

УДК 620.18

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 20

© В. А. Ким, О. В. Башков, А. А. Попкова¹*Статья поступила 10 февраля 2015 г.*

Изложена методика цветовой сегментации изображения микроструктур как элемента компьютерной металлографии, раскрывающая широкие возможности структурного анализа. На примере структурных изменений стали 20 при пластической деформации показано практическое приложение цветовой сегментации, позволяющее разделять микроструктурные объекты по их структурно-энергетическому состоянию.

Ключевые слова: микроструктура; компьютерная металлография; цветовая сегментация; плотность границ; дефекты кристаллического строения; свободная энергия; химический потенциал.

Структурные изменения при пластической деформации носят многоуровневый характер и в первую очередь проявляются в зонах микро- и мезомасштабных концентраторов напряжений. При малых степенях пластической деформации визуальный анализ изображений микроструктур, полученных с помощью оптической микроскопии, не позволяет идентифицировать подобные изменения, но они могут быть выявлены с помощью компьютерной обработки с использованием алгоритма цветовой сегментации и количественных показателей структурной организации материала.

Изображение микроструктуры представляет срез объемного строения материала в плоскости металлографического шлифа. С формальной точки зрения это набор точечных, линейных и плоскостных геометрических фигур разных форм и размеров. При таком отображении микроструктуры все ее составляющие теряют одну единицу мерности, т.е. нуль-, одно- и двухмерные объекты в реальности линейные, двух- и трехмерные соответственно.

Компьютерная обработка изображений микроструктур традиционно сводилась к вычислению геометрических характеристик ее составляющих, в частности, периметра, площади, максимального и минимального диаметров двухмерных объектов, фрактальной размерности линейных образований и общего количества точечных элементов. Полученные значения в дальнейшем использовались для вычисления различных комплексных показателей, характеризующих структурную организацию материала [1 – 5].

Идентификацию структурных составляющих чаще всего осуществляют химическим или электрохимическим травлением зеркальной поверхности металлографического шлифа. При травлении на поверхности шлифа образуются пленочные химические

соединения, состав которых зависит от строения и химического состава структурного объекта, или развитый рельеф, вызванный растворением или осаждением продуктов реакции. Каждая структурная составляющая в результате цветовой интерференции приобретает свой индивидуальный цвет с определенной глубиной оттенка и отражательной способностью [6].

Если результат травления — изменение шероховатости, то глубину или высоту рельефа можно оценить по степени темно-серого оттенка, создаваемого тенью и полутенями. Для более точного анализа состояния поверхности рекомендуется рассматривать металлографический шлиф в светлом и темном полях. В последнем случае получается негативное изображение.

Большие возможности структурного анализа материала заложены в алгоритме цветовой сегментации, позволяющей идентифицировать микроструктурные составляющие по глубине цветовых оттенков. Алгоритм цветовой сегментации заложен во многих программах обработки изображений и заключается в следующем [7]. При правильном выборе состава реактива и метода травления структурные компоненты с более высокой свободной энергией подвержены большему изменению рельефа, а образованная в результате травления поверхность обладает меньшей светоотражательной способностью [6]. На изображениях микроструктур, снятых в светлом поле, структурные составляющие с высокой свободной энергией приобретают большую глубину темно-серого оттенка.

Большинство программ обработки изображений включают алгоритмы цветовой сегментации, позволяющие ранжировать объекты изображения по глубине цветовых оттенков. Для описания уровня серого цвета в восьмиразрядном полутоновом изображении принято, что простой черный цвет имеет 0 пикселей, а простой белый — 1. Различная глубина серого оттенка обеспечивается сочетанием черного и белого цветов или комбинацией 0 и 1 в пределах 256 пиксе-

¹ Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия;
e-mail: kmtnm@knastu.ru

лей. Для более точного ранжирования глубины темно-серого оттенка можно применять разложение изображения на цветовые каналы (красный, синий и зеленый) с последующей обработкой каждого полученного изображения по алгоритму полутоновой сегментации [7]. Следовательно, объекты на изображениях, выявленные в области темно-серых оттенков с низким числом пикселей, представляют собой микроструктуры, подвергающиеся более глубокому травлению, т.е. обладающие высокой исходной величиной свободной энергии.

В работе представлена методика обработки изображений микроструктур с помощью алгоритма цветовой сегментации, значительно расширяющая возможности компьютерной металлографии, а также приведены результаты практического приложения этой методики при исследовании структурных изменений низкоуглеродистой стали 20 в результате пластической деформации.

Методика исследования. Цилиндрические образцы диаметром 5 и длиной рабочей части 125 мм подвергали растяжению на универсальной испытательной машине INSTRON-3382 до разной степени пластической деформации. Металлографические шлифы изготавливали по традиционной методике, включающей шлифование и полирование на автоматическом станке AutoMet 250 и последующее травление 4,0 %-ным раствором азотной кислоты в спирте.

Микроструктуру в поперечном сечении образцов исследовали с помощью металлографического микроскопа «Микро-200» при 400-кратном увеличении. Обработку изображений осуществляли специальной программой Image.Pro.Plus.5.1. Исследуемые изображения микроструктур предварительно корректировали по резкости и подвергали пространственной калибровке. Цветовую сегментацию проводили без разложения на цветовые каналы, для чего шкалу глубин темно-серого цвета разделили на пять интервалов по 51 пикселю. Границы интервалов глубин темно-серого цвета и их средние значения приведены в таблице.

В каждом интервале снимали контрастную маску. В результате исходное изображение микроструктуры раскладывалось на пять снимков. По изображениям контрастных масок рассчитывали количество (N) всех микрообъектов, зафиксированных на одной фотографии, площадь (F_i) и периметр (P_i) каждого из них. Полученные значения использовали для вычисления средней плотности границ (q_{cp}) и средней площади микроструктурных объектов (f_{cp}):

$$q_{cp} = \frac{1}{F_{\phi}} \sum_{i=1}^N P_i, \quad f_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i,$$

где F_{ϕ} — площадь металлографического шлифа, зафиксированная на одном снимке (при 400-кратном увеличении составляла 32 800 мкм²).

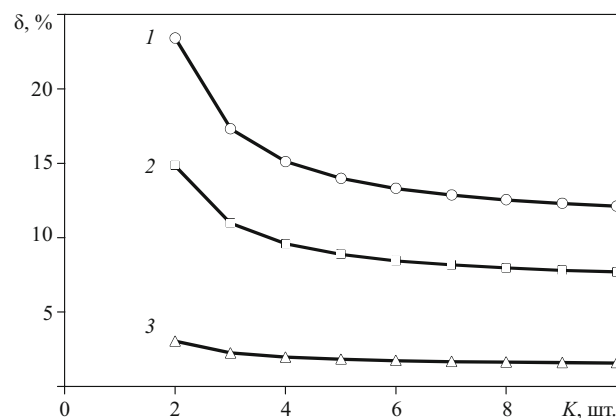


Рис. 1. Относительная погрешность компьютерной обработки изображений микроструктур δ при доверительной вероятности $p = 0,95$ в зависимости от количества изображений K : 1 — общее число N ; 2 — суммарная длина периметров ΣP_i ; 3 — суммарная площадь ΣF_i микроструктурных объектов на одной микрофотографии

Точность компьютерного анализа изображений оценивали с помощью критерия Стьюдента. Для этого использовали выборку из 10 фотографий исходных микроструктур стали 20, а в качестве параметров для статистического анализа приняли суммарную длину границ ΣP_i , площадь ΣF_i всех микроструктурных объектов и их количество N , зафиксированные на одном снимке. Относительную погрешность определяли по формуле [8]:

$$\delta = \frac{st_p}{M} \cdot 100\%,$$

где s — дисперсия; t_p — критерий Стьюдента при заданной доверительной вероятности; M — математическое ожидание.

Результаты статистической обработки представлены на рис. 1. При определении общей численности микроструктурных объектов на одной фотографии (N) погрешность максимальна, поэтому этот параметр при дополнительном анализе структурной организации материала можно использовать только с оговорками. При определении суммарных значений периметра и площади микроструктурных объектов допустимая относительная погрешность составляла 5 – 15 % при выборке из 2 – 3 микрофотографий одной и той же структуры, поэтому эти показатели в дальнейших исследованиях использовали без ограничений.

Результаты исследования и их анализ. На рис. 2 приведены микроструктуры исследуемых образцов в

Границы участков темно-серых оттенков и их средние значения в пикселях

Параметры	Диапазон				
	1	2	3	4	5
Границы диапазона	0/51	52/103	104/155	156/207	208/259
Среднее значение	25	77	129	181	233

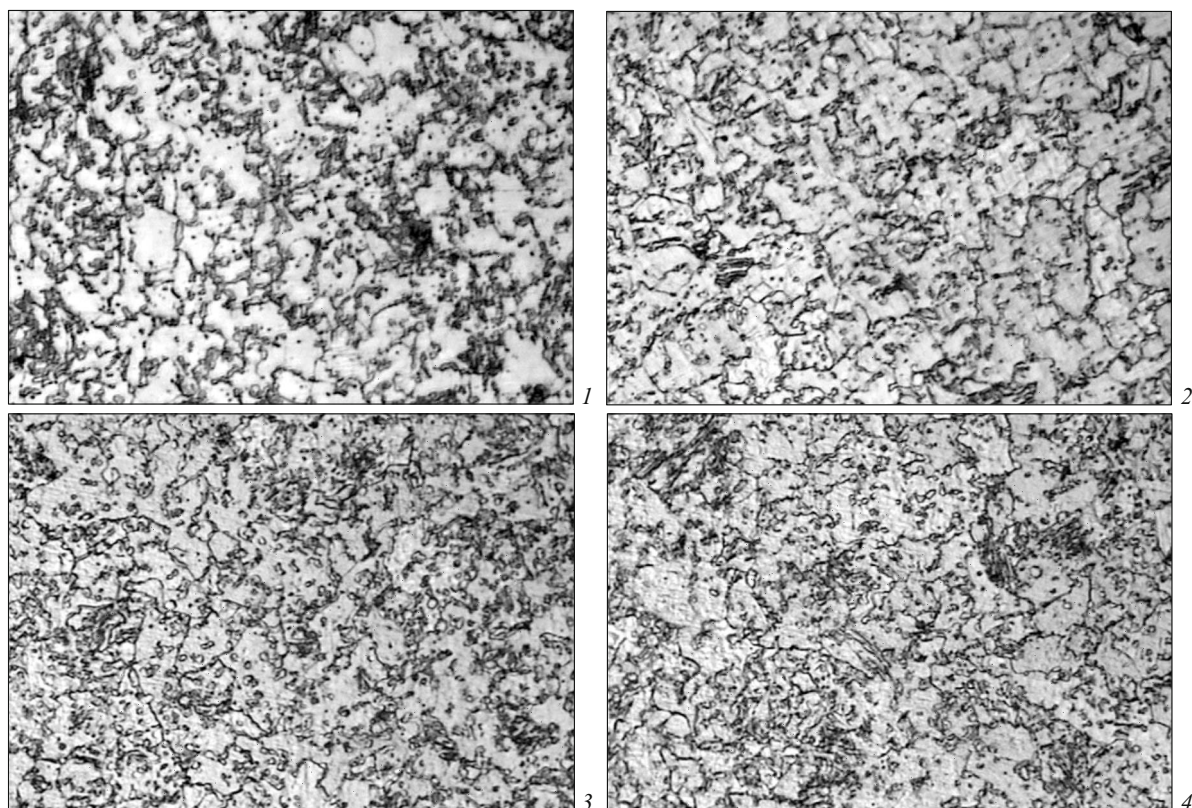


Рис. 2. Микроструктуры образцов из стали 20: 1 — исходное состояние; 2–4 — степени деформации ε , равные 0,05, 0,2 и 0,3 соответственно

исходном состоянии и после пластической деформации. Сравнительный анализ показывает, что микроструктуры в поперечном сечении, сформированные при растяжении, мало отличаются от исходного состояния, так как деформационные изменения зеренной структуры более выражены в продольном сечении образцов. Тем не менее незначительное уменьшение размеров зерен и повышение плотности точечных образований заметны при степени деформации $\varepsilon > 0,2$.

На рис. 3 приведены контрастные маски исследуемых микроструктур с различной глубиной темно-серого оттенка, разложенных с помощью цветовой сегментации. При этом в 1-м диапазоне были зафиксированы микроструктуры, подверженные более активному травлению, т.е. характеризующиеся повышенной величиной свободной энергии, а в 4-м — пониженной.

Микроструктуры, идентифицированные на контрастных масках, состоят из точечных объектов, объединенных в колонии с разной степенью упорядоченности. Линейные объекты включают совокупности точечных образований, выстроенных в ряд. Поверхностные двумерные объекты представляют собой фигуры с замкнутыми границами раздела, при этом сами границы также состоят из точечных образований. Внутри поверхностных объектов выявлено незначительное количество неоднородно распределенных точечных образований. Следовательно, точечные структурные образования преимущественно концентрируются по границам зерен.

Количество точечных объектов в зависимости от их цветового оттенка достигает максимума во 2-м и 3-м диапазонах глубин темно-серого оттенка (см. рис. 3). С повышением степени пластической деформации количество точечных объектов увеличивается. Можно предположить, что большая часть точечных структур, сформированных пластической деформацией, представляет собой пересечение вновь образованных дислокаций с плоскостью металлографического шлифа, а алгоритм цветовой сегментации следует рассматривать как методику косвенной оценки активности генерации дислокаций.

Средняя площадь точечных объектов варьируется от 0,2 до 1,4 мкм² (рис. 4, а), достигая (в зависимости от исходной величины свободной энергии объектов) максимума во 2-м диапазоне глубин темно-серого оттенка. Особенно ярко это выражено в случае исходного состояния. С повышением степени пластической деформации размеры точечных объектов снижаются. Количество микроструктурных объектов обратно пропорционально их средней площади. Следовательно, с повышением степени пластической деформации количество точечных объектов возрастает.

Структурная организация точечного образования определяется микромасштабным концентратором напряжения и размером поля упругих напряжений вокруг него. Увеличенная площадь точечных образований на изображении исходной недеформированной микроструктуры обусловлена малым количеством

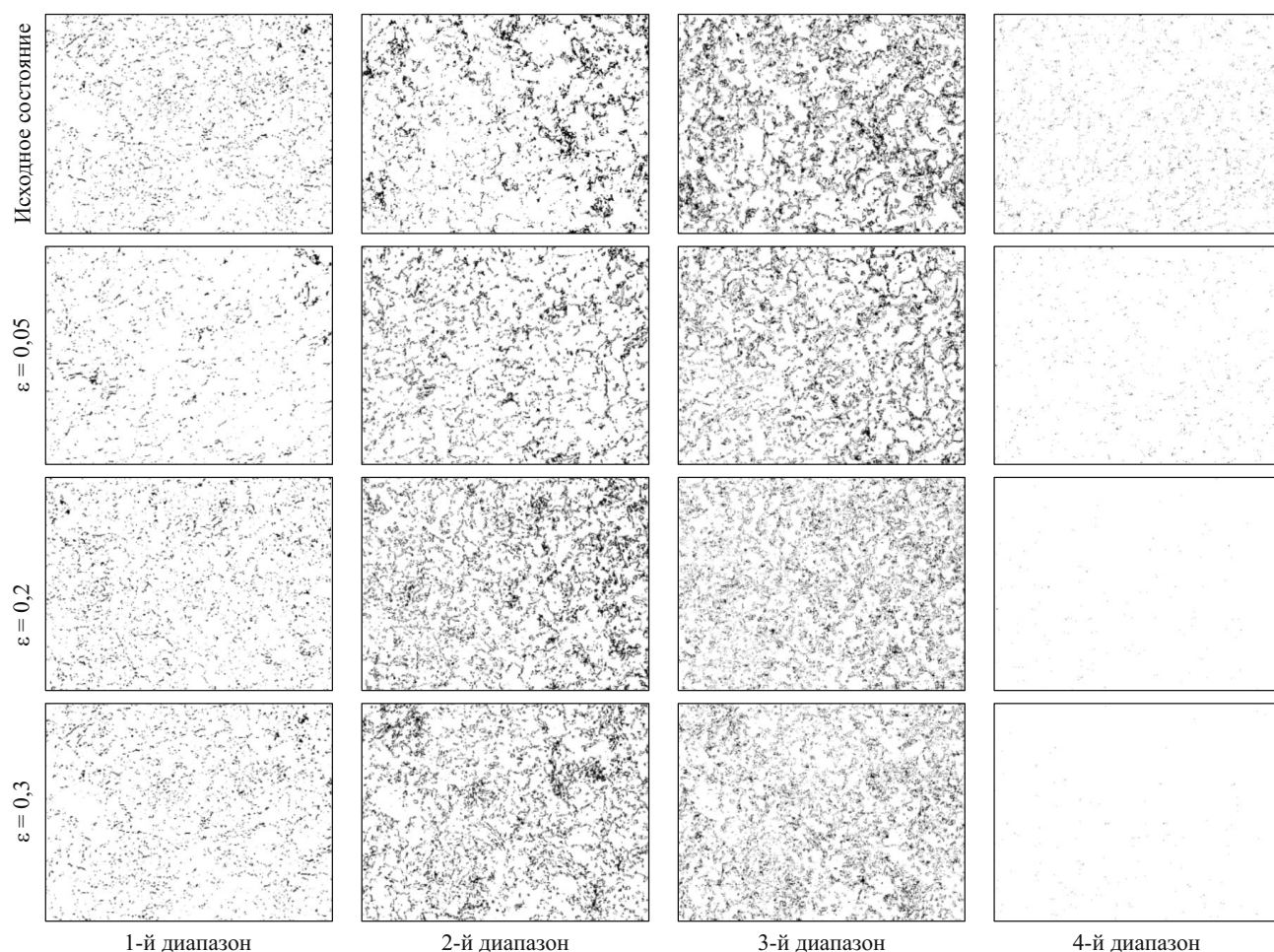


Рис. 3. Контрастные маски изображений микроструктур стали 20 с разной глубиной темно-серого оттенка в исходном состоянии и после деформации ε , равной 0,05, 0,2 и 0,3

микроконцентраторов напряжений и широкой областью распространения полей упругих напряжений. С повышением количества микроконцентраторов напряжений среднее расстояние между ними уменьшается, что накладывает ограничения на развитие поля упругих напряжений вокруг них.

Распределение микроструктурных объектов по средней плотности границ для разных глубин темно-серого оттенка показано на рис. 4, б. Степень развитости границ количественно оценивают их средней плотностью ($q_{\text{ср}}$) или общей протяженностью границ на площади металлографического шлифа в 1 мкм^2 . Этот показатель характеризует потенциальную способность дефектов кристаллического строения блокировать мобильные дислокации и степень деформационного упрочнения [9].

С повышением величины пластической деформации развитость границ возрастает за счет генерации дислокаций различными источниками, функционирующими внутри зерен и на их границах. Выход внутризеренных дислокаций к границам повышает их локальную кривизну и протяженность. Все это в совокупности повышает свободную энергию границ [10, 11]. Следовательно, микроструктуры с высокой

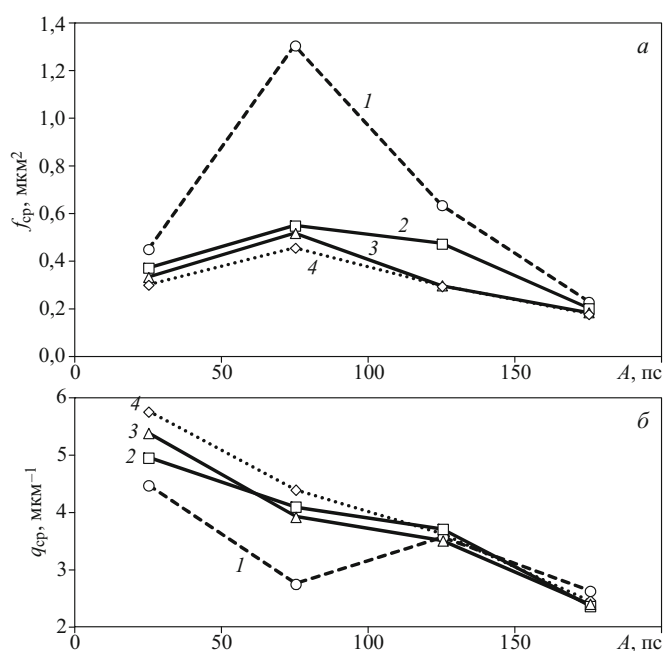


Рис. 4. Распределение средней площади $f_{\text{ср}}$ (а) и средней плотности $q_{\text{ср}}$ (б) границ микроструктурных объектов в зависимости от среднего значения диапазона темно-серого оттенка A для стали 20 в исходном состоянии (1) и после деформации ε , равной 0,05 (2), 0,2 (3), 0,3 (4)

величиной свободной энергии должны обладать более развитыми границами и состоять из большего числа точечных объектов, обеспечивающих в совокупности высокую среднюю плотность границ.

Таким образом, цветовая сегментация по глубине темно-серого оттенка изображений микроструктур, идентифицированных травлением, позволяет разделять микроструктурные объекты по величине свободной энергии или их структурно-энергетическому состоянию. На контрастных масках изображений разделенных таким способом микроструктур выявлено, что микроструктурные объекты состоят из точечных образований, объединенных в группы с разной степенью упорядоченности. С повышением степени пластической деформации плотность точечных объектов возрастает, а с увеличением глубины темно-серого оттенка их количество меняется немонотонно, проходя через максимум. Можно предположить, что большинство точечных объектов, образованных в результате пластической деформации, представляет собой пересечения дислокаций с плоскостью металлографического шлифа.

Цветовую сегментацию изображений микроструктур можно рассматривать как методику выявления полей упругих напряжений вокруг линейных дефектов кристаллического строения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kim V. A., Petrov V. V., Butin A. V., Belova I. V., Shpileva A. A. Quantitative Structure-and-Energy Analysis of Heat Treatment of Structural Steel / Metal Sci. Heat Treatment. Vol. 52. N 3-84. 2010. P. 163 – 165.
2. Kim V. A., Belova I. V., Boutin A. V. Kinetics of structural of hardened steel 15H5M during tempering / Modern Mater. Technol. 2013. N 1. P. 126 – 131.
3. Ким В. А., Лиманкин В. В., Марин Б. Н. и др. Количественная оценка зеренной структуры конструкционных сталей при пластической деформации и рекристаллизационном отпуске / Ученые записки КнАГТУ. 2012. № II. С. 83 – 88.
4. Башков О. В., Ким В. А., Попкова А. А. Методика цифровой обработки изображений микроструктуры алюминиевых сплавов в среде MATLAB / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 10. С. 34 – 40.
5. Ким В. А., Евдокимова Р. В., Золоторева С. В., Попкова А. А., Йошида М. Статистическая оценка количественной металлографии / Ученые записки КнАГТУ. 2013. № II-1(14). С. 76 – 82.
6. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. — М.: Техносфера, 2004. — 384 с.
7. Претт У. Цифровая обработка изображений. Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — 480 с.
8. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. — М.: Физматлит, 2006. — 816 с.
9. Кан Р. У., Хаазен П. Физическое материаловедение. 3-е издание, перераб. и доп. Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1987. — 640 с.
10. Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А. Синергетик и фракталы в материаловедении. — М.: Наука, 1994. — 383 с.
11. Балахонов Р. Р., Болеста А. В., Бондарь М. П. и др. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / отв. ред В. Е. Панин — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. — 520 с.

REFERENCES

1. Kim V. A., Petrov V. V., Butin A. V., Belova I. V., Shpileva A. A. Quantitative Structure-and-Energy Analysis of Heat Treatment of Structural Steel / Metal Sci. Heat Treatment. Vol. 52. N 3-84. 2010. P. 163 – 165.
2. Kim V. A., Belova I. V., Boutin A. V. Kinetics of structural of hardened steel 15H5M during tempering / Modern Mater. Technol. 2013. N 1. P. 126 – 131.
3. Kim V. A., Limankin V. V., Marin B. N. et al. Kolichestvennaya otsenka zerennoi struktury konstruktivnykh staley pri plasticheskoi deformatsii i rekristallizatsionnom otpuske [Quantitative Assessment of Engineering Steel's Granulated Structure During Plastic Deformation and Recrystallization Annealing] / Uch. Zap. KnAGTU. 2012. N II. P. 83 – 88 [in Russian].
4. Bashkov O. V., Kim V. A., Popkova A. A. Metodika tsifrovoy obrabotki izobrazhenii mikrostruktury alyuminiyevykh spлавov v srede MATLAB [Digital Processing of Aluminum Alloy Microstructure Images in MATLAB Environment] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2013. Vol. 79. N 10. P. 34 – 40.
5. Kim V. A., Evdokimova R. V., Zolotoreva S. V., Popkova A. A., Ioshida M. Statisticheskaya otsenka kolichestvennoi metallografii [Statistical Evaluation in Quantitative Metallography] / Uch. Zap. KnAGTU. 2013. N II-1. P. 76 – 82.
6. Brandon D., Kaplan U. Mikrostruktura materialov. Metody issledovaniya i kontrolya [Microstructural characterization of materials]. — Moscow: Tekhnosfera, 2004. — 384 p. [Russian translation].
7. Pratt W. Digital Processing of Image. — Moscow: Mir, 1982. — 480 p. [Russian translation].
8. Kobzar' A. I. Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov [Applied Mathematical Statistics. For Engineers and Scientists]. — Moscow: Fizmatlit. 2006. — 816 p. [in Russian].
9. Cahn R. W., Haasen P. Physical Metallurgy. 3rd Edition. — Moscow: Metallurgiya, 1987. — 640 p. [Russian translation].
10. Ivanova V. S., Balankin A. S., Bunin I. Zh., Oksogoev A. A. Sinergetik i fraktaly v materialovedenii [Synergetic and Fractal in Material Science]. — Moscow: Nauka, 1994. — 383 p. [in Russian].
11. Balakhonov R. R., Bolesta A. V., Bondar' M. P. et al. Poverkhnostnye sloi i vnutrennie granitsy razдела v geterogennykh materialakh [Surface Layers and Interfaces in Heterogeneous Materials]. — Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2006. — 520 p. [in Russian].