



УДК 621.745.551
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-43-49

Поступила 28.07.2018
Received 28.07.2018

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СЕРОГО ЧУГУНА ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ В РАСПЛАВ ДИСПЕРСНЫХ ДОБАВОК

Ф. И. РУДНИЦКИЙ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: stl_minsk@tut.by,
С. А. КУЛИКОВ, В. А. ШУМИГАЙ, ОАО «Минский тракторный завод», г. Минск, Беларусь, ул. Долгобродская, 29. E-mail: cyberlis@mail.ru

Рассмотрены основные механизмы повышения прочности сплавов, в том числе и за счет введения в расплав когерентных и некогерентных кристаллизующимся структурным составляющим сплава дисперсных частиц. Представлены новые сведения о влиянии ультрадисперсных частиц, получаемых из отходов шлифования инструментальных сталей (металлоабразивного шлама) и предложенных в качестве модифицирующих добавок, на структуру и прочностные свойства серого чугуна. Выявлено преобладающее влияние на свойства чугуна металлической составляющей металлоабразивного шлама. Установлены оптимальные количества добавок-модификаторов. Прирост прочности чугуна СЧ20 в результате модифицирования составляет до 20%.

Ключевые слова. Серый чугун, модифицирование дисперсными добавками, структура, свойства.

Для цитирования. Рудницкий Ф. И. Повышение прочности серого чугуна путем введения в расплав дисперсных добавок / Ф. И. Рудницкий, С. А. Куликов, В. А. Шумигай // *Литье и металлургия*. 2018. Т. 92. № 3. С. 43–49. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-43-49.

INCREASING THE STRENGTH OF GREY CAST IRON BY INTRODUCING OF DISPERSED ADDITIVES INTO THE MELT

F. I. RUDNITSKY, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
E-mail: stl_minsk@tut.by,
S. A. KULIKOV, V. A. SHUMIGAI, JSC «Minsk Tractor Works», Minsk, Belarus, 29, Dolgobrodskaya str.
E-mail: cyberlis@mail.ru

The basic mechanisms of increasing the strength of alloys, including methods through the introduction of the melt coherent and incoherent crystallizing structural components of the alloy dispersed particles were considered. New data on the influence of ultrafine particles obtained from grinding wastes of tool steels (metal abrasive slime) and proposed as modifying additives on the structure and strength properties of gray cast iron are presented. The prevailing influence of metal component of metal-abrasive sludge on the properties of cast iron is revealed. The optimum amount of additives-modifiers were defined. The increase in the strength of cast iron mid 20 as a result of modification is equal up to 20%.

Keywords. Grey iron, modifying particulate additives, structure, properties.

For citation. Rudnitsky F. I., Kulikov S. A., Shumigai V. A. Increasing the strength of grey cast iron by introducing of dispersed additives into the melt. *Foundry production and metallurgy*, 2018, vol. 92, no. 3, pp. 43–49. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-43-49.

В большей степени прочность изделия определяется прочностью материала, из которого оно сделано. В начале XX в. развитие методов структурного анализа позволило четко установить зависимость прочности от внутренней структуры. Прочность – есть свойство сопротивления металла к разрушению при приложении нагрузки, т. е. при деформации. Многочисленные испытания образцов на растяжение, сжатие, изгиб не позволяли уточнить механизмы, происходящие при деформации. Только в середине 50-х годов с введением понятия «дислокация» были уточнены понятия пластической и упругой деформации, выведены формулы, позволяющие получать расчетные показатели прочности, удовлетворительно совпадающие с экспериментальными свойствами [1, 2].

Современные теории прочности основаны на дислокационном механизме. Все процессы, протекающие при деформации, можно разделить на четыре основных механизма сопротивления распространению дислокаций: субструктурное упрочнение $\sigma_{\text{суб}}$, твердорастворное упрочнение $\sigma_{\text{тв.р}}$, поликристаллическое упрочнение $\sigma_{\text{поликр}}$ и многофазное упрочнение $\sigma_{\text{многоф}}$ [3].

В чистых металлах увеличение сопротивления деформированию достигается за счет субструктурного упрочнения, когда в кристаллической решетке металла образуется большое количество дефектов. В результате приложения нагрузки в металле присутствуют скользящие подвижные дислокации и хаотично расположенные неподвижные. При этом скользящие дислокации испытывают сопротивление совокупного упругого поля всех дислокаций и контактное торможение отдельных дислокаций.

При твердорастворном упрочнении сопротивление деформации достигается путем искажения кристаллической решетки металла путем внедрения или замещения примесными атомами. В процессе деформации дислокации должны преодолеть ближний порядок в сплаве и искажения кристаллической решетки, что совокупно увеличивает работу, затрачиваемую на разрушение материала.

Поликристаллическое (зернограничное) упрочнение основано на том, что в реальном сплаве зерна хаотично расположены под некоторым углом друг к другу. В результате приложения нагрузки границы зерен выступают дополнительной преградой для распространения дислокаций. Связь размера зерна с изменением прочностных характеристик удовлетворительно описывается уравнением Холла-Петча для расчета предела текучести [4]:

$$\sigma_T = \sigma_0 + kd^{1/2}, \quad (1)$$

где k – константа, характеризующая материал; d – средний диаметр зерна (свободный пробег дислокации); σ_0 – сопротивление движению дислокаций со стороны кристаллической решетки.

Многофазное упрочнение заключается в образовании выделений второй фазы в матрице основного металла, что создает дополнительные препятствия для движения дислокаций.

При пластической деформации реального сплава в той или иной степени участвуют все обозначенные механизмы. Таким образом, суммарную прочность, или другими словами, суммарную работу сопротивления разрушению можно представить в виде:

$$\sigma = \sigma_{\text{суб}} + \sigma_{\text{тв.р}} + \sigma_{\text{поликр}} + \sigma_{\text{многоф}}. \quad (2)$$

Однако физика прочности значительно сложнее, так как влияние каждого фактора не всегда аддитивно. При деформации происходят фазовые превращения, образование и распад ансамбля дислокаций и т. д., что значительно усложняет формирование объективной модели разрушения.

В современных условиях одним из важнейших направлений развития в машиностроении является уменьшение металлоемкости продукции без изменения (уменьшения) механических свойств. Очевидно, что с уменьшением толщины стенки отливки при неизменной технологии производства сплава ее ресурс будет снижаться. Поэтому необходимо применять различные технологические и конструктивные решения, направленные на увеличение прочности изделия. Одним из таких подходов может быть дисперсионное упрочнение сплавов, обусловленное созданием неоднородностей, которые служат дополнительной преградой на пути дислокаций. Такие неоднородности можно разделить на локальные неоднородности, обусловленные флуктуациями состава, приводящие к образованию метастабильных кластеров; метастабильные зоны (предвыделения); выделения второй фазы; смесь двух фаз [2].

Для литейного производства чаще всего применяют упрочнение выделением второй фазы. Физический смысл данного явления заключается в создании в металлической матрице когерентных и некогерентных частиц.

Упрочнение когерентными частицами описывается моделью Мотта-Набарра:

$$\tau = G_m f E_n, \quad (3)$$

где τ – прирост прочности; G_m – модуль сдвига; f – объемная доля когерентных частиц; E_n – параметр несоответствия кристаллических решеток матрицы и выделений.

Упрочнение когерентными выделениями достигается за счет того, что в месте контакта частицы со скользящей дислокацией создается препятствие ее распространению. Дальнейший сдвиг возможен лишь после того, как дислокация прорежет когерентную частицу.

Модель упрочнения некогерентными частицами предложена Орованом для случая, когда матрица содержит более жесткие частицы ($G_{\text{ч}} > G_{\text{м}}$):

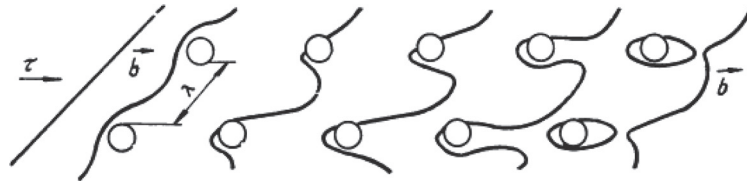


Рис. 1. Схема препятствия движению дислокаций некогерентными частицами (модель Орована)

$$\tau = \frac{1}{2\pi} \frac{G_M b}{\lambda} \phi \ln \frac{\lambda}{2b}, \quad (4)$$

где λ – расстояние между частицами; ϕ – коэффициент, учитывающий форму дислокаций.

Упрочнение некогерентными частицами достигается тем, что распространение дислокаций возможно только после того, как они обогнут частицу и создадут вокруг нее петлю (рис. 1).

На ОАО «Минский тракторный завод» для повышения конкурентоспособности продукции конструкции отливок постоянно совершенствуются, металлоемкость литья снижается. Поэтому остро стоит задача повышения эксплуатационных свойств изделий при минимальных затратах. В этом направлении особый интерес представляет процесс модифицирования отливок моторной группы добавками, содержащимися в отходах собственного производства. Эффект от их использования заключается, с одной стороны, в повышении свойств металла, с другой – решается задача утилизации подобных отходов, трудно поддающихся переработке. На площадях механических цехов повсеместно образуется тонкодисперсный металл–абразивный шлам, который состоит из ультрадисперсных металлических частиц и фрагментов абразива. Утилизация подобных отходов представляет собой определенную проблему. Учитывая, что шлам легированных сталей, особенно быстрорежущих, содержит такие дорогостоящие элементы, как молибден, вольфрам и ванадий, предпринята попытка опробовать его в качестве модификатора для чугуна при изготовлении отливок моторной группы. В работе [5] приведены результаты использования отходов шлифования инструмента из быстрорежущих сталей, в которых частицы представляли собой металлическую составляющую. Хотя в ходе экспериментов, прежде всего, ставилась задача использовать микролегирующее действие добавок для повышения твердости, в процессе работы было установлено значительное повышение прочности при условии легирования матрицы молибденом, вольфрамом и хромом. Также зафиксировано увеличение и выравнивание твердости по сечению отливки, что и явилось целью эксперимента. Добавки вводили в количестве от 1 до 5%. В результате был сделан вывод [5], что если целью модифицирования является повышение значения предела сопротивления на разрыв, то ультрадисперсный модификатор (УДМ) данного вида в количестве более 2,5% вводить нецелесообразно, так как при больших количествах зафиксировано снижение прочности. Кроме того, была решена проблема по изысканию приемлемого способа ввода частиц. В работе [6] приведены результаты введения в расплав УДМ в виде смеси оксидов тугоплавких металлов, причем массу добавок изменяли от 0,0125 до 0,1%. В работе [7] для ввода УДМ в расплав высокохромистого чугуна использовали брикетирование. В работе [8] УДМ вводили в виде прутка. Во всех случаях общее количество УДМ не превышало 0,5 мас.%. Учитывая результаты собственных работ, а также выводы других авторов, в данной работе условия эксперимента были скорректированы.

Эксперименты по модифицированию серого чугуна марки СЧ20 ультрадисперсным модификатором на основе отходов шлама быстрорежущей стали марки Р6М5 проводили в условиях плавильного участка ЦТСП ОАО «МТЗ». В ковш емкостью 100 кг на струю металла подавали предварительно взвешенный и упакованный в конверт из алюминиевой фольги модификатор в количестве 0,005–0,5 мас.%. От каждого ковша в форму из ХТС отливали по два образца для определения механических свойств. Результаты испытаний приведены на рис. 2.

Достаточно неожиданным было снижение прочности при введении 0,005% УДМ, при введении 0,1% УДМ прочность соответствует немодифицированному образцу, при 0,5% – возрастает на 30 МПа. Структура образцов показана на рис. 3. На втором этапе работы количество вводимого УДМ изменили от 0,1 до 5%.

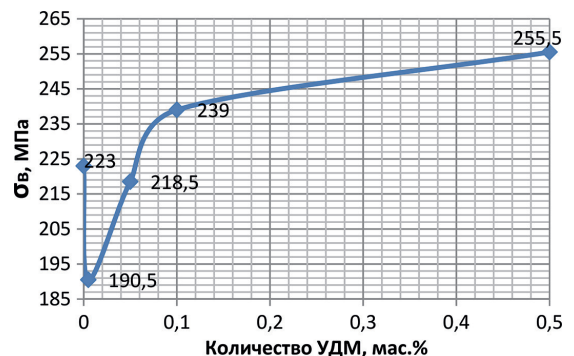


Рис. 2. Изменение σ_b в зависимости от количества вводимого УДМ

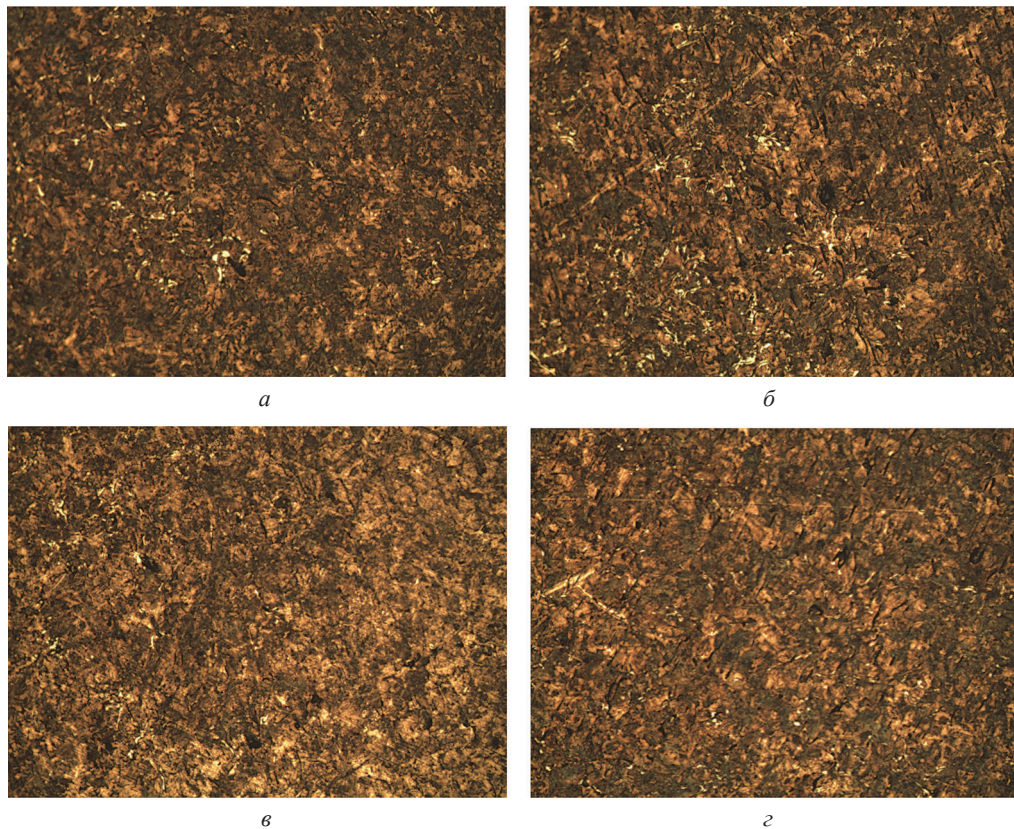


Рис. 3. Структура образцов первого эксперимента, оптический микроскоп. $\times 100$, травлено азотной кислотой: *а* – контрольный образец; *б* – 0,005% УДМ; *в* – 0,1; *г* – 0,5% УДМ

Результаты изменения прочности приведены на рис. 4, структура образцов – на рис. 5.

Анализ результатов эксперимента показывает, что введение УДМ в количестве более 0,5% нецелесообразно. При больших количествах прочность падает и возрастает только тогда, когда в химическом составе чугуна отмечаются Mo и W , т. е. проявляется микролегирующий эффект (при 5% УДМ), хотя это увеличение прочности незначительно по сравнению с прочностью образцов с 0,5% УДМ. Интересен тот факт, что в первом и втором экспериментах зафиксированы контрольные точки максимумов и минимумов σ_b , соответствующих определенному количеству УДМ, которые отличаются от значений, полученных в работе [5]. Таким образом, можно сделать вывод, что изменение σ_b при введении УДМ есть периодическая функция, период которой зависит не только от количества УДМ, но и от его вида. Так, для УДМ на основе дисперсной стружки в пределах 1–5% максимум σ_b достигается в пределах 2,5%, после чего происходит снижение этого показателя, а для УДМ на основе абразивного шлама в пределах 0,005–5% максимумы σ_b отмечаются при 0,5 и 5%.

После магнитной сепарации шлама было установлено количественное соотношение содержания в нем металлических частиц и абразива, составившее примерно 50 на 50%. Наличие такого количества неметаллической составляющей, несомненно, требует ответа на вопрос, в какой мере она влияет на механизм модифицирования расплава. Так, в некоторых работах [6–14] отмечается использование оксидов и карбидов тугоплавких металлов для управления процессами затвердевания, изоморфные же сплаву частицы отмечаются как неустойчивые.

Поэтому на следующем этапе работы, в тех же условиях был проведен еще один эксперимент, в котором в качестве модификатора использовали порошок стали марки 10P6M5MP,

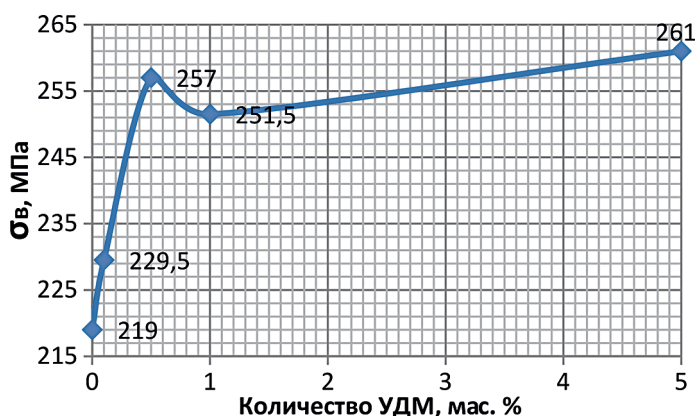


Рис. 4. Изменение σ_b при увеличении количества вводимого УДМ

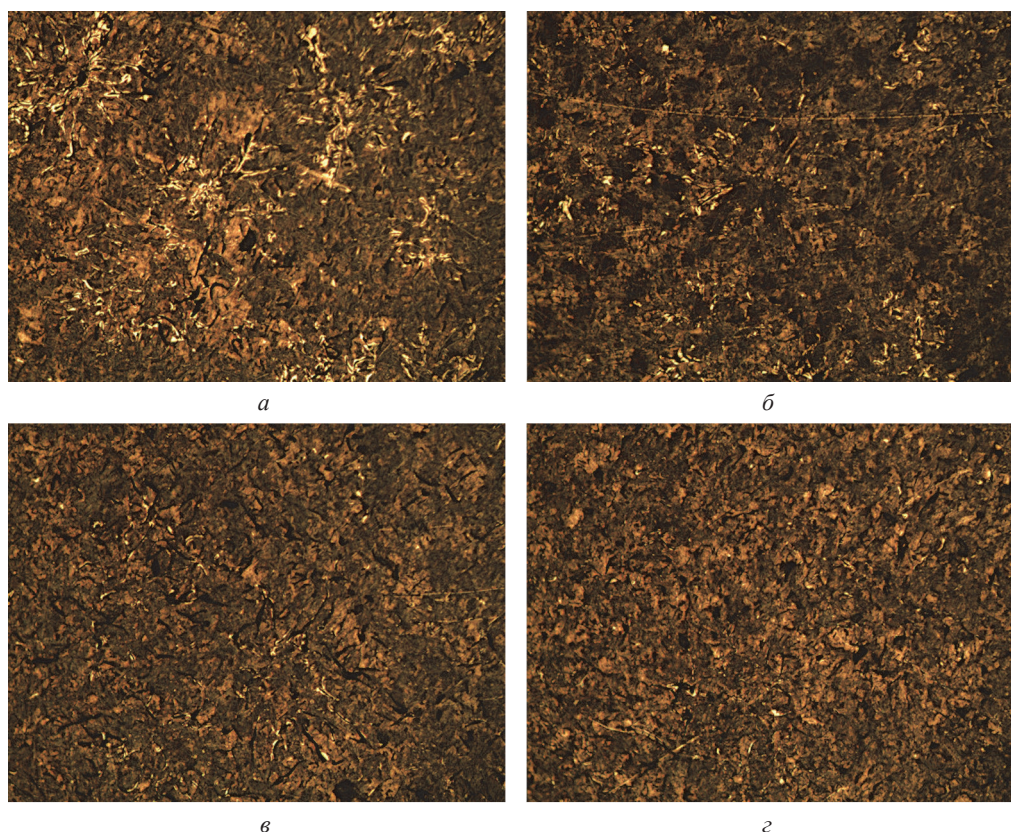


Рис. 5. Структура образцов второго эксперимента, оптический микроскоп. $\times 100$, травлено азотной кислотой: *a* – контрольный образец; *б* – 0,5% УДМ; *в* – 1; *г* – 5% УДМ

который также упаковывали свободным насыпом в алюминиевый конверт. Результаты эксперимента приведены на рис. 6, структура образцов показана на рис. 7.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективном влиянии на свойства чугуна именно металлической составляющей, полученной после сепарации металлоабразивного шлама. Так, увеличение прочности чугуна СЧ20 при использовании в качестве модификатора металлического порошка из шлама и порошка стали 10P6M5МП составляет до 30 и 50 МПа соответственно. Несмотря на лучшие результаты при модифицировании чугуна порошком быстрорежущей стали (повышение прочности) и технологические преимущества (большая насыпная плотность), применение металлоабразивного шлама в качестве исходного материала для получения комплексного модификатора весьма перспективно с точки зрения рециклинга отходов производства, повышения качества литья и снижения его себестоимости.

При введении УДМ в пределах 0,005–1% изменение химического состава чугуна за счет содержания в нем легирующих элементов не зафиксировано. В процессе дюрOMETРИЧЕСКИХ испытаний и проверки микроструктуры, согласно ГОСТ 3443-87, наличие особенностей, которые бы однозначно указывали на изменение структуры металлической матрицы чугуна не выявлено. Поэтому говорить о дисперсионном упрочнении матрицы когерентными или некогерентными частицами преждевременно.

Для выявления формы графита и характера его распределения в металлической матрице в процессе металлографического анализа исследованы нетравленные образцы. Количественный анализ площади, занимаемой графитом, проводили при помощи программы SimpleIm, применяемой для обработки изображений (рис. 8).

Микроструктуры образцов чугуна, модифицированного УДМ на базе стального порошка, приведены на рис. 9.

Как видно из рисунков, структура контрольного образца типична для промышленной отливки из серого чугуна. При введении 0,005% УДМ выделяются обла-

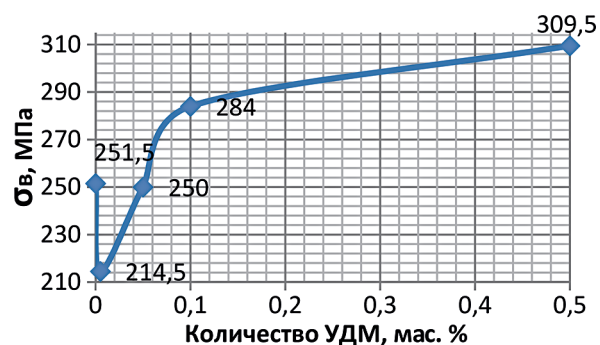


Рис. 6. Изменение σ_v в зависимости от количества вводимого порошка стали марки 10P6M5МП

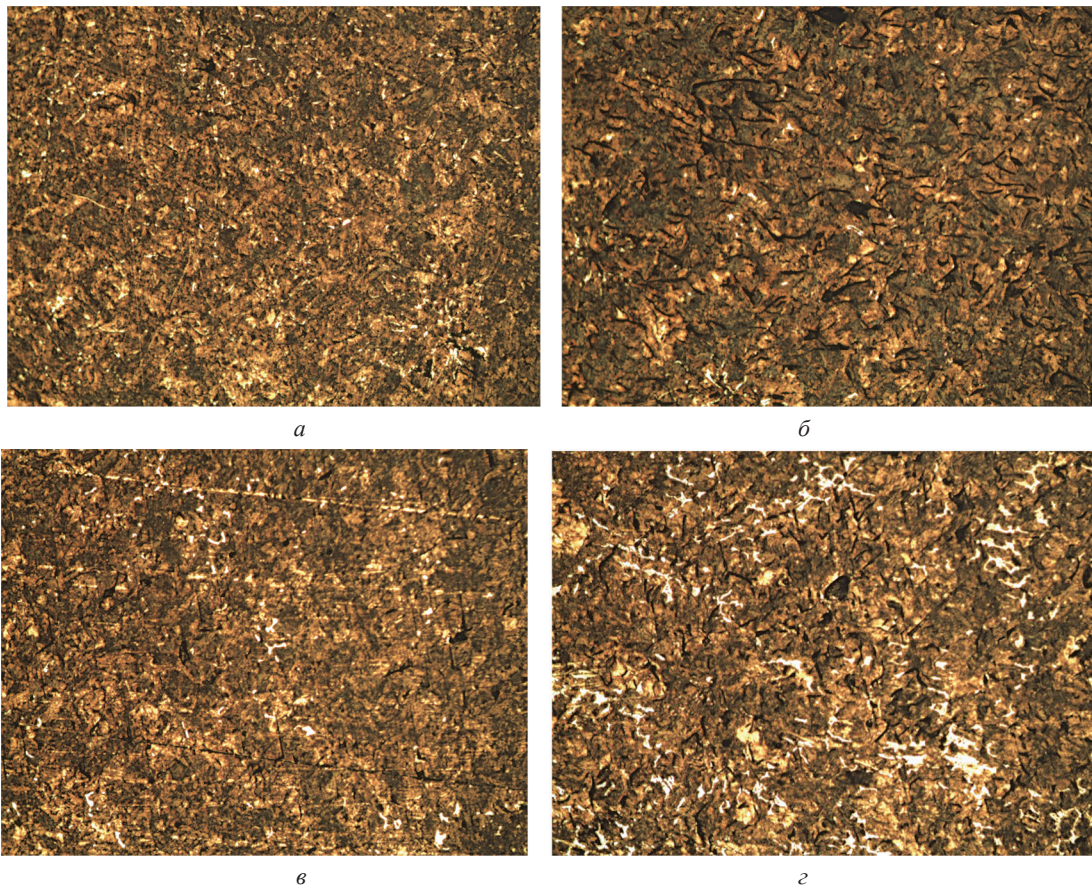


Рис. 7. Структура образцов чугуна, полученного с использованием в качестве модификатора стального порошка стали марки 10P6M5МП, оптический микроскоп. х100, травлено азотной кислотой: *a* – контрольный образец; *б* – 0,05% УДМ; *в* – 0,1; *г* – 0,5% УДМ

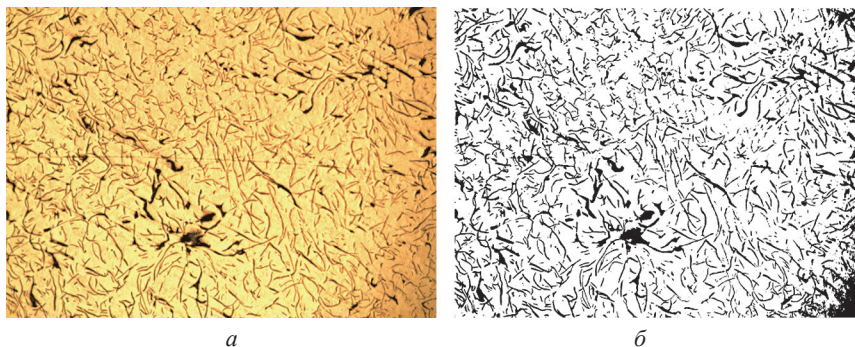


Рис. 8. Пример использования программы SimpleIm для выделения объектов (графита); контрольный образец первого эксперимента: *a* – оригинал; *б* – тот же снимок, но с удаленным фоном и выделенными объектами

сти междендритного точечного графита, что обуславливает снижение механических свойств. При введении 0,1% УДМ форма и распределение графита практически не отличаются от контрольного образца, что и отражается на σ_B . При введении 0,5% УДМ образцы имеют благоприятное равномерное распределение графита при некотором увеличении толщины пластинок, что вызывает рост σ_B .

Выводы

1. Изменение σ_B при введении УДМ есть периодическая функция, период которой зависит не только от количества УДМ, но и от вида модификатора.
2. При вводе УДМ для модифицирования металлических расплавов необходимо определить оптимальное количество этих материалов с учетом их особенностей (химический, фракционный состав и др.).
3. Для ультрадисперсных частиц предел эффективности модифицирования расплавов находится в диапазоне 0,001–0,6%. При большем количестве вводимого УДМ эффективность ультрадисперсных частиц снижается.

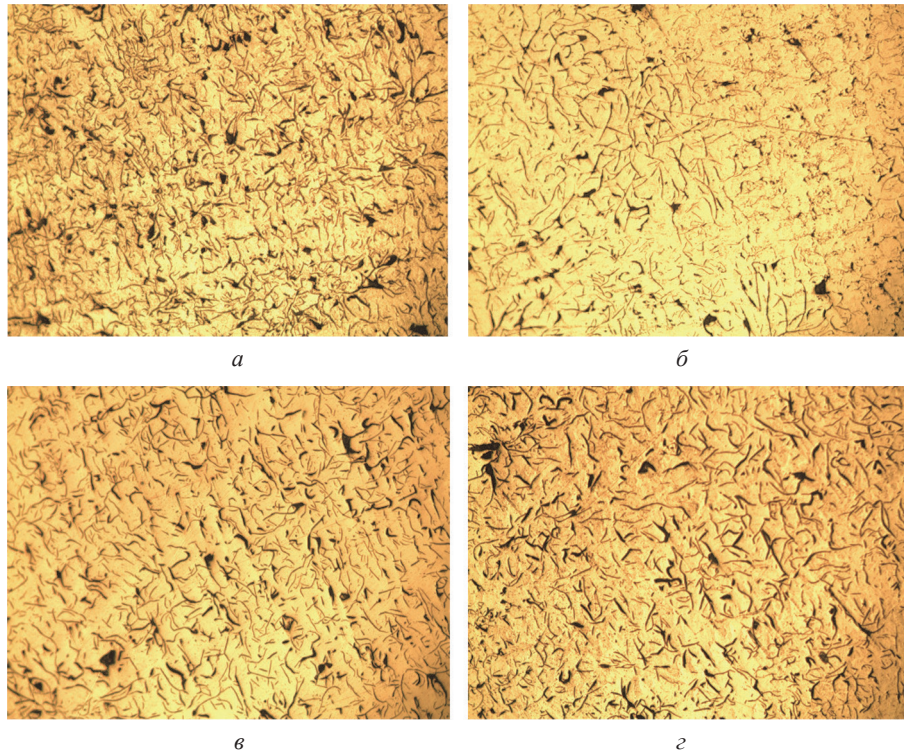


Рис. 9. Структура нетравленных образцов чугуна, полученного с использованием в качестве модификатора стального порошка стали марки 10P6M5MP, оптический микроскоп. $\times 100$: а – контрольный образец; б – 0,005% УДМ; в – 0,1; г – 0,5% УДМ

4. Введение УДМ не влияет на структуру основы сплава, при этом оказывая значительное влияние на форму других фаз.

Механизм влияния УДМ требует дальнейшего уточнения. По-видимому, имеет место образование локальных флуктуаций, вызванных растворением введенных частиц. При этом, учитывая огромное количество вводимых на единицу массы частиц, их кажущаяся термодинамическая неустойчивость не является препятствием для формирования структуры, повышающей прочность конечного изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн М. Л., Займовский В. А. Механические свойства металлов. М: Металлургия, 1979. 496 с.
2. Трефилов В. И., Моисеев В. Ф., Печковский Э. П. и др. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов, Киев: Наукова думка, 1989. 256 с.
3. Конева Н. А. Физика прочности металлов и сплавов // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 7. С. 95–102.
4. Клецова О. А. Разработка оптимальных режимов термической обработки микролегированных инструментальных сталей: дис. ... канд. техн. наук. Орск, 2014. 158с.
5. Рудницкий Ф. И., Куликов С. А. Модифицирование чугунов ультрадисперсными добавками// Литье и металлургия. 2017. № 1. С. 11–15.
6. Гаврилова Р., Манчев М., Манолов В., Черепанов А. Исследование влияния модификаторов с наноразмерами на кристаллизационный процесс в сплавах на основе железа// Научные известия. 2013. № 2(139). С. 313–315.
7. Сабуров В. П. Суспензионное модифицирование сталей и сплавов ультрадисперсными порошками // Литейное производство. 1991. № 4. С. 14–16.
8. Крушенко Г. Г., Балашов Б. А., Василенко З. А., Фильков М. Н., Миллер Т. Н. Повышение механических свойств алюминиевых литейных сплавов с помощью ультрадисперсных порошков// Литейное производство. 1991. № 4. С. 17–18.
9. Коротгаева З. А. Получение ультрадисперсных порошков механохимическим способом и их применение для модифицирования материалов: автореф. дис. ... канд. хим. наук. Кемерово, 2008. 22 с.
10. Дроздов В. О., Черепанов А. Н. О температуре плавления плакирующего слоя на тугоплавкой нанодисперсной частице// Изв. вузов. Черная металлургия. 2014. № 2. С. 24–26.
11. Дроздов В. О. Исследование влияния физико-химических воздействий на структуру и свойства шва при лазерной сварке металлов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2014. 80 с.
12. Калинина А. П., Черепанов А. Н., Полубояров В. А., Сабуров В. П. Влияние размерных и электрических эффектов на нуклеацию в сплавах, содержащих тугоплавкие частицы // Физическая мезомеханика. 1999. № 5. С. 93–97.
13. Семенов И. В. Повышение эксплуатационных свойств свинцово-оловянистой антифрикционной бронзы: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2016. 148 с.
14. Воеводина М. А. Исследование обрабатываемости резанием чугуна с шаровидным графитом// Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы. VII ставеровские чтения. Красноярск: СФУ, 2015. С. 138–139.