

Експериментальна оцінка впливу імпульсного електричного струму на залишкові напруження в покритті Ti–Al–Si–Ag

Г. В. Степанов, А. І. Бабуцький, І. А. Мамєєв

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

Результати експериментів та моделювання методом скінченних елементів у пружній постановці свідчать, що в стійкому до окислення тонкому покритті, нанесеному на основу з титанового сплаву, виникають залишкові напруження високого рівня. Пропускання імпульсного електричного струму через зразок із покриттям суттєво знижує середній рівень залишкових напружень у покритті.

Ключові слова: магнетронне напилення, стійке до окислення покриття, сплав Timetal 834, залишкові напруження, імпульсний електричний струм.

Вступ. Вплив залишкових напружень (ЗН) розтягу на міцність деталей з покриттям добре відомий. За існуючими методами рівень ЗН у системі покриття–основа зменшують шляхом використання проміжних шарів із погодженими властивостями, позитивний ефект дає також нанесення дискретних покриттів [1]. Разом із тим розробка нових методів є актуальною.

Згідно з численними експериментальними даними імпульсний електричний струм (ІЕС) суттєво впливає на релаксацію напружень у металах при їх активному навантаженні розтягом [2–4], у той час як інформація про релаксацію ЗН практично відсутня. Відомо, що обробка ІЕС зменшує ЗН першого та другого роду, що формуються після технологічних операцій, пов'язаних із пластичним деформуванням [5]. Є також дані щодо використання обробки ІЕС для зниження рівня ЗН після зварювання [6]. Дані про вплив обробки ІЕС на ЗН в покриттях відсутні. Нижче наведено результати експериментального визначення ЗН у тонкому покритті, що нанесене на основу з титанового сплаву, до та після обробки ІЕС.

Матеріал для досліджень. При проведенні досліджень за матеріал основи брали сплав Timetal 834 (Ti–5,8Al–4Sn–3,5Zr–0,7Nb–0,5Mo–0,35Si–0,06C–0,09O, ваг.%), що є майже α -титановим сплавом. Цей сплав широко використовується при виробництві деталей компресорів сучасних газотурбінних двигунів [7]. Через досить низький опір окисленню його застосування обмежено температурами приблизно 600°C. Для покращання цієї характеристики на основу зі сплаву Timetal 834 магнетронним напиленням наносять покриття Ti–Al–Si–Ag.

Досліджували зразки, які виготовляли зі сплаву Timetal 834 у формі стрижня з поперечним перерізом 3×10 мм та довжиною 70 мм. Покриття наносили магнетронним напиленням: зразки підвішували на тонких (діаметр 0,5 мм) сталевих нитках під горизонтальним столом, що обертався з частотою 0,2 Гц навколо вертикальної осі симетрії циліндричної вакуумної камери. Чотири магнетронні гармати з мішенями з Ti, Al, Ag та Si розміщували симетрично по окружності камери (одна від одної з кутом 90°) на відстані 200 мм від осі камери. Під час нанесення покриття камеру заповню-

вали аргонем під тиском 0,2 Па при його безперервному потоці $0,2 \text{ см}^3/\text{хв}$. Більш детально процес нанесення покриття описано в роботі [8].

Мікроструктурний аналіз зразків проводили з використанням оптичної мікроскопії, скануючої та аналітичної трансмісійної електронної мікроскопії (СЕМ та ТЕМ відповідно). ТЕМ-дослідження проводили на мікроскопі JEOL JEM-2010 ARP з використанням тонких фольг, які виготовляли сфокусованим променем іонів.

Мікроструктура сплаву в стані поставки складається з α -фази (гексагональна щільно упакована) та невеликої кількості β -фази (кубічна об'ємно центрована). Додатково в зернах та на їх границях було виявлено високодисперсні виділення Zr_5Si_4 (гексагональні примітиви). Детальний опис мікроструктури сплаву в стані поставки наведено в роботі [9]. Мікроструктура основи не змінюється після нанесення покриття.

Типовий вигляд СЕМ-мікроструктури покриття Ti-Al-Si-Ag на основі з Timetal 834 показано на рис. 1. ТЕМ-дослідження свідчать, що покриття формується у вигляді двох субшарів із відмінною мікроструктурою: зовнішній стовпчастий γ -TiAl субшар та аморфний внутрішній. Детальні ТЕМ-дослідження продовжуються. Слід зауважити, що товщина покриття на досліджуваних зразках сягала близько 10 мкм.

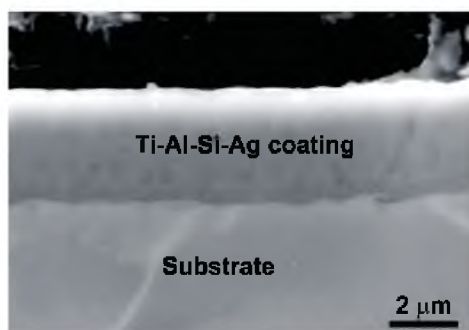


Рис. 1. СЕМ-мікроструктура покриття Ti-Al-Si-Ag на основі з Timetal 834 (поперечний переріз, зображення у вторинних електронах).

Оцінка залишкових напружень у покритті. Залишкові напруження оцінювали руйнівним методом. Його суть полягає в тому, що із зразка вирізається певний об'єм навантаженого матеріалу і вимірюється результуюча деформація в суміжних областях. Існуючі залишкові напруження у видаленому матеріалі можна розрахувати за вимірними деформаціями, оскільки в даній точці матеріалу вони залежать від усіх напружень, що існували у такому матеріалі. На цій основі базуються руйнівні методи вимірювання ЗН [10]. Як правило, надалі співвідношення між деформаціями та напруженнями визначаються методом скінченних елементів (МСЕ).

Щоб визначити розподіл ЗН у тілі за допомогою цієї методики, зазвичай на певній ділянці поступово під контролем видаляють матеріал з одного боку зразка і реєструють пружні деформації на протилежній його стороні. При виконанні даних досліджень провести контрольоване поетапне видалення (зменшення товщини) покриття товщиною 10 мкм із одночасною реєстрацією деформацій досить складно. У зв'язку з цим було розроблено

методику оцінки в шарі покриття осереднених напружень. За допомогою цього методу не можна визначити розподіл напружень у тонкому покритті та поблизу межі поділу основи і покриття, але можна оцінити вплив обробки ІЕС на осереднені напруження в покритті. Наявність ЗН напружень σ_c у покритті призводить до певного розподілу напружень в основі (рис. 2,*а*). При цьому потрібно враховувати, що напруження в основі дуже малі і є сумою поздовжніх компонент та компонент від згину. Через видалення шару покриття (рис. 2,*б*) знімаються поздовжні напруження в основі і змінюється поздовжня деформація, що реєструється, на величину $\Delta \epsilon_R$. Порівняння зареєстрованих змін у показаннях датчика деформації до, після обробки ІЕС та при подальшому видаленні покриття може використовуватися для оцінки величини осереднених напружень у цьому покритті.

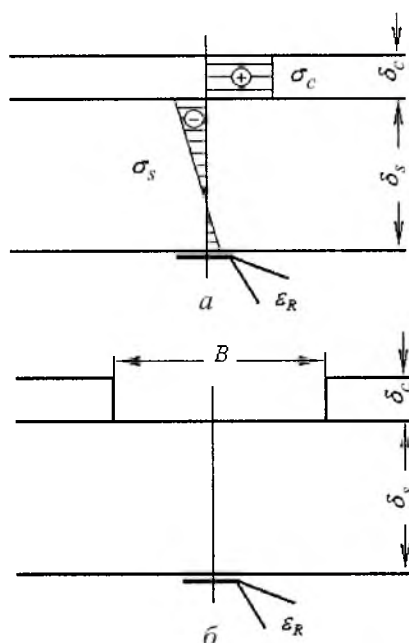


Рис. 2. Схематичний розподіл напружень у зразку з одностороннім покриттям до (а) та після (б) видалення частини покриття.

При проведенні експериментів на кожний зразок приклеювали по два тензодатчики з базою 5 мм (на стороні, що протилежна до покриття Ti–Al–Si–Ag, рис. 3). Дані щодо деформації датчиків отримували з використанням двоканальної вимірювальної системи, що включала два комерційні модулі ICP CON I-7016P. За допомогою модуля ICP CON I-7520 (RS 232) отримані дані передавалися до персонального комп'ютера для подальшої обробки.

На одному із зразків деформації вимірювали до, після обробки ІЕС та при видаленні покриття. На іншому зразку деформації вимірювали до і після видалення покриття (обробку ІЕС не використовували). У всіх випадках покриття навпроти тензодатчика видаляли тонким шліфуванням на ширину B більше ніж 10 мм (повноту видалення покриття визначали за появою характерного кольору основи).

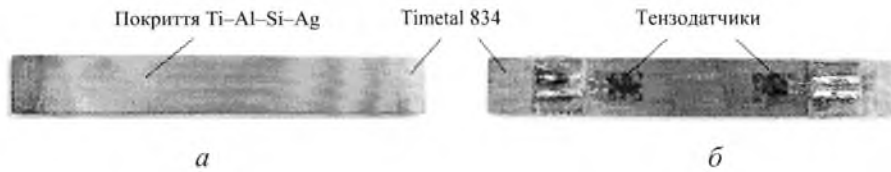


Рис. 3. Зразок сплаву Timetal 834 зі стійким до окислення покриттям (а) та його зворотній вигляд із встановленими тензодатчиками (б).

Обробку ІЕС проводили за допомогою генератора імпульсного струму [11]. Через зразок пропускали два імпульси струму з максимальною амплітудою 40 кА.

Результати вимірювання деформації, осереднені за даними двох датчиків, наведено на рис. 4. Обробка ІЕС призводить до зміни деформації на $\Delta\epsilon_{IEC} = 0,00716\%$, в той час як видалення покриття – на $\Delta\epsilon_{R^*} = 0,01432\%$. Видалення покриття на необробленому зразку призводить до зміни деформації на $\Delta\epsilon_R = 0,01395\%$. Всі зміни деформації мають від’ємний знак (деформації стиску). Від’ємна величина зареєстрованих змін деформації відповідає напруженням розтягу в покритті. Результати експериментів показали, що обробка ІЕС суттєво (практично в два рази) змінює напружено-деформований стан системи покриття–основа.

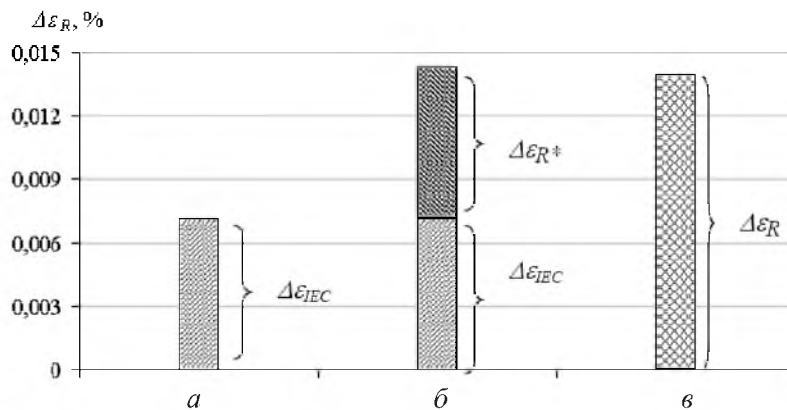


Рис. 4. Зміни деформації датчиків, зареєстровані в експериментах: а – після обробки ІЕС ($\Delta\epsilon_{IEC}$); б – після обробки ІЕС та видалення покриття ($\Delta\epsilon_{IEC} + \Delta\epsilon_{R^*}$); в – після видалення покриття без обробки ІЕС ($\Delta\epsilon_R$).

За умови пружної поведінки основи невідоме осереднене напруження σ_c (рис. 2) пропорційне вимірній деформації $\Delta\epsilon_R$. Напруження в основі збільшуються лінійно з ростом осереднених напружень σ_c у шарі покриття та товщини останнього δ_c . Видалення покриття призводить до зміни поздовжньої деформації на нижній стороні основи на величину $\Delta\epsilon_R$. Виходячи із загальних міркувань для тонкого покриття ($\delta_c \ll \delta_s$) та пружної поведінки основи, деформація $\Delta\epsilon_R$ пропорційна σ_c , δ_c , модулю Юнга основи E_s та обернено пропорційна товщині основи δ_s . Таким чином, співвідношення між поздовжнім напруженням σ_c у покритті та зареєстрованою деформацією $\Delta\epsilon_R$ на протилежній стороні основи можна записати в формі

$$\sigma_c = k \frac{\delta_s}{\delta_c} E_s \Delta \varepsilon_R,$$

де коефіцієнт k залежить від розмірів зразка з вирізом на місці видаленого покриття, напруженого стану в зразку і не залежить від природи напружень σ_c . Напруження в основі за величиною малі, їх знаки в покритті та на нижній поверхні основи збігаються.

Для визначення коефіцієнта k за допомогою МСЕ було виконано моделювання поведінки зразка з покриттям в умовах плоскої деформації. При цьому напруження розтягу σ_c штучно наводили шляхом зниження температури в покритті без підводу тепла з основи. Видалення покриття на ширину 10 мм моделювали шляхом видалення елементів, що належать покриттю. За результатами числового моделювання величина коефіцієнта k для зразка з покриттям вищевказаної геометрії складає приблизно 0,54.

З урахуванням наведеного вище виразу, значення $E_s = 120$ ГПа та величини зміни деформації $\Delta \varepsilon_R = 0,01395\%$ можна обчислити осереднені напруження у покритті. Розрахована величина напружень розтягу $\sigma_c \approx 2,7$ ГПа є досить високою. Вона може бути завищеною внаслідок використання пружної моделі поведінки основи на границі з покриттям. Можлива непружна поведінка матеріалу основи біля поверхні поділу покриття і основи могла бути результатом локального підвищення температури під час нанесення покриття.

Обробка ІЕС зразка з покриттям призводить до зміни розподілу залишкових напружень, що реєструються відповідною зміною деформації $\Delta \varepsilon_{IEC}$. Слід зазначити, що сума $\Delta \varepsilon_{IEC}$ і $\Delta \varepsilon_{R*}$ (остання є додатковою зміною деформації через наступне видалення покриття) приблизно рівна величині зміни деформації $\Delta \varepsilon_R$, яка реєструвалася під час видалення покриття в зразку без обробки ІЕС (рис. 4), що, власне, і очікувалося.

Висновки

1. Розрахунки, що базуються на пружній поведінці матеріалу основи, вказують на високий рівень залишкових напружень розтягу в тонкому покритті Ti–Al–Si–Ag, нанесеному на сплав Timetal 834.

2. Обробка ІЕС в значній мірі зменшує величину осереднених залишкових напружень у тонкому покритті Ti–Al–Si–Ag, нанесеному на сплав Timetal 834.

Вплив нелінійної поведінки матеріалу основи при нанесенні покриття та параметрів обробки ІЕС на перерозподіл залишкових напружень є метою наступних досліджень.

Работа виконана за часткової підтримки EU Network of Excellence проект Knowledge-based Multicomponent Materials for Durable and Safe Performance (КММ-№Е) за контрактом No. NMP3-СТ-2004-502243. Автори щиро дякують за допомогу в проведенні ТЕМ-досліджень Д. Евер, д-ру Х. Пенкалла (Research Centre Julich, Germany) та за надані зразки д-ру Т. Москалевичу (AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland), д-ру Б. Вендлеру (Lodz University of Technology, Lodz, Poland).

Резюме

Результаты экспериментов и моделирования методом конечных элементов в упругой постановке свидетельствуют, что в стойком к окислению тонком покрытии, которое нанесено на основу с титанового сплава, возникают остаточные напряжения высокого уровня. Пропускание импульсного электрического тока через образец с покрытием существенно снижает средний уровень остаточных напряжений в покрытии.

1. Ляшенко Б. А., Рутковский А. В., Сорока Е. Б., Липинская Н. В. О снижении остаточных напряжений в вакуум-плазменном покрытии // Пробл. прочности. – 2001. – № 4. – С. 62 – 68.
2. Баранов Ю. В., Троицкий О. А., Авраамов Ю. С., Шляпин А. Д. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.
3. Sprecher A. F., Mannan S. L., and Conrad H. On the mechanisms of the electroplastic effects in metals // Acta Met. – 1986. – **34**, No. 7. – P. 1145 – 1162.
4. Stepanov G. V., Babutskii A. I., Mameev I. A., and Olisov A. N. Pulse current effect on stress levels in a metal strip in tension // Strength Mater. – 2005. – **37**, No. 6. – P. 593 – 597.
5. Богуслаев В. А., Долматов А. И., Жеманюк П. Д. и др. Повышение ресурса деталей ГТД из титановых сплавов. – Запорожье, 2000. – 108 с.
6. Глинберг А. Д., Карандашев Н. А., Крутин А. Ф., Сидоренков Е. Н. Практика и перспективы применения магнитно-импульсной обработки материалов: Тез. докл. междунар. конф. “Действие электромагнитных полей и тока на материалы”. – М., 2003. – С. 55 – 57.
7. Kaysser W. Surface modifications in aerospace applications // Surface Eng. – 2001. – **17**. – P. 305 – 312.
8. Wendler B. G. and Kaczmarek L. Oxidation resistance of nanocrystalline microalloyed γ -TiAl coatings under isothermal conditions and thermal fatigue // J. Mater. Proc. Tech. – 2005. – **164-165**. – P. 947 – 953.
9. Moskalewicz T., Grogger W., and Czyrska-Filemonowicz A. Microstructural characterisation of nitrified Timetal 834 // J. Microscopy. – 2006. – **223**. – P. 195 – 199.
10. Schajer G. S. and Prime M. B. Use of inverse solutions for residual stress measurement // J. Eng. Mater. Techn. – 2006. – **128**, No. 3. – P. 375 – 382.
11. Stepanov G. V., Babutskii A. I., and Mameev I. A. High-density pulse current-induced unsteady stress-strain state in a long rod // Strength Mater. – 2004. – **36**, No. 4. – P. 377 – 381.

Поступила 22. 01. 2007