

УДК 621.793:621.311.22

**В.І. Похмурський, М.М. Студент, Т.Р. Ступницький, Н.Р. Червінська**  
**СТРУКТУРА, МЕХАНІЧНІ ТА ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ**  
**КОРОЗИЙНОСТІЙКИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ІЗ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ**

*Досліджували електродугові покриття сформовані з порошкових дротів двох систем легування Fe-Cr-C-Ni-Ti-Al та Fe-Cr-C-B-Ni-Ti-A. Також висвітлено теоретичні положення, що підтверджені експериментальними результатами по розробленню корозійностійких та і зносостійких електродугових покриттів*

*Ключові слова:* Електродугові покриття, порошковий дріт, мікрогетерогенність, шихта, феросплави, корозійна стійкість  
*Форм. 1. Табл. 7. Рис. 1. Літ. 9.*

**В.И. Похмурский, Н.Н. Студент, Т.Р. Ступницкий, Н.Р. Червинская**  
**СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**  
**КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ С ПОРОШКОВЫХ**  
**ПРОВОЛОК**

*Исследовали электродуговые покрытия сформированы из порошковых проволок двух систем легирования: Fe-Cr-C-Ni-Ti-Al и Fe-Cr-C-B-Ni-Ti-A. Также освещены теоретические положения, подтвержденные экспериментальными результатами по разработке износостойких так и коррозионностойких электродуговых покрытий*

*Ключевые слова:* Электродуговые покрытия, порошковая проволока, микрогетерогенность, шихта, ферросплавы, коррозионная стойкость.

**V. Pokhmursky, M. Student, T. Stupnytsky, N. Chervinska**  
**THE BASICS OF CREATION CORROSION RESISTANCE ARC SPRAY COATINGS FROM**  
**CORED WIRES**

*The influence of cored wires alloying elements on a coefficient of micro heterogeneity of arc spray coatings has been reviewed. It was investigated that corrosion properties of arc spray coatings greatly depend on the coefficient of micro heterogeneity. Basis on it were formed the main basics of formation corrosion resistance arc spray coatings.*

*Key words:* arc sprayed coatings, cored wire, mikroheterogeneity, mixture, ferro alloys, corrosion resistance.

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день все більше застосування знаходять методи газотермічного напилення покриттів. Серед них найбільш дешевим, високо продуктивним та технологічно найпростішим є електродугове напилення (ЕДН) покриттів.[1]. Застосування таких електродних матеріалів як порошкові дроти (ПД) для ЕДН, дозволяє одержувати електродугові покриття (ЕДП) із високою твердістю 1000...1300 НV та високою абразивною зносостійкістю, а також розширити область їх застосування.[2...4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В Україні так як і закордоном розробляють нові витратні матеріали (ПД) для ЕДН.[4-7]. Як правило це ПД для одержання відновних та захисних (зносостійких та жаростійких) покриттів. Однак одночасне поєднання таких властивостей у одному покритті є досить складним завданням.

**Невирішені частини проблеми.** ЕДП за своєю природою є значно гетерогенними, що в основній мірі впливає їх функціональні властивості, в тому числі і корозивні. Тому невирішеним завданням залишається розроблення теоретичних підходів для регулювання ступеню гетерогенності ЕДП, за яких ЕДП будуть мати високі як зносостійкі так і корозійні властивості.

**Метою дослідження** є розроблення підходів до створення порошкових дротів для ЕДН покриттів, не тільки з високою абразивною зносостійкістю, а також із високою корозійною стійкістю. Такі покриття можуть бути альтернативою екологічно небезпечного процесу - гальванічного хромування.

**Методики експериментів.** Покриття з використанням ПД напиляли при робочій напрузі 32 В, силі струму 130...150 А і тискові повітря 0,6 МПа. Перед напиленням поверхню зразків у вигляді труб діаметром 40 мм піддавали абразивно-струминній обробці корундом до шорсткості поверхні  $R_z=40...45$  для забезпечення необхідної сили зчеплення покриття з основою. Вихідна товщина покриття становила 1,5 мм, після шліфування - 1 мм. Для напилення покриттів використовували порошкові електродні дроти діаметром 1,8 мм у вигляді трубчастій оболонки, виготовленої з низьковуглецевої сталі 0,8 кп товщиною 0,4 мм, заповненої порошковою шихтою. Для забезпечення корозійної стійкості вміст Cr >13% мас. був у всіх ПД.

Характеристики корозійних процесів досліджували, використовуючи потенціостати ПИ-50-1 та ІРС-Про у потенціодинамічному режимі. Для потенціостата ІРС-Про використовували програму ІРС 2000, яка обслуговує програмно-апаратний комплекс „Потенціостат ІРС-Про + ПК ІВМ РС”. Швидкість корозії

визначали, екстраполюючи лінійні ділянки поляризаційних кривих на потенціал корозії або за ділянками, що відповідали пасивному стану.

Для проведення мікроелектрохімічних вимірювань як мікроелектрод порівняння використовували капіляри із скляних трубок з внутрішнім діаметром 0,5–1 мкм та заповнювали розчином електроліту, який використовували для досліджень (МЕХ). За допомогою двокоординатного столика мікроскоп переміщували разом із капіляром по всій поверхні шліфа з точністю 1 мкм. При цьому капіляр і досліджувана область мікрошліфа знаходилися в полі зору мікроскопа. Вимірювання електродного потенціалу проводили безперервно з моменту занурення його у розчин до закінчення дослідження. Використовували спеціальний розчин 0,0092%  $H_2SO_4$  + 0,14%  $H_2O_2$  + 0,00001%  $K_2Cr_2O_7$  (МЕХ), в якому вуглецеві сталі розчиняються в активному стані. Опір цього електроліту в капілярах 1-3 мкм дорівнює 630 МОм [8].

Для оцінювання мікрогетерогенності (МГ) покриттів використано коефіцієнт  $K_{MG}$ , який запропоновано визначати згідно формули [9]:

де  $n$  - кількість прямокутних ділянок площею  $35 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$ , на яких визначається вміст кожного елемента, який присутній у покритті.

$$K_{MG} = \left( \sum_{i=1}^n |c_{сер} - c_i| \right) / n \times c_{сер} \quad (1)$$

Коефіцієнт  $K_{MG}$  характеризує відхилення вмісту кожного з елементів легування в межах окремої ламелі  $c_i$  від його середнього вмісту  $c_{сер}$  у покритті. Загалом коефіцієнт  $K_{MG}$  свідчить про повноту сплавлення шихти та оболонки. Якщо шихта та оболонка сплавляються повністю з утворенням гомогенного розплаву, то утворене з нього покриття також буде гомогенним. У цьому випадку коефіцієнт  $K_{MG}$  прямує до нуля. Коли ж шихта та оболонка не сплавляються, то  $K_{MG}$  прямує до одиниці.

Для визначення коефіцієнта  $K_{MG}$  порівнюється інтегральний вміст конкретного елемента легування  $c_{сер}$  на ділянці площею  $10 \text{ мм}^2$  з його локальним вмістом  $c_i$  на прямокутних ділянках площею  $35 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$ , які за величиною сумірні з середньою площею ламелей (рис. 2). Визначення  $K_{MG}$  покриття проводиться як мінімум на п'яти ділянках, які розташовані одна від другої на віддалі 5 мм, по ширині плями пучка напилена, яка становить 25...30 мм. Значення  $K_{MG}$  із цих ділянок усереднюються.

**Основні результати дослідження.** Для розробки експериментальних партій порошкових дротів вибирали шихтові матеріали які між собою та між оболонкою із мало вуглецевої сталі 0,8 кп утворюють евтектики (табл. 1).

Таблиця 1. Матеріали використані при виготовленні ПД

Назва матеріалу	Марка	ГОСТ
ферохром високовуглецевий	ФХ-800	4757-85
феротитан	ФТИ-40А	4761-80
порошок алюмінію	ПА-40	
хром металевий	Х99А	5905-79
самофлюсуєчий сплав на основі Ni	ПГ10-Н-01	
лігатура залізохромбор	ФХБ-2	ТУ 14-5-106-73

Таблиця 2. Хімічний склад порошків феросплавів

Марка	Вміст елементів, мас. %										
	Cr	Mo	Fe	Ti	Al	Cu	B	Si	C	S	P
ФХ-800	65,0							2,0	8,0	0,08	0,05
ФТИ-40А		0,5		40,0	9,0	0,2		5,0	0,1	0,05	0,05
ФХБ-2	42,4		30,1		2,0		22	2,8			

Основою шихтових матеріалів для розроблених ПД були порошки високовуглецевого ферохрому ФХ-800, та ферохромбору ФХБ-2 з додатками нікелевого самофлюсуєчого сплаву (табл. 2), феротитану та алюмінію. Нікелевий сплав та феротитан утворюють евтектики із залізною оболонкою ПД при його плавленні, а порошок алюмінію підвищує міцність зчеплення покриття із основою.

Такий вибір шихтових матеріалів дозволяє отримувати більш повне сплавлення шихти та оболонки і таким чином одержувати більш гомогенні а значить і більш корозійностійкі покриття. Розроблено ПД двох систем легування Fe-Cr-C-Ni-Ti-Al та Fe-Cr-C-B-Ni-Ti-Al (табл. 3). Покриття із ПД Fe-Cr-C-Ni-Ti-Al мають твердість 500-600 HV високу когезійну міцність на рівні 220...300 МПа та середній рівень

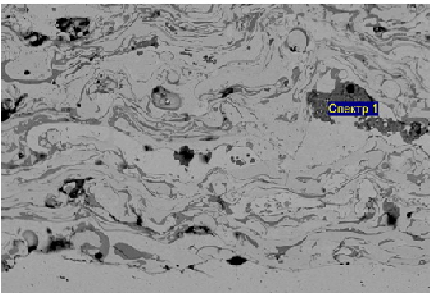
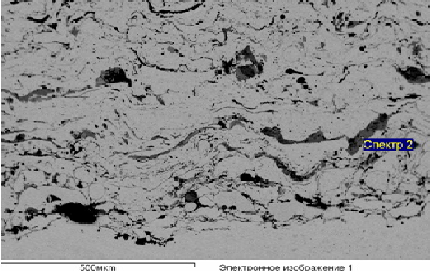
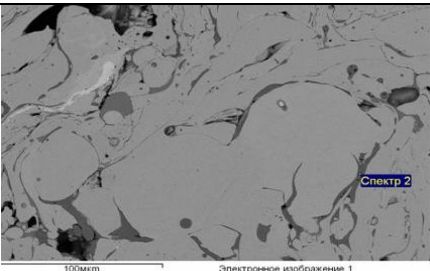
напружень розтягу 45...70 МПа. Термічна обробка за температури 550°С на протязі 2 год. приводить до зменшення когезійної міцності, незначного зменшення твердості покриттів і трансформації напружень розтягу в напруження стиску.

Таблиця 3. Порошкові дроти з вмістом хрому більше 13% мас

Марка ПД	Шихта	До ТО 550°С			Після ТО 550°С			Фазовий склад покриття до ТО
		Твердість HV	Когезія, МПа	Напруження МПа	Твердість HV	Когезія, МПа	Напруження МПа	
140X17H4	FeCr; Ni сф	500-600	293	70	450-550	160	-42	Fe <sub>γ</sub> ; Fe <sub>α</sub> ; сліди (FeCr) <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , (FeCr) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
140X15H4Ю	FeCr; Niсф; Al.	500-600	223	45	-	173	-42	Fe <sub>γ</sub> ; Fe <sub>α</sub> ; сліди (FeCr) <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , (FeAlCr) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ПД 140X14H2T2Ю	FeCr; Niсф; FeTi; Al	450-550	250	71	450-500	180	7	Fe <sub>γ</sub> ; Fe <sub>α</sub> ; сліди (FeCr) <sub>23</sub> C <sub>6</sub> , (FeAlTi) <sub>x</sub> O <sub>y</sub>
ПД100X14H2T2P3Ю2	FeCr; FeCrB2; Niсф; Al	700-1000	70	52	600-950	75	15	Fe <sub>γ</sub> ; Fe <sub>α</sub> ; сліди (FeCr) <sub>2</sub> B (FeAlB) <sub>x</sub> O <sub>y</sub>

Матричною фазою покриттів є залишковий аустеніт, 10..15% мас. фериту, 4...6% мас. оксидів Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub> а також сліди карбиду (FeCr)<sub>23</sub>C<sub>6</sub>.

Таблиця 4. Склад оксидної фази у покриттях з ПД

Структура покриття із ПД	Спектральний аналіз оксидів у покритті	
 <p>100нм Електронное изображение 1</p> <p>ПД 140X17H4</p>	Елемент	Масовий
	O K	29.77
	Al K	1.09
	Si K	1.70
	Ti K	0.34
	Cr K	44.02
	Mn K	3.53
	Fe K	23.46
 <p>50нм Електронное изображение 1</p> <p>ПД 140X15H4Ю</p>	Елемент	Масовий
	Mg K	0.50
	Al K	15.07
	Si K	7.80
	Cr K	27.23
	Fe K	49.40
 <p>100нм Електронное изображение 1</p> <p>ПД 140X14H2T2Ю</p>	Елемент	Масовий
	O K	39.28
	Ti K	44.04
	Cr K	1.83
	Al K	14.84

Покриття ід ПД Fe-Cr-C-B-Ni-Ti-Al мають суттєво більшу твердість 600...950 HV, невисоку когезійну міцність та рівень залишкових напружень розтягу. Після термічної обробки за 550°C впродовж 2 год., твердість покриттів зростає внаслідок дисперсійного зміцнення матриці боридами (FeCr)<sub>2</sub>B, а рівень напружень суттєво зменшується до 7...15 МПа. (табл. 3).

Для корозійностійких покриттів із вмістом хрому (табл. 3), що незначно перевищує рівень хрому у 12% мас., який забезпечує корозійну стійкість, є небажано поява у покритті значної кількості фериту та оксидів на основі хрому. Як відомо додаток алюмінію, титану та фосфору суттєво збільшує вміст феритної фази у структурі покриття. Так додаток 2% мас. алюмінію та 2% мас. титану у ПД сприяє утворенню у структурі покриття 20% фериту.

Це приводить до зменшення твердості покриттів, підвищення хімічної гетерогенності внаслідок появи у фериті хромвмісних карбідів (FeCr)<sub>2</sub>C<sub>6</sub> що зменшує вміст хрому у покритті і як наслідок погіршує корозійні характеристики покриттів. Тому хоча алюміній у шихті ПД суттєво підвищує адгезійну міцність покриттів до основи, проте вміст у ПД слід обмежувати 2 % мас.

При напиленні покриттів у їх структурі утворюється 4...6 % мас оксидів. Для хромвмісних покриттів утворюються переважно оксиди хрому. Додаток алюмінію зменшує кількість оксидів хрому, а додаток 2 % мас. алюмінію сумісно із 2 % мас. титаном у ПД практично повністю виключає утворення оксидів хрому при напиленні покриття і як наслідок їх більше зберігається у твердому розчині (табл. 4, 5).

Таблиця 5. Склад оксидної фази у покриттях

Марка ПД	Склад оксидів у покритті
ПД 140X17H4	4...6% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (68мас.%Cr)+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ПД 140X15H4Ю	4...6% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ПД 140X14H2T2Ю	4...6% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiO <sub>2</sub>

Додаток у шихту ПД нікелевого евтектичного сплаву ПГСП-3. та феротитану, які із сталлюю оболонкою утворюють глибокі евтектики із низькою температурою плавлення сприяють утворенню гомогенних електродугових покриттів із ПД 140X14H2T2Ю та ПД100X14H2T2P3Ю2. Середнє арифметичне відхилення концентрації хрому від інтегральної в таких покриттях Кмг не перевищує 5%, а середнє квадратичне Кмг<sup>2</sup> не перевищує 8% (табл. 6).

Це підтверджує також і електрохімічна мікрогетерогенність, яка визначена методом рухомої краплі (рис. 1).

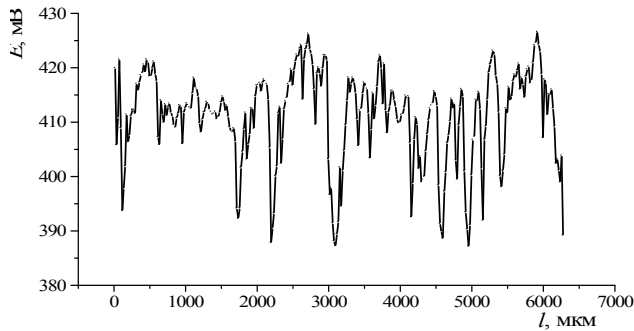
Таблиця 6. Мікрогетерогенність покриттів із ПД

Марка ПД	Середнє арифметичне відхилення концентрації хрому в ламелях покриття, Кмг	Середнє квадратичне відхилення концентрації хрому в ламелях покриття, Кмг <sup>2</sup>
140X17	0,15	0,22
140X17H4	0.08	0,08
140X15H4Ю	0,18	0,4
140X14H2T2Ю	0.05	0.07
100X14H2T2P3Ю2	0,05	0,08

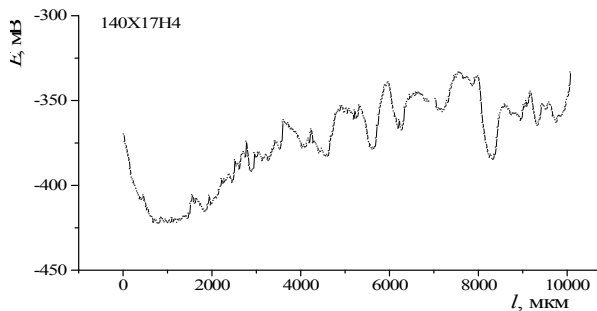
Електрохімічна мікрогетерогенність гомогенної аустенітної сталі X18H10T не перевищує 40 мВ на довжині відрізка шліфованої поверхні. Електрохімічна мікрогетерогенність поверхні шліфованих покриттів із ПД є більшою ніж для поверхні сталі X18H10T.

Це пов'язано із тим що у структурі покриття важко забезпечити в повній мірі однаковий вміст хрому та інших легувальних елементів у кожній ламелі, крім цього у структурі покриття є також 4...6 % мас. оксидів які є катодними включеннями і підсилюють мікрохімічну гетерогенність (Рис. 1). Така мікрогетерогенність дозволяє забезпечити задовільні електрохімічні характеристики та достатню корозійну стійкість у 3% водному середовищі NaCl. Так, протягом 124 год. у цьому середовищі слідів

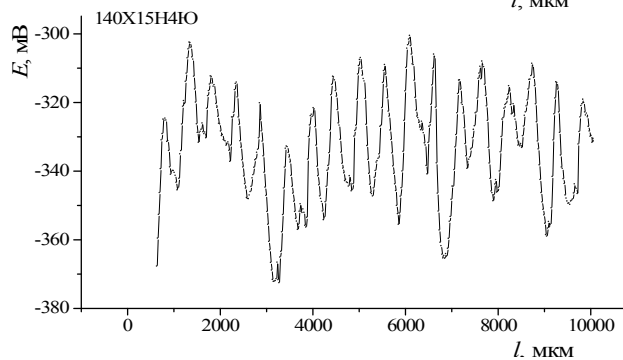
корозії на шліфованій поверхні на покриттях із ПД140X14Н2Т2Ю та ПД100X14Н2Т2Р3Ю2 не відмічено. Це дозволяє стверджувати, що такі покриття можна використовувати для захисту від корозії в 3% водному середовищі NaCl.



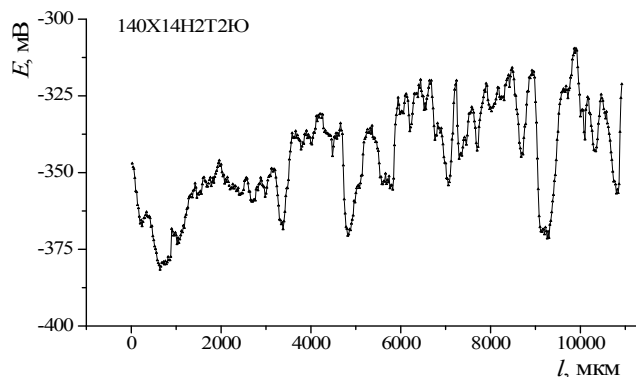
а)  
Нержавна Сталь X18H10T  
 $\Delta E=40$  мВ



б)  
Покриття із ПД 140X17H4  
 $\Delta E=75$  мВ



в)  
Покриття із ПД  
140X15H4Ю  $\Delta E=70$  мВ



г)  
Покриття із ПД  
140X14H2T2Ю  $\Delta E=70$  мВ

Рис. 1. Електрохімічна мікрогетерогенність покриттів в середовищі МЕХ

Таблиця 7. Електрохімічні параметри покриттів на сталях у водному розчині 3% NaCl

Покриття з ПД Товщина покриття 1мм	Ест, мВ	І кор., мА/см <sup>2</sup>
	На сталі 3	
140X17H4	-440	0,012
140X14H2T2Ю	-425	0,0015
100X15H4P3Ю2	-420	0,005
Основа	-350	0,0004

**Висновки:**

1. Встановлено, що для створення зносостійких та корозійностійких покриттів першою і необхідною умовою є наявність в складі шихти ПД вуглецевмісних або боромісних феросплавів (ферохрому, високовуглецевого ферохрому), які забезпечують у складі покриття не менше 14% Cr, та при цьому покриття має бути гомогенним, а коефіцієнт  $K_{MF}$  не перевищувати 0,06.
2. Необхідною умовою для формування корозійностійких та зносостійких покриттів є також обмеження кількості легувальних елементів крім Cr, що стабілізують ферит, при цьому вміст фериту у структурі покриття не має перевищувати 20% мас.
3. Для підвищення корозійної стійкості покриттів необхідно у шихту ПД вводити порошок Al та феросплави на основі Ti (не менше 2% Ti), що унеможливило утворення оксидів хрому та збільшує Cr у твердому розчині покриття.

1. *Коробов Ю.С.* Эффективность применения активированной дуговой метааллизации для нанесения защитных покрытий // Сварочное производство. – 2002. – 5, № 2. – С. 47-50.
2. *Студент М.М.* Особливості топографії поверхні електродугових покриттів із порошкових дрітів після шліфування та полірування / М. Студент // Вісник ТДТУ. – 2009. – 14, № 3. – С. 72-80.
3. *Похмурский В.И.* Влияние режимов электродуговой металлизации и состав применяемых порошковых проволок на структуру и абразивную износостойкость покрытий. / В.И. Похмурский, М.М. Студент, И.А. Рябцев, И.И. Сидорак, В.М. Довгуняк, Б. Форманик // Автомат. сварка. – 2006. – № 7. – С. 31-36.
4. Структура и трибологические свойства покрытий, полученных методом электродуговой металлизации / В.И. Похмурский, М.М. Студент, И.И. Сидорак, Ю.М. Кусков, И.И. Рябцев, В.М. Довгуняк // Автомат. сварка. – 2003. – № 8. – С. 13-17.
5. *Venugopal K. and Agrawal M.* Wear.-2008. – №264. – 139-145 p.
6. *Dallaire C.S.* Journ. Therm. Spray Techn., – 2001. – №10. – 337-350 p.
7. *Branagan D.J., Swank W.D., Haggard D.C., et al.* Metallurg. and Mater. Transact. A, 32A.-2001.-№10. – 2615-2621 p.
8. Вплив корозії у середовищах з різним рН на локальні електродні потенціали сталей / М. С. Хома, Г. М. Сисин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – 46, № 3. – С. 92-97.
9. *Студент М.М.* Вплив будови електродугових покриттів з порошкових дрітів на їх властивості / М.М. Студент // Машинознавство. – 2010. – №5(155). – С. 16-20.

Стаття надійшла до редакції 26.04.2013.