii izgotovleniya zubchatyh koles GTD. *Dvigatel'*, 4 (16), 10–13.
4. Ju.S. Eliseev, V.V. Krymov, I.P. Nezhurin i dr. (2001) Proizvodstvo zubchatyh koles gazoturbinyh dvigatelej : Proizv.-prakt. izdanie ; pod red. Ju.S. Eliseeva. M. : Vyssh. shk., 493.
5. N.N. Sirotin, E.Ju. Marchukov, A.S. Novikov, A.G. Pajkin i dr. (2011) Osnovy konstruirovaniya, proizvodstva i jekspluatacii aviacionnyh gazoturbinyh dvigatelej i jenergeticheskikh ustanovok v sisteme CALS tehnologij, 2-e izd. M. : Nauka, 431.
6. Nitrocementacija stali [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://stankiexpert.ru/spravochnik/materialovedenie/nitrocementaciya.html>. — 07.12.2018 g.
7. V.B. Rajces, V.M. Litvin (1980) Himiko-termicheskaja obrabotka detalej. K. : Tehnika, 152.
8. Korablev A. I., D. N. Reshetov (1968) Povyshenie nesushhej sposobnosti i dolgovechnosti zubchatyh peredach. M. : Mashinostroenie, 288.
9. Nitrocementacija stali: cel', vidy, tehnologija [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://pellete.ru/stal/nitrocementaciya-stali.html>. — 07.12.2018 g.
10. Stepanova T.Ju. (2009) Tehnologija poverhnostnogo uprochneniya detalej mashin: uchebnoe posobie, Ivan. Gos. him.-tehnol. un-t. Ivanovo, 64.