

УДК 669.162.238

**І. Русу, д. т. н., доц.; С. Георгеску; К. Бачіу, д. т. н., проф.; Б. Ауреліан**  
**БАГАТОШАРОВІ ТЕРМІЧНІ БАР'ЄРИ, ОДЕРЖАНІ В РЕЗУЛЬТАТІ**  
**ЗАСТОСУВАННЯ APS І HVOF ТЕХНОЛОГІЙ**

*Розглядаються технологічні параметри методу плазмового нанесення захисного шару. Запропонована методика нанесення проміжного шару (100 % металу). За допомогою подальших захисних шарів в атмосфері аргон-водень шляхом плазмового струменя, інтеграції плазмотроном METCO7M. Виконаний аналіз електронних зображень керамічних захисних шарів, нанесених на поршині дизельних двигунів.*

*У статті розглядаються результати аналізу хімічного складу багатошарового захисного бар'єру на основі Me/MeCrAlY. Стаття містить зображення, які ілюструють результати якісного аналізу шарів стабілізованого цирконію з Y і Mg<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, а також рентгенівські дифрактограми і хімічний склад нанесених шарів.*

**Ключові слова:** багатошарові термічні бар'єри, метод змішаного нанесення покриття.

### 1. Вступ

Багатошаровий захист здійснюється за допомогою послідовного нанесення металевих і чисто керамічних порошків або суміші. Як правило, наносяться 5 різних шарів, починаючи з шару чистого металу і закінчуючи чистим окислом. Чим більше кількість шарів, тим більше ефективним є термічний захист. В процесі нанесення покриття зменшують вміст металу з 100 % до 0 % і збільшують оксиди кераміки до 100 %. Дана методика дозволяє уникнути появи тріщин в захисному шарі внаслідок різних коефіцієнтів об'ємного розширення при нагріві.

### 2. Технологічні параметри мікроіонізованих порошків при використанні методу підземного нанесення

Технологія підземного нанесення є складною, що включає безліч параметрів вживаних в даному процесі. Передача матеріалу з бункера здійснюється за допомогою інжектування частинок порошку перпендикулярно потоку плазми або проти потоку, на виході із сопла, використовуючи транспортуючий газ. Частинки порошку повинні інжектуватися в середину плазмового потоку до повного розплавлення порошку. Після декількох мілісекунд перебування в середині джерела тепла, частинки розпилюються у вигляді невеликих крапель, що мають швидкість приблизно 2 М, і досягають поверхні нижнього шару, утворюючи дуже пластичні шари. Кращі характеристики нанесення шарів визначаються рядом параметрів: відстанню металізації, охолодження полум'я, розмірами порошку, швидкістю інжекції, кількістю проходів.

Основними параметрами металізації є:

- Плазма: ступінь вакууму, склад газу, склад струменя плазми, швидкість;
- Полум'я: швидкість руху, відстань наплення;
- Інжектор: потік транспортуючого газу, потік порошку;
- Порошок: грануляція, розмір, форма гранул, розподіл швидкості інжекції, час плазмоутворення;
- Перший шар: температура, контроль залишкової напруги, швидкість удару частинок.

Для нанесення покриття використовується плазмотрон METCO7M, що має наступні характеристики: плазмотрон типу 7MB, форсунка типа GH (3); отвір для подачі порошку = 2, відстань нанесення порошку 4÷7дюйма, тиск аргону – 80 psi; тиск кисню – 20 psi; електрична дуга – 500 А, 70 V; ККД 60 %.

### 3. Метод змішаного нанесення покриття високошвидкісним газополуменевим напиленням (High Velocity Oxygen Fuel, HVOF) і плазменного напилення в атмосфері повітря (Air Plasma Spraying, APS)

Ми розглянемо нанесення перехідного шару (100% металу) за допомогою процесу HVOF; інші шари наносяться в атмосфері аргон – водень, використовуючи плазмовий струмінь, який генерується плазмотроном METCO7M.

Даний метод змішаного покриття дозволяє забезпечити максимальну адгезію перехідного шару з мінімальною пористістю, застосовуючи HVOF-метод і забезпечує розплавлення керамічних матеріалів за допомогою APS-методу.

Порядок виконання технологічних операцій наступний:

- знежирення;
- піскоструминне очищення;
- нанесення проміжного шару методом HVOF;
- напилення керамічного шару за допомогою плазмового струменя.

Піскоструминне очищення – це операція, необхідна для поліпшення механічної зчеплюваності шару, що наноситься. Дана операція виконується в спеціальній камері металізуючого пристрою METCO.

Тиск повітря складає приблизно 3,5 атм і обдув здійснюється EF корундом, розмір зерна – 60÷80. Кут проекції струменя обдуву - 0÷30°. Щоб уникнути корозії металеві очищеної поверхні рекомендується почати металізацію не пізніше ніж через 2 години.

Таблиця 1 містить назви типів порошків, які потенційно можуть бути використані.

Таблиця 1

#### Типи порошку

	Тип порошку	Комерційні назви	Характеристики і сфери застосування
1.	Co32Ni21Cr8Al10,5Y	AMDRY 995C	Аерокосмічна галузь
2.	ZrO220Y2O3	Metco 202NS	Для захисту шарів при високих температурах
3.	65MgZrO3,26Ni 7Cr 2Al	M441NS-1	Використовується як проміжний шар
4.	24MgOZrO2	METCO210	
5.	NiCr 80/20	MTS 5644	

Відомо, що має місце низька адгезія перехідних шарів типа MeCrAlY з керамічними шарами метастабільного цирконію, одержаних в результаті процесу плазмової металізації. Щоб збільшити зчеплюваність перехідних шарів, особливо в умовах термічного удару, ми використовували пристрій HVOF типу, що працює за принципом надзвукової струменевої металізації.

Якщо використовується HVOF метод, то величина адгезії подвоюється, в порівнянні з результатами одержаними в результаті використання методу металізації за допомогою плазмового струменя, також істотно зменшується пористість.

Таблиця 2

#### Робочі параметри

Встановлена потужність	35 кВт
Сила струму	800А
Робоча напруга	45В
Витрата аргону	40 л/хв
Витрата водню	2 л/хв
Відстань	7 см
Швидкість частинок в струмені	226м/с
Температура нагрівання порошку	2 800°С

Метод, який ми використовували, дозволяє одержувати високоміцні, корозійно-стійкі, зносостійкі захисні шари, використовувані у високоточних деталях приладів.

З технологічної точки зору, до цієї категорії деталей ми можемо віднести штампи і деталі з композитних матеріалів, що використовують алюміній, які застосовуються в лабораторному устаткуванні.

Результати досліджень представлені на рис. 1. Одержані зразки використовувати для порівняльного аналізу результатів дослідження.

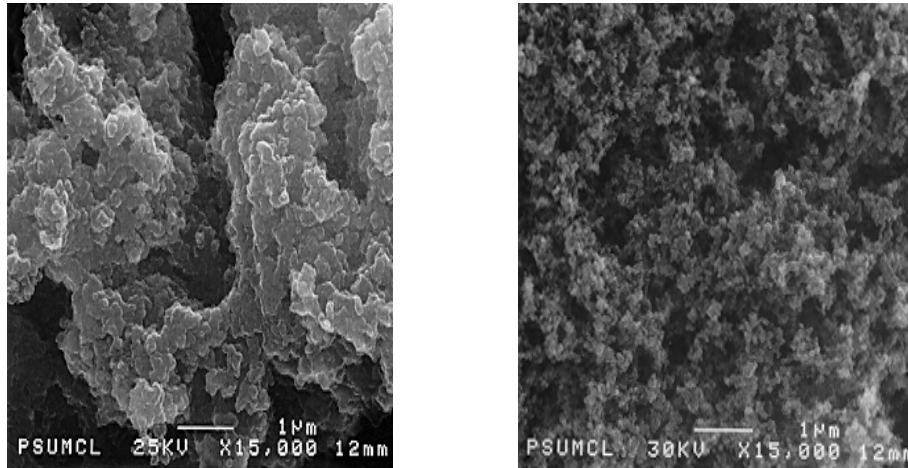


Рис. 1. Зображення нанесеного керамічного бар'єру на поршнях дизельного двигуна. Європейська програма EUROCERAM: а) залишкове нанесення вуглеводнів, агломерованих в порах керамічного матеріалу, нанесеного на головку циліндра; б) м'якший і однорідніший шар, нанесений на кромки поршня в зонах посадки

Термічний захисний керамічний бар'єр був виконаний з товщиною приблизно 11 мікрон, розмір зерен складав від 0,5 до 1 мікрона в гомогенних шарах. Забезпечується можливість обмеження відкритої пористості і незначної дифузії кисню в нанесеному шарі.

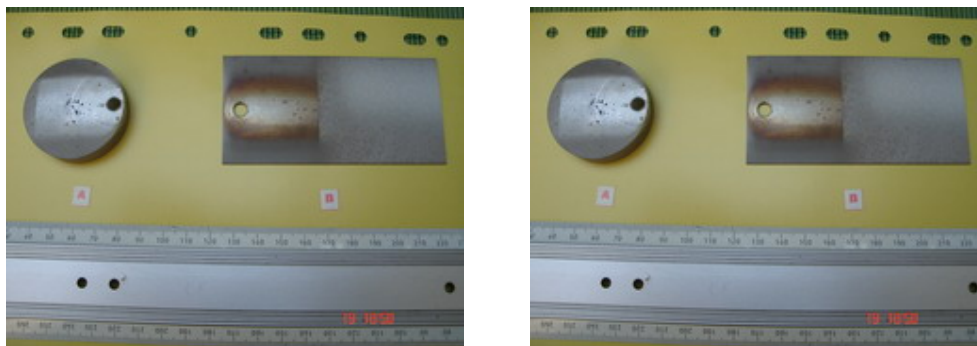


Рис. 2. Тестування процесу нанесення шарів на круглі і плоскі зразки

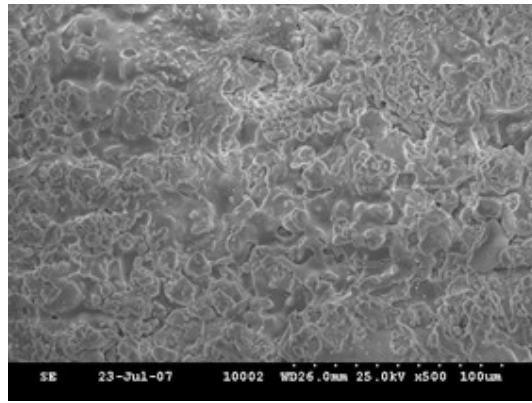


Рис. 3. Нанесений шар стабілізованого цирконію (електронна фотографія x500)

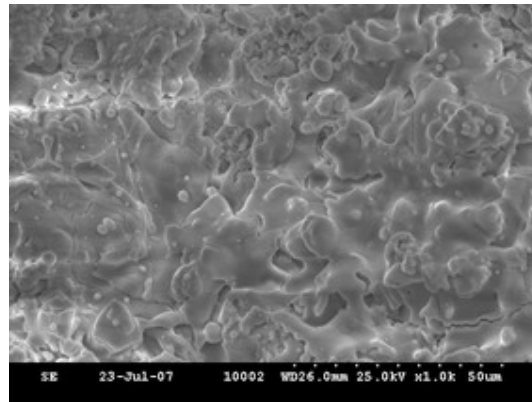


Рис. 4. Нанесений шар стабілізованого цирконію  $Y_2O_3$  (електронна фотографія x1000)

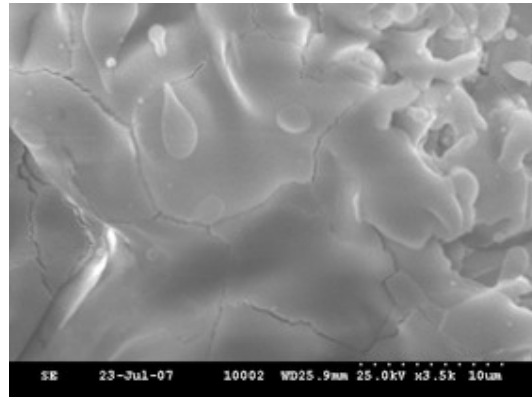


Рис. 5. Нанесений шар стабілізованого цирконію  $Y_2O_3$  (електронна фотографія x3500) (на останньому нанесеному шарі можна помітити мережу мікротріщин).

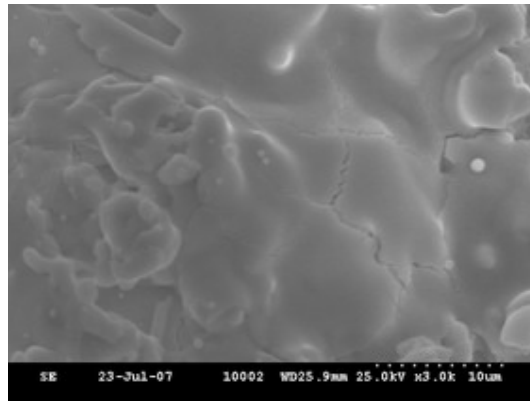


Рис. 6.  $ZrO_2\text{-}Y_2O_3$  наноситься методом плазмового розпилювання (електронна фотографія  $\times 3500$ ). В останньому шарі мережа мікротріщин острівцями покриває всю поверхню керамічного шару.

На рисунку 3 можна помітити однорідність нанесеного керамічного шару. В порівнянні з наявним методом, запропонована технологія володіє термічною стабільністю і хорошою механічною зносостійкістю шару, причому пористість і мікротріщини складають приблизно 10 – 20 % від об'єму керамічного шару.

#### 4. Аналіз хімічного складу багатшарового термічного бар'єру

Для того, щоб створити і випробувати нові захисні шари, нанесені на головки поршня, нам необхідно спочатку вивчити матеріали, характеристики яких відповідають умовам, які виникають при роботі двигуна внутрішнього згорання.

Отже, ми пропонуємо, на першому етапі, використовувати б керамічні і багатшарове покриття FGM типу, відповідно  $Me/MeCrAlY$ . Ці шари можуть мати наступний склад  $ZrO_2\text{-}Y_2O_3$  або  $MoCrAlY90\% + Al_2O_3 10\%$  і  $ZrO_2Y_2O_3$ .

Дані типи багатшарових структур можуть привести до погіршення нанесених керамічних шарів, стійкості до термічної дії. Важливою проблемою, яку необхідно вирішити у разі застосування даного технологічного методу є створення проміжного (зчіплюючого шару), який може бути нанесений на алюмінієву основу поршня, а також для нанесення керамічного шару.

Технологічною альтернативою є створення певного захисного сплаву на основі твердого розчину, з комплексними з'єднаннями (типу  $Al\text{-}Ni$ ), сумісними з алюмінієвою підкладкою і стійкими в екстремальних умовах роботи камери згорання дизельного двигуна.

Ми представимо результати дифрактографічного і якісного аналізу нанесених шарів.

Рис. 7 і 8 характерні піки результатів якісного аналізу шарів цирконію, стабілізованих ітрієм і  $MgO_2$ , нанесених в ході проведення аналізу. Рис. 9 показує відносно однорідні розподіли елементів у відповідних шарах.

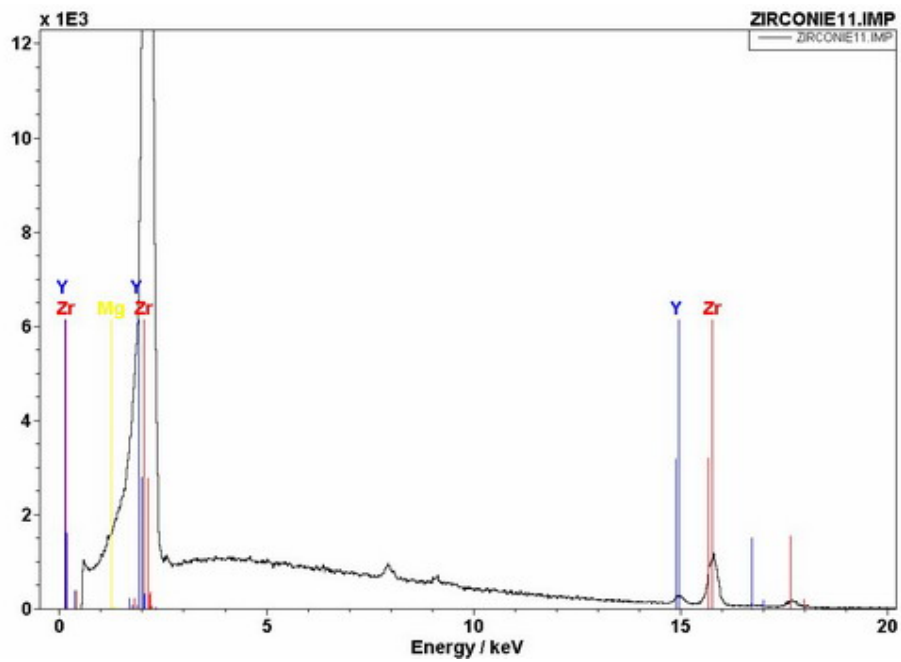


Рис. 7. Характерні піки. Зображення одержаних результатів якісного аналізу шарів цирконію, стабілізованих Y і MgO<sub>2</sub>.

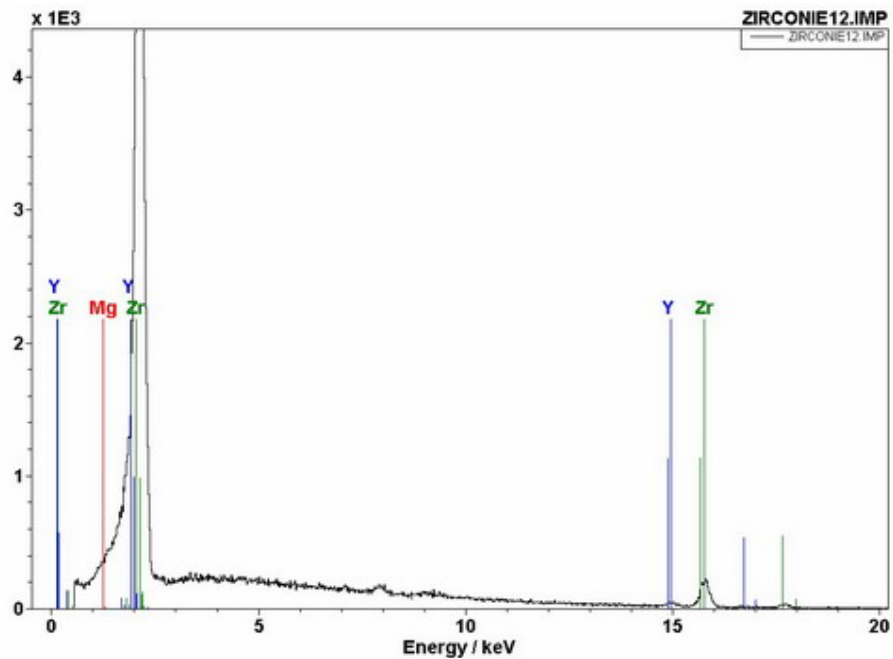


Рис. 8. Характерні піки. Зображення одержаних результатів якісного аналізу шарів цирконію, стабілізованих ітрієм і MgO<sub>2</sub>.

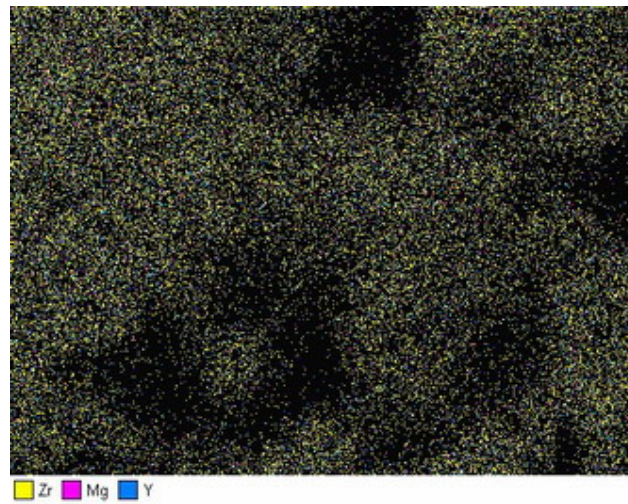


Рис. 9. Зображення розподілу елементів, одержане в результаті якісного аналізу шарів цирконію, стабілізованих ітрієм і  $MgO_2$ .

На рис. 10 зображені характерні піки тетрагональних і кубічних фаз шарів цирконію, під кутом  $2\theta$  в к- $\alpha$  випромінюванні мідного і нікелевого, одержані з використанням прикладних програм.

Ми встановили, що продукти реакції є результатом послідовної обробки поверхні алюмінієвого сплаву після обробки 20 % розчином  $Al(OH)_3 - (85\%) H_3PO_4$  вони не можуть бути ідентифіковані дифракційним методом на поверхні нанесеного шару.

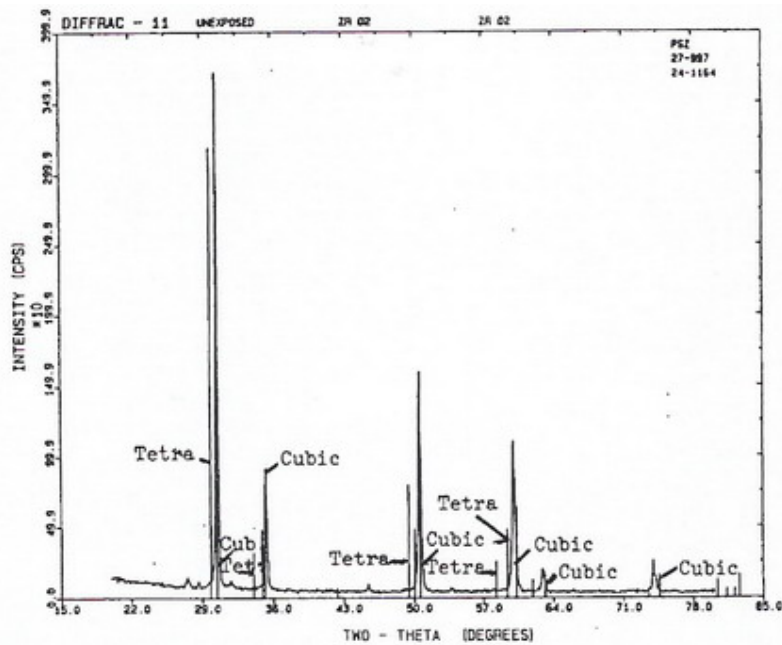


Рис. 10. Рентгенівські дифрактограми нанесених шарів. Показані зображення характерних піків.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Andritschky M., Teixeira V., Adherence of combined physically vapor-deposited and plasma-sprayed ceramic coatings Surface and Coatings Technology 76-77, 1995, p.101-105;
2. Steffens H.D., Babiak Z., Gramlich M., Some Aspects of Thick Thermal Barrier Coating Lifetime Prolongation, Journal of Thermal Spray Technology, 8(4), 1999, p. 517-522;
3. Yonushonis T.M., Thick Thermal Barrier Coatings for Diesel Components National Aeronautics and Space

Administration Lewis Research Center Nasa Cr-187111 NASA.

4. Freitas D., Kuranaga C., Machado A.J.S., Sintese de pos de zirconia cubica policristalina, Ceramica v.45 n.291 Sao Paulo, 1999. ISSN 0366-6913.

5. Gualco C., Cordano E., Fignino F., Gambaro C., Ahmaniemi S., Tuurna S., Mäntylä T., Vuoristo P., An improved deposition process for very thick porous Thick Thermal Barrier, Proceedings of the International Thermal Spray Conference, 2002, p. 195-201.

6. Rejda E.F., Socie D.F., Deformation behavior of plasmasprayed thick thermal barrier coatings Surface and Coatings Technology 113, 1999, p.218-226.

7. Stover D., Funke C., Directions of the development of thermal barrier coatings in energy applications, Journal of Materials Processing Technology, 92-93, 1999, p.195-202.

8. Yonushonis T.M., Thick Thermal Barrier Coatings for Diesel Components National Aeronautics and Space Administration Lewis Research Center Nasa Cr-187111 NASA.

9. Zhu, Dongming and Miller R.A.: Development of Advanced Thermal and Environmental Barrier Coatings Using a High-Heat-Flux Testing Approach. Presented at the 27th Annual International Conference on Advanced Ceramics and Composites, Cocoa Beach, FL, 2003.

**Іон Русу** – д. т. н., доцент, факультет матеріалознавства та інженерії, тел.: 0232-278688, e-mail: vrusu 2003@yahoo.com

**Сільвія Георгеску** – факультет матеріалознавства та інженерії, тел.: 0232-278688

**Костянтин Бачіу** – д. т. н., професор, декан факультету матеріалознавства та інженерії, тел.: 0232-278680, e-mail: constantin baci\_u\_2004@yahoo.com

Технічний університет «Джорджа Асахи», м. Яси, Румунія.

**Бузану Ауреліан** – науковий співробітник науково-дослідного центру SC. METAV-R&D SA, Бухарест, Румунія.