

УДК 621.923.02

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СТРІЧКОВОГО ШЛІФУВАННЯ НА ЕЛАСТИЧНІЙ  
ОСНОВІ**

©Скоркін А. О.

*Українська інженерно-педагогічна академія***Інформація про автора:**

**Скоркін Антон Олегович:** ORCID: 0000-0003-3032-83414; mot@uira.ua; кандидат технічних наук; доцент кафедри металоріжучого обладнання і транспортних систем; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Широке розповсюдження стрічкового шліфування стримується відсутністю теорії визначення раціональних галузей його використання, практичних рекомендацій і методик, необхідних для одержання необхідної точності і якості оброблених поверхонь при найменших витратах. У зв'язку із цим, найважливішою проблемою є розробка теоретичних і технологічних основ високопродуктивного шліфування абразивними стрічками.

Таким чином, розробка теорії й методів підвищення ефективності процесу шліфування абразивними стрічками з урахуванням одержання необхідної якості виробу являє собою актуальну проблему.

У роботі проводилися теоретичні й експериментальні дослідження, оцінювалася точність і достовірність одержуваних результатів. Робота виконана на основі фундаментальних положень теорії різання, пластичності, теплопровідності, а також сучасних положень технології машинобудування, динаміки технологічних систем і трибології із застосуванням методів математичної статистики, теорії ймовірностей і багатофакторного планування.

**Ключові слова:** шліфувальний верстат; зернистість; стрічкове шліфування; складнопрофільні поверхні.

**Скоркин А. О.** «Исследование процесса ленточного шлифования на эластичной основе».

Широкое распространение ленточного шлифования сдерживается отсутствием теории определения рациональных областей его использования, практических рекомендаций и методик, необходимых для получения требуемой точности и качества обработанных поверхностей при наименьших затратах. В связи с этим, важнейшей проблемой является разработка теоретических и технологических основ высокопроизводительного шлифования абразивными лентами.

Таким образом, разработка теории и методов повышения эффективности процесса шлифования абразивными лентами с учетом получения требуемого качества изделия представляет собой актуальную проблему.

В работе проводились теоретические и экспериментальные исследования, оценивалась точность и достоверность получаемых результатов. Работа выполнена на основе фундаментальных положений теории резания, пластичности, теплопроводности, а также современных положений технологии машиностроения, динамике технологических систем и трибологии с применением методов математической статистики, теории вероятностей и многофакторного планирования.

**Ключевые слова:** шлифовальный станок; зернистость; ленточное шлифование; сложнопрофильные поверхности.

## Верстати та інструменти

---

*Skorkin A.* “The study belt grinding process on a flexible basis”.

Widespread belt grinding hampered by the lack of definition of rational theory of fields of use, practical advice and techniques necessary to obtain the required accuracy and surface quality at the lowest cost. In this regard, the most important problem is the development of theoretical and technological bases of high-performance grinding abrasive belts.

Thus, the development of theory and methods for increasing the efficiency of the grinding abrasive belts based on receipt of the required product quality is an issue of concern.

The work carried out theoretical and experimental studies evaluating the accuracy and reliability of the results. The work was based on the fundamental principles of the theory of cutting, plasticity, thermal conductivity, as well as the provisions of modern engineering technology, dynamics and tribology technology systems with the use of mathematical statistics, probability theory and multivariate planning.

**Key words:** grinder; grain; belt grinding; surfaces of complex profile.

### 1. Вступ

Шліфування з використанням інструмента на еластичній основі є відносно новим, але досить перспективним видом абразивної обробки. Обладнання для стрічкового шліфування просте за конструкцією й економічне в експлуатації. На відміну від традиційних шліфувальних верстатів воно не вимагає спеціальних пристосувань для захисту від можливого розриву кола, складних і дорогих пристосувань для балансування й виправлення інструмента, легко вбудовується практично в будь-який технологічний процес. Ці обставини роблять незаперечними переваги абразивних стрічок у порівнянні з абразивними колами в умовах енергетичного й авіаційного машинобудування при обробці складнопрофільних поверхонь із більшою кількістю галтелей і переходів таких, як лопатки парових і газових турбін, лопаті гвинтів і вентиляторів.

У той же час, технологія шліфування абразивними стрічками докорінно відрізняється від шліфування абразивними колами або брусками. Основними відмінностями є кінематичні й динамічні особливості стрічково-шліфувальних верстатів і модулів, використання одношарового абразивного інструмента на еластичній основі з упорядкованим розташуванням зерен на ріжучій поверхні, можливість керування вихідними параметрами процесу за рахунок використання в складі технологічної системи опорних елементів з різними характеристиками і т.д.

Таким чином, використання відомих теорій шліфування абразивними колами, щодо процесу стрічкового шліфування практично не можливе.

### 2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Широке розповсюдження стрічкового шліфування стримується відсутністю теорії визначення раціональних галузей його використання, практичних рекомендацій і методик, необхідних для одержання необхідної точності і якості оброблених поверхонь при найменших витратах. У зв'язку із цим, найважливішою проблемою є розробка теоретичних і технологічних основ високопродуктивного шліфування абразивними стрічками.

При стрічковому шліфуванні основними факторами, що впливають на шорсткість поверхні, є: зернистість абразивної стрічки  $d_3$ , зусилля притискання стрічки  $F_S$  і лінійна швидкість на зовнішньому діаметрі заготовки  $v_n$  [1].

Важливим фактором при цьому є наявність номограми для вибору приведених параметрів режиму стрічкового шліфування, щоб їх вибір у сукупності забезпечував заданий рівень шорсткості поверхні при обробці.

Побудова таких номограм можлива при наявності математичної залежності (моделі) шорсткості поверхні від наведених факторів, поверхню відгуку якої можна представити як геометричне місце точок значень параметрів режиму, що відповідають одному конкретно заданому параметру  $Ra$  шорсткості поверхні [2].

Вплив параметрів режиму на шорсткість поверхні дослідники процесів різання представляють, як правило, у вигляді степеневих залежностей [3], заснованих на проведенні експериментів за методикою одно- або багатофакторного експерименту.

Кращим є багатофакторне планування експерименту [4], що дозволяє при проведенні малого числа дослідів у граничних точках області експериментування одержувати у вигляді математичних моделей вичерпний опис досліджуваного процесу.

Слід очікувати з досліду раніше виконаних досліджень [2], що при вивченні стрічкового шліфування залежність параметра шорсткості поверхні  $Ra$  від досліджуваних факторів: зернистості абразивної стрічки  $d_3$ , зусилля притискання стрічки  $F_S$  і швидкості заготовки  $v_{II}$  буде мати вигляд:

$$Ra = CRd_3^{\alpha_1} F_S^{\alpha_2} v_{II}^{\alpha_3}, \quad (1)$$

де  $d_3, F_S, v_{II}$  – змінні фактори, відповідно, зернистість стрічки, зусилля притискання стрічки й швидкість виробу;

$CR$  – коефіцієнт, що враховує сумарний вплив неврахованих у рівнянні (1) факторів;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – показники ступеня при змінних факторах.

Завданням експерименту є визначення величини коефіцієнта  $CR$  і показників ступені  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  при змінних факторах  $d_3, F_S, v_{II}$ .

Для цього рівняння (1) шляхом логарифмування слід привести в більш простий вид рівняння лінійної регресії, яке для 3-факторного експерименту має вигляд [4]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (2)$$

де  $y = \lg Ra$  – логарифмічний вираз параметра шорсткості  $Ra$  (відгук моделі);  $x_1, x_2, x_3$  – змінні фактори в закодованому вигляді, відповідні до параметрів  $d_3, F_S$  і  $v_{II}$  відповідно;  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – коефіцієнти регресії при змінних факторах, що є їх оцінками, значимості;  $b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$  – коефіцієнти регресії, що враховують значимість взаємного впливу змінних факторів на досліджуваний процес.

Кодування змінних факторів  $x_1, x_2, x_3$  у рівнянні регресії (2) здійснюється по наступних залежностях:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{2(\lg d_3 - \lg d_{3\max})}{\lg d_{3\max} - \lg d_{3\min}} + 1; \\ x_2 &= \frac{2(\lg F_S - \lg F_{S\max})}{\lg F_{S\max} - \lg F_{S\min}} + 1; \\ x_3 &= \frac{2(\lg v_{II} - \lg v_{II\max})}{\lg v_{II\max} - \lg v_{II\min}} + 1, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де  $d_{3\max}, F_{S\max}, v_{II\max}$  відповідають максимальним їхнім значенням, а  $d_{3\min}, F_{S\min}, v_{II\min}$  – мінімальним значенням змінних факторів при проведенні дослідів у граничних точках області експериментування.

## Верстати та інструменти

Після визначення коефіцієнтів регресії  $b_0, b_1, b_2, b_3$  у рівнянні (2) здійснюємо оцінку їх значимості з виключенням з розгляду незначущих коефіцієнтів. Далі здійснюємо перетворення (декодування) по залежностях (3) змінних факторів  $x_1, x_2, x_3$  з натурним їхнім вираженням як  $d_3, F_S$  і  $v_{II}$  відповідно. Перетворене рівняння регресії (2), у якому значення відгуку  $y$  представляє логарифмічне вираження параметра  $Ra$ , почленно потенціюємо і в результаті одержуємо шукану степеневу залежність параметра шорсткості  $Ra$  від досліджуваних факторів у вигляді виразу (1).

Адекватність отриманої залежності (моделі) досліджуваному процесу оцінюємо по  $F$ -критерію Фішера, розрахункове значення якого повинне бути більше його табличного значення для прийнятих умов експериментування.

### 3. Постановка проблеми

З метою підтвердження вірогідності отриманого результату по кожному незалежному досліді рекомендується проводити не менш  $k = 3$  паралельних дослідів з виміром щораз параметра  $Ra_{ik}$  шорсткості поверхні й обчисленням середнього його арифметичного значення, як

$$\overline{Ra}_i = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^3 Ra_{ik} . \quad (4)$$

Ураховуючи побудову регресійного рівняння (4) у логарифмічних координатах, отримані експериментальним шляхом значення параметра шорсткості  $Ra_{ik}$  слід представляти як логарифм їх значень із символом  $y_{ik}$ , а середнє арифметичне їх як  $\overline{y}_i$ .

Оцінка відтворюваності паралельних дослідів у логарифмічному вираженні здійснюється по  $G$ -Критерію Кохерна, згідно з яким гіпотеза відтворюваності дослідів ухвалюється, якщо розрахункове значення  $G_p$ -Критерію буде менше його табличного значення, тобто

$$G_p \leq G_T(p, N, f_i), \quad (5)$$

де  $p$  – рівень довірчої ймовірності, прийнятої в експерименті;  $N$  – загальна кількість незалежних дисперсій (число дослідів);  $f_i$  – число ступенів свободи кожної з них.

Для прийнятих в експерименті умов дослідів:  $p = 0,95$ ;  $N = 8$ ;  $f_i = k - 1 = 3 - 1 = 2$  табличне значення критерію Кохерна становить:

$$G_T(0,95; 8; 2) = 0,5157.$$

Розрахункове значення  $G_p$ -Критерію Кохерна визначається по формулі:

$$G_p = \frac{S_{i\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (6)$$

де  $S_i^2$  – дисперсія відтворюваності  $i$ -го незалежного дослідів;  $S_{i\max}^2$  – максимальне значення дисперсії відтворюваності із усіх дослідів;  $N$  – число незалежних дослідів.

Дисперсія відтворюваності по кожному досліді визначається як:

$$S_i^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{k=1}^k (y_{ik} - \overline{y}_i)^2, \quad (7)$$

де  $k = 3$  – число паралельних дослідів.

**Таблиця 1** – Матриця плану, результати експерименту і їх математична обробка

№ досліджу	Матриця плану ПФЕ $N = 23$								$\overline{Ra}_i$	$\overline{y}_i$	$y_i$	$(y - \hat{y})_i^2 \times 10^{-4}$	$S_i^2 \times 10^{-4}$
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$					
1	+	+	+	+	+	+	+	+	4,9	0,6899	0,6993	0,41	3,15
2	+	-	+	+	-	-	+	-	2,3	0,3609	0,3707	1,02	11,21
3	+	+	-	+	-	+	-	-	3,5	0,5432	0,5455	0,05	11,24
4	+	-	-	+	+	-	-	+	1,1	0,0402	0,0215	3,50	15,69
5	+	+	+	-	+	-	-	-	4,0	0,6006	0,5941	0,42	19,02
6	+	-	+	-	-	+	-	+	1,9	0,2784	0,2685	0,98	5,22
7	+	+	-	-	-	-	+	+	2,8	0,4455	0,4433	0,05	21,88
8	+	-	-	-	+	+	+	-	0,8	-0,0992	-0,0807	3,42	29,79
$\sum_{N=1}^8$	2,8595	1,6989	1,0001	0,4089	-0,3965	-0,0349	-0,0653	Рівняння регресії при $\Delta b_j = \pm 0,0286$ ; $y = 0,3574 + 0,2124x_1 + 0,1250x_2 + 0,0511x_3 - 0,0496x_1x_2$				9,85	117,20
$\frac{1}{N} \sum_{N=1}^8$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$					$S_{ad}^2$	$S \frac{2}{y_i}$
	0,3574	0,2124	0,1250	0,0511	-0,0496	-0,0044	-0,0082	$2,46 \times 10^{-4}$	$10,65 \times 10^{-4}$				

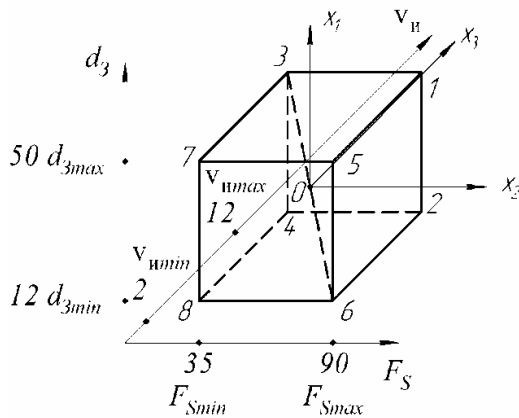
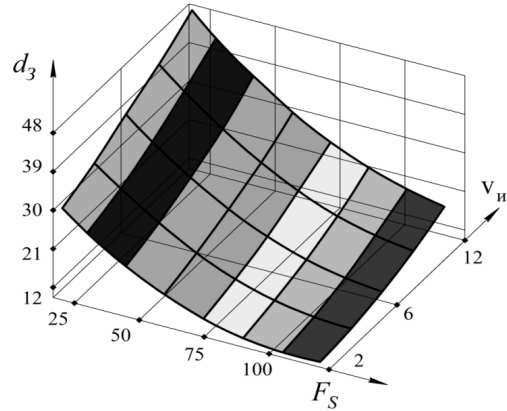
**4. Метою роботи** є підвищення ефективності шліфування абразивними стрічками шляхом керування параметрами контактної взаємодії інструмента із заготовкою.

### 5. Виклад основного матеріалу

Із аналізу дослідження стрічкового шліфування [1], величина зернистості абразивних стрічок при шліфуванні виробів різного призначення здебільшого перебуває в інтервалі 12...50 (умовна позначка номера зернистості за ГОСТ 3647–80, що відповідає  $(12...50) \cdot 10^{-2}$  мм), зусилля притискання стрічки в інтервалі 35...90 Н та лінійна швидкість подачі виробу – 2...12 м/хв. Ці значення змінних факторів і були прийняті в експерименті як граничні точки області експериментування.

Факторний простір прийнятої області експериментування представлено на рис. 1 у вигляді куба, побудованого на координатних осях змінних факторів  $d_3$ ,  $F_S$ ,  $v_{II}$ .

За методикою проведення експерименту [4] перенесемо початок координат у центр куба (т.  $O$ ) і привласнимо новим осям позначення  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , відповідні до напрямків векторів  $d_3$ ,  $F_S$  і  $v_{II}$  відповідно. Точка « $O$ » нових координат повинна відповідати основному «нуль»-рівню. Тоді максимальні значення змінних факторів  $d_3$ ,  $F_S$  і  $v_{II}$ , закодовані як  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  будуть у новій системі приймати позначення як «+1» або просто «+», а мінімальні значення – як «-1» або просто «-». Точки вершини куба 1...8, що представляють максимально-мінімальні значення змінних факторів, є граничними точками області експериментування в досліджуваному факторному просторі. На рис. 2 показана також умовно очікувана поверхня відгуку математичної моделі.

**Верстати та інструменти****Рис. 1** – Графічна інтерпретація факторного простору**Рис. 2** – Очікувана поверхня відгуку математичної моделі

У табл. 2 наведені числові значення рівнів варіювання й коди змінних факторів.

**Таблиця 2** – Рівні варіювання й схема кодів позначень змінних факторів

Рівень варіювання	Зернистість стрічки		Зусилля притискання		Швидкість виробу	
	$d_3 \cdot 10^{-2}$ , мм	$x_1$	$F_S$ , Н	$x_2$	$v_{II}$ , м/хв	$x_3$
Основний	32	0	50	0	7	0
Верхній	50	+ 1	90	+ 1	12	+ 1
Нижній	12	- 1	35	- 1	2	- 1

Розрахунки коефіцієнтів регресії  $b_0, b_1, b_2, b_3$  у рівнянні (4) здійснюється шляхом підсумовування по стовпцях матриці (табл. 2) експериментально отриманих значень  $\bar{y}_i$  з урахуванням знака (+1) при змінних  $x_{ji}$  стовпця, що відповідає, по наступних залежностях:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i; \\ b_j &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij} \bar{y}_i, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

де  $N = 8$  – число незалежних дослідів експерименту.

Для наведених у табл. 2 даних експерименту маємо коефіцієнти  $b_0$  і  $b_1$ :

$$b_0 = \frac{1}{8} (0,6899 + 0,3609 + 0,5432 + 0,0402 + 0,6006 + 0,2784 + 0,4455 - 0,0992) = 2,8595;$$

$$b_1 = \frac{1}{8} (0,6899 - 0,3609 + 0,5432 - 0,0402 + 0,6006 - 0,2784 + 0,4455 + 0,0992) = 1,6989.$$

Оцінка значимості коефіцієнтів регресії здійснюється за допомогою  $t$ -критерію Стьюдента. Коефіцієнт регресії  $b_j$  статично значимий, якщо виконується умова [4]:

$$b_j \geq \pm t_{(p, f_y)} S_{b_j}, \quad (9)$$

де  $t_{(p, f_y)}$  – табличне значення критерію Стьюдента;  $S_{b_j}$  – середнє квадратичне відхилення коефіцієнтів регресії.

При рівні довірчої ймовірності  $p = 0,95$  і числі ступенів свободи дисперсії адекватності  $f_y = f = 8(3 - 1) = 16$  табличне значення критерію Стьюдента становить  $t_{(0,95, 16)} = 2,12$ .

Середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів регресії визначається з підкореневого виразу:

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{S}{N} \frac{2}{y_i}}, \quad (10)$$

де  $S \frac{2}{y_i}$  – оцінка середнього значення дисперсії відтворюваності дослідів, тобто

$$S \frac{2}{y_i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2, \quad (11)$$

де  $S_i^2$  – дисперсія відтворюваності паралельних дослідів (див. табл. 1).

За результатами експерименту, наведених у табл. 1, здійснимо оцінку значимості розрахованих коефіцієнтів. Середнє значення дисперсії відтворюваності паралельних дослідів в експерименті склало:

$$S \frac{2}{y_i} = \frac{1}{8} (3,15 + 11,21 + 11,24 + 15,69 + 19,02 + 5,22 + 21,88 + 29,79) \times 10^{-4} = 10,65 \times 10^{-4}.$$

Средньоквадратичне відхилення коефіцієнтів регресії в цьому випадку буде:

$$S_{bj} = \sqrt{\frac{14,65 \times 10^{-4}}{8}} = 1,35 \cdot 10^{-2}.$$

Статично значимі коефіцієнти регресії повинні задовольняти умові:

$$b_j \geq \pm 2,12 \cdot 1,35 \cdot 10^{-2} = \pm 0,02862.$$

Як видно з табл. 2, цьому значенню інтервалу задовольняють перші п'ять коефіцієнтів:

$$b_0 = 0,3574; b_1 = 0,2124; b_2 = 0,1250; b_3 = 0,0511 \text{ і } b_{12} = -0,0496.$$

Вплив інших коефіцієнтів:  $b_{13}, b_{13}, b_{123}$ , а отже, і взаємний вплив факторів  $x_1x_3, x_2x_3, x_1x_2x_3$  на шорсткість поверхні при стрічковім шліфуванні є незначним і вони виключаються з рівняння регресії (2).

З урахуванням оцінки значимості коефіцієнтів рівняння регресії (2) прийме вигляд:

$$y = 0,3574 + 0,2124x_1 + 0,1250x_2 + 0,0511x_3 - 0,0496x_1x_2. \quad (12)$$

## Висновки

На підставі усього вищезазначеного можна відмітити, що отримана математична модель залежності параметра Ra шорсткості поверхні при стрічковому шліфуванні є робочою для всіх точок дослідженого факторного простору з інтервалами варіювання змінних факторів: зернистості стрічки  $d_3 = 12...50$ , зусилля притискання стрічки  $F_S = 30...90$  Н й лінійної швидкості на зовнішньому діаметрі заготовки  $v_M = 2...12$  м/хв.

## Список використаних джерел:

1. Паньков Л. А. Ленточное шлифование высокопрочных материалов / Л. А. Паньков, Н. В. Костин. – М. : Машиностроение, 1978. – 128 с.
2. Лурье Г. Б. Шлифование абразивными лентами / Г. Б. Лурье. – М. : Высш. шк., 1980. – 47 с.
3. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – М. : Машиностроение, 1974. – 319 с.
4. Иванов Ю. Н. Эффективность и качество обработки инструментами на гибкой основе / Ю. Н. Иванов, Н. В. Носов. – М. : Машиностроение, 1985. – 88 с.
5. Experimental Research on the Abrasive Belt Grinding Turbine Blades Material 1Cr13 Stainless Steel / H.L. Wu, Y. Huang, Z. Huang and G.J. Cheng // *Key Engineering Materials*. – 2011. – Vol. 487. – P. 452-456.
6. Li H. Research on Accuracy of Abrasive Belt Grinding / Hong Li // *Applied Mechanics and Materials*. – 2012. – Vol. 101-102. – P. 1101-1104.

## References

1. Pankov, L & Kostin, N 1978, *Lentochnoye shlifovaniye vysokoprochnykh materialov*, Mashinostroyeniye, Moskva.
2. Lurye, G 1980, *Shlifovaniye abrazivnymi lentami*, Vyssh. shk., Moskva.
3. Maslov, E 1974, *Teoriya shlifovaniya materialov*, Mashinostroyeniye, Moskva.
4. Ivanov, Yu & Nosov, N 1985, *Effektivnost i kachestvo obrabotki instrumentami na gibkoy osnove*, Mashinostroyeniye, Moskva.
5. Wu, H, Huang, Y, Huang, Z & Cheng, G 2011, 'Experimental Research on the Abrasive Belt Grinding Turbine Blades Material 1Cr13 Stainless Steel', *Key Engineering Materials*, vol. 487 (2011), pp. 452-456.
6. Li, H 2012, 'Research on Accuracy of Abrasive Belt Grinding', *Applied Mechanics and Materials*, vol. 101-102, pp. 1101-1104.

Стаття надійшла до редакції 15 червня 2016 р.