

УДК 621.791.05

Канд. техн. наук Пухальская Г. В.¹, канд. техн. наук Петрик И. А.², канд. техн. наук
Селиверстов А. Г.², Николаев Н. И.², канд. техн. наук Степанова Л. П.¹

¹ Национальный университет «Запорізька політехніка», г. Запорожье

² АТ «Мотор Сич», г. Запорожье

ОСОБЕННОСТИ УПРОЧНЕНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ ШАРИКАМИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПРИ РЕМОНТЕ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА И КОМПРЕССОРА ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Цель работы. Исследовать влияние упрочнения шариками в магнитном поле на усталостную прочность (предел выносливости) сварных швов в титановых сплавах.

Методы исследования. Исследования проводили на образцах из титанового сплава ВТЗ-1, изготовленных по технологии, приближенной к технологии изготовления лопаток. Определение предела выносливости сварных образцов без упрочнения и сварных, обработанных шариками в магнитном поле, 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 проводились таким образом, чтобы ось сварного шва находилась в зоне действия максимальных напряжений. Фрактографические исследования проводили на микроскопе STEMI 2000-C фирмы KAPL ZEISS. Замеры твердости проводились на микротвердомере LECO LM-248AT, оснащенной системой автоматического измерения твердости АМН-43 в соответствии с [6].

Полученные результаты. Анализ полученных результатов показывает, что обработка шариками в магнитном поле повышает предел выносливости сварных образцов на 19%. Разрушения при испытаниях на усталость исходных сварных и сварных, упрочненных шариками в магнитном поле образцов, происходит по месту расположения сварного шва. В околошовной зоне, характеризующейся снижением механических свойств, разрушений при испытаниях на усталость не выявлено. Фрактографический анализ разрушенных образцов показал, что изломы имеют усталостный характер, разрушение происходит по хрупкому механизму. Отличительной особенностью является наличие пор диаметром от 0,05 до 0,15 мм, в большинстве случаев они располагаются в районе очага разрушения.

Научная новизна. Установлено, что упрочнение шариками в магнитном поле приводит к повышению усталостной прочности сварных швов. В сварных швах при сварке деталей из титановых сплавов могут образовываться поры. При расположении шва в зоне действия наибольших напряжений, поры могут способствовать снижению усталостной прочности.

Практическая ценность. Установлено, что обработка шариками в магнитном поле не приводит к охрупчиванию сварного шва и повышает усталостную прочность сварных образцов, что позволяет рассматривать упрочнение шариками в магнитном поле применительно к ремонту ответственных деталей ГТД, в том числе лопаток вентилятора.

Ключевые слова: сварной шов, пора, упрочнение, микротвердость, микронапряжения, предел выносливости.

При эксплуатации авиационных двигателей в условиях повышенной запыленности, на грунтовых аэродромах, в пустыне, может происходить повреждение лопаток компрессора в виде забоин, царапин, рисок [1]. Для ремонта значительных повреждений требуется применение методов сварки или наплавки. Усталостная прочность сварных швов обычно меньше, чем цельного материала. Методы поверхностного упрочнения, как правило, приводят к повышению предела выносливости [1]. Поэтому для обеспечения эксплуатационных свойств деталей, восстановленных с применением сварки, актуальной задачей является применение методов поверхностного упрочнения для сварных соединений [2].

Исследования проводили на образцах, применительно к ремонту лопаток вентилятора из материала ВТЗ-1

с заменой поврежденного фрагмента и приваркой вставки методом ЭЛС.

Определение предела выносливости сварных образцов без упрочнения и сварных образцов, 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 проводились таким образом, чтобы ось сварного шва находилась в зоне действия максимальных напряжений.

Фрактографические исследования проводили на микроскопе STEMI 2000-C фирмы KAPL ZEISS. Замеры твердости проводились на микротвердомере LECO LM-248AT, оснащенной системой автоматического

измерения твердости АМН-43 в соответствии с ГОСТ 9450-76. В качестве индентора использовался алмазный наконечник в форме правильной четырехгранной пирамиды с углом между противоположными гранями 136 градусов. К индентору прилагалась нагрузка 0,4905 Н, с выдержкой усилия в течение 15 с. Для оценки уровня микронапряжений измеряли ширину дифракционной линии 105 α -фазы. В исследовании использовали рентгеноструктурный метод, съемка в медном излучении на дифрактометре типа ДРОН-3.

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 МИКРО-МИД20-1Л. 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. Свар-

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

Согласно проведенным ранее исследованиям [4], ось сварного шва (рис. 1) 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.

Выбор оптимального режима проводили по результатам исследований характеристик поверхностного слоя: шероховатости, микротвердости, остаточных напряжений [5]. Материал шариков – сталь ШХ15. Образцы при обработке выполняли возвратно-поступательное перемещение сквозь слой шариков, которые удерживались магнитным полем. В результате шарики совершали «мягкие» удары по поверхности образцов, таким образом, упрочняя их. Обработку выполняли по оптимальному режиму (см. табл. 1).

Результаты испытаний на усталость представлены в табл. 2 и 3.

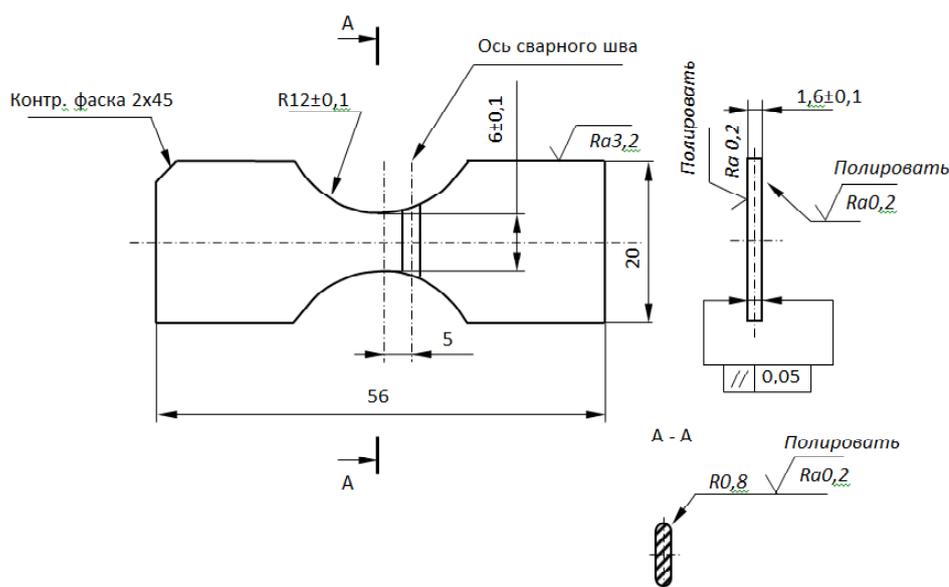


Рис. 1. Эскиз сварного образца для испытаний на усталость

Таблица 1 – Параметры режимов обработки образцов

Параметры режима обработки					
Сечение магнитопровода	a , мм	d , мм	Расстояние между полюсами магнита, мм	ν , Гц	τ , мин
УК	22	1,6	11	16	30
		0,65			7

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.

Таблиця 2 – Результати испытаний на усталость сварных образцов

№ п/п	№ образцов	Уровень нагружения σ , МПа	Кол-во циклов, $N \times 10^6$	Результаты испытаний	Примечание
1	9С	500	0,172	Разр.	$l = 23$ мм
2	11С	470	0,894	Разр.	$l = 23$ мм
3	12С	440	0,431	Разр.	$l = 23$ мм
4	13С	410	3,84	Разр.	$l = 24$ мм
5	14С	380	20,0	Н.р.	-
6	10С	380	20,0	Н.р.	-
7	15С	380	20,0	Н.р.	-
8	16С	380	0,91	Разр.	$l = 24$ мм
9	17С	350	1,49	Разр.	$l = 23$ мм
10	18С	320	20,0	Н.р.	-
11	19С	320	20,0	Н.р.	-
12	20С	320	20,0	Н.р.	-
13	21С	320	20,0	Н.р.	-
14	24С	320	20,0	Н.р.	-
15	25С	320	20,0	Н.р.	-

В соответствии с методикой предел выносливости на базе 10^8 циклов составит $320 \times 0,8 = 256$ МПа.

Таблиця 3 – Результати испытаний на усталость 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	16СУ	440	20,0	Н.р.	-
2	17СУ	470	20,0	Н.р.	-
3	18СУ	500	20,0	Н.р.	-
4	19СУ	530	7,14	Разр.	$l = 24$ мм
5	20СУ	500	1,39	Разр.	$l = 23$ мм
6	21СУ	470	2,52	Разр.	$l = 24$ мм
7	22СУ	440	20,0	Н.р.	-
8	23СУ	440	0,43	Разр.	$l = 24$ мм
9	24СУ	410	0,45	Разр.	$l = 24$ мм
10	25СУ	380	20,0	Н.р.	-
11	26СУ	380	20,0	Н.р.	-
12	27СУ	380	20,0	Н.р.	-
13	28СУ	380	20,0	Н.р.	-
14	29СУ	380	20,0	Н.р.	-
15	31СУ	380	20,0	Н.р.	-

В соответствии с методикой предел выносливости на базе 10^8 циклов составит $380 \times 0,8 = 304$ МПа.

Анализ полученных результатов показывает, что предел выносливости сварных образцов, обработанных шариками в магнитном поле на 19 % выше, чем сварных образцов без упрочнения; предел выносливости при этом повышается с 256 до 304 МПа. Стоит отметить, что разрушения при испытаниях на усталость исходных сварных и сварных, упрочненных шариками в магнитном поле образцов, происходит по месту расположения сварного шва. В околосшовной зоне, характеризующейся снижением механических свойств, разрушений при испытаниях на усталость не выявлено.

Измерение твердости проводилось в направлении от поверхности излома вглубь образца. По результатам выполненных измерений, следует отметить, что выяв-

лено наличие участков с повышенной микротвердостью: на глубине 0,12 мм – 430 HV; 0,75-0,81 мм – 399 HV; 0,9 мм – 417 HV. Можно предположить, что на данных участках будут присутствовать зоны повышенной хрупкости.

Фрактографический анализ образцов без упрочнения сварного шва

Фрактографический анализ (образец № 16 С) показал, что микрорельеф образца хрупкий, в зоне разрушения излом усталостный (рис. 3). В поле зрения выявлена пора диаметром ~ 0,15 мм, которая расположена в очаге разрушения. На рис. 3 стрелкой показан начальный очаг развития разрушения образца.

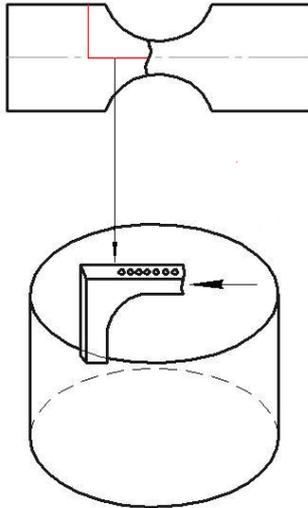


Рис. 2. Схема вырезки и замера твердости образца №17 С

Фрактографический анализ (образец № 17 С) показал, что микрорельеф образца имеет усталостный излом (рис. 4). Очаг разрушения скользящего вида, расположен со стороны наружной поверхности. За его пределами выявлена пора диаметром ~ 0,05 мм. Разрушение развивалось по хрупкому механизму.

Фрактографический анализ (образец № 13 С) показал, что микрорельеф образца имеет усталостный излом (рис. 5). Очаговая зона характеризуется складчатым хрупким микрорельефом. Четкое место расположения очага не просматривается. Вблизи очаговой зоны выявлена пора диаметром ~ 0,10 мм. Разрушение развивалось по хрупкому механизму.

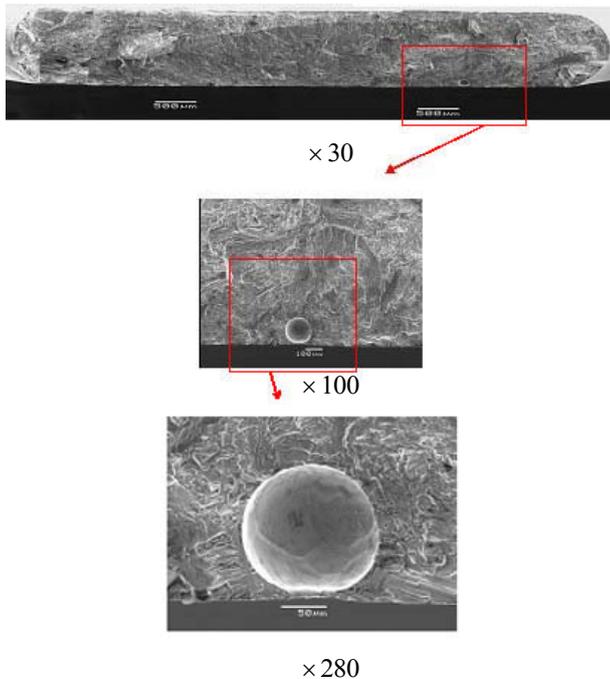


Рис. 3. Очаговая зона (образец № 16 С)

Таблица 4 – Результаты замера твердости образца № 17 С

№ п/п	Расстояние, мм	Твердость HV 0,05	Длина диагонали, мм
1	0,03	382	0,01558
2	0,06	397	0,01528
3	0,09	385	0,01552
4	0,12	430	0,01468
5	0,15	417	0,01491
6	0,18	396	0,01530
7	0,21	401	0,01521
8	0,24	396	0,01530
9	0,27	353	0,01621
10	0,30	390	0,01542
11	0,33	393	0,01536
12	0,36	387	0,01548
13	0,39	350	0,01628
14	0,42	377	0,01568
15	0,45	367	0,01589
16	0,48	361	0,01603
17	0,51	365	0,01594
18	0,54	353	0,01621
19	0,57	341	0,01649
20	0,60	359	0,01607
21	0,63	356	0,01614
22	0,66	368	0,01587
23	0,69	366	0,01592
24	0,72	374	0,01575
25	0,75	399	0,01524
26	0,78	396	0,01530
27	0,81	399	0,01524
28	0,84	385	0,01552
29	0,87	382	0,01558
30	0,90	417	0,01491
31	1,00	339	0,01654
32	1,10	326	0,01686
33	1,20	332	0,01671
34	1,30	337	0,01659
35	1,40	349	0,01630
36	1,50	335	0,01664
37	1,60	353	0,01621
38	1,70	353	0,01621
39	1,80	342	0,01646
40	2,80	368	0,01587
41	3,80	359	0,01607
42	4,80	363	0,01598
43	5,80	368	0,01587
44	6,80	374	0,01575
45	7,80	363	0,01598
46	8,80	368	0,01587
47	9,80	380	0,01562
48	10,80	371	0,01581
49	11,80	372	0,01579
50	12,80	368	0,01587

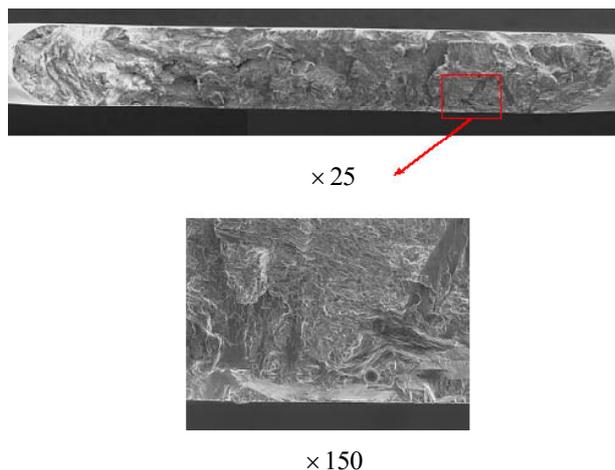


Рис. 4. Очаговая зона (образец № 17 С)

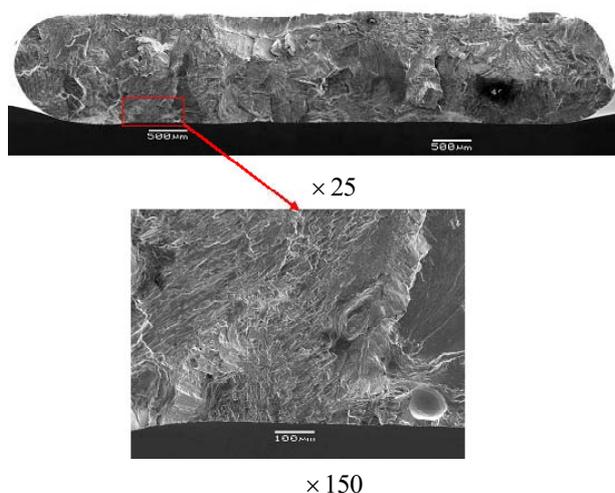


Рис. 5. Очаговая зона (образец № 13 С)

Фрактографический анализ образцов с упрочнением сварного шва

Фрактографический анализ (образец № 19 СУ) показал, что микрорельеф образца имеет усталостный излом (рис. 6). Очаговая зона частично повреждена и покрыта отложениями. В этой зоне наблюдаются участки хрупкого складчатого микрорельефа и пора диаметром $\sim 0,05$ мм (рис. 6, указано стрелкой). Разрушение развивалось по хрупкому механизму.

Фрактографический анализ (образец № 23 СУ) показал, что микрорельеф образца имеет усталостный излом (рис. 7). Очаговая зона частично покрыта отложениями, закрывающими частично очаговую зону. В этой зоне наблюдаются участки скольного вида и пора диаметром $\sim 0,05$ мм. Разрушение развивалось по хрупкому механизму.

Фрактографический анализ (образец № 24 СУ) показал, что микрорельеф образца имеет усталостный излом (рис. 8). В очаговой зоне выявлена пора диаметром $\sim 0,1$ мм, которая является начальным очагом разрушения. Микрорельеф в зоне разрушения хрупкий.

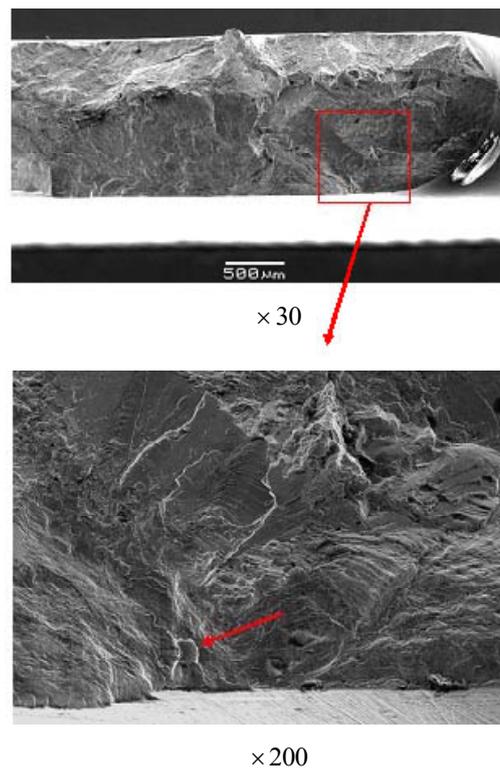


Рис. 6. Очаговая зона (образец № 19 СУ)

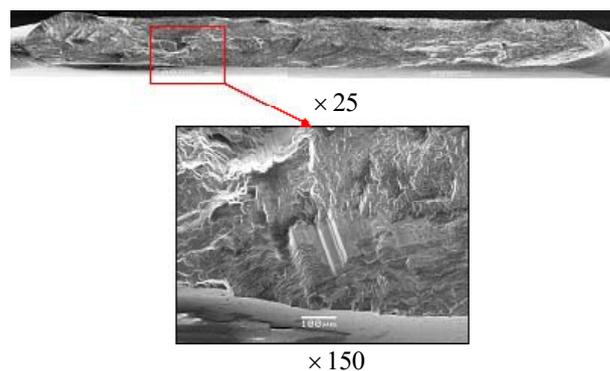


Рис. 7. Очаговая зона (образец № 23 СУ)

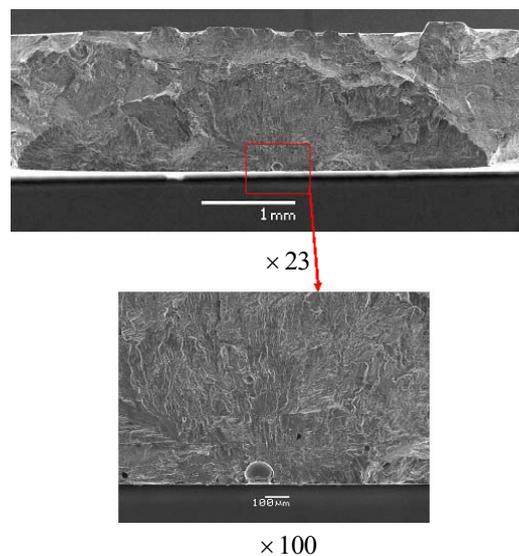


Рис. 8. Очаговая зона (образец № 24 СУ)

Следует отметить, что образование пор в сварных швах, как правило, связано с наличием загрязнений поверхности, вследствие нарушения технологии подготовки деталей под сварку.

Исследование микронапряжений в сварных швах

Было исследовано влияние обработки шариками в магнитном поле на уровень микронапряжений в сварном шве и вне зоны термического влияния (табл. 5).

Таблица 5 – Ширина линии 105 α - фазы (в радианах) для неупрочненного (вне зоны термического влияния) состояния и упрочненного (обработка шариками в магнитном поле) [4]

Место съёмки	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

Сравнительный анализ полученных данных показывает, что в сварном шве уровень микронапряжений ниже, чем на участке образца вне сварного шва и зоны термического влияния, что может быть связано с более высокой твердостью сварного шва [5]. Обработка шариками в магнитном поле «мягкая» и не приводит к охрупчиванию сварного шва.

Выводы

1. Разрушение при испытаниях на усталость сварных образцов без упрочнения и сварных образцов, упрочненных шариками в магнитном поле, происходило в зоне действия максимальных напряжений по сварно-

му шву. Упрочнение сварных образцов шариками в магнитном поле повышает предел выносливости на 19%.

2. Фрактографический анализ разрушенных образцов показал, что изломы имеют усталостный характер, разрушение происходит по хрупкому механизму. Отличительной особенностью является наличие пор диаметром от 0,05 до 0,15 мм, в большинстве случаев они располагаются в районе очага разрушения. Следовательно, необходимо особенно тщательно проводить подготовку поверхностей под сварку и подбирать режимы сварки, минимизируя образование пор.

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 ВТЗ-1/ Г. В. Пухальская, И. Б. Марков // Вестник двигателестроения. – 2016. – № 1. – С. 89–91.
5. Исследование применения метода обработки шариками в магнитном поле для упрочнения сварных швов при ремонте лопаток вентилятора и компрессора из титановых сплавов [Текст] / Пухальская Г. В., Петрик И. А., Селиверстов А. Г. и др. // Вестник двигателестроения. – 2017. – №1. – С. 101–109.
6. ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78) Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М. : Изд-во стандартов, 1993. – 33 с.

Одержано 18.11.2019

Пухальська Г.В., Петрик І.А., Селіверстов О.Г., Ніколасв М.І., Степанова Л.П. Особливості зміцнення зварних швів кульками в магнітному полі під час ремонту лопаток вентилятора і компресора з титанових сплавів

Мета роботи. Дослідити вплив зміцнення кульками в магнітному полі на втомну міцність (границю витривалості) зварних швів у титанових сплавах.

Методи дослідження. Дослідження проводили на зразках з титанового сплаву ВТЗ-1, виготовлених за технологією, наближеною до технології виготовлення лопаток. Визначення границі витривалості зварних зразків без зміцнення і зварних, оброблених кульками в магнітному полі, проводили прискореним методом на базі $N = 2 \cdot 10^7$ циклів з подальшим перерахунком із застосуванням коефіцієнта $\alpha = 0,8$ на базу $N = 10^8$ циклів [3]. Випробування проводилися таким чином, щоб вісь зварного шва знаходилась у зоні дії максимальних напружень. Фрактографічне дослідження проводили на мікроскопі STEMI 2000-C фірми КАРЛ ZEISS. Виміри твердості проводилися на мікротвердомірі LECO LM-248AT, оснащеному системою автоматичного вимірювання твердості АМН-43 відповідно до [6].

Отримані результати. Аналіз отриманих результатів показує, що обробка кульками в магнітному полі підвищує границю витривалості зварних зразків на 19 %. Руйнування при випробуваннях на втому вихідних зварних і зварних зразків, зміцнених кульками в магнітному полі, відбувається в зоні розташування зварного шва. В навколошовній зоні, яка характеризується зниженням механічних властивостей, руйнувань при випробуваннях на втому не виявлено. Фрактографічний аналіз зруйнованих зразків показав, що злами мають

втомний характер, руйнування відбувається за крихким механізмом. Відмінною особливістю є наявність пор діаметром від 0,05 до 0,15 мм, у більшості випадків вони розташовуються в районі джерела руйнування.

Наукова новизна. Встановлено, що зміцнення кульками в магнітному полі приводить до підвищення втомної міцності зварних швів. У зварних швах при зварюванні деталей з титанових сплавів можуть утворюватися пори. При розташуванні шва в зоні дії найбільших напружень пори можуть сприяти зниженню втомної міцності.

Практична цінність. Встановлено, що обробка кульками в магнітному полі не призводить до окрихчування зварного шва і підвищує втомну міцність зварних зразків, що дозволяє розглядати зміцнення кульками в магнітному полі стосовно ремонту відповідальних деталей ГТД, у тому числі лопаток вентилятора.

Ключові слова: зварний шов, пора, зміцнення, мікротвердість, мікронапруження, границя витривалості.

Pukhal'skaya G., Petrik I., Seliverstov O., Nikolaiev M., Stepanova L. Features of strengthening of welded seams by balls in a magnetic field at repair of fan blades and compressor from titanium alloys

Objective. Investigate the effect of hardening by balls in a magnetic field on the fatigue strength (endurance limit) of welds in titanium alloys.

Research methods. The studies were carried out on samples of VT3-1 titanium alloy manufactured using a technology close to the technology of manufacturing the blades. The endurance limit of welded specimens without hardening and welded treated with balls in a magnetic field was determined by the accelerated method based on $N = 2 \cdot 10^7$ cycles, followed by recalculation using the coefficient $\alpha = 0,8$ to the base $N = 10^8$ cycles [3]. The tests were carried out so that the axis of the weld was in the zone of maximum stress. Fractographic studies were performed on a STEMI 2000-C microscope from KARL ZEISS. Hardness measurements were carried out on a LECO LM-248AT microhardness meter equipped with an automatic hardness measurement system AMN-43 in accordance with [6].

Obtained results. An analysis of the results shows that treating with balls in a magnetic field increases the endurance limit of welded samples by 19%. Damage during fatigue tests of the original welded and welded, hardened by balls in the magnetic field of the samples, occurs at the location of the weld. In the heat-affected zone, characterized by a decrease in mechanical properties, no damage during fatigue testing was detected. A fractographic analysis of the destroyed samples showed that the fractures are fatigue-like, fracture occurs by a brittle mechanism. A distinctive feature is the presence of pores with a diameter of 0,05 to 0,15 mm, in most cases they are located in the area of the fracture focus.

Scientific novelty. It was found that hardening by balls in a magnetic field leads to an increase in the fatigue strength of welds. In welding seams, pores may form during welding of titanium alloy parts. When the seam is located in the zone of action of the highest stresses, the pores can help reduce fatigue strength.

Practical value. It was established that processing by balls in a magnetic field does not lead to embrittlement of the weld and increases the fatigue strength of welded samples, which allows considering the hardening by balls in a magnetic field as applied to the repair of critical parts of a gas turbine engine, including fan blades.

Key words: weld, pore, hardening, microhardness, microstresses, endurance limit.
