

УДК 621.791.05

*Канд. техн. наук Г. В. Пухальская¹, канд. техн. наук И. А. Петрик²,
канд. техн. наук А. Г. Селиверстов², И. Л. Гликсон²,
канд. техн. наук Л. П. Степанова¹*

¹ Запорожский национальный технический университет, ²АО «Мотор Сич», г. Запорожье

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ОБРАБОТКИ ШАРИКАМИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ РЕМОНТЕ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА И КОМПРЕССОРА ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Исследовано влияние обработки стальными шариками в магнитном поле на микроструктуру, параметры поверхностного слоя и предел выносливости сварных образцов из титанового сплава ВТЗ-1.

***Ключевые слова:** сварной шов, упрочнение, остаточные напряжения, микротвердость, шероховатость, предел выносливости, стальные шарики.*

В процессе эксплуатации детали газотурбинных двигателей (ГТД), в частности лопатки компрессора и лопатки вентилятора получают различные повреждения. Так, в условиях повышенной запыленности на грунтовых площадках аэродромов, в пустынях, происходит повреждение лопаток компрессора в виде забоин, царапин, рисок [1]. Также возможны повреждения поверхности пера лопаток вентилятора от попадания посторонних предметов. Наиболее часто повреждается входная кромка пера лопаток. Ремонт незначительных повреждений осуществляется путем зачистки в пределах припуска по толщине. Для ремонта значительных повреждений требуется применение сварки. Наиболее распространены методы сварки плавлением аргонодуговая сварка (АДС) и электронно-лучевая (ЭЛС).

Работа лопаток в условиях вибрационных нагрузок на двигателе, наряду с прочностью, предъявляет требования к высоким усталостным характеристикам титановых сплавов. Усталостная прочность зависит от типа микроструктуры сплава и связанными с микроструктурой механизмами зарождения и развития трещин.

Для изготовления лопаток компрессора и вентилятора применяются двухфазные титановые сплавы ВТ8, ВТ9, ВТЗ-1, ВТ6, которые имеют ограниченную свариваемость. В сварных швах формируется нерегламентированная крупнозернистая структура и снижаются механические свойства, что может привести к уменьшению ресурса.

Известно, что методы упрочнения поверхности позволяют повысить значение предела выносливости на 10–20%. Для обеспечения эксплуатационных свойств деталей, восстановленных с применением сварки, актуальной задачей явля-

ется применение методов упрочнения для сварных соединений [2].

В данном исследовании ставится задача повысить значение предела выносливости в месте расположения сварных швов при ремонте и соответственно увеличить ресурс отремонтированных лопаток методом поверхностного упрочнения стальными шариками в магнитном поле.

Методика

Исследования проводили на образцах, применительно к ремонту лопаток вентилятора из материала ВТЗ-1 с заменой поврежденного фрагмента и приваркой вставки методом ЭЛС.

По исследованиям параметров поверхностного слоя: шероховатости, микротвердости и остаточным напряжениям был выбран оптимальный режим обработки стальными шариками в магнитном поле. Были проведены сравнительные испытания на усталость с определением предела выносливости цельных образцов, сварных и сваренных обработанных стальными шариками в магнитном поле по оптимальному режиму (табл. 1).

Замеры микротвердости проводили на микротвердомере ММ7Т фирмы «BUENLER» при нагрузке индентора равной 50 г в течение 10 с.

Измерения параметров Ra и Rz выполняли на приборе «Hommelwave» вдоль и поперек оси образцов.

Остаточные напряжения определяли механическим методом на приборе ПИОН-2 – измерением прогиба консольно закрепленного образца, вырезанного из цельных образцов электроэрозионным методом при последовательном снятии слоев металла электролитическим полированием.

Определение пределов выносливости цельных образцов, сварных и сварных, обработанных шариками в магнитном поле по оптимальному режиму, проводили ускоренным методом на базе $N = 2 \cdot 10^7$ циклов с последующим пересчетом с применением коэффициента $\alpha = 0,8$ на базу $N = 10^8$ циклов [3]. Испытания на усталость проводились таким образом, чтобы контрольная фаска находилась в приспособлении для закрепления образца, а ось сварного шва была смещена вверх от центра оси галтели образца (рис. 2).

Фрактографические исследования проводили на микроскопе STEMI 2000-C фирмы ZEISS.

Для оценки уровня микронапряжений измеряли ширину дифракционной линии 105α -фазы. В исследовании использовали рентгеноструктурный метод, съемку в медном излучении на дифрактометре типа ДРОН-3.

Микроструктуру определяли на электронном растровом микроскопе РЭМ-106И.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследование прочностных свойств сварных соединений [4] показало снижение уровня механических свойств сварных образцов: $\sigma_B \sim 3\%$, $\delta \sim 50\%$, при этом, протяженность зоны снижения механических свойств в поперечном направлении составляет 1,58,0 мм от оси сварного шва.

Эскизы исходных (цельных) образцов для исследований были разработаны на основании ГОСТ 25502 – 79 «Методы механических испытаний металлов». Форма образца была доработана

таким образом, чтобы образец (рис. 1) обеспечивал наличие максимальных напряжений вдоль оси в зоне рабочей части образца – галтели шириной 6 мм, образованной радиусом 12 мм.

По результатам механических испытаний [4] установлено, что разрушение сварных образцов, в основном, происходило в зоне термического влияния, среднее значение расстояния от оси сварного шва до места разрушения составляло 4,68 мм.

Согласно проведенным ранее исследованиям, ось сварного шва (рис. 2) была смещена на 5 мм относительно центра оси галтели образца, соответственно зона снижения механических свойств расположена в зоне действия максимальных напряжений при испытаниях на усталость.

Изготовление образцов выполняли по технологии, приближенной к технологии изготовления лопаток. Технологический процесс включал следующие основные операции:

1. Прокатка прутков $\varnothing 45$ мм на полосы.
2. Порезка прокатанных полос на заготовки электроэрозионным методом на станке с ЧПУ МИКРОМИД20-1Л. Для сварных образцов ось сварного шва была смещена на 5 мм относительно оси образца.
3. Механическая обработка: фрезерование заготовок; шлифование заготовок, фрезерование радиуса.
4. Полирование плоскости и радиусов образцов.
5. Виброполирование образцов.

Для получения сварных образцов после фрезерования производилась сварка и термообработка.

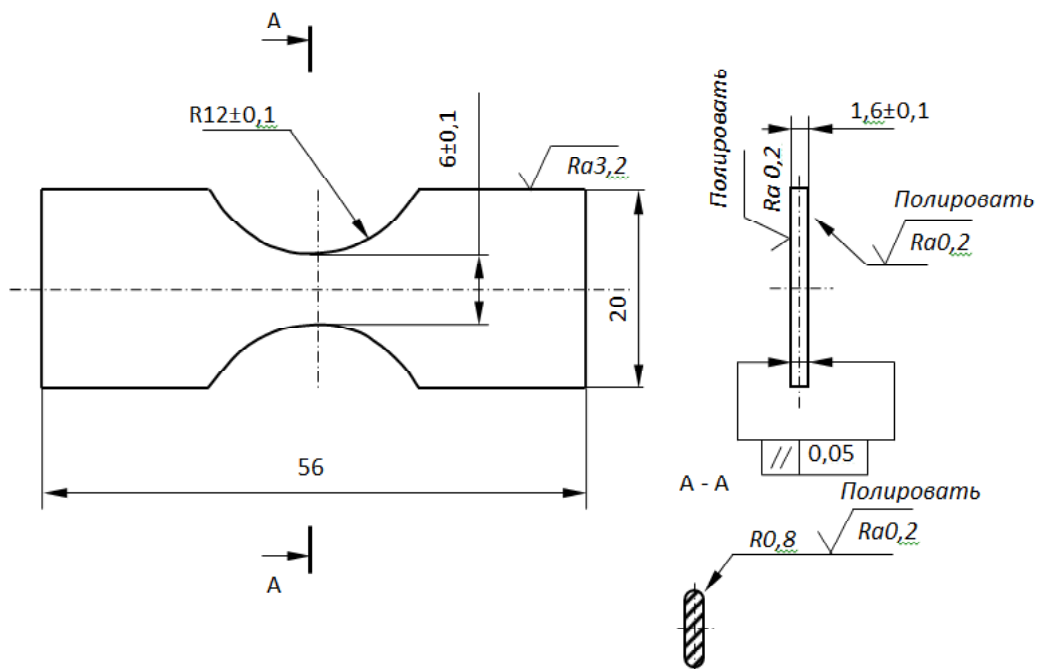


Рис. 1. Эскиз цельного образца для испытаний на усталость

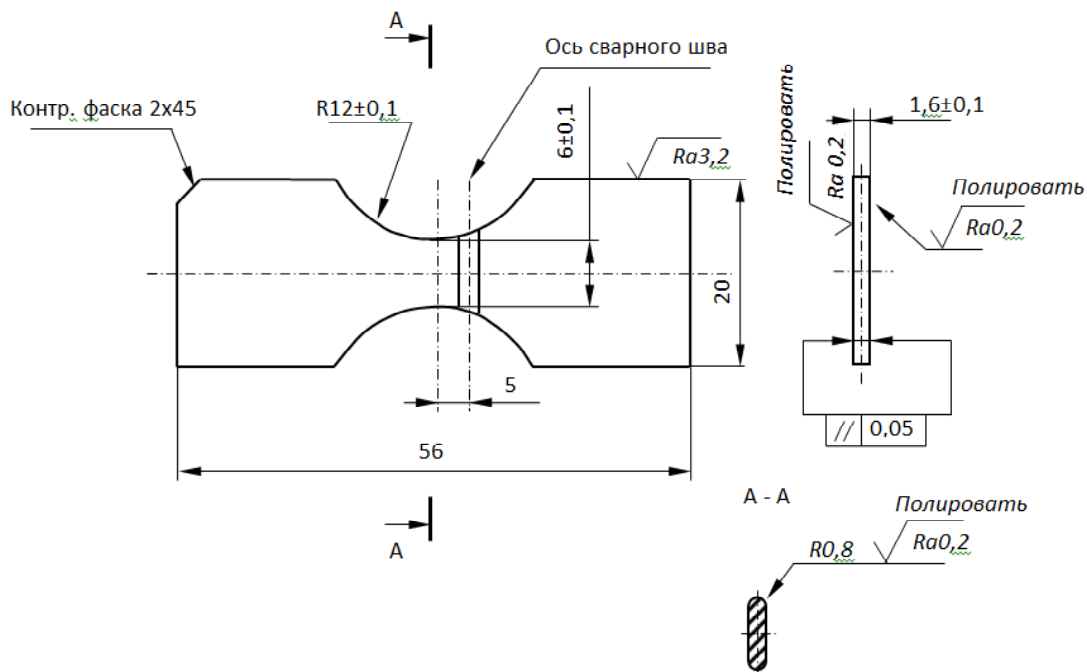


Рис. 2. Эскиз сварного образца для испытаний на усталость

Таблица 1 – Параметры режимов обработки образцов

Параметры режима обработки							
Обозначение режима обработки	№ образцов	Сечение магнитопровода	a , мм	d , мм	Расстояние между полосами магнита, мм	ν , Гц	τ , мин
№ 1	9, 10, 11, 12, 13	УК	22	1,6	11	16	30
№ 2	4, 5, 6, 7, 8	УК	22	1,6	11	16	30
				0,35			30
№ 3	1, 2, 3, 29, 30	УК	22	1,6	11	16	30
				0,65			7
№ 4	24, 25, 26, 27, 28	УК	22	1,6	11	16	20
				1			20

Примечание: УК – сечение магнитопровода – усеченный конус, размер рабочей зоны – $\varnothing 6 \times 11$ мм; d – диаметр шариков, мм; ν – частота перемещений образца вдоль оси, Гц; a – ход образца вдоль оси, мм; τ – время обработки, мин. При обработке образцу дополнительно сообщали поперечные колебания в направлении, перпендикулярном продольной оси с частотой 0,5 Гц и величиной 13 мм.

Сварка заготовок образцов выполнялась методом ЭЛС на установке ЭЛУ-20. После сварки выполнена двухступенчатая термообработка: 1-я ступень выполнена расфокусированным электронным лучом при $T = 910$ °С в течение 5 мин (среда вакуум) и 2-я ступень в печи при $T = 550$ °С, время выдержки 3 – 3,5 ч (среда полувакуум).

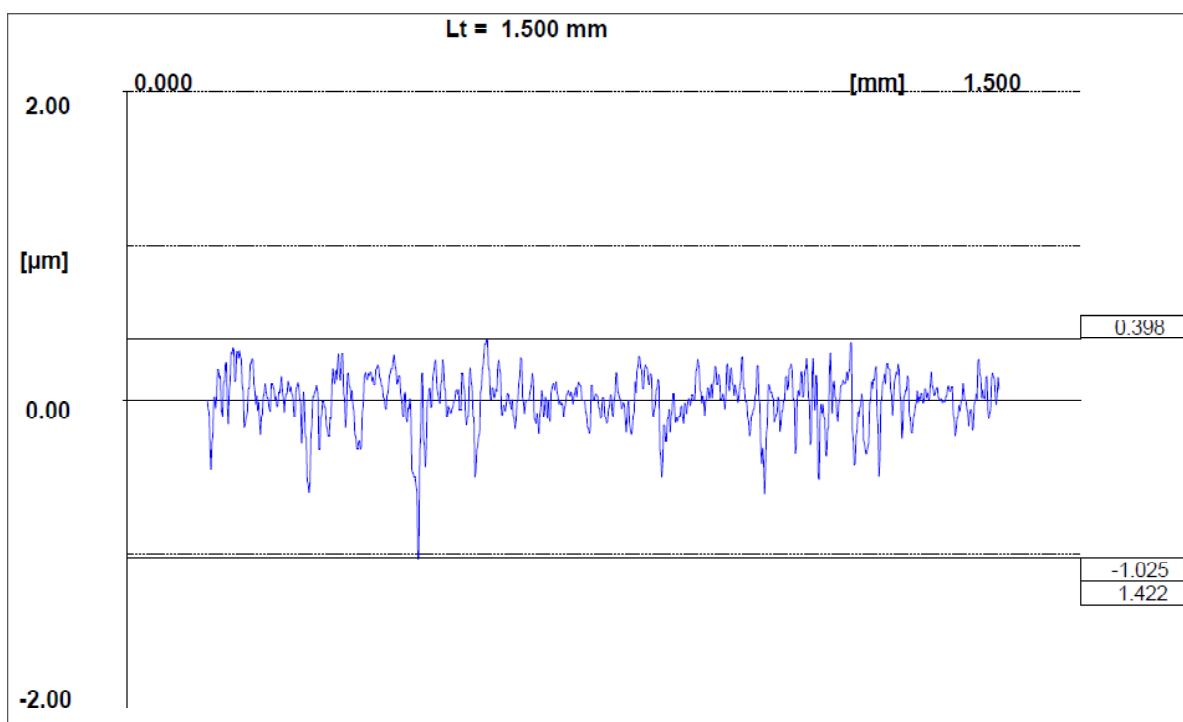
Обработку режима упрочнения стальными шариками в магнитном поле проводили на цельных образцах из сплава ВТЗ-1. Было обработано 4 партии образцов, режимы выбирались с учетом результатов, полученных ранее на лопатках из материалов ВТЗ-1, ВТ8 и ВТ8М. Для режимов № 2, 3, 4 применялась комбинированная обработка шариками разных диаметров. Материал шариков – сталь ШХ15. Образцы выполняли возвратно-поступательное перемещение сквозь слой шариков, которые удерживались магнитным полем. В результате шарики совершали «мягкие» удары по поверхности образцов, таким образом, упрочняя их.

Выбор оптимального режима проводили по результатам исследований характеристик поверхностного слоя: шероховатости, микротвердости, остаточных напряжений.

На двух образцах из каждой партии измерена шероховатость поверхности вдоль и поперек оси в центральной части образца. Измерения проводились после всех режимов обработки, а также на исходных образцах после виброполирования. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты измерения шероховатости поверхности образцов после различных режимов упрочнения

№ режима	№ образцов	Параметр шероховатости	Вдоль оси образца	Поперек оси образца
№ 1	9	Ra, мкм	0,079	0,095
		Rz, мкм	0,51	0,75
	10	Ra, мкм	0,049	0,11
		Rz, мкм	0,36	0,80
№ 2	7	Ra, мкм	0,11	0,44
		Rz, мкм	0,65	2,45
	8	Ra, мкм	0,2	0,45
		Rz, мкм	1,6	2,82
№ 3	29	Ra, мкм	0,071	0,071
		Rz, мкм	0,40	0,45
	30	Ra, мкм	0,064	0,071
		Rz, мкм	0,43	0,086
№ 4	24	Ra, мкм	0,054	0,058
		Rz, мкм	0,40	0,44
	28	Ra, мкм	0,040	0,073
		Rz, мкм	0,33	0,72
Исходн. (ВИ)	17	Ra, мкм	0,12	0,13
		Rz, мкм	0,98	1,03
	18	Ra, мкм	0,15	0,16
		Rz, мкм	1,24	1,06

**Рис. 3.** Шероховатость поверхности вдоль оси образца после виброполирования (образец № 17)

Анализ полученных данных показывает, что обработка образцов стальными шариками в магнитном поле обеспечивает существенное снижение величины параметров шероховатости. Наибольшее снижение шероховатости происходит после обработки по режимам №3 и №4 от

Ra 0,07–0,04 мкм вдоль до Ra 0,07–0,06 мкм поперек оси образца (рис. 3, 4).

Микротвердость измеряли на 2 образцах из каждой партии, величину микротвердости определяли как среднее значение по десяти отпечаткам правильной формы на поверхности образцов (табл. 3).

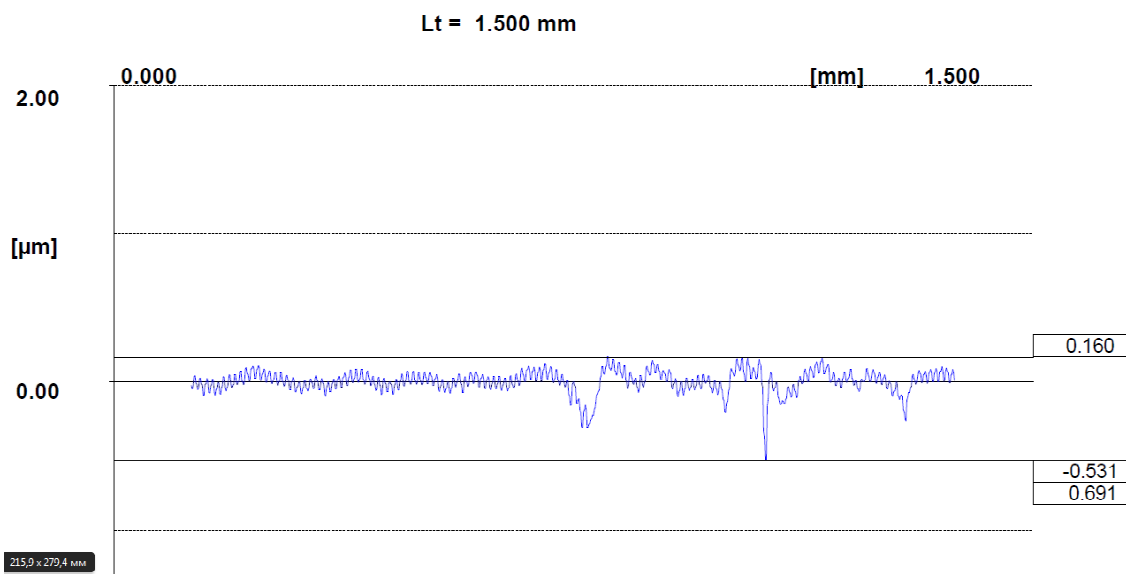


Рис. 4. Шероховатость поверхности вдоль оси образца после обработки шариками в магнитном поле по режиму № 4 (образец № 24)

Таблица 3 – Результаты измерения микротвердости поверхности образцов после различных режимов упрочнения

№ режима	№ образцов	HV	HV средн.
№1	9	391	390
	10	389	
№2	7	417	410
	8	403	
№3	29	410	400
	30	390	
№4	24	398	394
	28	390	
Исходн. (ВП)	17	385	380
	18	375	

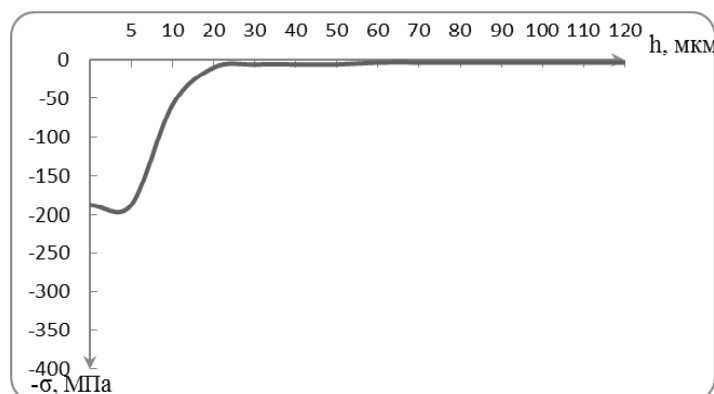


Рис. 5. Эпюра распределения остаточных напряжений на исходных образцах (после ВП)

Микротвердость поверхностного слоя образцов после обработки шариками в магнитном поле повышается до 400–410 HV.

Остаточные напряжения определяли на образцах механическим методом. На рис. 5–9 представлены эпюры распределения остаточных на-

пряжений исходных образцов – после виброполирования (ВП) и после различных режимов упрочняющей обработки. Эпюры построены по средним значениям величин остаточных напряжений, измеренных на трех образцах из каждой партии.

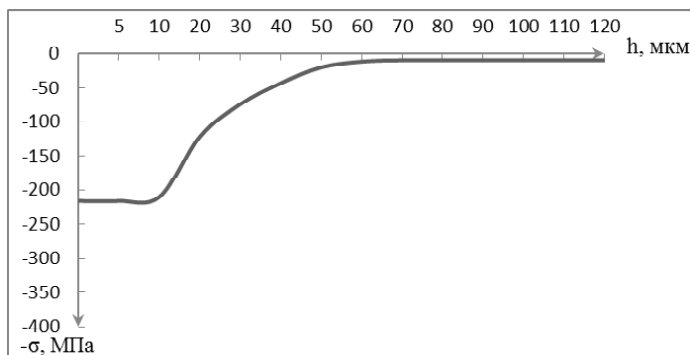


Рис. 6. Эпюра распределения остаточных напряжений после обработки стальными шариками в магнитном поле — режим № 1

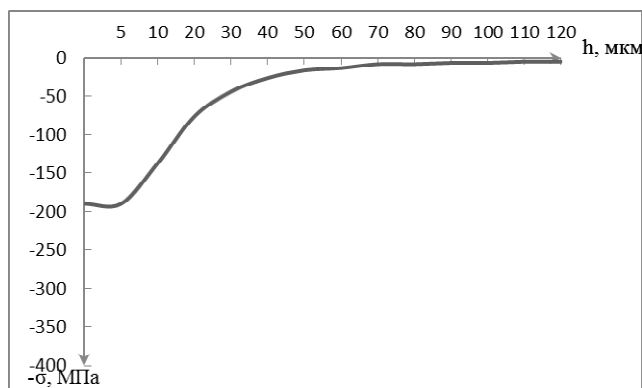


Рис. 7. Эпюра распределения остаточных напряжений после обработки стальными шариками в магнитном поле — режим № 2

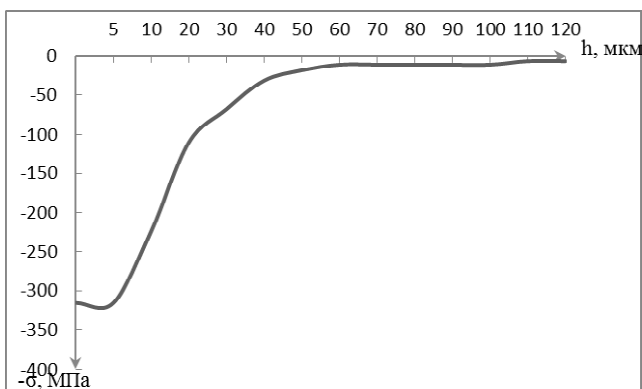


Рис. 8. Эпюра распределения остаточных напряжений после обработки стальными шариками в магнитном поле — режим № 3

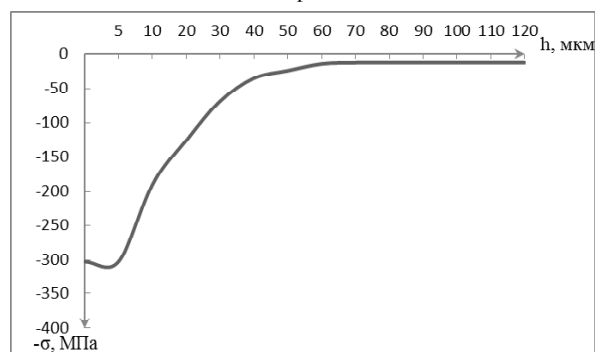


Рис. 9. Эпюра распределения остаточных напряжений после обработки стальными шариками в магнитном поле — режим № 4

Как видно из рисунков 5 – 9, обработка образцов по всем режимам обеспечивает уровень остаточных напряжений сжатия от 220 до 330 МПа при глубине залегания до 120 мкм. Самый высокий уровень поверхностных остаточных напряжений сжатия обеспечивает обработка по режиму №3.

Проанализировав результаты измерения параметров поверхностного слоя – шероховатости, микротвердости и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое образцов после различных режимов упрочнения стальными шариками в магнитном поле, можно сказать, что обработка по режиму №3 обеспечивает наилучшее сочетание характеристик поверхностного слоя.

Три партии образцов (по 15 шт.) – цельные, сварные и сварные, обработанные стальными шариками в магнитном поле по оптимальному режиму, были испытаны на усталость.

Результаты испытаний на усталость представлены в табл. 4...6.

В соответствии с методикой предел выносливости на базе 10^8 циклов составит $500 \times 0,8 = 400$ МПа.

Фрактографический анализ (образец №51) показал, что излом шероховатый, мелкодисперсный, усталостного характера, с началом развития с наружной поверхности. Дефекты металлургического характера на поверхности излома не выявлены (рис. 10). На рис. 10 стрелкой показан начальный очаг развития разрушения образца.

В соответствии с методикой предел выносливости на базе 10^8 циклов составит $470 \times 0,8 = 376$ МПа.

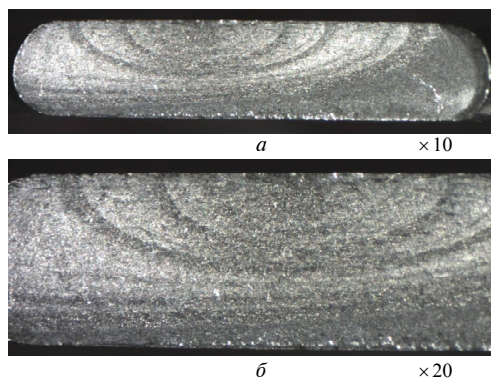


Рис. 10. Фрактография излома образца (№ 51)

Фрактографический анализ (образец №2С) показал, что излом крупнокристаллический, усталостный, скользящего характера, с началом развития с наружной поверхности. Дефекты металлургического характера на поверхности излома не выявлены (рис. 11). На рис. 11 стрелкой показан начальный очаг развития разрушения образца.

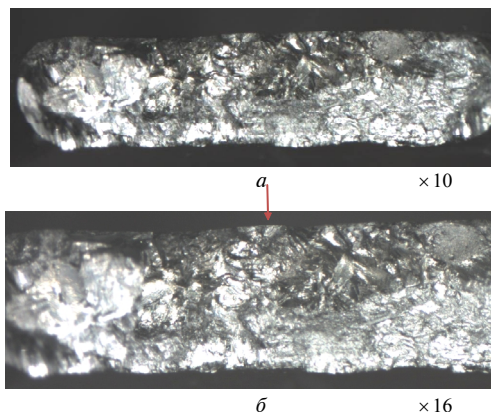


Рис. 11. Фрактография излома образца (№ 2С)

Таблица 4 – Результаты испытаний цельных образцов

№ п/п	№ образцов	Уровень нагружения σ , МПа	Кол-во циклов, $N \times 10^6$	Результаты испытаний	Примечание
1	51	530	10,5	Разр.	$l = 26$ мм
2	48	500	20,0	Н. р.	-
3	52	500	20,0	Н. р.	-
4	54	500	20,0	Н.р.	-
5	56	500	20,0	Н.р.	-
6	59	500	20,0	Н.р.	-
7	58	500	20,0	Н.р.	-

Таблица 5 – Результаты испытаний сварных образцов

№ п/п	№ образцов	Уровень нагружения σ , МПа	Кол-во циклов, $N \times 10^6$	Результаты испытаний	Примечание
1	2С	500	0,46	Разр.	$l = 32$ мм
2	1С	470	20,0	Н. р.	-
3	3С	470	20,0	Н. р.	-
4	4С	470	20,0	Н.р.	-
5	5С	470	20,0	Н.р.	-
6	6С	470	20,0	Н.р.	-
7	8С	470	20,0	Н.р.	-

В соответствии с методикой предел выносливости на базе 10^8 циклов составит $500 \times 0,8 = 400$ МПа.

Анализ полученных результатов показывает, что предел выносливости сварных образцов ниже предела выносливости цельных образцов на 6%, разрушение образца произошло в околшовной зоне – зоне термического влияния. Упрочнение сварных образцов шариками в магнитном поле повышает предел выносливости с 376 до 400 МПа. Разрушение при испытаниях на усталость упрочненных сварных образцов происходило в зоне действия максимальных вибронпряжений по месту окончания обработки стальными шариками в магнитном поле. В околшовной зоне, характеризующейся снижением механических свойств, после обработки шариками в магнитном поле разрушений при испытаниях на усталость нет.

Было исследовано влияние обработки шариками в магнитном поле на уровень микронапряжений в сварном шве и вне зоны термического влияния. Ширина линии представлена в табл. 7.

Сравнительный анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы. В сварном шве уровень микронапряжений ниже, чем на участке образца вне сварного шва и зоны термичес-

кого влияния. Обработка шариками в магнитном поле приводит к повышению уровня микронапряжений вне зоны шва. Упрочнение в сварном шве незначительно.

Было проведено исследование микроструктуры поверхностного слоя образцов после обработки стальными шариками в магнитном поле и сердцевины сварного шва, зоны термического влияния и зоны, удаленной от сварного шва (рис. 12 – 14).

Анализ микроструктуры показал, что в сварном шве и околшовной зоне – зоне термического влияния формируется нерегламентированная крупнозернистая пластинчатая структура, что может приводить к снижению механических свойств [4]. Следует отметить увеличенный размер пластин β -фазы в структуре сварного шва, что свидетельствует о повышенном содержании этой фазы. По-видимому, это связано с быстрым охлаждением с высоких температур. Количественный анализ стандартными методами провести не удалось, так как структура текстурирована, исходя из анализа интенсивностей линий на дифрактограмме. Образование текстуры следует связывать с технологией изготовления образцов.

Таблица 6 – Результаты испытаний сварных образцов, обработанных стальными шариками в магнитном поле

№ п/п	№ образцов	Уровень нагружения σ , МПа	Кол-во циклов, $N \times 10^6$	Результаты испытаний	Примечание
1	1СУ	560	20,0	Н.р.	-
2	3СУ	590	2,34	Разр.	$l = 32$ мм
3	4СУ	560	20,0	Н. р.	-
4	5СУ	560	4,83	Разр.	$l = 24$ мм
5	6СУ	530	20,0	Н.р.	-
6	7СУ	530	9,9	Разр.	$l = 25$ мм
7	8СУ	500	20,0	Н.р.	-
8	10СУ	500	20,0	Н.р.	-
9	11СУ	500	20,0	Н.р.	-
10	13СУ	500	20,0	Н.р.	-
11	14СУ	500	20,0	Н.р.	-
12	9СУ	500	20,0	Н.р.	-

Таблица 7 – Ширина линии 105 α - фазы (в радианах) для неупрочненного (исходного) состояния и упрочненного (обработка шариками в магнитном поле)

Место съемки	Исходный неупрочненный образец	Образец после упрочнения шариками в магнитном поле
Вне сварного шва и зоны термического влияния	$21,1 \times 10^{-3}$, рад.	$23,2 \times 10^{-3}$, рад.
Сварной шов	$18,3 \times 10^{-3}$, рад.	$18,8 \times 10^{-3}$, рад.

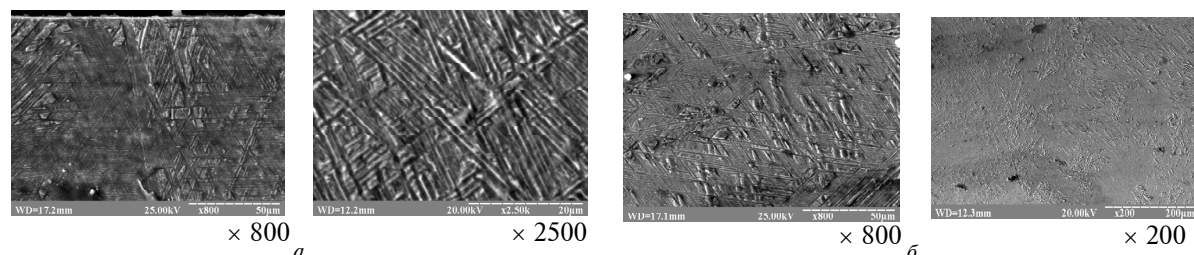


Рис. 12. Микроструктура сварного шва: а – поверхностный слой; б – сердцевина

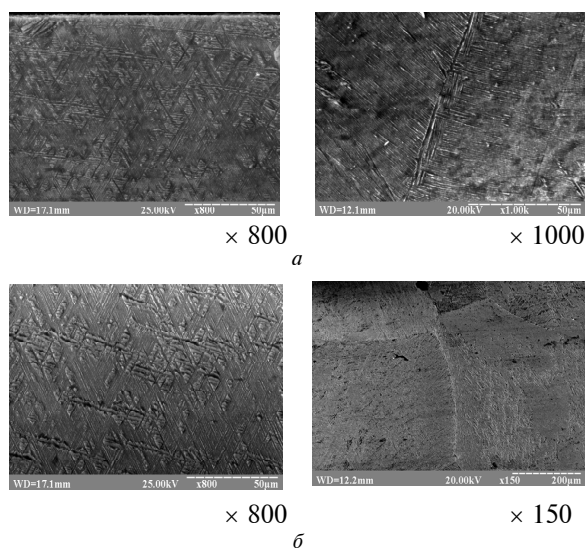


Рис. 13. Микроструктура зоны термического влияния: а – поверхностный слой; б – сердцевина

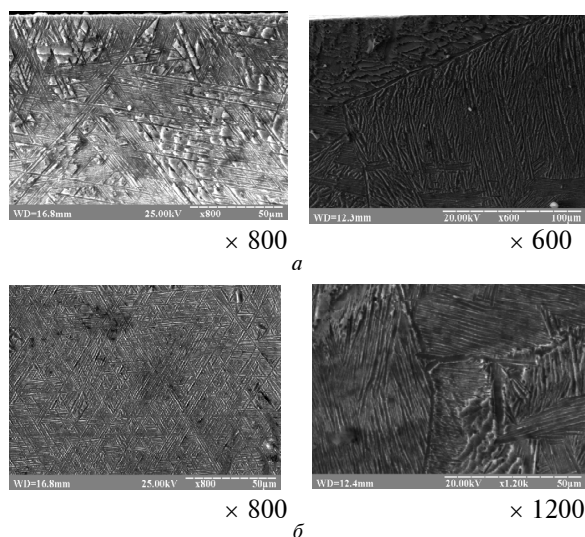


Рис. 14. Микроструктура зоны термического влияния: а – поверхностный слой; б – сердцевина

Выводы

1. Выбран оптимальный режим упрочняющей обработки стальными шариками в магнитном

поле, обеспечивающий шероховатость по Ra от 0,07 мкм воль и 0,06 мкм поперек оси образца, микротвердость 400 НV, наиболее благоприятную эпюру распределения остаточных напряжений сжатия величиной до 330 МПа на поверхности образцов и глубиной залегания до 120 мкм.

2. Обработка шариками в магнитном поле приводит к незначительному изменению микронапряжений в сварном шве, что возможно связано с высокой твердостью сварного шва – 420 НV [4], и повышению до 10% уровня микронапряжений вне зоны шва, что ведет к повышению усталостной прочности. После обработки стальными шариками в магнитном поле структура поверхностного слоя не меняется.

3. Упрочнение сварных образцов шариками в магнитном поле повышает предел выносливости сварного соединения ЭЛС из титанового сплава VT3-1с 376 до 400 МПа. В околошовной зоне, характеризующейся снижением механических свойств, после обработки шариками в магнитном поле усталостная прочность повышается до уровня основного материала.

Список литературы

1. Детонационное нанесение покрытий на детали авиадвигателей и технологического оснащения с последующей магнитно-абразивной обработкой / [Богуслаев В. А., Долматов А. И., Жеманюк П. Д. и др.]. – Запорожье : Дека, 1996 – 366 с.
2. Сайдахмедов Р. Х. Прогрессивные технологии производства конструкций летательных аппаратов из титановых сплавов / Р. Х. Сайдахмедов. – Ташкент : ТГАИ, 2005. – 54 с.
3. Лопатки газотурбинного двигателя (ГТД). Методы испытаний на усталость. (ОСТ 1.00870-77.) – Введ. 07.78.
4. Пухальская Г. В. Определение механических свойств в различных зонах сварных соединений из титанового сплава VT3-1 / Г. В. Пухальская, И. Б. Марков // Вестник двигателестроения. – 2016. – № 1. – С. 89–91.

Поступила в редакцию 26.04.2017

Пухальська Г.В., Петрик І.А., Селіверстов О.Г., Гликсон І.Л., Степанова Л.П. Дослідження застосування методу обробки кульками в магнітному полі для зміцнення зварних швів при ремонті лопаток вентилятора і компресора з титанових сплавів

Досліджено вплив обробки сталевими кульками в магнітному полі на мікроструктуру, параметри поверхневого шару і межю витривалості зварних зразків з титанового сплаву VT3-1.

Ключові слова: зварний шов, зміцнення, залишкові напруги, микротвердість, шорсткість, межа витривалості, сталеві кульки.

Pukhal'skaya G., Petrik I., Seliverstov O., Glikson I., Stepanova L. Investigation of the balls processing method application in the magnetic field for the welding sequences over the fans and compressor repair from titanium alloys

The effect of treatment with steel balls in a magnetic field on the microstructure was investigated, the surface layer parameters and the endurance limit of welded specimens from titanium alloy VT3-1 was studied.

Key words: weld seam, hardening, residual stresses, microhardness, roughness, endurance limit, steel balls.