

II ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.789

Кравцов В. В.

НУ «Запорізька політехніка», г. Запоріжжє

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ УПРОЧНЕНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЕРТОЛЕТНОЙ ТРАНСМИССИИ

Цель работы. Оценка влияния ультразвукового упрочнения (УЗУ) на сопротивления усталости, величину и характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое образцов зубчатых колес из стали 16ХЗНВФМБ-Ш вертолетной трансмиссии.

Методы исследования. Для проведения сравнительных испытаний на усталость были изготовлены специальные образцы с выкружкой в количестве 34 шт. Материал образцов зубчатых колес – сталь 16ХЗНВФМБ-Ш. Технологический процесс изготовления выкружки образцов аналогичен техпроцессу обработки впадин зубьев исследуемых зубчатых колес вертолетной трансмиссии.

Часть образцов (17 шт.) испытывались в исходном состоянии, остальные – подвергались ультразвуковому упрочнению шариками. Испытания проводились на вибростенде ВЭДС-400 при комнатной температуре и резонансных колебаниях по первой изгибной форме консольно закрепленных образцов.

Полученные результаты. На основе результатов экспериментальных исследований, показано влияние ультразвукового упрочнения на сопротивление усталости, величину и характер распределения остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое образцов из стали 16ХЗНВФМБ-Ш.

Научная новизна. Экспериментальные исследования показали, что ультразвуковое упрочнение повышает сопротивление усталости образцов из стали 16ХЗНВФМБ-Ш и формирует в их поверхностном слое остаточные напряжения сжатия в диапазоне от -533 до -23 МПа. Предел выносливости исходных образцов составляет $\sigma_{-1} = 588$ МПа. Предел выносливости образцов с выкружкой, поверхность которых подвергалась ультразвуковому упрочнению стальными шариками, составляет $\sigma_{-1} = 666$ МПа.

Практическая ценность. На основании полученных результатов данного эксперимента возможно разработать рациональный технологический процесс изготовления зубчатых колес из стали 16ХЗНВФМБ-Ш вертолетной трансмиссии, обеспечивающий их высокие эксплуатационные характеристики.

Ключевые слова: зубчатые колеса, ультразвуковое упрочнение, экспериментальные данные, сопротивление усталости, остаточные напряжения, вертолетная трансмиссия, качество материала, диаграмма, сравнительные испытания, образцы, предел выносливости.

Введение

В практике эксплуатации вертолетной техники одной из причин отказов является нарушение устойчивой работы главного редуктора, что сопровождается аварийными ситуациями.

Зубчатые передачи относятся к числу наиболее ответственных и сложных элементов вертолетных редукторов, определяющих во многом их технический уровень и работоспособность. В настоящее время недостаточное качество зубчатых передач в значительной степени ограничивает повышение характеристик вертолетных редукторов. Технологии изготовления зубчатых передач главных вертолетных редукторов рассмотрены в ограниченном числе работ, изданных еще в 60–80-е годы прошлого столетия.

Технология производства зубчатых колес вертолетной трансмиссии является одной из сложных и про-

блемных задач, требующей наличия специального дорогостоящего оборудования, технологической оснастки и специалистов высокой квалификации. Совершенствование технологических 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, 2].

Данная статья посвящена исследованию влияния ультразвукового упрочнения на сопротивления усталости, величину и характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое образцов зубчатых колес из стали 16ХЗНВФМБ-Ш вертолетной трансмиссии. Так как работоспособность зубчатых колес в ре-

шающей 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].

Анализ источников и публикаций

Состояние поверхностного слоя конструкционного материала, применяемого для изготовления зубчатых колес главных вертолетных редукторов, представляет собой важный фактор, определяющий эксплуатационные характеристики изделия. Вызвано это тем, что разрушение конструкционного материала детали обычно начинается с её поверхности, а это приводит не только к потере необходимой прочности, но и к ухудшению условий эксплуатации детали.

Надежность работы вертолетных редукторов во многом зависит от выносливости тяжело нагруженных при работе зубчатых колес. Разрушения от усталости деталей практически всегда начинаются с поверхностного слоя, где обычно имеется значительное количество различных дефектов. Упрочнение методом поверхностного пластического деформирования является эффективным технологическим способом повышения сопротивления усталости зубчатых колес.

В процессе ультразвукового упрочнения поверхностный слой подвергается пластическому деформированию – наклепу. При этом повышаются сопротивление деформации и твердость поверхности, изменяется микрогеометрия поверхности, уменьшается количество микроконцентраторов напряжений.

Существенную роль играет величина и знак остаточных напряжений. В процессе эксплуатации растягивающие напряжения складываются с действующими циклическими растягивающими напряжениями, ускоряется процесс разупрочнения и образования трещин от усталости.

К достоинствам ультразвукового упрочнения следует отнести возможность применения данной технологии для деталей, имеющих сложнопрофильную геометрию. При этом достигается благоприятное распределение внутренних напряжений в металле и такое структурное состояние, при котором удается повысить в два-три раза запас прочности деталей, работающих при переменных нагрузках, и увеличить срок службы в десятки раз [5–7].

Объект исследования

Объект исследования – процесс ультразвукового упрочнения образцов зубчатых колес из стали 16ХЗНВФМБ-Ш.

Методика проведения исследований

Для проведения сравнительных испытаний на усталость были изготовлены специальные образцы с выкружкой в кол-ве 34 шт., форма и размеры которых представлены на рис. 1. Материал образцов – сталь 16ХЗНВФМБ-Ш. Технологический процесс изготовления выкружки образцов аналогичен техпроцессу обработки впадин зубьев исследуемых зубчатых колес.

Часть образцов (17 шт.) испытывались в исходном состоянии, остальные подвергались УЗУ шариками. Схема УЗУ и общий вид установки представлены на рис. 2, 3 соответственно. В таком виде образцы поступили на испытания, которые проводились на вибростенде ВЭС-400 при комнатной температуре и резонансных колебаниях по первой изгибной форме консоли закрепленных образцов.

Максимальные напряжения при этом развивались по выкружке в сечении А-А (см. рис. 1). Частота колебаний $f = 440-475$ Гц, база испытаний $N = 20 \cdot 10^6$ циклов. Режимы УЗУ для проведения исследований остаточных напряжений на образцах представлены в таблице 1.

Результаты исследований и их обсуждение

Напряжения при испытаниях устанавливались и контролировались по величине двойной амплитуды коле-

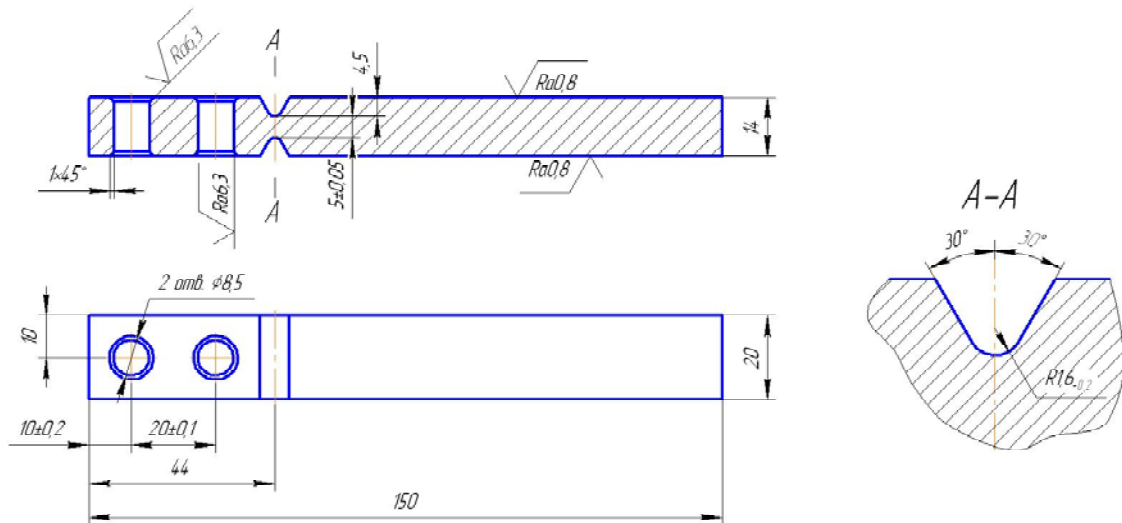


Рис. 1. Эскиз образца для испытаний на усталость

баний образца. Расчет напряжений в сечении А-А проводился по результатам статической тарировки: приложением тарированного груза и измерением прогиба на конце консольно зажатого образца. Результаты испытаний на усталость представлены в таблицах 2, 3.

Определение характера и величины остаточных напряжений после УЗУ проводилось на образцах разме-

рами 70x12x4 мм (рис. 4), изготовленных из стали 16ХЗНВФМБ-Ш с цементацией по серийной технологии. Измерения остаточных напряжений проводились на приборе ПИОН-2.

Результаты измерений остаточных напряжений изложены в таблице 4 (где И-1 – исходный образец, У-1 ... У-5 – образцы после УЗУ шариками) и на обобщенной диаграмме на рис. 5.

Таблица 1 – Режимы ультразвукового упрочнения образцов для проведения исследования остаточных напряжений на образцах из стали 16ХЗНВФМБ-Ш

№ образца	Диаметр шариков, мм	Масса шариков, г	Время упрочнения, мин	Интенсивность по прибору
У-1	0,68	50	10±0,3	38...40 ед.
	1,0	250		
У-2	0,68	150	10±0,3	30...32 ед.
	1,0	250		
У-3	0,68	100	10±0,3	28...30 ед.
	1,0	250		
У-4	0,68	100	10±0,3	19...20 ед.
	1,0	300		
У-5	0,68	150	10±0,3	14 ед.
	1,0	350		

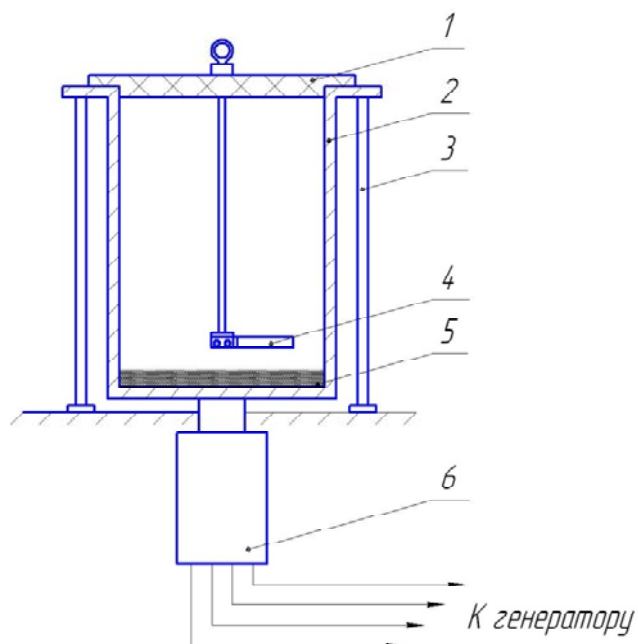


Рис. 2. Принципиальная схема ультразвукового упрочнения: 1 – крышка; 2 – концентратор; 3 – стойки; 4 – испытываемый образец из стали 16ХЗНВФМБ-Ш; 5 – шарики; 6 – магнитострикционный преобразователь



Рис. 3. Общий вид установки для ультразвукового упрочнения

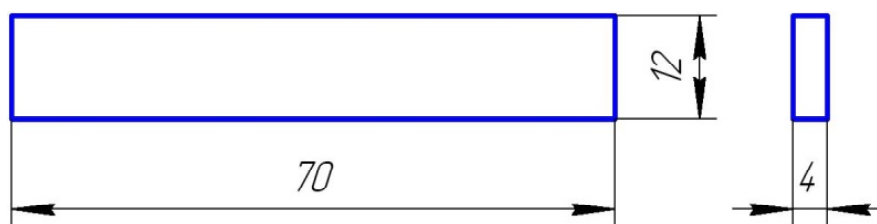


Рис. 4. Эскиз образца для исследования остаточных напряжений

Таблиця 2 – Результати испытаний на усталость исходных образцов из стали 16ХЗНВФМБ-Ш

№п /п	№ образца	Амплитуда колебаний 2А, мм	Напряжение в сечении I-I, МПа	Число циклов, млн	Примечание
1	И-1	2,0	784	0,14	Разрушился
2	И-2	1,8	706	0,20	Разрушился
3	И-17	1,8	706	0,13	Разрушился
4	И-13	1,7	666	20,0	Не разрушился
5	И-14	1,7	666	0,40	Разрушился
6	И-15	1,7	666	20,0	Не разрушился
7	И-16	1,7	666	20,0	Не разрушился
8	И-3	1,6	627	20,0	Не разрушился
9	И-4	1,6	627	6,15	Разрушился
10	И-10	1,6	627	20,0	Не разрушился
11	И-11	1,6	627	6,15	Разрушился
12	И-5	1,5	588	20,0	Не разрушился
13	И-6	1,5	588	20,0	Не разрушился
14	И-7	1,5	588	20,0	Не разрушился
15	И-8	1,5	588	20,0	Не разрушился
16	И-9	1,5	588	20,0	Не разрушился
17	И-12	1,5	588	20,0	Не разрушился

Таблиця 3 – Результаты испытаний на усталость образцов с ультразвуковым упрочнением выкружки из стали 16ХЗНВФМБ-Ш

№ п/п	№ образца	Амплитуда колебаний 2А, мм	Напряжение в сечении I-I, МПа	Число циклов, млн	Примечание
1	У-1	2,0	784	0,36	Разрушился
2	У-2	1,8	706	20,0	Не разрушился
3	У-3	1,8	706	0,08	Разрушился
4	У-16	1,8	706	20,0	Не разрушился
5	У-17	1,8	706	20,0	Не разрушился
6	У-8	1,7	666	20,0	Не разрушился
7	У-9	1,7	666	20,0	Не разрушился
8	У-10	1,7	666	20,0	Не разрушился
9	У-11	1,7	666	20,0	Не разрушился
10	У-12	1,7	666	0,85	Разрушился
11	У-15	1,7	666	20,0	Не разрушился
12	У-4	1,6	627	20,0	Не разрушился
13	У-5	1,6	627	20,0	Не разрушился
14	У-6	1,6	627	20,0	Не разрушился
15	У-7	1,6	627	20,0	Не разрушился
16	У-13	1,6	627	20,0	Не разрушился

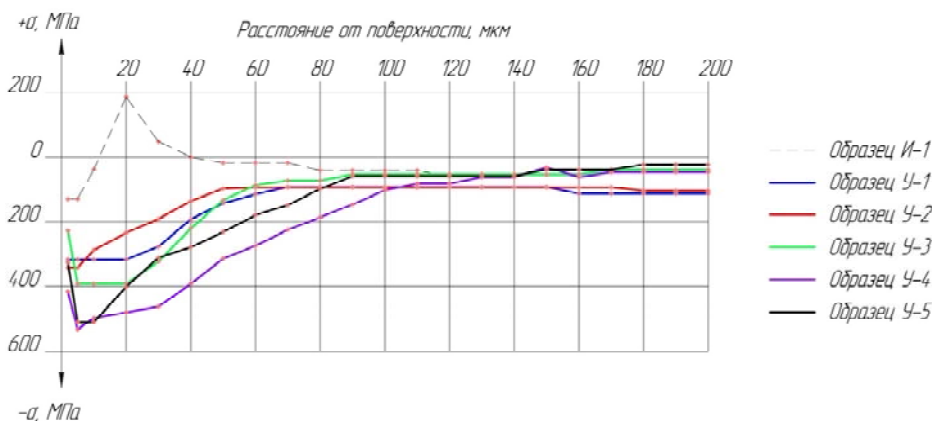


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое образцов

Таблица 4 – Результаты исследования остаточных напряжений на образцах из стали 16ХЗНВФМБ-Ш

№ образца		И-1	У-1	У-2	У-3	У-4	У-5
Расстояние от поверхности, мкм	2	-130,3	-316,5	-342	-228,3	-415,5	-326,3
	5	-130,3	-316,5	-342	-392	-533,1	-510,6
	10	-39,2	-316,5	-288,1	-392	-497,8	-510,6
	20	+186,2	-316,5	-235,2	-392	-480,2	-401,8
	30	+48	-277,3	-192,1	-323,4	-462,6	-310,7
	40	0	-193	-136,2	-221,5	-392	-279,3
	50	-17,6	-143,1	-98	-133,3	-313,6	-232,3
	60	-17,6	-115,6	-94,1	-87,2	-274,4	-180,3
	70	-17,6	-93,1	-94,1	-72,5	-225,4	-149
	80	-40,2	-93,1	-94,1	-72,5	-187,2	-99
	90	-40,2	-93,1	-94,1	-53,9	-147	-58,8
	100	-40,2	-93,1	-94,1	-53,9	-102,9	-58,8
	110	-40,2	-93,1	-94,1	-53,9	-82,3	-58,8
	120	-59,8	-93,1	-94,1	-53,9	-82,3	-58,8
	130	-59,8	-93,1	-94,1	-53,9	-61,7	-58,8
	140	–	-93,1	-94,1	-53,9	-61,7	-58,8
	150	–	-93,1	-94,1	-53,9	-32,3	-39,2
	160	–	-113,7	-94,1	-53,9	-61,7	-39,2
	170	–	-113,7	-94,1	-39,2	-47	-39,2
	180	–	-113,7	-104,9	-39,2	-47	-23,5
190	–	-113,7	-104,9	-39,2	-47	-23,5	
200	–	-113,7	-104,9	-39,2	-47	-23,5	

Выводы

Экспериментальные исследования показали, что ультразвуковое упрочнение повышает сопротивление усталости образцов из стали 16ХЗНВФМБ-Ш и формирует в их поверхностном слое остаточные напряжения сжатия в диапазоне от -533 до -23 МПа.

Предел выносливости исходных образцов составляет $\sigma_{-1} = 588$ МПа.

Предел выносливости образцов с выкружкой, поверхность которых подвергалась ультразвуковому упрочнению стальными шариками, составляет $\sigma_{-1} = 666$ МПа.

Список литературы

1. Клепиков В. В. Технология обработки зубчатых колес : моногр. / В. В. Клепиков. – М. : ИНФРА-М, 2017. – 409 с.
2. Кравцов В. В. Влияние ультразвукового упрочнения на качество изготовления зубчатых колес главных вертолетных редукторов / В. В. Кравцов // Вестник двигателестроения. – 2017. – № 2. – С. 138–142.
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. : Высш. шк., 2001. – 493 с.
5. Коновалов Д. И. Метод ультразвукового упрочнения поверхностей узлов и деталей авиационных газотурбинных двигателей как одна из перспективных технологий в авиастроении / Д. И. Коновалов, Г. Г. Ширваньянц // Молодой ученый. – 2015. – Вып. 22. – С. 141–147.
6. Голямина И. П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / И. П. Голямина. – М. : Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
7. Ультразвуковые колебания и их влияние на механические характеристики конструкционных материалов : сб. науч. тр./ отв. ред. В. А. Кузьменко. – К. : Наук. думка, 1986. – 208 с.

Одержано 15.05.2019

Кравцов В. В. Ультразвукове зміцнення зубчатих коліс вертолітної трансмісії

Мета роботи. Оцінка впливу ультразвукового зміцнення на опір утомленості, величину і характер розподілення залишкових напружень у поверхневому шарі зразків зубчатих коліс із сталі 16ХЗНВФМБ-Ш вертолітної трансмісії.

Методи дослідження. Для проведення порівняльних випробувань на втомленість були виготовлені спеціальні зразки з викруткою у кількості 34 шт. Матеріал зразків зубчатих коліс – сталь 16ХЗНВФМБ-Ш. Технологічний процес виготовлення викружки зразків аналогічний технологічному процесу обробки впадин зубців дослідних зубчатих коліс вертолітної трансмісії.

Частина зразків (17 шт.) випробувались в початковому стані, інші – піддавались ультразвуковому зміцненню шариками. Випробування проводились на вібростенді ВЭДС-400 при кімнатній температурі та резонансних коливаннях по першій згинальній формі консольно закріплених зразків.

Отримані результати. На основі результатів експериментальних досліджень, показано вплив ультразвукового зміцнення на опір втомленості, величину і характер розподілення залишкових напружень стиску у поверхневому шарі зразків із сталі 16ХЗНВФМБ-Ш.

Наукова новизна. Експериментальні дослідження показали, що ультразвукове зміцнення підвищує опір втомленості зразків із сталі 16ХЗНВФМБ-Ш і формує в їх поверхневому шарі залишкові напруження стиску в діапазоні від -533 до -23 Мпа. Межа витримки вихідних зразків складає $\sigma_{-1} = 588$ МПа. Межа витримки зразків з викруткою, поверхня яких піддавалася ультразвуковому зміцненню стальними шариками, складає $\sigma_{-1} = 666$ МПа.

Практична цінність. На основі отриманих результатів даного експерименту можливо розробити раціональний технологічний процес виготовлення зубчатих коліс із сталі 16ХЗНВФМБ-Ш вертолітної трансмісії, що забезпечує їх високі експлуатаційні характеристики.

Ключові слова: зубчаті колеса, ультразвукове зміцнення, експериментальні дані, опір втомленості, залишкові напруження, вертолітна трансмісія, якість матеріалу, діаграма, порівняльні випробування, зразки, межа витримки.

Kravtsov V. Ultrasonic hardening of the gear wheels of helicopter transmission

Purpose. Evaluation of the effect of ultrasonic hardening on endurance strength, the magnitude and nature of the distribution of residual stresses in the surface layer of samples of gear wheels from steel 16ХЗНВФМБ-Ш of helicopter transmission is done.

Methods of research. For comparative tests on fatigue, special samples were made with a fillet in a number of 34 pieces, samples material of gear wheels is steel 16ХЗНВФМБ-Ш, the technological process of making fillet samples is similar to the technological process of processing the cavities of the teeth of helicopter transmission gear wheels were used.

Some samples (17 pcs.) were tested in the initial state, the rest of samples were subjected to ultrasonic hardening with balls. The tests were carried out on a ВЭДС-400 vibrostand at room temperature and resonant vibrations in the first bending form of cantilevered samples.

Received results. In the work, based on the results of experimental studies, the effect of ultrasonic hardening on fatigue resistance, the magnitude and nature of the distribution of residual compressive stresses in the surface layer of samples of steel 16ХЗНВФМБ-Ш were shown.

Scientific novelty. Experimental studies have shown that ultrasonic hardening increases the fatigue resistance of samples from steel 16ХЗНВФМБ-Ш and forms in their surface layer the residual compressive stresses in the range from -533 to -23 МПа. The endurance limit of the original samples is $\sigma_{-1} = 588$ МПа. The endurance limit of samples with a fillet, which surface was subjected to ultrasonic hardening with steel balls, is $\sigma_{-1} = 666$ МПа.

Practical value. Based on the results of this experiment, it is possible to develop a rational technological process for the manufacture of gear wheels from steel 16ХЗНВФМБ-Ш of helicopter transmission, ensuring their high performance.

Key words: gear wheels, ultrasonic hardening, experimental data, fatigue resistance, residual stress, helicopter transmission, the quality of the material, diagram, comparative tests, samples, endurance limit.