

**ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
СЕРЫХ ЧУГУНОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ
ДИСПЕРСНЫМИ ДОБАВКАМИ С ПОЗИЦИЙ ТЕРМОДИНАМИКИ
ОТКРЫТЫХ НЕРАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМ**

Ф.И. РУДНИЦКИЙ, канд. техн. наук
Белорусский национальный технический университет,
С.А. КУЛИКОВ, В.А. ШУМИГАЙ, ОАО «Минский тракторный завод»,
Л.С. ШУМАНСКАЯ
Белорусский национальный технический университет

Рассмотрены теоретические основы процесса кристаллизации расплава серого чугуна с позиций термодинамики открытых неравновесных систем. Показана целесообразность рассмотрения плавления и кристаллизации отливок как неравновесных процессов. Теоретически обосновано использование для модифицирования расплавов ультрадисперсных модификаторов. При этом указано, что способ введения дисперсных смесей в расплав имеет очень важное значение, которое определяет эффективность модифицирования. Изучены морфология и состав некоторых видов дисперсных отходов литейных цехов. Приведены экспериментальные данные, полученные в результате модифицирования отливок моторной группы ОАО «МТЗ» модификаторами на основе дисперсных отходов.

***Ключевые слова:** серый чугун, модифицирование, дисперсные добавки, диссипативные структуры, механические свойства.*

**FEATURES OF THE MECHANISM OF CRYSTALLIZATION
OF GRAY CAST IRONS AS A RESULT OF MODIFICATION
WITH DISPERSED ADDITIVES FROM THE STANDPOINT
OF THERMODYNAMICS OF OPEN NONEQUILIBRIUM SYSTEMS**

F.I. RUDNITSKY, Ph.D in Technical Science
Belarusian National Technical University,
S.A. KULIKOV, V.A. SHUMIGAJ, Minsk Tractor Works,
L.S. SHUMANSKAYA, Belarusian National Technical University

The article discusses the theoretical foundations of the process of crystallization of molten gray cast iron from the standpoint of the thermodynamics of open nonequilibrium systems. The expediency of considering the melting and

crystallization of castings as nonequilibrium processes is shown. The use of ultrafine modifiers to modify melts is theoretically justified. It is indicated that the method of introducing dispersed mixtures into the melt is very important, which determines the effectiveness of the modification. The morphology and composition of some types of particulate waste from foundries were studied. Experimental data obtained as a result of modifying the castings of the motor group of OJSC «MTW» with modifiers based on dispersed waste are presented.

Keywords: *gray cast iron, modification, dispersed additives, dissipative structures, mechanical properties.*

Введение. Под понятием «модифицирование» в литейном производстве в широком смысле подразумевают любое воздействие на расплав, приводящее к изменению литой структуры. Наиболее простая классификация типов модифицирования представлена тремя видами [1]:

- модифицирование I рода – использование элементов-инокуляторов;
- модифицирование II рода – применение элементов-ПАВ;
- модифицирование III рода – модифицирование (дробление) эвтектики.

Существуют и более сложные примеры классификации [2]. Нетрудно видеть, что какова бы ни была классификация, без уточнения конкретных механизмов, протекающих в металлических расплавах, она является условной. С этой позиции разработка различных составов модификаторов определяется конечным результатом при условии положительного влияния модификаторов. Использование теоретической базы позволяет перейти от констатации свойств литья в результате проведения экспериментов к их прогнозированию. Для уточнения механизмов кристаллизации чугунов предприняты многочисленные исследования и расчеты, в т.ч. и касательно жидких металлов и сплавов[3].

Одной из возможных причин задержки в развитии теории кристаллизации сплавов является, по-видимому, попытка анализа процессов кристаллизации и плавления с позиции термодинамики замкнутых систем, в которых протекают линейные необратимые процессы. Это состояние характеризуется известной формулой энергии Гиббса:

$$\Delta G = \Delta H - \Delta TS. \quad (1)$$

Выражение (1) достаточно хорошо описывает диаграммы состояния одно- и двухкомпонентных систем. Однако ситуация меняется при попытке описать открытые процессы, например, плавление. Кристаллическое состояние тела более упорядочено (его энтропия меньше), чем жидкое состояние. Согласно второму началу термодинамики система стремится к максимуму энтропии в новом состоянии, т.е. в закрытых системах без обмена энергией с окружающей средой не возникает движущей силы к уменьшению энтропии. В открытых системах это компенсируется диссипацией тепловой энергии в окружающую среду – расплав охлаждается, рассеивает тепловую энергию и кристаллизуется. Таким образом, для поддержания жидкого состояния расплава системе необходимо сообщать энергию в виде нагрева, создавая при этом поток энтропии. Учитывая, что плавящийся металл является открытой системой, а охлаждающийся расплав – линейным необратимым процессом, из этого вытекает, что процессы кристаллизации и плавления требуют рассмотрения с позиций открытых неравновесных систем.

Как указано выше, для поддержания расплава в жидком состоянии ему необходимо сообщать энергию. Вследствие этого выражение (1) следует изменить, т.к. энтропия S уже состоит из двух членов:

$$S_{\text{общ}} = S_{\text{в.о}} + S_{\text{вн.пр}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{общ}}$, $S_{\text{в.о}}$, $S_{\text{вн.пр}}$ – энтропия всей системы, внешнего обмена и внутренних процессов соответственно. Данный подход применен И. Пригожиным для описания процессов, протекающих в неравновесных системах [4].

Теория неравновесного состояния предусматривает понятие самоорганизации – явления упорядочивания системы в неравновесных условиях [4, 5]. В некоторых случаях процессы самоорганизации приводят к такому состоянию, когда в среде возникают реакции по типу Белоусова-Жаботинского (автокаталитические колебания, независимые от времени). Одним из условий возникновения такого рода реакций является смещение системы с позиции равновесия.

Отсюда вытекает факт теории катастроф – для упорядочивания системы она должна выйти из равновесия. Другими словами, энтропия нового состояния должна быть меньше энтропии предшествующего состояния (критерий эволюции Пригожина):

$$\Delta S < 0. \quad (3)$$

Плавление металла – это сообщение системе постоянного потока энтропии. Поэтому вполне оправдано ожидать реакций самоорганизации в расплавленном металле. По-видимому, современное понятие «кластер» [3] являет собой классическую диссипативную структуру. Понятие «диссипативная структура» было введено в 1971 г. Пригожиным и Гленсдорфом. Т.е. когда исчезает воздействие, вызвавшее образование такой структуры, она тоже разрушается. В расплавленном металле условие (3) может выполняться, что и обуславливает существование кластеров. При снятии внешнего воздействия с расплава (температуры) он переходит из состояния открытой неравновесной системы к линейному необратимому процессу – кристаллизации (проходит точку бифуркации). Дальнейшее поведение системы, без приложения внешнего воздействия, описывается выражением (1). Однако при приложении к кристаллизующемуся расплаву какого-либо воздействия (например, модифицирования путем введения добавок), он неизбежно отклонится от состояния равновесия. В таких условиях ожидать автокаталитических явлений самоорганизации преждевременно. Но в то же время анализ линейных необратимых реакций показывает [4, 5], что если система претерпевает изменение какого-либо параметра (претерпевает внешнее или внутреннее возмущение), то этот параметр будет изменяться во времени до тех пор, пока система не придет в равновесие. Это свидетельствует о том, что в линейной необратимой реакции также возможны колебания, которые будут затухать во времени. По-видимому, это также может приводить к появлению временных образований – диссипативных структур.

Если принять данные положения, процесс модифицирования представляется в следующем: в системе (расплаве), претерпевающей линейный необратимый процесс (кристаллизацию) и испытывающей внешнее воздействие, возникает неоднородность по составу

ву (флуктуация), которая испытывает колебания во времени до тех пор, пока возникшее возмущение не будет компенсировано средой. Таким образом, любое локальное отклонение системы от равновесия может служить осциллятором, излучающим в среду колебания («химические волны») [4]. Особенностью таких осцилляторов является то, что передача вещества производится не классическими волнами, где вещество перемещается по фронту, а соединениями.

В этом случае процесс модифицирования раскладывается минимум на два временных периода: создание локальных возмущений в системе и процесс релаксации среды. Очевидно, что эти два временных промежутка регулируются различными параметрами: первый период ограничен областью взаимодействующих осцилляторов, второй – диффузией.

Размер критической области (область взаимодействующих осцилляторов) регулируется количеством введенного вещества. В реальных условиях, используя для модифицирования, например, лигатуру, невозможно добиться такого случая, когда она распадется на необходимое количество взаимодействующих в расплаве фрагментов. При попадании макроскопического тела (т.е. тела, соизмеримого по размерам с объемом расплава) в расплав, по его контуру, вследствие возникшего градиента температур, возникнет переходной слой. Очевидно, что процесс растворения такого тела ограничен диффузионными потоками к переходному слою через тело, и через переходной слой в толщу расплава.

В [4] приведена формула Назареа, которая связывает период колебаний, размер критической области и диффузию:

$$T = \frac{1}{2} \delta l^2, \quad (4)$$

где T – период колебаний, δ – максимальная сумма элементов столбцов обратной матрицы коэффициентов диффузии, l – размер критической области.

Выражение (4) показывает, что реальный процесс модифицирования (сообщение среде возмущения) может происходить как колебаниями, так и диффузионными потоками. Первый вариант более предпочтителен, т.к. диффузия растянута во времени. Однако для возникновения колебаний флуктуаций необходимо создать область

локального упорядочивания, т.е. систему взаимодействующих осцилляторов. Этого можно добиться при использовании дисперсных материалов.

Таким образом, для перехода от диффузионного механизма передачи вещества к колебательному при модифицировании расплавов целесообразно использовать дисперсное вещество, введенное определенным образом, и равномерно распределяя частицы по объему. Количество вещества, т.е. регулирующий параметр размера критической области, имеет эффективный диапазон. В случае введения незначительного количества вещества осцилляторы будут расположены слишком далеко друг от друга, при превышении необходимого количества – слишком близко. Т.е. дисперсность материала и способ его ввода в расплав имеют решающее значение.

Было бы неверным полагать, что «химические осцилляторы» заменяют собой диффузию или каким-либо образом «отключают» ее. Классическая термодинамика характеризует систему при помощи макроскопических параметров: температуры, давления и объема. Локальное упорядочивание, флуктуация является микроскопическим явлением. В результате отклонения системы от равновесия происходит расслоение временных процессов, протекающих в ней на быстрые и медленные [6]. Линейный закон приближения системы к равновесию предполагает, что скорость v приближения системы к состоянию равновесия пропорциональна термодинамической движущей силе X . Если таких сил несколько, тогда:

$$v_i = \sum_j L_{ij} X_j, \quad (5)$$

где L_{ij} – перекрестные кинетические коэффициенты.

Таким образом, быстрые локальные процессы могут протекать практически мгновенно, по сравнению с медленными глобальными процессами. Выражения (4) и (5) показывают, что микроскопическое упорядочивание будет компенсироваться средой путем колебаний до тех пор, пока микроскопические параметры не приведут к изменению макроскопических параметров системы. Другими словами, чем дальше система находится от позиции равновесия, тем больше превалируют колебания параметров. И, соответственно, чем

ближе система к равновесию, тем больше влияние диффузии. Данные утверждения формируются на основе теоремы Онзагера и принципа микроскопической обратимости. Поэтому использование для модифицирования расплавов ультрадисперсных смесей позволяет действовать на него на локальном, микроскопическом уровне. При этом ультрадисперсные смеси могут быть как искусственного, так и естественного происхождения.

Постановка задачи. Методы и материалы. На предприятии ОАО «Минский тракторный завод», как и на большинстве промышленных объектов, образуются дисперсные металлосодержащие отходы: шламы, пыль аспираторных установок и др. Обычно такие материалы являются безвозвратными. Некоторые виды таких отходов, например, шламы быстрорежущих сталей могут содержать дорогостоящие легирующие элементы: W, V, Cr, Mo. Поэтому использование таких отходов для модифицирования расплавов выгодно сразу с нескольких позиций: рециклинга трудноперерабатываемых отходов и снижения себестоимости выпускаемого литья. Для этого необходимо определить фракционный и химический состав таких отходов, изучить влияние модификаторов на их основе на свойства отливок.

Изучение морфологии частиц, фракционного и химического состава дисперсных смесей проводили на электронном сканирующем микроскопе VEGA TESCAN. Исследование металлографических образцов проводилось на электронном сканирующем микроскопе MIRA TESCAN.

Экспериментальную часть работы проводили на плавно-заливочном участке цеха точного стального литья. Расплав чугуна марки СЧ20 готовили в индукционной тигельной печи емкостью 1 т с кислой футеровкой. Завалку, плавку и доводку металла вели согласно действующего технологического процесса. Модифицирование проводили в ковше емкостью 100 кг с подачей модификатора на струю. Модификатор предварительно упаковывали в конверт из алюминиевой фольги. Алюминиевый конверт предназначен для предохранения модификатора от выгорания, подача на струю позволяет добиться максимального распределения дисперсных частиц по объему. Первый ковш не модифицировали и из него заливали в форму ХТС контрольные образцы. В каждый последующий ковш

вводили навеску модификатора и также отливали образцы-свидетели. Температуру регистрировали прибором ДИСК-250М с термопарой ПТПР-91.

Результаты исследований и их анализ. Результаты исследований дисперсных образцов на электронном микроскопе (рисунок 1) позволяют сделать вывод, что определяющим состав и свойства шламов фактором является процесс, при котором они образуются. Этот фактор влияет не только на фракционный и химический состав шламов, но также на форму металлических частиц.

Пыль дробебетных камер (рисунок 1, а) состоит в большей части из осколков зерен песка, образовавшихся при удалении пригара с тела отливки, а также металлических частиц – остатков дробы, сколов с отливок и т.п. Фракционный состав определяет и содержание химических элементов: данный вид отходов содержит в большом количестве кремний, а также железо, кислород и углерод, содержание остальных элементов исчезающе мало.

Шлам металлоабразивный с участка обнажачивания крупного литья (рисунок 1, б) представляет собой механическую смесь, состоящую из металлических частиц, образовавшихся при обработке отливки и осколков абразива. Химический состав представлен железом, кислородом, алюминием и углеродом.

Состав шлама дуговой печи (рисунок 1, в) представляет собой смесь окисленных металлических частиц и силикатов. По химическому составу этот шлак кроме железа, кислорода и кремния, также содержит хром и никель.

Шлак металлоабразивный с участка шлифовки специнструмента (рисунок 1, г), как и образец шлама с участка крупного литья, состоит из смеси металлических частиц, образовавшихся при обработке инструмента и осколков абразива. В то же время он содержит вольфрам, молибден, ванадий и хром.

Перспективными для использования в качестве модификаторов для расплавов из всех отобранных образцов, по нашему мнению, являются металлоабразивные шламы, т.к. в их составе содержится большое количество металлических частиц, в т.ч. и карбидообразующие элементы, которые должны способствовать увеличению механических свойств отливок. Наиболее перспективны шламы участков, где происходит обработка специального инструмента.

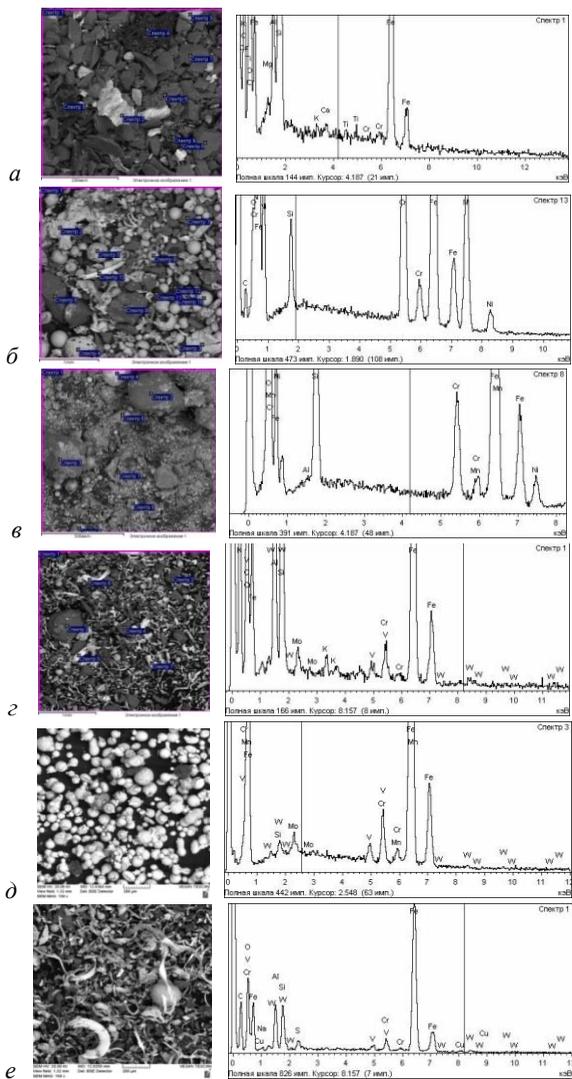


Рисунок 1 – Отходы литейных цехов ОАО «МТЗ», порошок стали P6M5, общий вид и результаты микроспектрального анализа: *а* – пыль дробетметных камер; *б* – шлак металлообразивный (участок крупного литья); *в* – шлак дуговой печи; *г* – шлак металлообразивный (участок специнструмента), *д* – порошок стали P6M5, *е* – магнитная фракция шлака стали P6M5

Исходя из полученных результатов, было принято решение опробовать металлоабразивный шлам с участка шлифовки специнструмента в качестве основы для комплексного модификатора серых чугунов. Исследования химического состава шлама (рисунок 1, з) показывают, что он содержит в немалом количестве легирующие элементы, в первую очередь вольфрам. Значительное содержание Al и Si обусловлено наличием в составе шлама частиц абразива.

На рисунке 2 показано приращение прочности чугуна σ_b при введении различных модификаторов. Видно, что даже незначительные по массе добавки (0,005 %) дисперсного материала могут значительно отклонить систему от равновесия. Эта гистограмма также подтверждает вывод о наличии эффективного диапазона количества вводимого вещества. При первоначальном ухудшении свойств дальнейшее увеличение количества введенного материала может привести к скачкообразному изменению свойств.

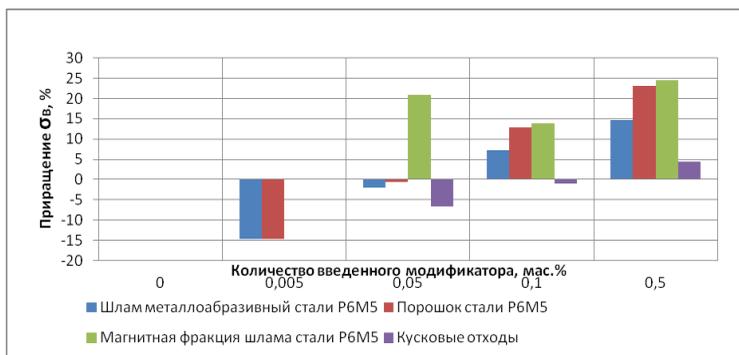


Рисунок 2 – Влияние различных модификаторов на прочность серого чугуна

С целью определения преобладающего влияния одной из составляющих (металлическая и неметаллическая) на свойства чугуна в процессе исследований в качестве модификатора был использован чистый порошок стали Р6М5 (рисунок 1, д).

Результаты экспериментов оказались схожими. Введение незначительного количества порошка стали Р6М5 (0,005 %) приводит к снижению прочности. В то же время, прирост прочности фиксиру-

ется на более высоком уровне, что может быть связано с отсутствием неметаллической составляющей (частиц абразива).

Учитывая этот факт, в последующих экспериментах принято решение использовать в качестве модификатора металлическую составляющую металлоабразивного шлама (рисунок 1, *e*), используя для удаления неметаллической составляющей магнитную сепарацию. Количество добавки, вводимой в расплав, было также скорректировано. Как следует из рисунка 1, *e*, магнитная сепарация позволяет значительно снизить долю неметаллической составляющей, что, в свою очередь, способствовало существенному увеличению прочности чугуна в результате модифицирования. Это свидетельствует о том, что наличие в составе ультрадисперсных модификаторов неметаллических частиц снижает эффективность модифицирования.

Данные экспериментов однозначно свидетельствуют об эффективности использования для модифицирования расплавов дисперсных смесей и ультрадисперсных частиц. Для окончательного подтверждения влияния размерного фактора в аналогичных условиях в расплав в таком же процентном соотношении вводили модификатор в виде кусковых отходов стали Р6М5 (куски металла до 10 мм в сечении).

Как следует из рисунка 2, изменение прочности при использовании модификаторов в виде крупных фрагментов и в виде ультрадисперсных частиц одинакового химического состава имеет схожий характер. Однако использование дисперсных частиц отличается большей эффективностью на единицу массы введенного модификатора.

Причиной снижения прочности чугуна при введении модификатора в количестве 0,005 % является междендритный точечный графит, области которого фиксируются на нетравленных шлифах. Для установления механизма повышения прочности серого чугуна в результате введения модифицирующей добавки в больших количествах (0,05–0,5 %) использовали тонкие методы исследования, поскольку заметные изменения в химическом составе металла и структуре образцов не зафиксированы [7].

На рисунке 3 представлены результаты исследования образцов немодифицированного чугуна и модифицированного магнитной

фракцией металлообразивного шлама стали Р6М5 на электронном сканирующем микроскопе.

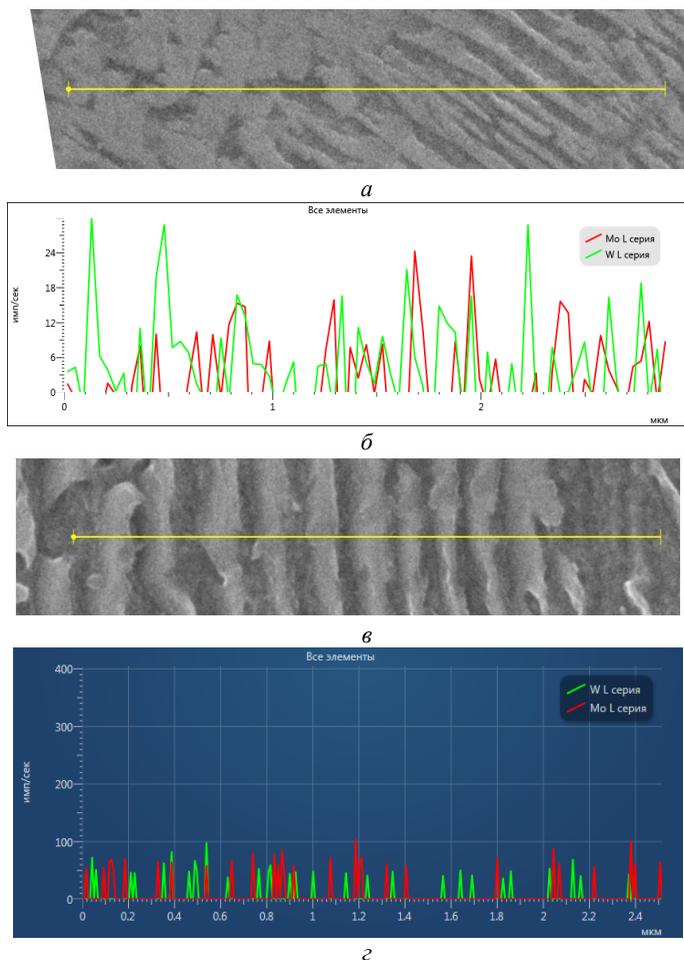


Рисунок 3 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа образцов чугуна СЧ 20:

a, *б* – контрольный; *в*, *г* – чугун, модифицированный металлической составляющей металлообразивного шлама стали Р6М5 в количестве 0,5 %

Как видно из рисунка 3, молибден и ванадий присутствуют в промышленном чугуна в виде следов. Микронзонд зафиксировал наибольшие пики этих элементов в пределах 20–35 имп/с. Положение пиков свидетельствует о преимущественном нахождении этих элементов в пластинах цементита в составе перлитных зерен. Отличительной особенностью химического состава структурных составляющих в образце модифицированного чугуна является большее, по сравнению с контрольным образцом, содержание вольфрама и молибдена. В модифицированном образце пики данных элементов находятся в пределах 50–100 имп/с против 20–35 имп/с в контрольном образце. Вольфрам и молибден, как и в немодифицированном образце, концентрируются преимущественно в пластинках цементита. Таким образом, причиной увеличения прочности чугуна в ходе экспериментов явилось микролегирование цементита в составе перлитных зерен.

В работе [8] показано, что модифицирование сплавов цинка ультрадисперсным нитридом бора приводило к схожим результатам. Модификатор также предварительно взвешивался и упаковывался в конверт из алюминиевой фольги и подавался на струю металла. Результаты эксперимента показывают (рисунок 4), что при модифицировании сплава ЦАМ 10-5 нитридом бора в количестве 0,05 % прочность возрастает в тех же пределах, как и при модифицировании 0,3 % масс. BN. Причиной увеличения прочности являются области повышенной твердости, наличие которых и обуславливает увеличение механических свойств. Данный пример показывает, что модифицирование ультрадисперсными частицами эффективно как для железоуглеродистых, так и для цветных сплавов.

Таким образом, теоретически и практически показана целесообразность модифицирования расплавов металлов ультрадисперсными частицами. Преимущество ультрадисперсных модификаторов в том, что по сравнению с модификаторами в виде крупных фрагментов, при меньшем введенном количестве они позволяют достичь больших результатов при повышении механических свойств отливков.

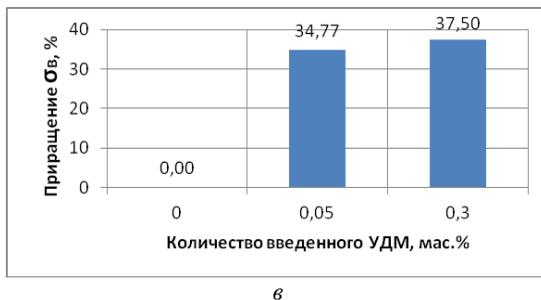
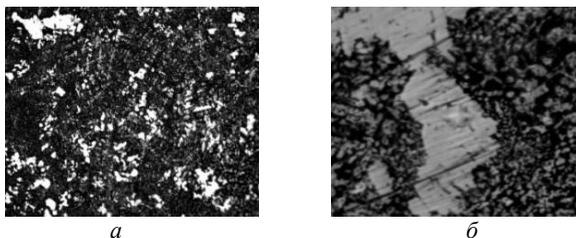


Рисунок 4 – ЦАМ 10-5, модифицированный нитридом бора [8]:
a – $\times 100$; *б* – $\times 1000$; в – приращение σ_v

Заключение. Для внедрения данной технологии разработан типовой технологический процесс модифицирования расплавов ультрадисперсными модификаторами. Замена дорогостоящего ферромolibдена и ферровольфрама при производстве отливок ответственного назначения на модификатор на основе металлообразивного шлама стали Р6М5 позволяет снизить себестоимость литья более чем на 15 %, а ожидаемый экономический эффект при годовой программе 4000 т составляет не менее 350 тыс. долл. США в год.

Список литературы

1. **Иоффе, М.А.** Теория литейных процессов: учебно-методический комплекс. Учеб. пособие, в 2-х т., том 2 / М.А. Иоффе. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2009. – 192 с.
2. **Леках, С.Н.** Внепечная обработка высококачественных чугунов в машиностроении / С.Н. Леках, Н.И. Бестужев. – Минск: Навука і тэхніка, 1992. – 269 с.

3. **Баум, Б.А.** Металлические жидкости / Б.А. Баум. – М.: Наука, 1979. – 120 с.

4. **Николис, Г.** Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. Пер. с англ. / Г. Николис, И. Пригожин. – М.: Мир, 1979. – 503 с.

5. **Полак, Л.С.** Самоорганизация в неравновесных физико-химических системах / Л.С. Полак, А.С. Михайлов. – М.: Наука, 1983. – 283 с.

6. **Пармон, В.Н.** Термодинамика неравновесных процессов для химиков / В.Н. Пармон. – Долгопрудный: изд. дом «Интеллект», 2015. – 472 с.

7. **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.

8. **Technological Possibilities of Increasing of the Products Operating under High Loads at the Stage of Metallurgical Treatment / L.V. Sudnik [et al.].** – RUSSIAN METALLURGY (METALLY). – Vol. 2018, № 13. – P. 87–92.

References

1. **Ioffe, M.A.** *Teoriya litejnyh processov: Ucheb. posobie, v 2-h t., tom 2* [Foundry process theory: Textbook. manual, in 2 volumes, volume 2] / M.A. Ioffe. – St. Petersburg: SZTU Publ., 2009. – 192 p.

2. **Lekah, S.N.** *Vnepechnaya obrabotka vysokokachestvennyh chugunov v mashinostroenii* [Out-of-furnace treatment of high-quality cast irons in mechanical engineering] / S.N. Lekah, N.I. Bestuzhev. – Minsk: Navuka i tekhnika Publ., 1992. – 269 p.

3. **Baum, B.A.** *Metallicheskie zhidkosti* [Metallic liquids] / B.A. Baum. – Minsk: Science Publ., 1979. – 120 p.

4. **Nikolis, G.** *Samoorganizaciya v neravnovesnyh sistemah. Ot dissipativnyh struktur k uporyadochennosti cherez fluktuacii* [Self-organization in nonequilibrium systems. From dissipative structures to ordering through fluctuations] / G. Nikolis, I. Prigozhin. – Moscow: Mir Publ., 1979. – 503 p.

5. Polak, L.S. *Samoorganizaciya v neravnovesnyh fiziko-himicheskikh sistemah* [Self-organization in nonequilibrium physicochemical systems] / L.S. Polak, A.S. Mihajlov. – M.: Nauka Publ., 1983. – 283 p.

6. Parmon, V.N. *Termodinamika neravnovesnyh processov dlya himikov* [Thermodynamics of nonequilibrium processes for chemists] / V.N. Parmon. – Dolgoprudnyj: izd. dom «Intellekt» Publ., 2015. – 472 p.

7. Rudnitsky, F.I. *Povyshenie prochnosti serogo chuguna putem vvedeniya v rasplav dispersnyh dobavok* [Increasing the strength of gray cast iron by introducing dispersed additives into the melt] / F.I. Rudnitsky, S.A. Kulikov, V.A. Shumigai // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2018. – Vol. 92. – No. 3. – P. 43–49.

8. Technological Possibilities of Increasing of the Products Operating under High Loads at the Stage of Metallurgical Treatment / L.V. Sudnik [et al.]. – RUSSIAN METALLURGY (METALLY). – Vol. 2018, No. 13. – P. 87–92.

Поступила 27.07.2020

Received 27.07.2020