УДК 629.7.067 https://doi.org/10.15407/materials2023.07.003

Вплив дефектів зварювання на втомні показники зразків зі сплаву ВТ-22 при застосуванні відновлювального наплавлення присадковими дротами

А. О. Горпенко*, О. І. Семенець

ДП "АНТОНОВ", Київ
Україна, 03062, Київ, вул. Академіка Туполєва, 1
*E-mail: timanz.ag@gmail.com

Досліджено зразки з високоміцного титанового сплаву ВТ-22, поверхня яких була відновлена методом наплавлення з використанням присадкових дротів із сплавів СП-15 та ВТ-22, після випробувань на втому. Фрактографія виявила наявність ряду дефектів зварювання, розташованих як в зоні наплавленого металу, так і на його межах. Результати показали, що наявність цих дефектів у першу чергу зумовлена ініціюванням втомних тріщин. На зниження втомних характеристик впливали розмір та форма дефектів, а також їхнє розташування відносно наплавленого шару. Корегування умов наплавлення може значно зменшити критичний розмір дефектів і, як наслідок, суттєво збільшити залишковий ресурс відновлених деталей.

Ключові слова: *високоміцний титановий сплав ВТ-22, пори зварювання, сегрегація дефектів, зона термічного впливу, циклічне навантаження.*

Вступ

Титанові сплави як конструкційний матеріал в авіабудуванні набули широкого застосування з другої половини 20 століття [1—3]. Основними і безперечними перевагами, що сприяли їх швидкому впровадженню у виробництво, була їх мала щільність, високі механічні властивості та відмінний опір корозії за підвищених температур. Однак поряд з перевагами були й недоліки: висока вартість виробництва, погані антифрикційні властивості, висока схильність титану та багатьох його сплавів до водневої крихкості, погана оброблюваність різанням. Тому розробка методів відновлення частково пошкоджених деталей з титанових сплавів зі збереженням їх експлуатаційних властивостей є актуальним напрямком.

а *б*

Рис. 1. Фотографія ділянки, де відбувся знос робочої поверхні рейки літака Ан-124, (*а*) та вид дефектної поверхні після застосування відновлювального наплавлення (*б*).

Відповідно до цієї проблематики Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України розробив технологію відновлення поверхні пошкоджених деталей методом наплавлення з використанням присадкових дротів зі сплавів СП-15 та ВТ-22 [4—7]. Технологія частково апробована на ДП “Антонов”. За цією технологією було відновлено поверхню габаритної деталі літака Ан-124 з титанового сплаву ВТ-22 [8]. Деталь мала локальний знос на глибину більше 1,5 мм (рис. 1, *а*) і її потрібно було замінити на нову, але за допомогою аргонно-дугового осадження дефектна поверхня була відновлена до початкових розмірів (рис. 1, *б*). Через великі габаритні розміри відновленої деталі для покращення механічних властивостей застосовано локальну термічну обробку для вирівнювання макро- та мікроструктури в сформованому шві. Обробка полягала в швидкому нагріві до температур однофазного β-розчину і подальшому короткочасному старінні [9, 10]. Виконане відновлення забезпечило необхідний рівень надійності, хоча поверхня деталі мала знос від ковзання по її поверхні рухливого ролику.

Для вивчення впливу даної відновлювальної технології зварювання на втомні показники високоміцних титанових сплавів було виготовлено стандартні зразки типу “лопатка” з наплавками в центральній зоні та проведено втомні випробування щодо виявлення особливостей їх руйнування при знакозмінних навантаженнях.

Незважаючи на те, що наплавлення відбувалось в середовищі інертних газів (аргон, гелій), які захищали ванну розплаву та її хвостову частину від шкідливого впливу зовнішнього середовища, дефекти зварювання (пори та їх сегрегації) були присутні в зварювальних з’єднаннях. Ці дефекти значно зменшують втомні показники через збільшення концентрацій напружень навколо пор, що спричинює передчасне руйнування деталей. Тобто ресурс деталей обмежується не внутрішніми мікроструктурними особливостями, такими як розмір зерна або альфа-пакетів, а зовнішніми дефектами — порами. Пори формуються незалежно від виду зварювання. На даний час немає однозначного пояснення утворення пористості в титанових зварних швах, однак в літературі висвітлюються деякі важливі відомості про ймовірну причину появи пор. Прийнято вважати, що пористість виникає через бульбашки, які потрапили після затвердіння зварювальної ванни. Формування пористості багато в чому залежить від геометрії зварного

з'єднання і підготовки його кромок, від стану поверхні [11], кількості водню в основному металі. Перепад температур у різних частинах деталі під час зварювання може призвести до міграції водню в зону зварювання та навколо неї. Таким чином, багато факторів впливають на утворення пор і більшість з них відносять до технологічних. Вдосконалюючи технологію зварювання, можливо досягти позитивних зрушень, які зменшать кількість та критичний розмір дефектів у зварному шві. Дана робота ставить на меті дослідити поверхню зруйнованих під час втомних випробувань зразків, до яких застосовано відновлювальну технологію зварювання.

Матеріали і методи досліджень

На ДП "Антонов" проведено втомні випробування зразків типу "лопатка" з титанового сплаву ВТ-22 (рис. 2). У центральній зоні зразків було видалено частку поверхневого шару на глибину 1—1,5 мм завширшки 5 мм, що імітувало пошкодження поверхні реальних деталей літаків, які зазнали зносу під час експлуатації. Після цього в місцях зі знятим шаром було застосовано технологію локального відновлення поверхні методом наплавлення. Пластини товщиною 7 мм зварювали аргонно-дуговим способом з використанням вольфрамового електрода, де як присадковий дрот вибрано легований дріт марки СП-15, який можна застосовувати для зварювання високоміцних титанових сплавів, та дріт марки ВТ-22. Оскільки хімічний склад дроту марки СП-15 відрізняється від складу пластин, які зварюються, було вирішено проводити наплавлення присадковими дротами зі сплавів СП-15 та ВТ-22 на глибину 1 та 1,5 мм відповідно. Після зварювання зразки проходили термічну обробку для вирівнювання властивостей основного металу з наплавленим (таблиця).

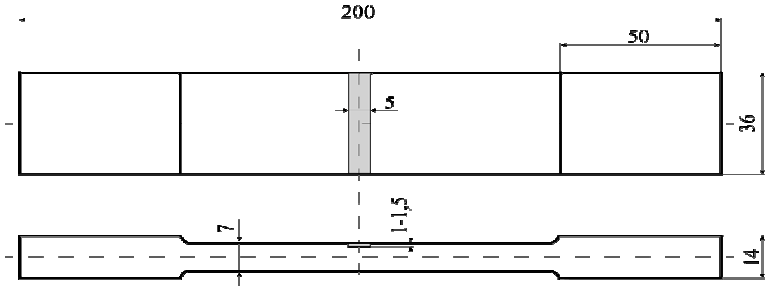


Рис. 2. Схема зразка з відновленою поверхнею для проведення втомних випробувань.

Результати випробувань

Номер зразка	Напрацювання до руйнування, цикл	Матеріал присадкового дроту	Глибина наплавки, мм
1	243 325	ВТ-22[1]	1,5
2	193 220	СП-15[2]	1
3	162 070	СП-15[2]	1
Примітка: 1 — Ti—5,7Al—5,5Mo—5,5V—1≈,5Cr—0,3Zr; 2 — Ti—4,5Al—2,5Mo—2,5V—3,5Nb—1,5Zr.			

Випробування зразків здійснювали на гідравлічній машині УИМ-25 до їх повного руйнування від нульовим циклом (R = 0) з частотою 3 Гц з навантаженнями $P_{max}^{розтяг} \approx 90$ кН та $P_{max}^{стиск.} \approx 60$ кН.

Структуру та поверхню руйнування зразків вивчали за допомогою оптичного (Neophot-21) та скануючого (TESCANVEGA 3) мікроскопів.

Результати експерименту та їх обговорення

У даній роботі досліджено три зразки, які зруйнувались під час випробувань. Встановлено, що зразки руйнувались на межі сплавлення основного металу з наплавленим (рис. 3). При дослідженні зразка № 1 з використанням незначних збільшень виявлено, що тріщина розвинулась за втомним механізмом. В осередку тріщини наявні пори максимального діаметра 130 мкм (рис. 4), які розташовувались в центральній частині зразка на глибині 1,2 мм від її поверхні. Розвиток тріщини відбувався в обидва боки від цих пор.

У зламі спостерігалися три зони різної будови:

переважно гладка сріблясta зона наплавлення зі слабовираженими лініями втомного розвитку тріщини;

прилегла до наплавлення серповидна зона з грубим макрорельєфом, що складається з блискучих ділянок сколу (зона термічного впливу);

зона з макролініями, що включає перехідну область від крихкого макрорельєфу до змішаного в'язкого і втомного макрорельєфу. Фотографія і схема будови зламу зразка № 1 представлені на рис. 5.

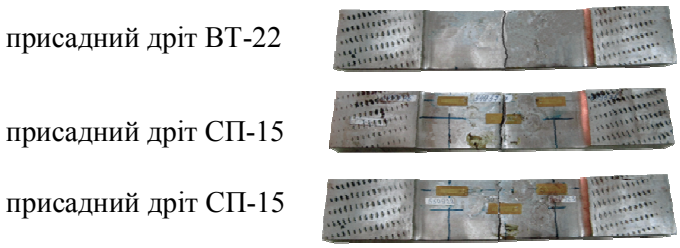
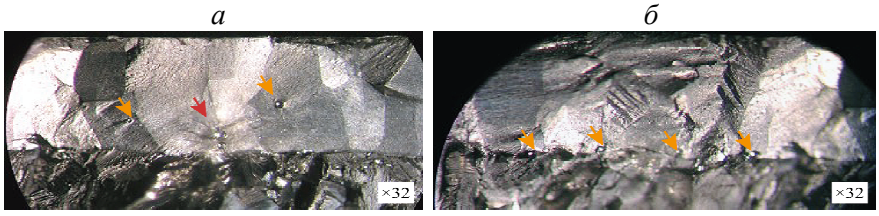


Рис. 3. Зовнішній вигляд зразків, які пройшли втомні випрооування.



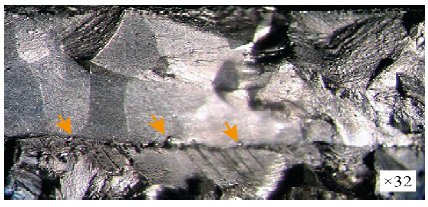
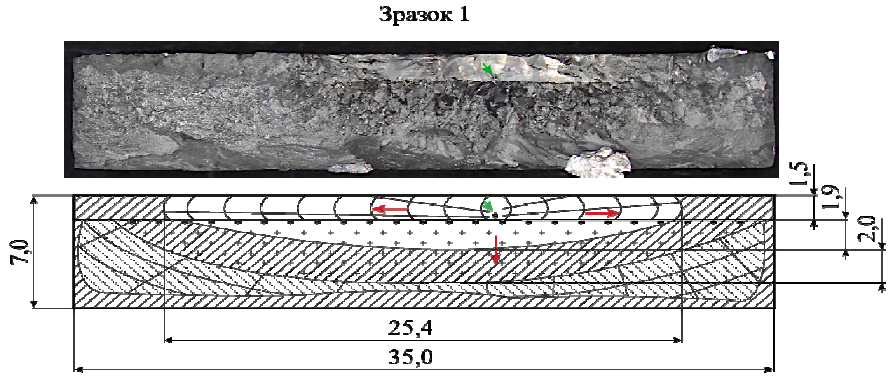


Рис. 4. Дефекти (пори) в наплавленому металі: *а* — у зламі наплавленого металу (максимальна пора діаметром 0,13 мм, від якої почалось зародження тріщини); *б*, *в* — у зоні сплавлення.

в



Умовні позначення:

- зона наплавленого матеріалу;
- зона крихкого руйнування;
- зона в’язкого статичного руйнування (зона долому);
- зона змішаного руйнування (втомно-в’язкого);
- зона втомного руйнування;
- напрямок розвитку тріщини;
- осередок тріщини.

Рис. 5. Фотографія та схема будови зламу зразка № 1.

При дослідженні тріщини зразків № 2 та 3 встановлено, що руйнування зразків також носить втомний характер. Зародження тріщин обох зразків відбувалося від бокової поверхні в місцях несуцільності злиття основного матеріалу з наплавленим (рис. 6). Уздовж лінії сплавлення основного металу з наплавленим у зразках спостерігався крупнозернистий макрорельєф шириною до 4,4 мм, що відповідає зоні термічного впливу. Фотографії та схеми будови зламів зразків № 2 та 3 наведені на рис. 7.

Дослідження на скануючому електронному мікроскопі трьох зразків виявило наступні особливості їх руйнування.

Руйнування зразка № 1 відбувалось в двох протилежних напрямках (рис. 5) від пори максимального діаметра 0,13 мм та двох менших, що були дотичні до неї (рис. 8, *а*). У зламах тріщин зразків № 2 та 3 виявлено ланцюжки мікропор довжиною 420 та 330 мкм відповідно, що виходили на зовнішню бокову поверхню зразків (рис. 8, *б*).

Механізм руйнування зразків був подібний, лише з різницею в розташуванні пор та їх сумарній площі. У зонах втоми зразків № 1—3 спостерігався транскристалічний мікрорельєф, на деяких ділянках розрізнялися лінії втоми (рис. 9). У зоні термічного впливу здебільшого виявлялися крихкі фасетки сколу і невелика кількість мікроділянок міжзереного руйнування (рис. 10). Долом між елементами крихкого руйнування відбувався за в’язким механізмом злиття мікропор (рис. 11).

Рис. 6. Фотографія фрагменту зламу зразка № 2.

Виконані дослідження виявили, що швидкість зародження втомних тріщин суттєво залежить від наявності дефектів, зокрема від пор, утворених під час процесу зварювання. Ці пори виступають концентраторами напружень, що сприяє появі втомних тріщин. Встановлено, що після наплавлення дротом зі сплаву ВТ-22 зразок № 1 мав кращі втомні показники порівняно зі зразками № 2 та 3, для яких наплавлення виконували дротом зі сплаву СП-15.

Основна причина різниці у втомних властивостях зразків зумовлена в першу чергу різною глибиною наплавлення, відмінністю хімічних складів сплавів дротів, мікроструктури та механічних властивостей наплавленого шару.

Виявлені скупчення пор у наплавленому шарі зразків № 2 та 3 суттєво вплинули на процес зародження втомних тріщин. Скупченість та віддаленість пор від поверхні матеріалу значно підвищили швидкість зародження та розвиток тріщин.

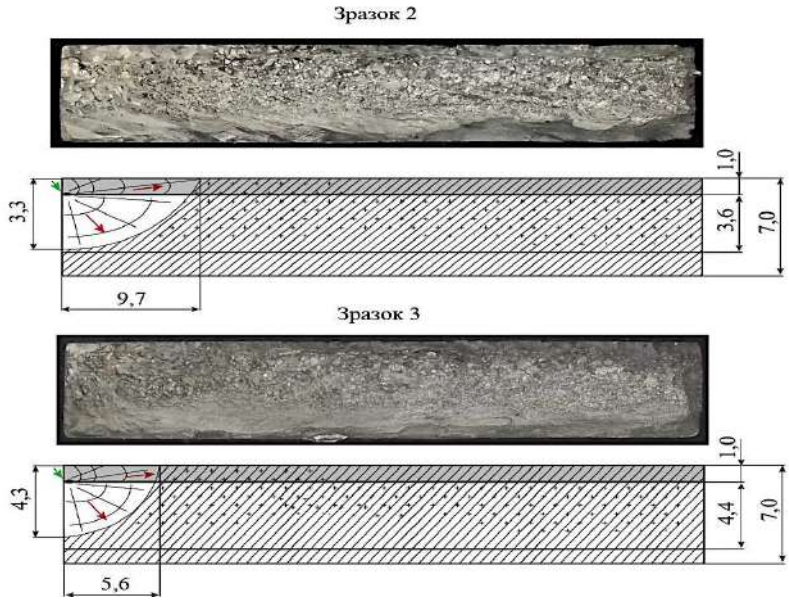
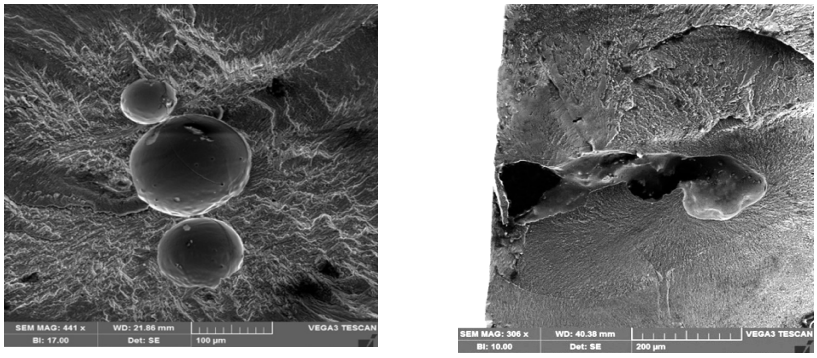
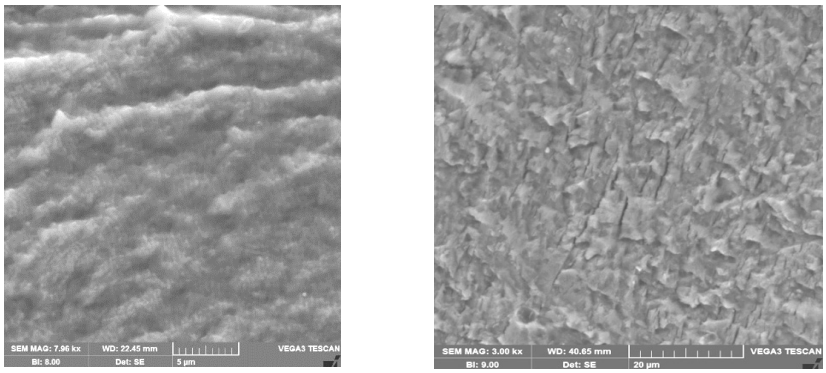


Рис. 7. Фотографії та схеми будови зламів зразків № 2 і 3. Умовні позначення див. у підпису до рис. 5.



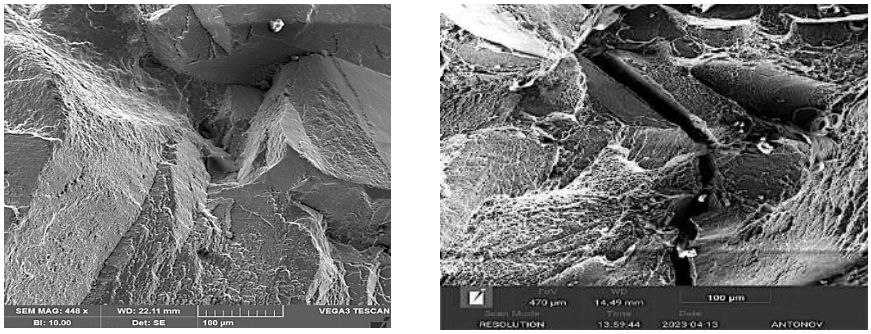
а *б*

Рис. 8. Пори в зоні наплавленого металу зразків № 1 (*а*) та 2 (*б*).



а *б*

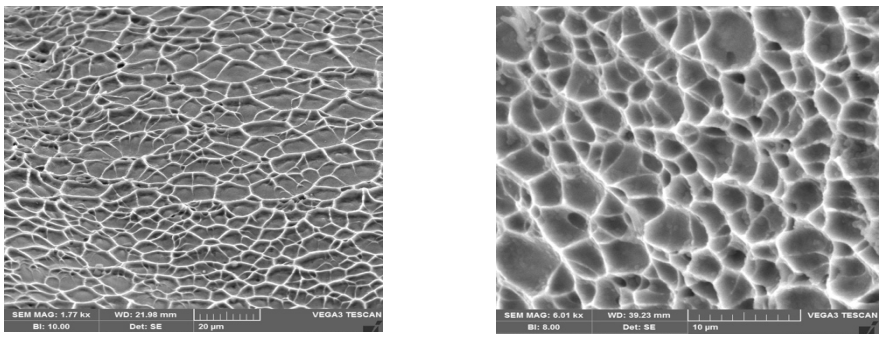
Рис. 9. Фотографії втомного мікрорельєфу в зоні наплавлення зразків № 1 (*а*) та 2 (*б*).



а *б*

Рис. 10. Фасетки сколу в зоні термічного впливу зразків № 1 (*а*) та 2 (*б*).

Хоча виявлено, що запобігти повністю появі пор складно, проте можливо досягти певних умов під час процесу наплавлення, які сприятимуть зменшенню критичного розміру дефектів та запобіганню їхньої сегрегації в межах наплавленого шару. Важливим кроком може бути оптимізація параметрів наплавлення, таких як температура, швидкість наплавлення, захисна атмосфера тощо. Також використання додаткових методів контролю дефектів, наприклад ультразвукового або рентгенівського, може сприяти виявленню пор та інших дефектів, що дозволить



а *б*

Рис. 11. В’язкий мікрорельєф у зоні долому зразків № 1 (*а*) та 3 (*б*).

вжити відповідні заходи для їхнього усунення або мінімізації їх впливу на міцність та втомні властивості матеріалу.

Висновки

У результаті проведених досліджень зразків з наплавками було встановлене наступне.

На швидкість зародження втомних тріщин впливали дефекти, які виникли під час зварювання.

Зразок № 1 руйнувався як за втомним механізмом, так і за механізмом крихкого руйнування в зоні термічного впливу. Зародження тріщини відбувалося від трьох пор, розташованих у центральній частині зразка. Максимальний діаметр однієї з пор становив 0,13 мм.

Зразки № 2 та 3 також зруйнувались за втомним механізмом. Зародження тріщин відбувалося від сегрегації мікропор, протяжність яких складала 420 та 330 мкм відповідно. Це спостерігалося в зонах сплавлення основного металу з наплавленим. Скупчення пор виходило на торцеву поверхню зразків № 2 і 3.

Використаний присадковий дріт зі сплаву ВТ-22 в зразку № 1 показав більш високі характеристики стійкості до втоми, ніж дріт із сплаву СП-15 (зразки № 2, 3). Корегуванням певних умов наплавлення при застосуванні присадкового дроту зі сплаву СП-15 можливо уникнути утворення скупчень пор на поверхні зразків, що в свою чергу значно поліпшить їх втомні показники.

Присутність скупчень пор у наплавленому шарі зразків № 2 і 3 пришвидшує зародження втомних тріщин.

Результати попередніх досліджень вказують на складність запобігання появі пор. Однак можливо досягти певних умов наплавлення металу, що допоможе зменшити критичний розмір дефектів та уникнути їх накопичення в межах наплавленого шару на глибину 1—1,5 мм з використанням присадкових дротів зі сплавів СП-15 та ВТ-22.

Отримані результати досліджень надають інформацію, що має важливе значення для подальших досліджень та практичного застосування.

Список літератури

1. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. Москва: Металлургия, 1969. 348 с.
2. Горынин И.В., Чечулин Б.Б. Титан в машиностроении. Москва: Машиностроение, 1990. 400 с.
3. Цвиккер У. Титан и его сплавы. Москва: Металлургия, 1979. 512 с.
4. Гуревич С.М., Замков В.Н., Компан Я.Ю., Кушниренко Н.А., Харченко Г.К., Блащук В.Е., Волков В.Б., Загребенюк С.Д., Прилуцкий В.П., Сабокарь В.К. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов. Киев: Наук. думка, 1979. 300 с.
5. Гуревич С.М., Замков В.Н., Кушниренко Н.А. Изыскание присадочного материала для сварки (α+β)-титановых сплавов. *Актуальные проблемы сварки цветных металлов*. Киев: Наук. думка, 1980. С. 314—320.
6. Анисимова Л.И., Попов А.А., Мельникова В.И. Влияние термической обработки на структуру и свойства титанового сплава ВТ-22. *Физика металлов и металловедение*. 1977. Вып. 4. С. 843—845.
7. Прилуцкий В.П., Шваб С.Л., Петриченко И.К. Аргонно-дуговая сварка титанового сплава ВТ-22 с использованием присадочной порошковой проволоки. *Автоматическая сварка*. 2016. № 9. С. 10—14.
8. Прилуцкий В.П., Ахонин С.В., Шваб С.Л. Восстановительная наплавка деталей из титанового сплава ВТ-22. *Автоматическая сварка*. 2017. № 1. С. 39—42.
9. Івасишин О.М., Марковський П.Є., Гавриш І.М., Карасевська О.П. Вплив швидкості охолодження під час гартування на старіння і формування механічних характеристик титанового сплаву ВТ-22. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2014. № 1. С. 60—66.
10. Markovsky P.E. Application of local rapid heat treatment for improvement of Microstructure and mechanical properties of titanium products. *Key Engineering Mater.* 2010. Vol. 436. Trans Tech Publications. P. 185—194. doi:10.4028/www.scientific.net/kem.436.185
11. Горпенко А.О., Семенець О.І., Доній О.М., Валуйська К.О. Вплив стану поверхні деталей шасі з високоміцного титанового сплаву ВТ-22 в процесі випробувань на втому. *Успіхи матеріалознавства*. 2021. № 2. С. 45—53. doi:10.15407/materials2021.02.045

References

1. Glazunov, S. G., Moiseev, V. N. (1969). Structural titanium alloys. Moscow: Metallurgiya, 348 p. [in Russian].
2. Horynin I., V., Chechulin, B. B. (1990). Titanium in mechanical engineering. Moscow: Mashinostroenie, 400 p. [in Russian].
3. Zvikker, U. (1979). Titanium and its alloys. Moscow: Metallurgiya, 512 p. [in Russian].
4. Gurevich, S. M., Zamkov, V. N., Kompan, Ya. Yu., Kushnirenko, N. A., Harchenko, G. K., Blaschuk, V. E., Volkov, V. B., Zagrebenyuk, S. D., Prilutskiy, V. P., Sabokar, V. K. (1979). Metallurgy and welding technology of titanium and its alloys, Kiev: Nauk. dumka, 300 p. [in Russian].
5. Gurevich, S. M., Zamkov, V. N., Kushnyrenko, N. A. (1980). Refinement of additive material for welding (α+β)-titanium alloys. Actualnye problemy svarki tsvetnyh metallov, Kiev: Nauk. dumka, pp. 314—320 [in Russian].
6. Anisymova, L. I., Popov, A. A., Melnikova, V. I. (1977). The influence of heat treatment on the structure and properties of titanium alloy VT-22. Fizika metallov i metallovedenie, Vol. 4, pp. 843—845 [in Russian].

7. Prilutskyi, V. P., Shvab, S. L., Petrychenko, I. K. (2016). Argon arc welding of titanium alloy VT-22 with the use of flux cored wire. Avtomaticheskaya svarka, No. 9, pp. 10—14 [in Russian].
8. Prilutskyi, V. P., Akhonin, S. V., Shvab, S. L. (2017). Restorative surfacing of VT-22 titanium alloy parts. Avtomaticheskaya svarka, No. 1, pp. 39—42 [in Russian].
9. Ivasyshyn, O. M., Markovskyi, P. E., Havrish, I. M., Karasevska, O. P. (2014). Effect of cooling rate during quenching on aging and formation of mechanical characteristics of titanium alloy VT22. Fiz.-him. Mehanika materialov, No. 1, pp. 60—66 [in Ukrainian].
10. Markovskyi, Pavlo E. (2010). Application of local rapid heat treatment for improvement of microstructure and mechanical properties of titanium products. Key Engineering Mater., Vol. 436, Trans Tech Publications, pp. 185—194. doi:10.4028/www.scientific.net/kem.436.185
11. Horpenko, A. O., Semenets, O. I., Donii, O. M., Valuyska, K. O. (2021). Influence of the surface condition of chassis parts made of high-strength titanium alloy VT-22 during fatigue tests. Uspihi materialoznavstva, Vyp. 2, pp. 45—53 [in Ukrainian]. doi:10.15407/materials2021.02.045

The influence of welding defects on the fracture mechanism of samples made of the VT-22 alloy, with the use of restorative surfacing with filler wires

A. O. Gorpenko*, O. I. Semenets

ANTONOV COMPANY, Kyiv, Ukraina
*E-mail: timanz.ag@gmail.com

The restoration of the surface of damaged parts made of high-strength titanium alloys by the method of restorative surfacing with the use of filler wires is a quite reasonable and promising technique since its aims is to restore a partially damaged surface of parts while preserving their strength properties. However, this technique requires a significant number of static, fatigue and corrosion tests to be followed by suitable processing of the obtained results to correct or improve even the welding technology. The main purpose of the research was to study the fatigue behavior of samples with a restored surface by the method of metal surfacing. Fatigue tests were carried out on VT-22 alloy samples, the surface of which was restored by surfacing using SP-15 and VT-22 filler wires. Fractography revealed the presence of several welding defects (pores mainly) located both in the zone of the deposited metal and on its borders. These conclusions summarize the obtained research results and provide important information about the correlation between welding defects, fatigue strength, and the properties of the VT-22 alloy. The results showed that the presence of these defects is primarily related to the initiation of fatigue cracks. The size and shape of defects, as well as their location relative to the deposited layer, also affected the reduction of fatigue properties. Correcting the surfacing conditions may significantly reduce the critical size of defects and, as a result, significantly increase the residual life of restored parts.

Keywords: *high-strength titanium alloy VT-22, welding pores, segregation of defects, zone of thermal influence, cyclic loading.*