

Формирование пространства признаков для определения границ зерен структурных компонентов сплава по полихроматическому растровому изображению его микроструктуры

К.Ю. Андросов¹, А.Н. Горбунов¹, С.В. Давыдов¹
androkirl@yandex.ru|angor47@yandex.ru|davidov69@tu-bryansk.ru

¹Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

Поиск дефектов в сплаве может быть значительно облегчен, если имеется возможность определения формы зерен компонентов сплава путем анализа его микроструктуры по имеющемуся полихроматическому растровому изображению. В данной работе рассматриваются вопросы определения необходимого набора параметров для формирования пространства признаков по определению границ зерен, алгоритма поиска этих границ и выполнения операции по их сегментации.

Ключевые слова: сплав, границы зерен, микроструктура, полихроматическое растровое изображение, пространство признаков.

Formation of the feature space to determine the grain boundaries of the structural components of the alloy by the polychromatic raster image of its microstructure

K.Yu. Androsov¹, A.N. Gorbunov¹, S.V. Davydov¹
androkirl@yandex.ru|angor47@yandex.ru|davidov69@tu-bryansk.ru

¹Bryansk state technical University, Bryansk, Russia

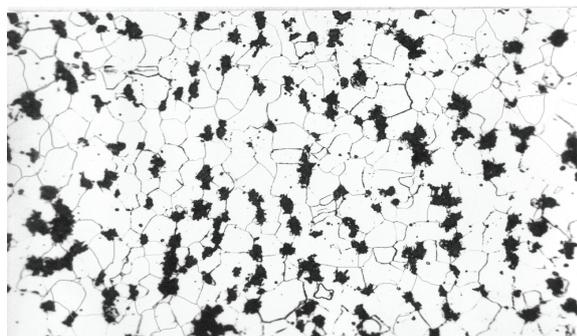
Search of defects in the alloy can be greatly facilitated if there is a possibility of determining the shape of the grains of the alloy components by the analysis of the microstructure according to available polychromatic raster image. In this paper, we consider the issues of determining the necessary set of parameters for the formation of the feature space to determine grain boundaries, the algorithm for finding these boundaries and perform operations on their segmentation.

Keywords: alloy, grain boundaries, microstructure, polychromatic raster image, feature space.

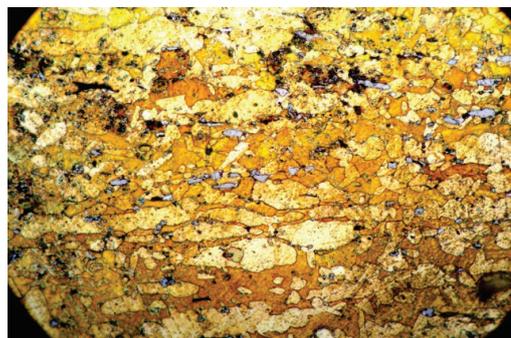
1. Введение

Наличие структурных дефектов в сплаве, таких как газовые поры, неметаллические включения, зоны усадки, микротрещины, можно определить, осуществляя анализ его микроструктуры по имеющемуся полихроматическому растровому изображению путем определения формы зерен фаз и структурных элементов, формирующих структурный состав сплава. Для этого необходимо сформировать пространство признаков, характеризующих зерно по некоторому ряду параметров, определить границы зерна и его конфигурацию. Схожие по конфигурации зерна объединяются в сегменты, формирующие различные области в структуре сплава. Отличия в конфигурации сегментов друг от друга дают возможность определять наличие и место расположения дефектов в структуре сплава.

В зависимости от типа сплава металлографическое изображение является ключевым носителем информации либо в виде черно-белой структуры (рис. 1а), либо в виде цветowego изображения структурных компонентов сплава (рис. 1б).



(а)



(б)

Рис. 1. Структурное (а) и цветовое (б) изображение сплава (а – ковкий ферритный чугун, x100, б – бронза, x100).

Приведенные изображения получены при фотографировании структуры сплавов с помощью стационарного металлографического инвертированного микроскопа Leica DM13000M, который позволяет рассматривать непрозрачные тела в отраженном свете. Таким образом, возникает проблема выбора алгоритма сегментации в равной степени применимого для обоих типов изображений. В связи с этим необходимо построить объединенное структурно-цветовое пространство, являющееся объединением двух более простых пространств – цветowych и структурных признаков [1].

2. Построение структурного пространства признаков

Исходные металлографические изображения, с которыми предстоит работать, представлены в формате BMP, и цветowe характеристики каждого пикселя представлены в обычном RGB пространстве. Для

качественного описания характеристик цвета необходимо учитывать не только характеристики основных цветов (Red, Green, Blue – красный, зелёный, синий), но и характеристики яркости (светлоты) и цветности (тона и насыщенности). Поэтому в работе будет использовано цветовое пространство CIE Lab. Преобразование координат из пространства RGB в CIE Lab организуется путем цепочки последовательных преобразований цветовых пространств: из RGB в CIEXYZ, из CIEXYZ в CIE Lab [2].

Для перевода из RGB в CIEXYZ воспользуемся следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} X &= 0.412453 * r + 0.357580 * g + 0.180423 * b, \\ Y &= 0.212671 * r + 0.715160 * g + 0.072169 * b, \\ Z &= 0.019334 * r + 0.119193 * g + 0.950227 * b \end{aligned} \right\} (1),$$

где r, g, b координаты характеристик для отдельно взятого пикселя в цветовом пространстве RGB, расчет проводится для каждого пикселя изображения. Далее рассчитываются непосредственно яркостная – L и хроматические составляющие – a, b по формулам:

$$L = \begin{cases} \sqrt[3]{116 * Y/Y_n} - 16, & Y/Y_n > 0.008856; \\ 903.3 * \frac{Y}{Y_n}, & \frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856; \end{cases} (2)$$

$$a = \begin{cases} 500 * (\sqrt[3]{X/X_n} - \sqrt[3]{Y/Y_n}), & \frac{Y}{Y_n} > 0.008856 \wedge \frac{X}{X_n} > 0.008856; \\ 500 * [f(X/X_n) - f(Y/Y_n)], & \frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856 \vee \frac{X}{X_n} \leq 0.008856; \end{cases} (3)$$

$$b = \begin{cases} 200 * (\sqrt[3]{Y/Y_n} - \sqrt[3]{Z/Z_n}), & \frac{Y}{Y_n} > 0.008856 \wedge \frac{X}{X_n} > 0.008856; \\ 200 * [f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)], & \frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856 \vee \frac{X}{X_n} \leq 0.008856; \end{cases} (4)$$

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = 7.87 * \frac{Y}{Y_n} - \frac{16}{116}; \quad (5)$$

$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) = 7.87 * \frac{X}{X_n} - \frac{16}{116}; \quad (6)$$

$$f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = 7.87 * \frac{Z}{Z_n} - \frac{16}{116}; \quad (7)$$

где: X_n, Y_n, Z_n показатели трех основных цветов в CIEXYZ пространстве, взятые как белый эталон. В работе будет использоваться эталон белого цвета D_{65} [2].

Для построения структурного пространства признаков, определяющих границы зерен сплава, будем использовать оценку локальной изменчивости изображения по нескольким направлениям для разных локальных масштабов, вычисляемую для каждой точки изображения на основе локальной вариации v и локального изменения градиента g вдоль выбранных направлений и масштабов. В качестве анализируемой информации будут использованы значения яркости L , вычисляемые по формуле (2). Рассмотрим непосредственно вычисление признаков принадлежности точки изображения (пикселя) к соответствующей структуре.

Сначала рассмотрим вычисление признака принадлежности пикселя к соответствующей структуре для единичного масштаба (расстояние между двумя соседними пикселями). Рассмотрим отрезок длиной $2L$, централизованный в точке (m, n) под углом $\alpha = k\pi/K$, где $k \in \overline{0, K-1}$. На этом отрезке равномерно отложим $2L + 1$ точек, и каждой из этих точек $i \in \overline{-L, L}$ присвоим значение x_i , равное значению ближайшей точки изображения.

Пусть $d_i = x_{i+1} - x_i$ есть разница между двумя соседними точками разбиения на отрезке, т.е. является градиентом в точке i по направлению отрезка. Далее вычисляются взвешенные суммы подъемов v^+ и спусков v^- яркости вдоль направления отрезка по формулам (8), (9). Для этого в качестве весовой функции для каждого значения d_i будет рассчитываться функция q_i , вычисляемая по формуле (10).

$$v^+ = \sum_{i=-L}^{L-1} q_i d_i, \text{ если } d_i \geq 0; \quad (8)$$

$$v^- = \sum_{i=-L}^{L-1} q_i (-d_i), \text{ если } d_i < 0; \quad (9)$$

$$q_i = \cos\left(\frac{i\pi}{2L}\right) / \sum_{i=-L}^L \cos\left(\frac{i\pi}{2L}\right). \quad (10)$$

Для подавления влияния контурных перепадов на значение локальной вариации по направлению из двух оценок взвешенных значений подъемов и спусков яркости выбирается наименьшее:

$$v_k = \min(v^+, v^-). \quad (11)$$

Значение изменения локального градиента g_k определяется как число перемен знака градиента d_i для $i \in \overline{-L, L}$ на выбранном отрезке, при условии что $d_i > \varepsilon$, где ε – выбранный порог чувствительности.

Произведение изменения локального градиента на значение локальной вариации по направлению k дает локальное значение структурного признака пикселя по выбранному направлению:

$$t'_k = g_k v_k. \quad (12)$$

Для выравнивания значений признаков высоко и мало контрастных структур можно использовать функцию гиперболического тангенса

$$t_k = \tanh(t'_k), \quad (13)$$

значение t_k будем считать структурным признаком по направлению k в соответствующей точке изображения. Такие значения рассчитываются для каждого направления $k \in \overline{0, K-1}$, а так как структура, очевидно, является масштабно зависимой характеристикой, то и для всех масштабных уровней S .

Расчет структурных признаков для масштабов различного уровня необходим с целью искусственного выделения микро- и макроструктурных компонентов сплава. Для решения указанной задачи требуется установление структурных признаков компонентов сплава, которые соответствуют дифференцированным пространственным частотам. Для расчета значений структурных признаков для разных масштабов можно воспользоваться формулами (4)-(9), для этого необходимо взять отсчеты с другим шагом, т.е. при сохранении числа точек, равном $2L - 1$, необходимо соответствующим образом изменить размер самого отрезка. Теоретически, увеличив размер отрезка в 2^n раз, можно учесть в 2^n раз больше низких частот, влияние которых можно ослабить применением сглаживающих фильтров.

Таким образом, по формулам (8)-(13) для каждой точки изображения по всем выбранным направлениям $k \in \overline{0, K-1}$ и масштабам $1, 2^1, \dots, 2^{S-1}$ можно вычислить значения структурного признака, где K и S общее число направлений и масштабов соответственно, т.е. структурный признак будет иметь значение:

$$t'^s_k = v^s_k g^s_k; \quad (14)$$

$$t^s_k = \tanh(av^s_k g^s_k), \quad (15)$$

где v^s_k и g^s_k значения локальной вариации и изменения локального градиента масштаба s по направлению k , а общее число рассчитываемых структурных признаков для точки изображения будет равным $K * S$.

Если в качестве K и S использовать значения $S = 4$ и $K = 4$, то для каждой точки будет рассчитываться 16 значений структурных признаков. Дальнейшее увеличение числа масштабов и направлений приведет к неоправданному увеличению вычислительной нагрузки при реализации.

Объединив полученные значения структурных признаков и признаков цвета для точки изображения,

получим вектор признаков изображения, а в совокупности эти векторы образуют объединенное структурно-цветовое пространство признаков.

3. Метрика в объединенном структурно-цветовом пространстве признаков

Важнейшим аспектом задачи сегментации является вопрос о близости соседних элементов, т. е. вопрос о метрике в пространстве признаков. Поскольку используемое в работе пространство является объединением пространства цветовых и структурных признаков, то для каждого из них будет выбрана своя метрика, которая затем объединяется в единую структурно-цветовую метрику, как это сделано в работе [3].

Структурная метрика будет задаваться формулой:

$$\rho(x, y) = \sum_{s=1}^S \omega^s \sum_{k=0}^{K-1} |t_k^s(x) - t_k^s(y)|, \quad (16)$$

где x, y – две точки структурного пространства, $t_k^s(x)$ и $t_k^s(y)$ значения структурных признаков в этих точках по направлениям и масштабам k, s , а ω^s весовой коэффициент соответствующего масштаба S .

В качестве цветовой метрики будет использована метрика CIEDE2000. Данная метрика предполагает использование цветового пространства CIE Lab.

Рассмотрим подробнее эту метрику. Возьмем две точки $L_1^* a_1^* b_1^*$ и $L_2^* a_2^* b_2^*$ (рис. 2) в пространстве цветовых признаков, описанном выше. Цветовое различие (метрика) между этими двумя точками обозначим как:

$$\Delta E_{00}(L_1^* a_1^* b_1^*, L_2^* a_2^* b_2^*) = \Delta E_{00}^{12} = \Delta E_{00}. \quad (17)$$

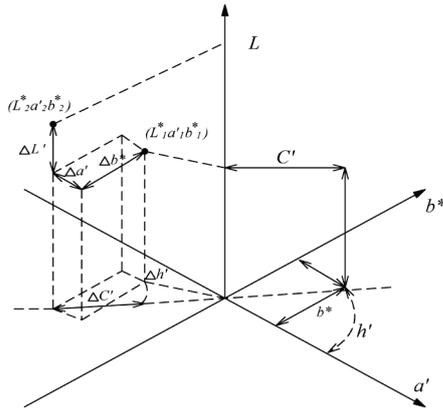


Рис. 2. Геометрическое представление значений, вычисляемых в CIEDE2000.

Вычисление ΔE_{00} можно разделить на 3 основных шага:

1. Вычисление значений C_i' и h_i' , где модифицированный оттенок h_i' вычисляется по формуле (23) и представляет собой угловую координату точки (a_i', b_i') в двумерной плоскости $a'-b^*$, взятую от положительной оси a' (рис. 2). Так как большинство языков программирования при вычисления арктангенса возвращают значение в радианах, а для дальнейших расчетов нам необходимы значения в градусах, то в приведенных формулах учитывается перевод значений.

$$C_{i,ab}^* = \sqrt{(a_i^*)^2 + (b_i^*)^2} \quad i = 1,2; \quad (18)$$

$$\bar{C}_{i,ab}^* = \frac{C_{i,ab}^* + C_{2,ab}^*}{2}; \quad (19)$$

$$G = 0.5 \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}_{ab}^{*7}}{\bar{C}_{ab}^{*7} + 25^7}} \right); \quad (20)$$

$$a_i' = (1 + G) a_i^*, \quad i = 1,2; \quad (21)$$

$$C_i' = \sqrt{(a_i')^2 + (b_i^*)^2}, \quad i = 1,2; \quad (22)$$

$$h_i' = \begin{cases} 0, & a_i' = b_i^* = 0 \\ \tan^{-1}(b_i^*/a_i'), & a_i' \neq 0, b_i^* \neq 0 \end{cases} \quad i = 1,2. \quad (23)$$

2. Далее вычисляются значения $\Delta L', \Delta C', \Delta h'$ по формулам (24), (25), (27) соответственно. Геометрическая интерпретация $\Delta L', \Delta C'$ представлена на рис. 2.

$$\Delta L' = L_2^* - L_1^*; \quad (24)$$

$$\Delta C' = C_2' - C_1'; \quad (25)$$

$$\Delta h' =$$

$$\begin{cases} 0 & C_1' C_2' = 0 \\ h_2' - h_1' & C_1' C_2' \neq 0; |h_2' - h_1'| \leq 180^\circ \\ h_2' - h_1' - 360 & C_1' C_2' \neq 0; (h_2' - h_1') > 180^\circ \\ h_2' - h_1' + 360 & C_1' C_2' \neq 0; (h_2' - h_1') < -180^\circ \end{cases} \quad (26)$$

$$\Delta h' = 2\sqrt{C_1' C_2'} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right). \quad (27)$$

3. На третьем шаге вычисляется непосредственно значение цветового различия ΔE_{00} . Для этого вычисляются поправки на яркость S_L , тон S_H , и насыщенность S_C по формулам (34)-(36). Значение цветового различия двух точек $(L_1^* a_1^* b_1^*)$ и $(L_2^* a_2^* b_2^*)$ будет вычисляться по формуле (38), где k_L, k_C, k_H весовые коэффициенты, позволяющие усилить или ослабить влияние нужных цветовых компонент на значение цветового отличия.

$$\bar{h}' =$$

$$\begin{cases} h_2' + h_1' & C_1' C_2' = 0 \\ \frac{(h_2' + h_1')}{2} & C_1' C_2' \neq 0; |h_1' - h_2'| \leq 180^\circ; \\ h_2' + h_1' + 360 & C_1' C_2' \neq 0; |h_1' - h_2'| > 180^\circ; h_1' + h_2' < 360^\circ \\ h_2' - h_1' - 360 & C_1' C_2' \neq 0; |h_1' - h_2'| > 180^\circ; h_1' + h_2' \geq 360^\circ \end{cases} \quad (28)$$

$$\bar{L}' = \frac{L_1^* + L_2^*}{2}; \quad (29)$$

$$\bar{C}' = \frac{C_1^* + C_2^*}{2}; \quad (30)$$

$$T = 1 - 0.17 \cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{h}') + 0.32 \cos(3\bar{h}' + 6^\circ) - 0.20(4\bar{h}' + 63^\circ); \quad (31)$$

$$\Delta\theta = 30 \exp\left\{-\left[\frac{\bar{h}' + 275^\circ}{25}\right]^2\right\}; \quad (32)$$

$$R_C = 2\sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}}; \quad (33)$$

$$S_L = 1 + \frac{0.015(L' - 50)^2}{\sqrt{20 + (L' - 50)^2}}; \quad (34)$$

$$S_C = 1 + 0.045\bar{C}'^7; \quad (35)$$

$$S_H = 1 + 0.015\bar{C}'^7 T; \quad (36)$$

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta) R_C; \quad (37)$$

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta h'}{k_H S_H}\right)}. \quad (38)$$

Таким образом, получив формулы структурной и цветовой метрик, можно задать формулу объединенной структурно-цветовой метрики. В работе она будет определяться как взвешенная сумма расстояний (метрик) в структурном и цветовом пространстве признаков и вычисляться по формуле:

$$D(x, y) = \omega_c \rho(x, y) + \omega_t \Delta E_{00}(x, y) \quad (39),$$

где ω_c, ω_t значения, определяющие весовые коэффициенты для цветовой и структурной метрик.

На основании полученных признаков строятся алгоритмы поиска границ зерен и выполнения операции по их сегментации для получения структуры сплава и дифференциации его структурных компонентов на предмет выявления областей с дефектами. Поиск дефектов производится путем сравнения конфигурации выделенных в процессе обработки зерен, образующих отдельные сегменты. На рис. 1б в центре рисунка отчетливо виден слой зерен вытянутой и уплощенной конфигурации, которые резко отличаются от остальных.

4. Результаты

Практическим результатом данной работы стало программное средство, реализующее метод сегментации, построенный на основании рассмотренного алгоритма. В качестве среды разработки используется Microsoft Visual Studio 2015. В качестве языка программирования для данной разработки был выбран язык C#. Тестирование проводилось на тестовых исходных металлографических изображениях (рис. 3) разрешением 1980 × 960 пикселей. Так как предложенный метод предполагает работу с большим количеством параметров, что требует значительных вычислительных мощностей, и, в частности, использования параллельных вычислений, предложенный метод сегментации был протестирован в усеченном варианте, т.е. с использованием несколько ограниченного пространства признаков и упрощенной метрики. Тем не менее, в таком варианте программное средство показало удовлетворительные результаты с точки зрения металлографии, (рис. 3 и рис. 4).

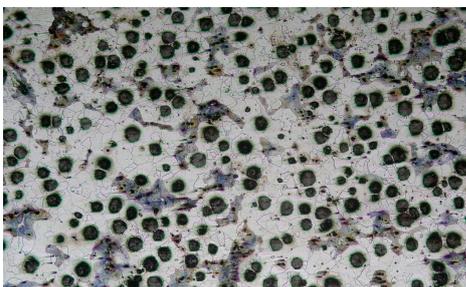


Рис. 3. Исходное тестовое металлографическое изображение (высокопрочный феррито-перлитный чугун, $\times 100$).

На рис. 4 представлены результаты сегментации изображения рис. 3 разработанным в данной работе методом.

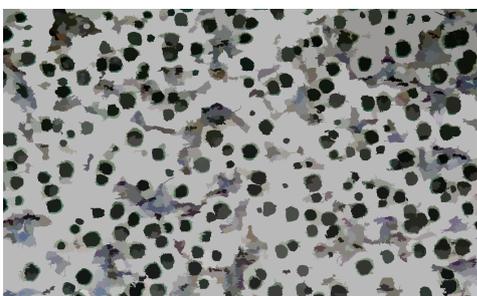


Рис. 4. Изображение, сегментированное разработанным методом.

Сравнение изображений показывает, что наблюдается общая тенденция укрупнения сегментов, вызванная слиянием более мелких областей с более крупными соседями.

5. Заключение

Предлагаемый алгоритм сегментации показал хорошие результаты на металлографических изображениях со сложной структурой. Это стало возможным благодаря использованию комбинированного структурно-цветового построения пространства признаков. Однако во время экспериментальной проверки метода были выявлены и недостатки этого подхода. Наиболее существенным из них стала большая вычислительная сложность, как самих признаков, так и меры в пространстве признаков.

Обработка рассмотренного в работе изображения занимала порядка 40 секунд на 4-х ядерном компьютере с

тактовой частотой 2,6 ГГц. В дальнейшем для решения задачи в полном объеме планируется использовать кластер параллельных вычислений, созданный на базе учебной лаборатории кафедры И и ПО БГТУ.

В результате комплексного исследования данных проблем были выявлены следующие узкие места алгоритма, приводящие к указанным выше проблемам:

1. Сложность расчета признаков структуры для каждого пикселя. Так как для каждого пикселя вычисляются не менее шестнадцати таких признаков, то в масштабах небольшого изображения разрешением 1980×960 их количество достигает 30412800.
2. Сложность используемой цветовой меры близости. Метрика CIEDE2000 (используемая в алгоритме) является наиболее совершенной на текущий момент мерой близости для цветового пространства CIE Lab, но и одновременно является наиболее сложной для вычислений.
3. Необходимость разработки процедуры выделения на сегментированной структуре дефектных зон, отличающихся по своим пространственным признакам от структурных бездефектных зон компонентов сплава. В дальнейшем представляются следующие пути развития описанного метода сегментации, при сохранении общей идеи:
 1. Для упрощения расчетов признаков структуры предполагается несколько путей развития, такие как: применение более рациональных алгоритмов для расчета признаков масштаба большего, чем единичный; введение усредненного признака структуры.
 2. Для решения проблем сложности используемой меры близости предполагается два пути. Первый – использование более простой меры близости в том же цветовом пространстве. Второй – отказ от пространства CIE Lab и поиск иного пространства цветовых признаков, и меры в нем.

6. Литература

- [1] Fukunaga, K. The Estimation of the Gradient of a Density Function, with Applications in Pattern Recognition / Fukunaga K., Hostetler L.D. // IEEE Trans. Information Theory. – 1975. – № 21. – С. 32-40.
- [2] Андросов К.Ю., Горбунов А.Н. Обработка цифрового изображения микроструктуры сплава для идентификации его структурных составляющих / Вестник образовательного консорциума Среднерусский университет. Серия: Информационные технологии. – 2015. – № (6) – С. 11-14.
- [3] Чочиа, П.А. Пирамидальный алгоритм сегментации изображений / Чочиа П.А. // Информационные процессы. – 2010. – №1. – С. 23-30.

Об авторах

Андросов Кирилл Юрьевич, аспирант кафедры «Информатика и программное обеспечение» Брянского государственного технического университета. Его e-mail androkirl@yandex.ru.

Горбунов Александр Николаевич, к.т.н. доцент кафедры «Информатика и программное обеспечение» Брянского государственного технического университета. Его e-mail angor47@yandex.ru.

Давыдов Сергей Васильевич, д.т.н., профессор кафедры «Триботехническое материаловедение и технология материалов» Брянского государственного технического университета. Его e-mail davidov69@tu-bryansk.ru.