

Фізико-хімічні основи зміцнення поверхні легких конструкційних сплавів ультразвуковою ударною обробкою за криогенних температур

Физико-химические основы упрочнения поверхности легких конструкционных сплавов ультразвуковой ударной обработкой при криогенных температурах

Physico-chemical basis for strengthening of the light structural alloys surface by ultrasonic shock treatment at cryogenic temperatures

- 1. Номер державної реєстрації теми - 0115U002320,**
- 2. Науковий керівник – д.ф.-м.н., проф. Волошко С.М., Волошко С.М., Voloshko Svitlana M.**

3. Суть розробки, основні результати. (укр.)

Одержані принципово нові наукові знання щодо фізико-матеріалознавчих основ та закономірностей зміцнення поверхневих шарів легких конструкційних сплавів шляхом ультразвукової ударної обробки (УЗУО) за криогенних температур. Ці закономірності обумовлюються пригніченням процесів динамічного повернення та динамічної рекристалізації, а також ефекту анігіляції дислокацій під дією фактору глибокого охолодження. Доведено можливість формування нітридних сполук в приповерхневих шарах за рахунок явища механодинамічної дифузії атомів азоту із зовнішнього середовища в процесі криодеформації. Відмінною рисою отриманих результатів від вітчизняних та зарубіжних аналогів є поверхнева обробка матеріалу за криогенних температур в умовах гідростатичного стиснення замість добре відомих методів криодеформації всього об'єму матеріалу. Подрібнення вихідної структури до наномасштабного рівня, а також перебіг механохімічних реакцій під дією УЗУО за криогенних температур порівняно з традиційною методикою УЗУО надає можливість зміцнення поверхні до ~500 %, збільшення товщини модифікованого шару до ~250 мкм, (на повітрі до ~100 мкм), зменшення шорсткості поверхні в 2,5 рази, підвищення зносо- та корозійної стійкості, втомної довговічності до ~3 разів, зменшення тривалості процесів модифікації поверхні матеріалу до декількох хвилин. Зокрема, максимальні значення мікротвердості поверхні сталі 12X18H10T ($HV = 5-5,66$ ГПа) отримані після криогенної УЗУО тривалістю 150 с, що обумовлено формуванням максимальної об'ємної частки α' -мартенситу (53%) порівняно із обробкою на повітрі (9%), нанорозмірами зерен α' -мартенситу (24 нм) та аустеніту (45 нм) і наявністю нанодвійників (60-120 нм). Крім низької енергії дефектів пакування (~30 мДж/м²), це обумовлено високою швидкістю деформації (~10³) та криогенними температурами (77 К)). Значення параметру Зінера-Холомона за умов УЗУО в рідкому азоті складає 26, тоді як за кімнатної температури на повітрі та в аргоні – 15 і 17, відповідно.

(рос.)

Получены принципиально новые научные знания относительно физико-материаловедческих основ и закономерностей упрочнения поверхностных слоев легких конструкционных сплавов путем ультразвуковой ударной обработки (УЗУО) при криогенных температурах. Эти закономерности обусловлены подавлением процессов динамического возврата и динамической рекристаллизации, а также эффекта аннигиляции дислокаций под действием фактора глубокого охлаждения. Доказана возможность формирования нитридных соединений в приповерхностных слоях за счет явления механодинамической диффузии атомов азота из внешней среды в процессе криодеформации. Отличительной особенностью полученных результатов от отечественных и зарубежных аналогов является поверхностная обработка материала при криогенных температурах в условиях гидростатического сжатия вместо хорошо известных методов криодеформации всего объема материала. Измельчение исходной структуры до наномасштабного уровня, а также развитие механохимических реакций под действием УЗУО при криогенных температурах по сравнению с традиционной методикой УЗУО предоставляет возможность

упрочнення поверхності до ~500%, збільшення товщини модифіцированого шару до ~250 мкм, (на повітрі до ~100 мкм), зменшення шерохватості поверхності в 2,5 рази, підвищення износо- і корозійної стійкості, усталостної довговічності до ~3 рази, зменшення тривалості процесів модифікації поверхності матеріалу до кількох хвилин. В частині, максимальні значення мікротвердості поверхності стали 12Х18Н10Т ($HV = 5-5,66$ ГПа) отримані після криогенної УЗУО тривалістю 150 с, що обумовлено формуванням максимальної об'ємної частини α' -мартенситу (53%) порівняно з обробкою на повітрі (9%), нанорозмірами зерен α' -мартенситу (24 нм) і аустеніту (45 нм) і наявністю нанодвійників (60-120 нм). Крім низької енергії дефектів упаковки (~30 МДж/м²), це обумовлено високою швидкістю деформації (~10³) і криогенними температурами (77 К)). Значення параметра Зенера-Холомона в умовах УЗУО в рідкому азоті становить 26, тоді як при кімнатній температурі на повітрі і в аргоні – 15 і 17, відповідно.

(англ.)

Essentially new scientific knowledge has been obtained on the physico-materials science basics and the laws of the surface layers hardening of the light structural alloys by ultrasonic shock treatment (UST) at cryogenic temperatures. These regularities are due to the suppression of the dynamic return processes and dynamic recrystallization, as well as the effect of the dislocations annihilation under the action of the deep cooling factor. The possibility of the nitride formation compounds in the near-surface layers due to the phenomenon of the mechanodynamic diffusion of the nitrogen atoms from the external medium in the process of the cryo-deformation is proved. A distinctive feature of the obtained results of the domestic and foreign analogues is the surface treatment of the material at cryogenic temperatures under conditions of hydrostatic compression instead of the well-known methods of cryodeformation of the entire bulk of the material. The grinding of the initial structure down to the nanoscale level, as well as the course of mechanochemical reactions under the influence of UST at cryogenic temperatures, in comparison with the traditional UST technique, makes it possible to harden the surface to ~ 500%, increase the thickness of the modified layer to ~ 250 μm , (in air up to ~ 100 μm), a 2.5 times decrease in the surface roughness, an increase in the wear and corrosion resistance, fatigue life up to ~ 3 times, a decrease in the duration of the surface modification processes of the material to several minutes. The maximum values of the surface HV of the steel 12Cr18Ni10Ti ($HV = 5-5,66$ GPa) were obtained after the cryogenic UIT owing to the formation of the maximum bulk fraction of α' -martensite (~53%), of the nano-sized grains of α' -martensite (24 nm) and austenite (45 nm) and the nanotwins (60-120 nm). This is due to the low value of the stacking fault energy (~30 mJ/m²) and the applied UIT conditions (high strain rate of ~10³ and cryogenic (77 K) temperatures), which determine the Zener-Hollomon parameter $\ln Z = 26$ in comparison with those for the air-UIT and argon-UIT processes to be of 15 and 17, respectively.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності

1. Сидоренко С.І., Волошко С.М., Васильєв М.О., Бурмак А.П. Високоєфективна технологія зміцнення поверхні алюмінієвого сплаву Д16 ультразвуковою ударною обробкою в різних середовищах // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір наукового характеру № 58683 від 28.11.2015.
2. М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, А.П. Бурмак. Технологія синтезу деформаційних нанокompозитів на поверхні легких конструкційних сплавів ультразвуковим ударним обробленням в різних середовищах. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір наукового характеру № 69803 від 17.01.2017.
3. Сидоренко С.І., Волошко С.М., Васильєв М.О., Бурмак А.П. Ультразвукова ударна обробка алюмінієвого сплаву Д16 в інертному середовищі та рідкому азоті // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір наукового характеру № 58684 від 28.11.2015.
4. М.А. Васильєв, Б.М. Мордюк, С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, А.П. Бурмак. Механічне легування поверхні алюмінієвого сплаву Д16 ультразвуковим обробленням залізним бойком в різних середовищах. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір наукового характеру № 69804 від 17.01.2017.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Результати відповідають світовому рівню. Методика ультразвукової ударної обробки поверхневих шарів металевих сплавів в рідкому азоті не має аналогів у світовій практиці інженерії поверхні.

6. Економічна привабливість для просування на ринок

За екологічністю, ресурсоемністю та енергетичними витратами технологія УЗУО відповідає європейським стандартам. Впровадження УЗУО в інженерію металевих поверхонь дозволить підвищити довговічність робочих деталей і вузлів із конструкційних легких сплавів і, таким чином, збільшити термін служби устаткування в авіаційній, автомобільній промисловості, машинобудуванні та медицині.

7. Потенційні користувачі

Результати представляють практичну цінність для багатьох підприємств, які об'єднує Державний концерн "Укроборонпром", а саме: ПАТ "МОТОР СІЧ"; ДП «Антонов»; ДП «Завод 410 цивільної авіації»; ДП «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка А.Г. Івченка тощо.

8. Стан готовності розробки

Відпрацьовані режими ультразвукової ударної обробки поверхневих шарів металевих сплавів в рідкому азоті із підвищеною мікротвердістю; розроблені практичні рекомендації щодо використання методики УЗУО для підвищення зносо- та корозійної стійкості, втомної довговічності поверхні металевих сплавів.

9. Існуючі результати впровадження

За результатами НДР розроблено і впроваджено новий лекційний курс «Матеріалознавство низькорозмірних структур» та новий цикл лабораторних робіт «Вторинно-іонна мас-спектрометрія у дослідженнях поверхні твердого тіла» з цієї дисципліни, розроблено нові розділи «Моделювання процесів аномального масопереносу під дією УЗУО» дисципліни «Комп'ютерне моделювання процесів тепло- та масопереносу» та «Атомно-зондова томографія» з дисципліни «Теорія тепло- та масопереносу», а також оновлено цикл лабораторних робіт із дисципліни «Фізичні методи дослідження».

В січні-квітні 2017 року результати НДР розглядалися на ДП «Антонов»; ДП «Завод 410 цивільної авіації»; ДП «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка А.Г. Івченка і одержали позитивну оцінку. Проведені тестові випробування на конкретних виробах авіаційної техніки.

10. Форма участі інвестора:

Кращою формою участі інвестора в реалізації результатів проекту є дольова участь у розмірі 50 %.

11. Обсяг інвестицій

Необхідна для результатів проекту сума інвестицій складає 300 тис. в доларах США.

12. Мета інвестицій

Обладнання може бути оснащено комп'ютерними системами управління з відповідним програмним забезпеченням для подальшої роботизації. У разі такої роботизації існуючого обладнання, вони можуть бути використані для обробки великих плоских поверхонь.

13. Назва підрозділу, телефон, e-mail

КПІ імені Ігоря Сікорського, інженерно-фізичний факультет, кафедра фізики металів,
0630759552, voloshkosvetlana13@gmail.com

14. Фото розробки

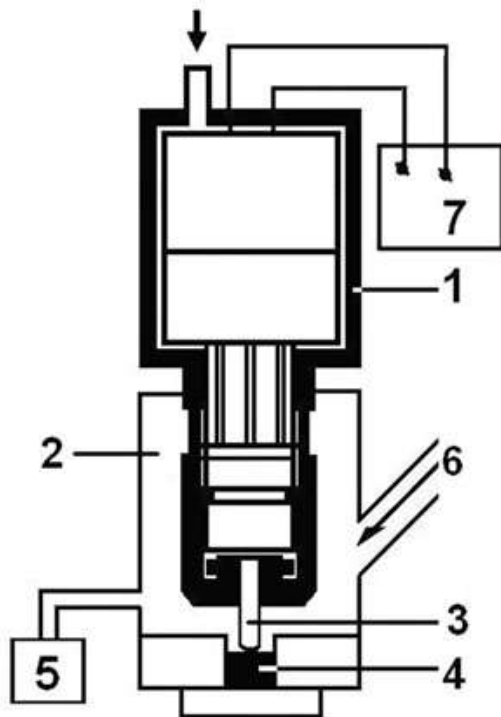


Рис. 1. Схема УЗУО: 1 – вібратор зі ступінчастим концентратором; 2 – герметична камера; 3 – бойок; 4 – зразок; 5 – манометр; 6 – канал для заповнення рідким азотом; 7 – ультразвуковий генератор



а



б



в



г

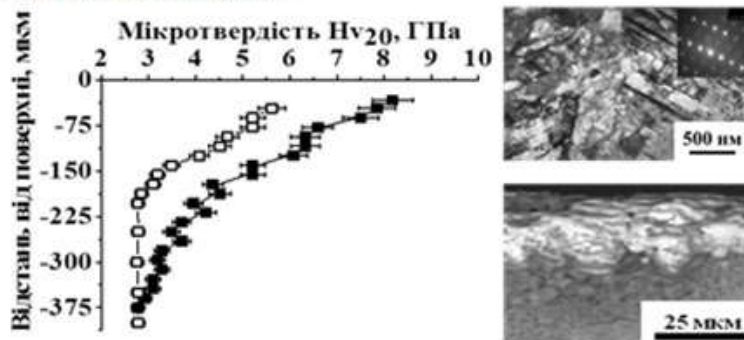


Рис. 3. Розподіл мікротвердості у поперечному перерізі, мікроструктура та модифікований поверхневий шар сталі 12X18H10T після УЗУО в середовищі рідкого азоту впродовж 150 с.

Рис. 2. а – типи головок, б – обладнання для УЗУО металевих виробів, в – ударний інструмент для УЗУО, г – зовнішній вигляд деталей після УЗУО

15. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

1. **Монографія.** Г.І. Прокопенко, Б.М. Мордюк, М.О. Васильєв, С.М. Волошко. Фізичні основи ультразвукового ударного зміцнення металевих поверхонь, Київ: Наукова Думка.- 2017.- 466 с.

2. V.N.Mordyuk, and G.I.Prokopenko, Ultrasonic Impact Treatment – an effective method for nanostructuring the surface layers of metallic materials, Handbook of mechanical nanostructuring M.Aliofkhazraei (Ed.), Wiley-VCH, 2015.- P. 417-434.

3. Навчальний посібник С.І.Сидоренко, С.М. Волошко. «Термодинаміка та кінетика дифузії», К.: НТУУ «КПІ», 2016 р. - 99 с.

4. Підручник С.І.Сидоренко, С.М. Волошко. Теорія тепло- та масопереносу, К.: НТУУ «КПІ ім. Сікорського», 2017 - 208 с. (розділи 1-7).

За період виконання роботи зроблено 40 доповідей на міжнародних конференціях та опубліковано 26 статей у журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, серед яких:

1. Vasylyev M.A. Corrosion of 2024 alloy after ultrasonic impact cladding with iron / M.A. Vasylyev, B.N. Mordyuk, S.I. Sidorenko, S.M. Voloshko, A.P. Burmak // Surface Engineering. – 2017. – Vol. 29. - №7. – P. – 1-6.

2. Vasylyev M.A. Influence of microstructural features and deformation-induced martensite on hardening of stainless steel by cryogenic ultrasonic impact treatment / M.A. Vasylyev, B.N. Mordyuk, S.I. Sidorenko, S.M. Voloshko, A.P. Burmak // *Surface and Coatings Technology* <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897217311568>
3. Petrov Yu.N. Influence of microstructural modifications induced by ultrasonic impact treatment on hardening and corrosion behavior of wrought Co-Cr-Mo biomedical alloy / Yu.N. Petrov, G.I. Prokopenko, B.N. Mordyuk, M.A. Vasylyev, S.M. Voloshko, V.S. Skorodzievski, V.S. Filatova // *Materials Science & Engineering C*. – 2016 – Vol.58 – P. 1024-1035.
4. Mashovets N.S. Aspects of the practical application of titanium alloys after low temperature nitriding glow discharge in hydrogen-free-gas media / N.S. Mashovets, I.M. Pastukh, S.M. Voloshko // *Applied Surface Science*. – 2017. – 392. – P.356-361.
5. Firstov S.A. Protective and functional powder coatings: Secondary ion emission of high-entropy Cr_{14.3}Mn_{14.3}Fe_{14.3}Ni_{28.6}Co_{14.3}Cu_{14.3} alloy / S.A. Firstov, N.A. Krapivka, M.A. Vasiliev, S.I. Sidorenko, S.M. Voloshko // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2016. – Vol. 55, №7-8. – P.459-463.
7. Васильєв М.О. Еволюція структурного стану та мікротвердості поверхні алюмінієвого сплаву Д16 внаслідок ультразвукової ударної обробки у різних атмосферах / М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, А.П. Бурмак // *Металлофізика и новейшие технологии*. – 2015. – Т. 37, №9. – С. 1269 – 1289.
8. Васильєв М.О. Масоперенесення при ультразвуковій ударній обробці пари Al–Fe / М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, А.П. Бурмак // *Металлофізика и новейшие технологии*. – 2015. – Т. 37, №12. – С. 1603 – 1618.
9. Васильєв М.О. Синтез деформаційних нанокомпозитів на поверхні алюмінієвого сплаву Д16 за допомогою ультразвукової ударної обробки / М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, А.П. Бурмак, М.В. Кіндрачук // *Металлофізика и новейшие технологии*. – 2016. – Т. 38, №4. – С. 545 – 563.
10. Васильєв М.О. Фізико-хімічний стан поверхні сплаву ВТ6 після піскоструминної обробки у рідкому азоті / М.О. Васильєв, Л.Ф. Яценко, С.М. Волошко, П.О. Гурін // *Металлофізика и новейшие технологии*. – 2016. – т. 38, №5. – С.669-682.
11. Vasylyev M.O. Effect of Low Energy Inert Gas Ion Bombardment of the Metal Surface on the Oxygen Adsorption and Oxidation (Review) / M.O. Vasylyev, S.I. Sidorenko, S.M. Voloshko, T. Ishikawa // *Usp. Fiz. Met.* – 2016. – Vol. 17. – P. 209-228.
12. Vasylyev M.O. Peculiarities of Structure and Phase Formation in the Surface Layers of 2024 Aluminium Alloy due to Ultrasonic Impact Treatment in Various Environments / M.O. Vasylyev, B.M. Mordyuk, S.I. Sidorenko, S.M. Voloshko and A.P. Burmak // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* – 2017. – Vol.39, No. 1. – P.49-68.
13. Васильєв М.О. Особливості деформації, зміцнення і масоперенесення внаслідок УЗУО поверхні сплаву Д16 різними бойками / М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, А.П. Бурмак, Н.В. Франчік // *Металлофізика и новейшие технологии*. – 2017. – т.39. – №8. – С. 1097–1117.
15. Васильєв М.О. Еволюція структурно-фазового стану та мікротвердості поверхні нержавіючої сталі 12Х18Н10Т за умов ультразвукового ударного оброблення в різних середовищах / М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, С.І. Сидоренко, С.М. Волошко, А.П. Бурмак, Н.В. Франчік // *Металлофізика и новейшие технологии*. – 2017. – т.39. – №7. – С. 905–928.

16. Ключові слова: ультразвукова ударна обробка, рідкий азот, кріодеформація, зміцнення поверхні, корозійна стійкість.