

УДК 621.789.

В. В. Кравцов*Запорожский национальный технический университет, Запорожье*

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ГЛАВНЫХ ВЕРТОЛЕТНЫХ РЕДУКТОРОВ

В работе, 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.

Ключевые слова: зубчатые колеса, ультразвуковое упрочнение, экспериментальные данные, сопротивление усталости, остаточные напряжения.

Введение

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 ее 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. [1, 2, 3].

Цель работы – оценка влияния ультразвукового упрочнения (УЗУ) на сопротивление усталости, величину и характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из стали 16ХЗНВФМБ-Ш.

Объект исследования

В качестве объекта исследования, для ультразвукового упрочнения приняты образцы 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 представлена на рис. 2. В таком виде образцы поступили на испытания, которые проводились на вибростенде ВЭДС-400 при комнатной температуре и резонансных колебаниях по первой изгибной форме консольно закрепленных образцов. Максимальные напряжения при этом развивались по выкружке в сечении А-А (см. рис. 1). Частота колебаний $f = 440-475$ Гц, база испытаний $N = 2010^6$ циклов. Режимы УЗУ для проведения исследований остаточных напряжений на образцах представлены в таблице 1.

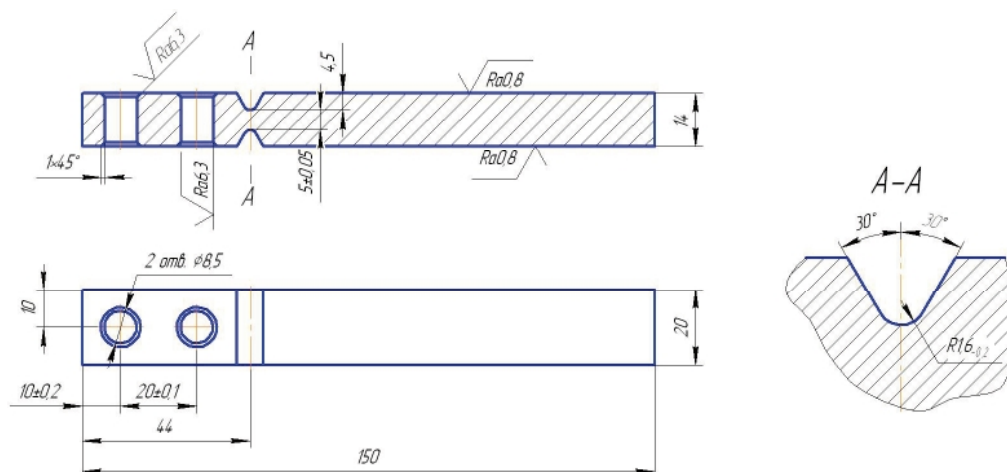


Рис. 1. Эскиз образца для испытаний на усталость

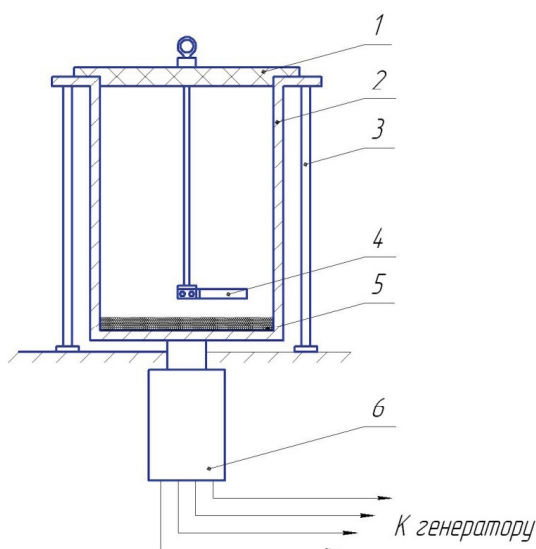


Рис. 2. Принципиальная схема ультразвукового упрочнения: 1 – крышка; 2 – концентратор; 3 – стойки; 4 – испытываемый образец из стали 16ХЗНВФМБ-Ш; 5 – шарики; 6 – магнитострикционный преобразователь

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		

Результаты исследований и их обсуждение

Напряжения при испытаниях устанавливались и контролировались по величине двойной амплитуды колебаний 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 размерами 70x12x4 мм (рис. 3), 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.4.

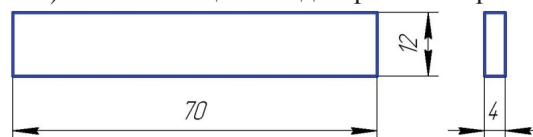


Рис. 3. Эскиз образца для исследования остаточных напряжений

Таблица 2

Результаты 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

Таблица 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

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	

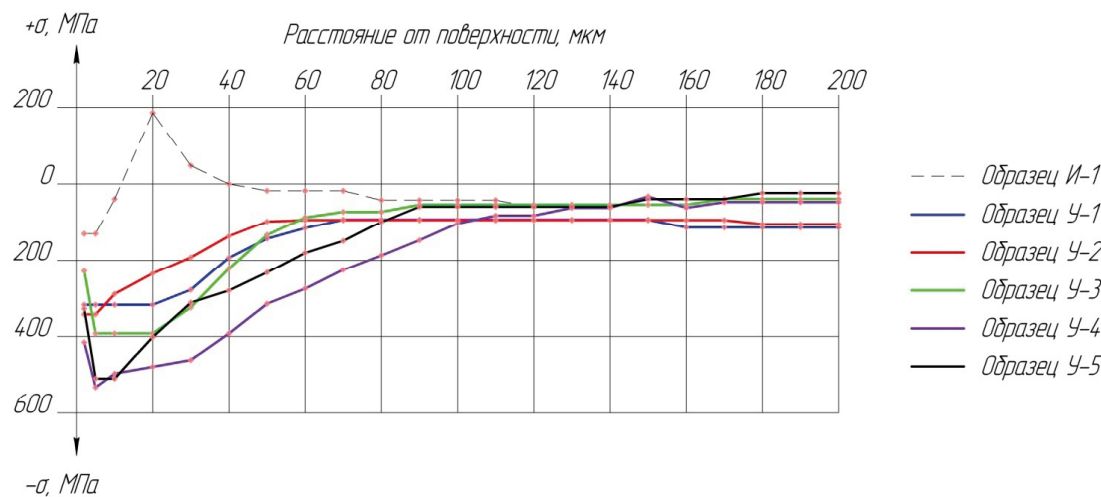


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое образцов

Выводы

Экспериментальные исследования показали, что УЗУ 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.

Литература

1. 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.

2. Голямина И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / И.П. Голямина. – М.: «Советская энциклопедия», 1979. – 400 с.

3. Ультразвуковые колебания и их влияние на механические характеристики конструкционных материалов: сб. науч. тр. / отв. ред. В.А. Кузьменко. – Киев: Наук. думка, 1986. – 208 с.

Поступила в редакцию 12.06.2017 г.

Кравцов В.В. Вплив ультразвукового зміцнення на якість виготовлення зубчатих коліс головних вертолітних редукторів

У роботі, на основі результатів експериментальних досліджень, показано вплив ультразвукового зміцнення на опір утомленості, величину і характер розподілення залишкових напружень стиснення у поверхневому шарі зразків із сталі 16ХЗНВФМБ-Ш.

Ключові слова: зубчасті колеса, ультразвукове зміцнення, експериментальні дані, опір утомленості, залишкові напруження.

Kravtsov V.V. Influence of hypersonic hardening on the quality of manufacture of gear wheels of helicopter main gearboxes

Based on the results of experimental research, it was shown the influence of hypersonic hardening on the endurance strength, quantity and character of afterstrain compression distribution in the surface layer of models from steel 16X3NVFMB-SH.

Key words: gear wheels, hypersonic hardening, experimental data, endurance strength, afterstrain.