

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-5-415-419

УДК. 621.891:621.793

К определению влияния варьирования режимов лазерной обработки на трибологические характеристики режущего инструмента

Кандидаты техн. наук О. В. Дьяченко¹⁾, М. А. Кардаполова¹⁾, студ. О. В. Серякова¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Резюме. Рассмотрены вопросы повышения стойкости и надежности режущего инструмента для нарезания гастрономических продуктов с помощью лазерной обработки, приводящей к увеличению сопротивления материала рабочих поверхностей ударным нагрузкам. Изучено влияние лазерного оплавления с дополнительным легированием на структуру, микротвердость, износостойкость клеевых покрытий системы Fe–B–Cr–Si. Для решения задачи выбора оптимального качественного, а впоследствии и количественного состава многокомпонентной обмазки использован метод математического моделирования на симплексных решетках Шеффе. Установлена одинаковая тенденция изменения микроструктуры у всех клеевых покрытий, оплавленных лучом лазера. Рост скорости луча лазера вызвал следующие изменения микроструктуры: литая равновесная, дендритная, пересыщенная боридная и карбидо-боридная. Найдены модели поверхностей отклика, позволяющие судить о степени влияния параметров лазерной обработки на микротвердость полученных лазерным легированием клеевых покрытий и интенсивность их изнашивания при различных усилиях для всех исследуемых составов. Установлено, что нет строгой корреляции между твердостью и интенсивностью изнашивания покрытий после лазерного легирования клеевых покрытий. Это говорит о том, что упрочнение произошло не только за счет увеличения карбидо-боридной фазы, но и за счет упрочнения матрицы. Кроме того, регрессионная модель влияния состава обмазки на трибологические характеристики клеевых покрытий показала, что оптимальный состав многокомпонентной обмазки, обеспечивающий максимальную износостойкость покрытий, составляет 2/3B4C и 1/3TaB. Установлено, что упрочнение клеевого покрытия после лазерного легирования многокомпонентной обмазкой происходит за счет не только увеличения карбидо-боридной фазы, но и упрочнения матрицы.

Ключевые слова: лазерная обработка, микротвердость, микроструктура, интенсивность изнашивания, регрессионная модель

Для цитирования: Дьяченко, О. В. К определению влияния варьирования режимов лазерной обработки на трибологические характеристики режущего инструмента / О. В. Дьяченко, М. А. Кардаполова, О. В. Серякова // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 415–419

To Determination of Influence for Variations in Laser Treatment Modes on Tribological Characteristics of Cutting Tool

O. V. Diachenko¹⁾, M. A. Kardapolova¹⁾, O. V. Seriakova¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper considers problems pertaining to higher durability and reliability of a cutting tool for cutting gastronomic products while using laser processing that leads to resistance increase of material operating surfaces against impact forces. Influence of laser fusion with additional doping on structure, microhardness, wear resistance for adhesive coatings of Fe–B–Cr–Si system has been studied in the paper. In order to solve a problem for selection of optimal qualitative and subsequently quantitative composition of a multi-component coating a mathematical modeling method using Scheffe's simplex lattices has been used in the paper. Similar tendency for measuring micro-structure of all adhesive coatings fused by laser

Адрес для переписки

Дьяченко Ольга Владимировна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 67,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-81
tiro@bntu.by

Address for correspondence

Diachenko Olga V.
Belarusian National Technical University
67 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-81
tiro@bntu.by

beams has been established in the paper. Increase in beam speed has caused the following microstructure changes: cast equilibrium, dendrite, supersaturated boride, carbide and boride. Response surface models have been found and they provide the possibility to assess influence quantity of laser processing parameters on microhardness of adhesive coatings obtained by laser doping and intensity of their wear under various conditions for all investigated compositions. It has been ascertained that there is no strict correlation between hardness and intensity of coating wear after laser doping used for adhesive coatings. This testifies to the fact that hardening has taken place not only due to an increase of carbide-boride phase, but also due to matrix hardening. In addition, a regression model for coating composition effect on tribological characteristics of the adhesive coatings has revealed that an optimal composition of a multicomponent coating ensuring maximum wear resistance of coatings constitutes B4C is 2/3 and 1/3 TaB. It has been determined that hardening of the adhesive coating after laser doping while using multicomponent coating occurs not only due to increase of carbide-boride phase, but also due to matrix hardening.

Keywords: laser processing, micro-hardness, microstructure, wear rate, regression model

For citation: Diachenko O. V., Kardapolova M. A., Seriakova O. V. (2016). To Determination of Influence for Variations in Laser Treatment Modes on Tribological Characteristics of Cutting Tool. *Science & Technique*. 15 (5), 415–419 (in Russian)

Введение

Повышение стойкости и надежности режущего инструмента для нарезания гастрономических продуктов в первую очередь зависит от увеличения сопротивления материала рабочих поверхностей ударным нагрузкам. Использование лазерного легирования для поверхностного упрочнения и восстановления изношенных рабочих поверхностей режущих инструментов для нарезания гастрономических продуктов – перспективное направление в развитии современных технологий [1, 2]. Широко известен способ получения износостойких покрытий сочетанием плазменного напыления с последующим лазерным оплавлением [1, 2]. Этот метод весьма успешно зарекомендовал себя при изготовлении и восстановлении длинномерных, крупногабаритных деталей и деталей сложной конфигурации. Однако данная технология достаточно затратная. Авторами статьи предпринята попытка замены плазменных покрытий на клеевые.

В технологии получения порошковых многокомпонентных материалов и изделий из них часто приходится решать задачи поиска оптимальных вариантов материалов, в частности путем выбора соответствующего соотношения исходных компонентов. Для решения задачи выбора оптимального качественного, а впоследствии и количественного состава многокомпонентной обмазки использовали метод математического моделирования на симплексных решетках Шеффе [3–10].

Цель работы – изучение влияния лазерного оплавления с дополнительным легированием на структуру, микротвердость, износостойкость клеевых покрытий системы Fe–B–Cr–Si.

Методика

Для исследования микроструктуры, микротвердости и сравнительных испытаний на износ использовали образцы из стали 45 прямоугольной формы сечением 10×10 мм и длиной 30 мм, на поверхность которых кистью наносили пасту, приготовленную путем смешивания трех компонентов: клея AGO, ацетона и порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф. Далее выдерживали на воздухе при комнатной температуре в течение часа для полного удаления растворителя из клеевого слоя. Толщина слоя составляла 0,6 мм. Оплавление осуществили непрерывным лазером ЛГН-702 мощностью $N = 800$ Вт при диаметре лазерного луча $d = 3,0 \cdot 10^{-3}$ м со скоростями движения детали относительно луча лазера (скоростями луча лазера): $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ м/с, $v_2 = 1,67 \cdot 10^{-3}$ м/с, $v_3 = 3,33 \cdot 10^{-3}$ м/с, $v_4 = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с, с коэффициентом перекрытия 0,8 после предварительного нанесения порошковых обмазок В₄С, ТаВ, МоВ на клеевой связке (3 % клея AGO в ацетоне). Содержание легирующих элементов в обмазке выбрали исходя из матрицы планирования соответственно в долях единицы: 0, 1/3, 2/3 и 1,0. Толщина слоя обмазки составила 0,09–0,11 мм и контролировалась толщиномером МТ-40НЦ. После нанесения клеевого покрытия и оплавления образцы разрезали поперек лазерных дорожек для исключения влияния нестабильности температурных условий нагрева и охлаждения на краях образца.

Микрошлифы травили в 5%-м растворе пикриновой кислоты в спирте, затем в 5%-м растворе азотной кислоты в спирте. Протравленные образцы изучали на световом металлографическом микроскопе Unimet (Япония) при увеличении ×400. Микротвердость измеряли микротвердомером ПМТ-3.

Таблица 1

Матрица планирования,
микротвердость клеевых покрытий
и интенсивность изнашивания пары трения

Planning matrix,
micro-hardness of adhesive coatings
and wear intensity of friction couple

№ п/п	z_1	z_2	z_3	Y_i	$I_h \cdot 10^{-7}$ при P, H			Микро- твердость $H_{\mu}, ГПа$
	V_4C (X_1)	TaB (X_2)	MoB (X_3)		30	50	70	
1	1,00	0	0	Y_1	0,41	0,44	0,87	12,14
2	0	1	0	Y_2	0,52	0,56	0,92	7,80
3	0	0	1	Y_3	0,38	0,60	0,64	10,83
4	2/3	1/3	0	Y_{112}	0,34	0,52	0,64	9,57
5	1/3	2/3	0	Y_{122}	0,65	0,69	0,71	10,54
6	2/3	0	1/3	Y_{113}	0,49	0,57	0,79	8,75
7	1/3	0	2/3	Y_{133}	0,42	0,65	0,69	8,99
8	0	2/3	1/3	Y_{223}	0,32	0,65	0,79	8,04
9	0	1/3	2/3	Y_{233}	0,57	0,61	0,79	10,18
10	1/3	1/3	1/3	Y_{123}	0,79	0,89	0,94	10,78

Коэффициенты уравнения (1) определяли по формулам:

$$\beta_1 = Y_1; \beta_2 = Y_2; \beta_3 = Y_3; \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta_{12} &= \frac{9}{4}(Y_{112} + Y_{122} - Y_1 - Y_2); \\ \beta_{13} &= \frac{9}{4}(Y_{113} + Y_{133} - Y_1 - Y_3); \\ \beta_{23} &= \frac{9}{4}(Y_{223} + Y_{233} - Y_2 - Y_3); \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{12} &= \frac{9}{4}(3Y_{112} - 3Y_{122} - Y_1 - Y_2); \\ \gamma_{13} &= \frac{9}{4}(3Y_{113} - 3Y_{133} - Y_1 - Y_3); \\ \gamma_{23} &= \frac{9}{4}(3Y_{223} - 3Y_{233} - Y_2 - Y_3); \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\beta_{123} = 27Y_{123} - \frac{27}{4}(Y_{112} + Y_{122} + Y_{133} + Y_{223} + Y_{233}) + \frac{9}{2}(Y_1 + Y_2 + Y_3). \quad (6)$$

Обсуждение результатов

Установлена одинаковая тенденция изменения микроструктуры у всех клеевых покрытий, оплавленных лучом лазера. С ростом скорости луча лазера она изменяется от литой равновесной до мелкой квазиэвтектической – как для покрытий без легирования, так и легированных ТаВ, МоВ и В₄С. Структуры оплавленных лазером клеевых покрытий, легированных В₄С, показаны на рис. 1.

Для ускоренных сравнительных испытаний материалов на износ при сухом трении использовали машину трения МТ-1 при линейной скорости вращения истирающего диска 2,3 м/с (угловая скорость 880 об/мин), нагрузке $P = 30-70$ Н, твердости диска 40–45 HRC. Время эксперимента 300 с.

По результатам проведенных экспериментов вычисляли интенсивности изнашивания для каждого случая по формуле

$$I_h = \frac{\Delta v}{A_t L_t} = \frac{A_t h}{A_t L_t} = \frac{H}{L_t} = \frac{b^2}{8rL_t}, \quad (1)$$

где I_h – интенсивность изнашивания пары трения; A_t – площадь поверхности трения; L_t – путь трения; b, r – длина и радиус лунки.

Математическую обработку полученных интенсивностей изнашивания проводили с помощью симплекс-метода. Исследуемая система содержала три варьируемых компонента (многокомпонентная обмазка состояла из ТаВ, МоВ и В₄С). Поэтому в качестве симплекса использовали модели третьего порядка.

Первая серия опытов состояла из девяти основных испытаний, вторая – из девяти основных и одного дополнительного опытов. Полученная модель учитывала взаимодействие следующих факторов:

$$Y_i = \sum_{i=1}^q \beta_i X_i + \sum_{i=1}^q \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^q \gamma_{ij} (X_i - X_j) + \sum_{i=1}^q \delta_{ijk} X_i X_j X_k, \quad (2)$$

где Y_i – параметры оптимизации; $\beta_{ij}, \gamma_{ij}, \delta_{ijk}$ – коэффициенты регрессии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов на параметры оптимизации; q – количество компонентов; X_i, X_j, X_k – (z_i) – кодированные уровни содержания компонентов; i, j, k – номер коэффициента модели, который совпадает с порядковым номером.

Для составления таблицы данных (матрицы планирования) определяли пределы изменения основных входных параметров, в качестве которых принимали содержание легирующих элементов в обмазке (табл. 1): $x_1 = z_1$ – содержание В₄С; $x_2 = z_2$ – содержание ТаВ; $x_3 = z_3$ – содержание МоВ.

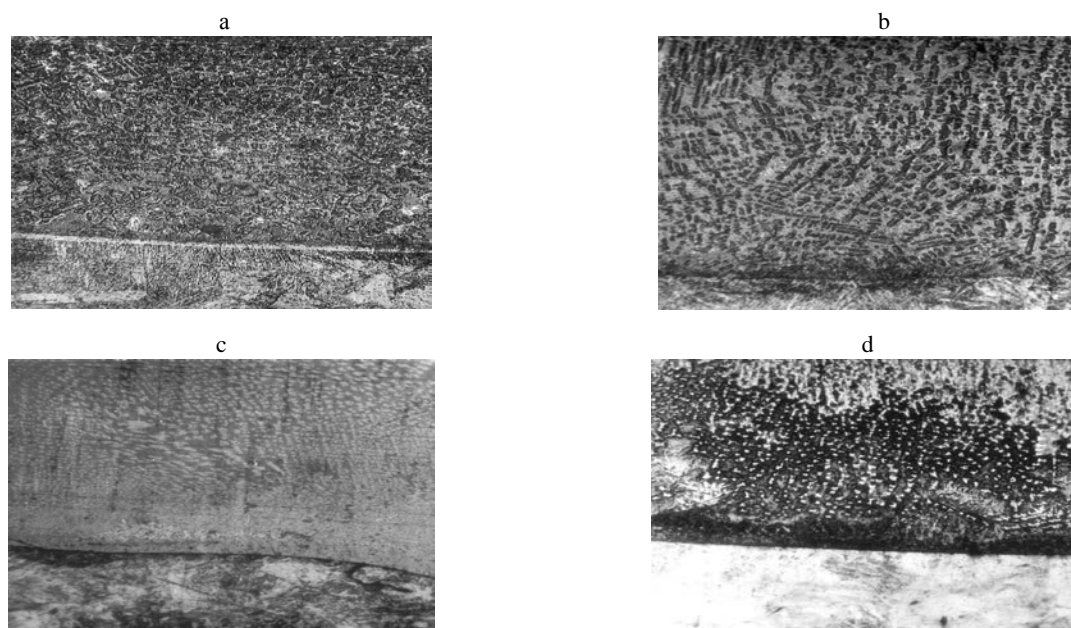


Рис. 1. Микроструктура покрытий, полученных оплавлением клеевого покрытия из порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф, легированного В₄С при скоростях луча лазера, м/с: а – $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ ($\times 400$); б – $v_2 = 1,67 \cdot 10^{-3}$ ($\times 400$); в – $v_3 = 3,33 \cdot 10^{-3}$ ($\times 400$); д – $v_4 = 5 \cdot 10^{-3}$ ($\times 400$)

Fig. 1. Microstructure of coatings obtained by fusion of adhesive coating while using powder ПР-Х4Г2Р4С2Ф, alloyed В₄С at laser beam speed, m/s: а – $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ ($\times 400$); б – $v_2 = 1,67 \cdot 10^{-3}$ ($\times 400$); в – $v_3 = 3,33 \cdot 10^{-3}$ ($\times 400$); д – $v_4 = 5 \cdot 10^{-3}$ ($\times 400$)

Рост скорости луча лазера вызвал следующие изменения микроструктуры: литая равновесная, дендритная, пересыщенная боридная и карбидо-боридная. С увеличением скорости луча лазера уменьшилось время, в течение которого произошло оплавление покрытия. Вследствие этого образуется пересыщенный твердый раствор, из которого при остывании покрытия выпадают бориды и карбиды в виде квазиэвтектики.

При скорости луча лазера $v_1 = 0,83 \cdot 10^{-3}$ м/с (рис. 1а) образовалась литая равновесная ячеистая структура с вкраплениями дендритов. Это свидетельствует о достаточно долгом пребывании покрытия в зоне лазерного облучения, приведшем к перераспределению элементов. Увеличение скорости до $v_2 = 1,67 \cdot 10^{-3}$ м/с (рис. 1б) привело к появлению дендритов 1-го и 2-го порядков, ориентированных под углом 45° в направлении теплоотвода. Дальнейший рост скорости луча лазера до v_3 (рис. 1с) привел к образованию пересыщенного твердого раствора, из которого выделились мелкодисперсные бориды и карбиды неправильной формы. Увеличение скорости луча лазера до v_4 (рис. 1д)

сократило время проплавления покрытия, вследствие чего из твердого раствора образовалась мелкодисперсная структура, состоящая из мелких карбидов и боридов. Более темная переходная зона говорит о недостаточном проплавлении покрытия с основой.

Интенсивность изнашивания клеевых покрытий, а также микротвердость являются основными показателями лазерного упрочнения [2–5]. С помощью формул (1)–(6) получены модели поверхностей отклика, позволяющие судить о степени влияния параметров X_1 – X_3 на микротвердость полученных лазерным легированием клеевых покрытий и интенсивность их изнашивания при различных усилиях P (табл. 2). По этим формулам найдена интенсивность изнашивания для всех 10 составов и определено, что наиболее износостойким является состав обмазки № 4, содержащий $2/3\text{В}_4\text{С}$ и $1/3\text{ТаВ}$ (табл. 2).

Во всех случаях интенсивность изнашивания зависела от скорости луча лазера, диаметра луча и коэффициента перекрытия лазерных дорожек и возрастала с увеличением нагрузки.

Уравнения регрессии для клеевых покрытий, легированных составом TaB + MoB + B₄CRegression equations for adhesive coatings alloyed by composition TaB + MoB + B₄C

Усилие $P, Н$	Уравнение регрессии	Количество веществ-упрочнителей	Интенсивность изнашивания, max
30	$Y_3 = 0,41X_1 + 0,52X_2 + 0,38X_3 + 0,135X_1X_2 + 0,27X_1X_3 - 0,023X_2X_3 - 1,85X_1X_2 \cdot (X_1 - X_2) + 0,405X_1X_3 \cdot (X_1 - X_3) - 2,003X_2X_3 \cdot (X_2 - X_3) + 11,7X_1X_2X_3$	2/3B ₄ C + 1/3TaB	0,34
50	$Y_5 = 0,44X_1 + 0,56X_2 + 0,6X_3 + 0,473X_1X_2 + 0,405X_1X_3 + 0,225X_2X_3 - 0,877X_1X_2 \cdot (X_1 - X_2) - 0,18X_1X_3 \cdot (X_1 - X_3) + 0,36X_2X_3 \cdot (X_2 - X_3) + 10,17X_1X_2X_3$	2/3B ₄ C + 1/3TaB	0,52
70	$Y_7 = 0,87X_1 + 0,92X_2 + 0,64X_3 - 0,99X_1X_2 - 0,0675X_1X_3 + 0,045X_2X_3 - 0,36X_1X_2 \cdot (X_1 - X_2) + 0,158X_1X_3 \cdot (X_1 - X_3) - 0,63X_2X_3 \cdot (X_2 - X_3) + 11,88X_1X_2X_3$	2/3B ₄ C + 1/3TaB	0,64
Микро- твер- дость	$Y = H_{\mu} = 12,14X_1 + 9,67X_2 + 8,04X_3 - 0,3X_1X_2 + 1,8X_1X_3 + 0,54X_2X_3$	1B ₄ C	$H_{\mu max} = 12,14 ГПа$

ВЫВОДЫ

1. Выявлено, что нет строгой корреляции между твердостью и интенсивностью изнашивания покрытий после лазерного легирования клеевых покрытий. Это свидетельствует о том, что упрочнение произошло не только за счет увеличения карбидо-боридной фазы, но и за счет упрочнения матрицы.

2. Регрессионная модель влияния состава обмазки на трибологические характеристики клеевых покрытий показала, что оптимальный состав многокомпонентной обмазки, обеспечивающий максимальную износостойкость покрытий, составляет 2/3B₄C и 1/3TaB.

3. Установлено, что упрочнение клеевого покрытия после лазерного легирования многокомпонентной обмазкой происходит за счет не только увеличения карбидо-боридной фазы, но и упрочнения матрицы.

4. Открываются новые возможности для повышения стойкости восстановленных режущих частей измельчительного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология лазерной обработки конструкционных и инструментальных материалов в авиадвигателестроении / Р. Р. Латыпов [и др.]. М.: Машиностроение, 2007. 240 с.
2. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюрлов. М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2008. 664 с.
3. Вакс, Е. Д. Практика прецизионной лазерной обработки / Е. Д. Вакс, М. Н. Миленький, Л. Г. Сапрыкин. Москва: Техносфера, 2013. 708 с.
4. Буснюк, Н. Н. Математическое моделирование: учеб. пособие / Н. Н. Буснюк, А. А. Черняк. Минск: Беларусь, 2014. 214 с.
5. Буснюк, Н. Н. Математическое моделирование: практикум / Н. Н. Буснюк, А. А. Черняк, Ж. А. Черняк. Минск: Беларусь, 2014. 295 с.
6. Матальцкий, М. А. Теория вероятностей, математическая статистика и случайные процессы: учеб. пособие / М. А. Матальцкий, Г. А. Хацкевич. Минск: Вышэйш. шк., 2012. 720 с.

7. Самарский, А. А. Математика. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. М.: Физ.-мат. лит-ра, 2005. 320 с.
8. Трусова, П. В. Введение в математическое моделирование / П. В. Трусова. М.: Логос, 2007. 440 с.
9. Черняк, А. А., Математическое программирование. Алгоритмический подход / А. А. Черняк, Ж. А. Черняк, Ю. М. Метельский. Минск: Вышэйш. шк., 2007. 352 с.
10. Юденков, В. А. Дисперсионный анализ / В. А. Юденков // Математическая статистика. Минск: Биосфера, 2013. 75 с.

Поступила 28.01.2016

Подписана в печать 04.03.2016

Опубликована онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. Latypov R. R., Teregulov N. G., Smyslov A. M., Lobanov A. V. (2007) *Technology of Laser Processing for Structural and Tool Materials in Aircraft Engine Manufacturing*. Moscow, Mashinostroyeniye. 240 (in Russian).
2. Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. (2008) *Technological Processes of Laser Processing*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University. 664 (in Russian).
3. Vaks E. D., Milenkii M. N., Saprykin L. G. (2013) *Practice of Precision Laser Processing*. Moscow, Tekhnosfera. 708 (in Russian).
4. Busnjuk N. N., Chernyak A. A. (2014) *Mathematical Simulation*. Minsk, Belarus. 214 (in Russian).
5. Busnjuk N. N., Chernyak A. A., Chernyak Zh. A. (2014) *Mathematical Simulation. Practical Course*. Minsk, Belarus. 295 (in Russian).
6. Matalytsky M. A., Khatskevich G. A. (2012) *Probability Theory, Mathematical Statistics and Stochastic Processes*. Minsk, Vysheysheyshaya Shkola. 720 (in Russian).
7. Samarsky A. A., Mikhailov A. P. (2005) *Mathematics. Mathematical Simulation. Ideas. Methods. Examples*. Moscow, Physical and Mathematical Literature. 320 (in Russian).
8. Trusova P. V. (2007) *Introduction to Mathematical Simulation*. Moscow: Publishing House "Logos". 440 (in Russian).
9. Chernyak A. A., Chernyak Zh. A., Metelsky Yu. M. (2007) *Mathematical Programming. Algorithmic Approach*. Minsk, Vysheysheyshaya Shkola. 352 (in Russian).
10. Yudenkov V. A. (2013) *Analysis of Variance*. Minsk, Biosphere. 75 (in Russian).

Received: 28.01.2016

Accepted: 04.03.2016

Published online: 26.09.2016