

ОСОБЛИВОСТІ ЗАРОДЖЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ВТОМНИХ ТРІЩИН ПРИ ЦИКЛІЧНИХ МЕХАНІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ НАПЛАВЛЕНИХ ПЛАСТИН

І.О. Рябцев, В.В. Книш, А.А. Бабінець, С.О. Соловей, І.І. Рябцев, І.П. Лентюгов

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: ryabtsev39@gmail.com

Досліджено особливості зародження та розвитку втомних тріщин при циклічних механічних навантаженнях зразків, наплавлених в один зносостійкий шар або з додатковим наплавленим пластичним підшаром. Встановлено принципово інший характер розвитку втомних тріщин у зразках, наплавлених з пластичним підшаром із низьковуглецевої сталі, у порівнянні зі зразками, наплавленими без підшару. У зразках, які були наплавлені з пластичним підшаром, на відміну від зразків, наплавлених без підшару, у процесі проходження магістральної тріщини втоми через наплавлений шар і підшар, на границі зносостійкого шару та пластичного підшару, а також підшару та основного металу відбувається розгалуження та своєрідне гальмування магістральної тріщини втоми. Бібліогр. 7, рис. 6.

Ключові слова: дугове наплавлення, циклічні навантаження, втомна довговічність, втомні тріщини, одношарове наплавлення, багатшарове наплавлення, зносостійкий шар, пластичний підшар

Вступ. Термін служби деталей машин і механізмів, які експлуатуються в різних галузях промисловості, залежить насамперед від умов їх експлуатації та властивостей матеріалів, з яких ці деталі виготовлені. При цьому багато з цих деталей експлуатуються в умовах різних видів зношування та циклічних механічних навантажень різної інтенсивності. Комбінація таких умов експлуатації найчастіше призводить до передчасного, а іноді аварійного виходу з ладу цих деталей внаслідок втомного руйнування. Це також може призвести до виходу з ладу технологічного устаткування, до складу якого такі деталі входять.

Особливо актуальною ця проблема є для гірничо-металургійної, машинобудівної та інших галузей промисловості, в яких використовується високоефективне технологічне устаткування. Зупинка такого устаткування для заміни зношених деталей призводить до втрат від невипущеної продукції, які можуть у багато разів перевищувати прямі витрати на придбання нових деталей і заміну зношених. До числа таких деталей відносяться валки холодної та гарячої прокатки різного призначення; штампи холодної та гарячої штампування; ролики машин безперервного лиття заготовок; ножі холодної та гарячої різання металу та ін. [1–4].

Відомо, що багато з цих деталей наплавляються при виготовленні. Практично всі після певного строку експлуатації і часткового зношування неодноразово відновлюються методами наплавлення та використовуються повторно [1]. У процесі по-

дальшої тривалої експлуатації в умовах одночасної дії зношування та циклічних механічних навантажень у наплавленому та основному металі можуть зароджуватися та розвиватися втомні тріщини, які можуть призвести до аварійного руйнування деталі. Тому актуальною та важливою є проблема дослідження впливу матеріалів і технологій, які використовуються при виготовленні та відновлювальному наплавленні згаданих вище деталей, на їх втомну довговічність, зокрема, в першу чергу, на особливості зародження та розвитку в них втомних тріщин.

При цьому для наплавлення робочих поверхонь згаданих вище деталей використовують високосносостійкі вуглецеві або високовуглецеві матеріали, які мають погану зварюваність. Для її поліпшення використовують підігрів або наплавлення пластичних підшарів, а іноді те й інше разом [1]. При цьому наплавлення пластичного підшару може вплинути на втомну довговічність деталі, що наплавляється, і, насамперед, на характер зародження та поширення в ній втомних тріщин.

Мета роботи – дослідити особливості зародження та розвитку втомних тріщин при циклічних механічних навантаженнях зразків, наплавлених в один зносостійкий шар або з додатковим наплавленим пластичним підшаром.

Матеріали та методики досліджень. Для досліджень особливостей зародження та розвитку втомних тріщин були виготовлені призматичні заготовки зразків зі сталі 40Х розмірами 25×45×300

Рябцев І.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7180-7782>, Книш В.В. – <https://orcid.org/0000-0003-1289-4462>,

Бабінець А.А. – <https://orcid.org/0000-0003-4432-8879>, Рябцев І.І. – <https://orcid.org/0000-0001-7550-1887>,

Соловей С.О. – <https://orcid.org/0000-0002-1126-5536>, Лентюгов І.П. – <https://orcid.org/0000-0001-8474-6819>

© І.О. Рябцев, В.В. Книш, А.А. Бабінець, С.О. Соловей, І.І. Рябцев, І.П. Лентюгов, 2024

мм з обробкою під наплавлення 12,5×150 мм по центру заготовки зразка.

Для дугового наплавлення на заготовки зразків зносостійкого шару використовували порошок дріт ПП-Нп-25Х5ФМС діаметром 2,4 мм, який забезпечує отримання наплавленого металу типу інструментальної теплостійкої сталі 25Х5ФМС. Наплавлення виконували під плавким флюсом АН-26П. Для дугового наплавлення пластичного підшару використовували суцільний дріт Св-08А діаметром 2,0 мм та плавкий флюс АН-348А.

Для мінімізації деформування наплавлених зразків і з метою зменшення обсягу робіт з механічної обробки заготовки під наплавлення склалися в пакет по 3–5 штук, використовувалися спеціальні прокладки між ними та скріплювалися прихватками. З боків пакетів приварювали вивідні планки.

Перед наплавленням здійснювали попередній підігрів пакетів заготовок до 250...300 °С. Потім виконувалося автоматичне дугове наплавлення пакетів заготовок під флюсом. Одні пакети заготовок наплавляли порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС під флюсом АН-26П без пластичного підшару, інші – з пластичним підшаром, наплавленим дротом Св-08А під флюсом АН-348А. Після наплавлення пакети заготовок розташовували під шар флюсу для уповільненого охолодження.

Після охолодження кожний пакет заготовок розрізався по прокладкам абразивними кругами на окремі зразки. Були заміряні величини деформації наплавлених зразків. Величина вигину заготовок у вертикальній площині після наплавлення не перевищувала ±1,5 мм на довжині 300 мм, що не потребувало додаткової правки перед шліфуванням зразків з чотирьох сторін на розмір 20×40×300 мм з наплавленим шаром по центру зразка 10×150 мм (рис. 1, а–в).

Перед початком втомних випробувань по центру наплавленого шару всіх отриманих призматичних зразків виконували гострій надріз завглибшки 1 мм з радіусом при його вершині 0,25 мм. При триточковому згинанні з додатком навантаження з боку основного металу з асиметрією циклу 0,01 і частотою 5 Гц при рівнях максимальних прикладених напружень, які не перевищували експлуатаційних, від гострого надрізу вирощували вихідну тріщину.

Незважаючи на наявність гострого надрізу по центру зразка, після зародження всі тріщини втомні розвивалися на бокових поверхнях зразка від одного або двох його бічних ребер. Характер зародження та розвитку втомних тріщин на бокових

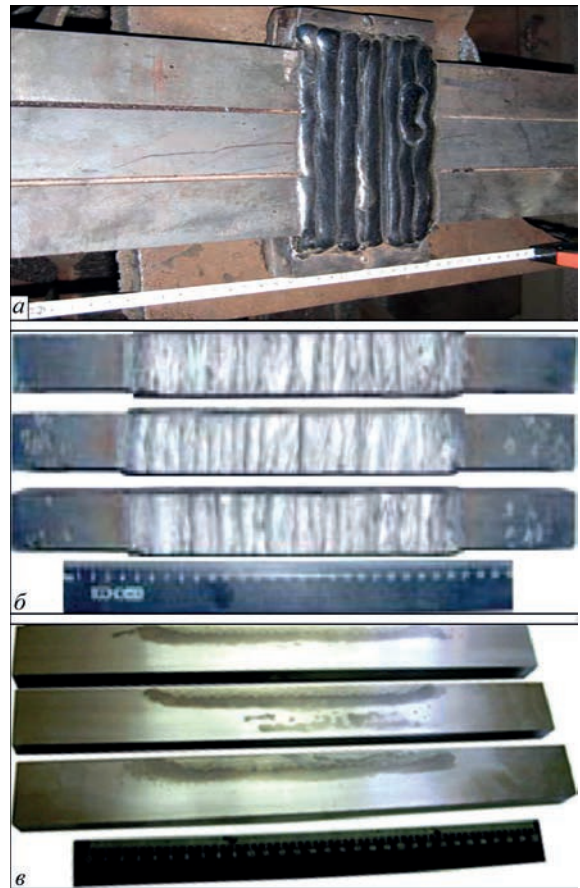


Рис. 1. Пакет заготовок після наплавлення (а), заготовки зразків після розрізання (б), зразки після остаточного шліфування (в)

поверхнях зразків фотографували та вимірювали за допомогою штангенциркуля.

Результати досліджень та їх обговорення. Зародження та розповсюдження втомних тріщин у зразках сталі 40Х, наплавлених порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС без підшару. У процесі циклічних механічних навантажень у зразках, наплавлених без підшару, тріщини втомні утворювалися переважно в наплавленому шарі на відстані 1...3 мм від лінії сплавлення основного металу та наплавленого зносостійкого шару (рис. 2, а–в).

Границя сплавлення наплавленого та основного металів грає роль концентратора напружень, через що втомні тріщини переважно зароджуються поблизу неї (215...760 мкм) та на першому етапі циклічних механічних навантажень розташовані в наплавленому металі, що пояснюється його нижчою пластичністю та більшою твердістю у порівнянні з основним металом. Дослідження мікроструктури травлених шліфів зразків, наплавлених без підшару, після втомних випробувань показали, що втомні тріщини переважно розвиваються у напрямку осей утворення дендритів наплавленого металу 25Х5ФМС (рис. 3, а, б).

Найчастіше утворювалося декілька паралельних тріщин на відстані 1...15 мм одна від одної

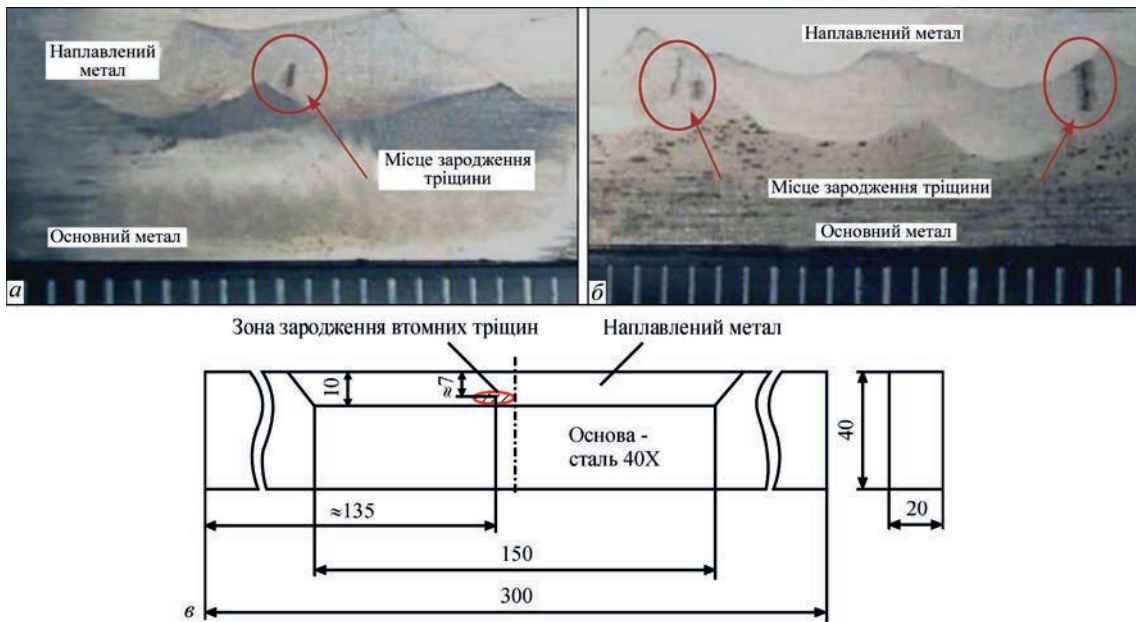


Рис. 2. Місця зародження втомних тріщин у зразках, наплавлених без підшару (а, б), схематичне зображення їх розташування в наплавленому зразку (в)

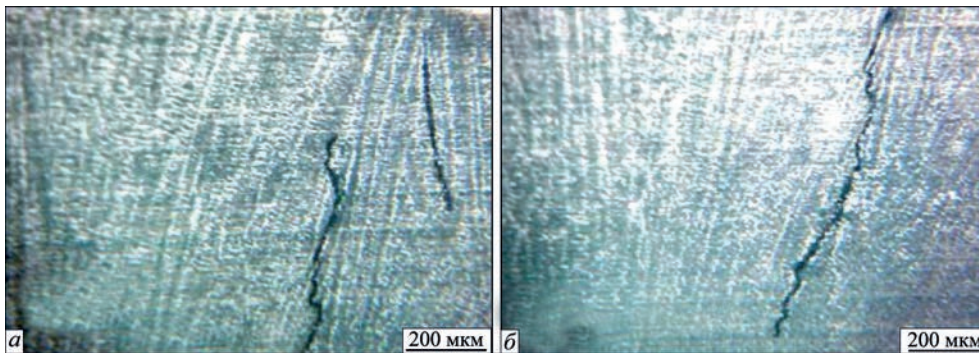


Рис. 3. Характер розвитку втомних тріщин у наплавленому металі 25X5ФМС

і, як правило, поблизу зон сплавлення двох сусідніх валиків (рис. 4, а). Спочатку під час втомних випробувань тріщини розвивалися в наплавленому металі лише в бік виходу на поверхню. Після проходження всього наплавленого металу тріщини починали розвиватися в інший бік – в напрямку основного металу (рис. 4, б). Після виходу та розвитку втомної тріщини в основному металі відбувалося руйнування зразків.

Зародження та розповсюдження втомних тріщин у зразках сталі 40Х, наплавлених порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром

із низьковуглецевої сталі. Як і у разі зразків, наплавлених без підшару, у зразках, наплавлених з підшаром, по центру наплавленого шару виконували гострій надріз завглибшки 1 мм з радіусом при вершині 0,25 мм, від якого вирощували вихідну тріщину завглибшки до 1 мм.

При дослідженні кінетики зростання тріщини втоми в процесі циклічних механічних навантажень встановлено, що магістральна втомна тріщина переважно розвивається по границі сплавлення окремих валиків. Тріщин втоми, паралельних магістральній, у зразках з низьковуглецевим підшаром

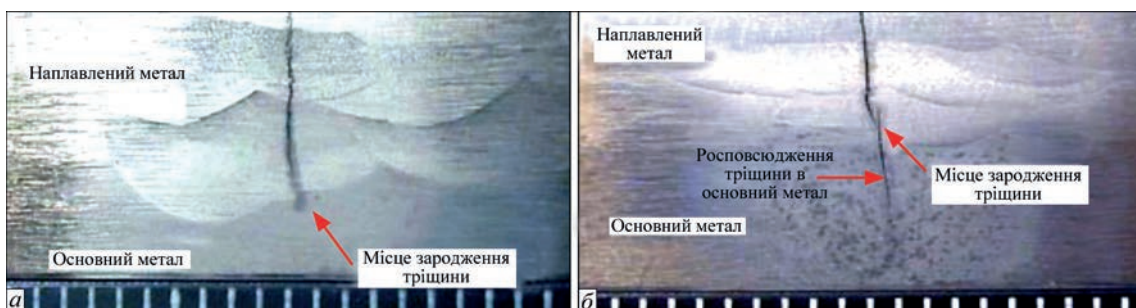


Рис. 4. Характер зародження та розвитку втомних тріщин у зразках, наплавлених без підшару

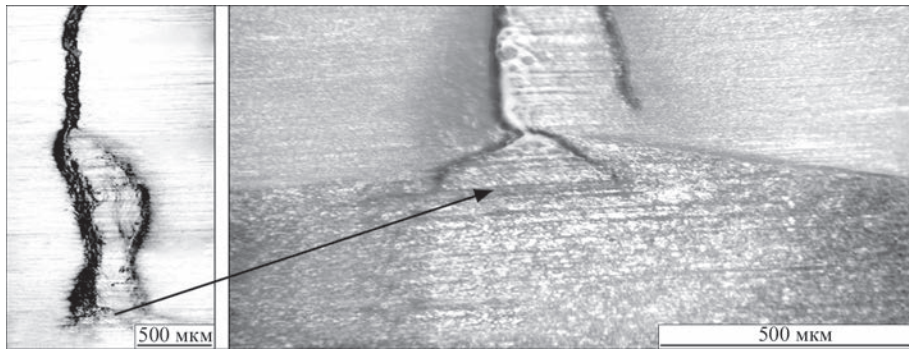


Рис. 5. Розгалуження втомної тріщини біля границі сплавлення зносостійкого шару та підшару

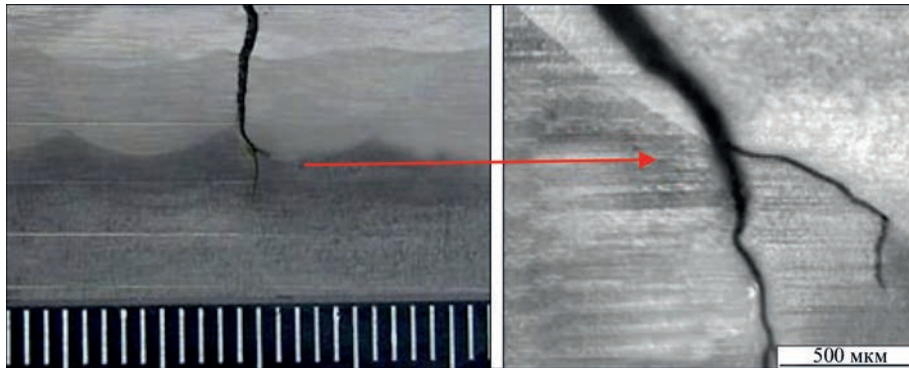


Рис. 6. Розгалуження втомної тріщини біля границі сплавлення підшару та основного металу

(на відміну від зразків без підшару) не виявлено. Проте, в процесі втомного руйнування в зонах переходу одного шару металу в інший спостерігалися бічні відгалуження від магістральної тріщини, які розвивалися вздовж лінії сплавлення зносостійкого шару з підшаром (рис. 5) та вздовж лінії сплавлення підшару з основним металом (рис. 6). Після проходження тріщиною зносостійкого шару та підшару з низьковуглецевої сталі руйнування зразків відбувалося по основному металу.

Така кінетика втомного руйнування зразків пояснюється проявом декількох факторів. По-перше, у зоні перекриття сусідніх наплавлених валиків розташована зона хімічної та структурної неоднорідності, що негативно впливає на властивості матеріалу [5]. По-друге, при багатоваликовому багат шаровому наплавленні можуть виникати відносно гострі кути на границі сплавлення сусідніх валиків і шарів, які будуть концентраторами напружень і, відповідно, ініціювати зародження бічних тріщин по лінії сплавлення [6, 7].

Отже, як і для зразків, наплавлених без підшару, встановлено, що границі сплавлення окремих валиків та шарів відіграють важливу роль у процесі втомного руйнування наплавлених деталей, оскільки тріщини здебільшого розвиваються або по границі сплавлення окремих валиків, або безпосередньо біля цієї границі (рис. 6, 7).

Єдина важлива відмінність цих двох технологій наплавлення стосовно розвитку втомних трі-

щин полягає в утворенні бічних відгалужень від магістральної тріщини втоми при наплавленні з підшаром, що призводить до своєрідного гальмування цих тріщин.

Висновки

На основі виконаних експериментальних досліджень було встановлено принципово інший характер розвитку втомних тріщин у зразках, наплавлених з пластичним підшаром із низьковуглецевої сталі, у порівнянні зі зразками, наплавленими без підшару. У зразках, наплавлених з пластичним підшаром, у процесі проходження магістральної тріщини втоми через наплавлений шар, на границі зносостійкого шару та пластичного підшару, а також підшару та основного металу відбувається розгалуження та своєрідне гальмування магістральної тріщини втоми.

Список літератури

1. Рябцев И.А., Сенченков И.К., Турык Э.В. (2015) *Наплавка. Материалы, технологии, математическое моделирование*. Гливице, Польша.
2. Махненко В.И. (2006) *Ресурс безопасности эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
3. Кравцов Т.Г., Стальниченко О.И., Олейник Н.В. (1994) *Восстановление деталей наплавкой и оценка их прочности*. Киев, Вища школа.
4. Marek, A., Junak, G., Okrajni, J. (2009) Fatigue life of creep resisting steels under conditions of cyclic mechanical and thermal interactions. *Archives of Materials Science and Engineering*, 40(1), 37–40.
5. Du Toit, M., Van Niekerk, J. (2010) Improving the life of continuous casting rolls through submerged arc cladding

- with nitrogen-alloyed martensitic stainless steel. *Welding in the World*, 54(11-12), R342–R349.
6. Kaierle, S., Overmeyer, L., Alfred, I. et al. (2017) Single-crystal turbine blade tip repair by laser cladding and remelting. *CIRP J. of Manufacturing Sci. and Technol.*, 19, 196–199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.04.001>.
 7. Caccese, V., Blomquist, P.A., Berube, K.A., Webber, S.R., Orozco, N.J. (2006) Effect of weld geometric profile on fatigue life of cruciform welds made by laser/GMAW processes. *Marine Structures*, 19(1), 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2006.07.002>
 3. Kravtsov, T.G., Stalnichenko, O.I., Olejnik, N.V. (1994) *Surfacing restoration of parts and assessment of their strength*. Kyiv, Vyshcha Shkola [in Russian].
 4. Marek, A., Junak, G., Okrajni, J. (2009) Fatigue life of creep resisting steels under conditions of cyclic mechanical and thermal interactions. *Archives of Mater. Sci. and Engin.*, 40(1), 37–40.
 5. Du Toit, M., Van Niekerk, J. (2010) Improving the life of continuous casting rolls through submerged arc cladding with nitrogen-alloyed martensitic stainless steel. *Welding in the World*, 54(11-12), R342–R349. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03266748>
 6. Kaierle, S., Overmeyer, L., Alfred, I. et al. (2017) Single-crystal turbine blade tip repair by laser cladding and remelting. *CIRP J. of Manufacturing Sci. and Technol.*, 19, 196–199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.04.001>.
 7. Caccese, V., Blomquist, P.A., Berube, K.A., Webber, S.R., Orozco, N.J. (2006) Effect of weld geometric profile on fatigue life of cruciform welds made by laser/GMAW processes. *Marine Structures*, 19(1), 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2006.07.002>

References

1. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K., Turyk, E.V. (2015) *Surfacing. Materials, technologies, mathematical modeling*. Gliwice, Poland. [in Russian]
2. Makhnenko, V.I. (2006) *Safe service life of welded joints and assemblies of modern structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

FEATURES OF ORIGINATION AND PROPAGATION OF FATIGUE CRACKS UNDER CYCLIC MECHANICAL LOADS OF DEPOSITED PLATES

I.O. Ryabtsev, V.V. Knysh, A.A. Babinets, S.O. Solovej, I.I. Ryabtsev, I.P. Lentugov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: ryabtsev39@gmail.com

The features of origination and propagation of fatigue cracks were investigated at cyclic mechanical loads of specimens, deposited in a one wear resistant layer or with an additional plastic sublayer. Fundamentally different nature of propagation of fatigue cracks was revealed in the specimens, deposited with a plastic sublayer of low-carbon steel compared to the specimens without a sublayer. In the specimens deposited with a plastic sublayer unlike the specimens deposited without a sublayer when the main fatigue crack passed through the deposited layer and the sublayer, at the boundary of the wear resistant layer and the plastic sublayer, as well as the sublayer and the base metal, branching and a kind of inhibition of the main fatigue crack are observed. 7 Ref., 6 Fig.

Keywords: arc surfacing, cyclic loading, fatigue life, fatigue cracks, single-layer surfacing, multilayer surfacing, wear resistant layer, plastic sublayer

Отримано 26.08.2024
Отримано у переглянутому вигляді 24.10.2024
Прийнято 13.01.2025

Ефективність сонячних панелей поліпшена за допомогою спеціальних молекул

Дослідники з Інституту Гельмгольца (Helmholtz Institute Erlangen-Nürnberg for Renewable, далі HI ERN) з відновлюваної енергії у філії дослідницького центру Jülich виявили нові органічні молекули, які можна використовувати для підвищення ефективності перовскітних сонячних елементів.

Вчені об'єднали можливості штучного інтелекту (ШІ) з повністю автоматизованим високопродуктивним синтезом. Вони провели 150 експериментів, але якби не ШІ, то їм знадобилося б провести сотні тисяч тестів. З одним із матеріалів, виявлених таким чином, вони збільшили ефективність еталонного сонячного елемента приблизно на 2% — до 26,2%.

Відправною точкою в HI ERN була база даних зі структурними формулами близько мільйона віртуальних молекул, які можна було б отримати з комерційно доступних речовин. Дослідники використовували усталені квантово-механічні методи для розрахунку енергетичних рівнів, полярності, геометрії та інших характеристик 13000 випадково обраних віртуальних молекул.

З цих 13000 молекул потім вибрали 100 молекул, які максимально відрізнялися за характеристиками. Вони були автоматично вироблені в HI ERN за допомогою роботизованої системи і використані для виробництва в іншому ідентичних сонячних елементів. Потім виміряли їхню ефективність. Отримані значення і характеристики пов'язаних молекул використовували для навчання ШІ-моделі. У підсумку, ШІ запропонував ще 48 молекул для синтезу на основі двох критеріїв: очікуваної високої ефективності та непередбачуваних властивостей.

Молекули, запропонувані ШІ, можуть бути використані для створення сонячних батарей з ефективністю вище за середню. Дослідники можуть брати до уваги молекулярні пропозиції ШІ певною мірою, оскільки використовуваний ШІ вказує, які характеристики віртуальних молекул були вирішальними для його пропозицій. Виявилось, що пропозиції ШІ також частково ґрунтувалися на характеристиках, на які хіміки раніше звертали менше уваги, наприклад, на наявність певних хімічних груп, таких як аміни.

