

А.Г. Анисович^{*}, И.Н. Румянцева^{*}, В.Ф. Бевза^{**}, Е.И. Марукович^{**}, В.В. Ажаронок^{***},
С.В. Гончарик^{***}

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЧУГУНА СЧ-25 В МОДУЛИРОВАННОМ ПО АМПЛИТУДЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

**Государственное научное учреждение «Физико-технический институт НАН Беларуси»,
ул. Купревича, 10, 220141, г. Минск, Республика Беларусь, pppt-3@imaph.bas-net.by*

***Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов НАН Беларуси»,
ул. Бялыницкого –Бирули, 11, 212030, г. Могилев, Республика Беларусь*

****Государственное научное учреждение «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси», пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Республика Беларусь*

Введение

Одним из методов получения чугуновых отливок является непрерывно-циклическое литье на морозивании (НЦЛН) [1]. В его основу положен принцип направленного затвердевания чугуна, при котором наружная поверхность отливки формируется рабочей полостью кристаллизатора, а внутренняя получается непосредственно из расплава и определяется только фронтом затвердевания. Благодаря этому методу формируют отливки серого чугуна для изготовления деталей цилиндропоршневых групп двигателей внутреннего сгорания, компрессоров и коробок гидромеханических передач автотракторной техники. Высокая эксплуатационная надежность и долговечность данных узлов и механизмов обусловлены достаточно жесткими требованиями к структуре и свойствам формируемых отливок: перлитная матрица (содержание феррита менее 5%), мелко пластинчатый графит (25–95 мкм), твердость ~100 HRB, прочность на разрыв ≥ 25 кг/мм², высокая износостойкость. Метод НЦЛН обеспечивает повышенные физико-механические и эксплуатационные свойства отливок; высокую производительность, экономичность и экологическую безопасность технологического процесса, относительно простой и быстрый переход с одного типоразмера отливок на другой, а также возможность управления режимом их вторичного охлаждения. Однако данному методу присущ ряд недостатков, заключающихся в наличии отбела на наружной поверхности и обратного отбела в приповерхностном слое внутри отливки, в присутствии в ее теле большого содержания феррита и точечного междендритного графита (графита переохлаждения), неравномерности в распределении дисперсности фазовых составляющих и металлической матрицы по поперечному сечению отливки. Применение для их устранения традиционных способов термической постобработки отливок требует дополнительных энергозатрат, ведущих к удорожанию производства. При этом задача обеспечения равномерности структуры методами термической обработки, как правило, решается неудовлетворительно [2].

Перспективными способами изменения структуры и свойств металлов и сплавов считаются импульсные нетермические энергетические воздействия [3], среди которых особое место занимает магнитно-импульсная обработка (МИО) [4–5]. Магнитные поля широко используются для модификации структуры и свойств различных материалов: водно-электролитных растворов [6], закристаллизованных расплавов, биологических объектов [7–8], полимерных тканей и волокон [9–11]. Простота технологии, а также высокая производительность применяемых устройств и установок позволили рекомендовать данный метод обработки для различных областей хозяйственной деятельности, но наиболее значительные результаты были получены в машиностроении. В частности, применение МИО позволило улучшить характеристики железоуглеродистых сплавов [12] и сплавов цветных металлов [13], уменьшить остаточные и усталостные напряжения в деталях и конструкциях, повысить стойкость режущего инструмента [14]. Следует отметить, что, несмотря на достаточно широкое практическое внедрение МИО, интерес к ней со стороны исследователей и представителей промышленности в настоящее время не ослабевает. Изучение воздействия магнитных полей на металлы и сплавы продолжается и считается одним из перспективных направлений в металловедении и физике твердого

тела. Однако при этом практически во всех работах используются сильные (с напряженностью $H \sim \text{кА/м}$) [15] и сверхсильные ($H \sim \text{МА/м}$) [16] магнитные поля, получение которых является не простой технической задачей [17]. Действие же на металлы и сплавы легко возбуждаемых слабых магнитных полей с напряженностью H порядка нескольких сотен А/м является мало изученным, хотя полученные рядом авторов результаты показывают перспективность такого воздействия. Так, например, в работе [18] исследовано влияние обработки в слабоинтенсивном магнитном поле на свойства стали 4Х5МФ1С. Изменения структуры и свойств бериллиевой бронзы БрБ2 под воздействием магнитного поля с напряженностью $H \sim 900$ А/м изучены в [19]. Особенности влияния слабого магнитного поля на структуру конденсированных сред рассмотрены авторами [20].

Полученные результаты позволяют предположить, что слабоинтенсивная МИО может быть эффективной и для перестройки структуры серого чугуна.

В настоящей работе исследованы возможности изменения структуры чугуна СЧ-25 путем воздействия на сформированные МНЦЛН образцы модулированного по амплитуде слабоинтенсивного высокочастотного магнитного поля.

Экспериментальная установка и методика исследований

Слабоинтенсивная высокочастотная магнитно-импульсная обработка (ВЧМИО) чугуна проводилась на экспериментальной установке, созданной на основе генератора переменного тока ВЧИ-62-5-ИГ-101. Установка позволяла возбуждать электромагнитное поле на промышленной частоте $f = 5,28$ МГц, локализованное в водоохлаждаемом трехвитковом индукторе длиной $L = 90$ мм и внутренним диаметром $D = 80$ мм, который подключен в качестве индуктивной нагрузки к выходу генератора ВЧИ-62-5-ИГ-101 (рис. 1). Образцы 1 помещались в диэлектрическую матрицу 2 и вносились в осевую зону индуктора 3 на удалении 40 мм от его верхнего среза.

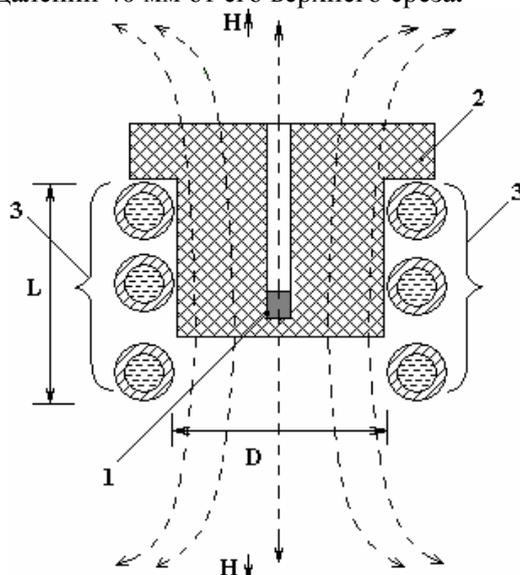


Рис. 1. Принципиальная схема обработки чугунных образцов в высокочастотном магнитном поле: 1 – образец; 2 – диэлектрическая матрица для фиксации положения образца; 3 – водоохлаждаемый индуктор

Среднеквадратичные величины напряженности магнитной H и электрической E составляющих электромагнитного поля на оси индуктора определялись измерителем напряженности высокочастотного поля ПЗ-15 с индикатором ЯБП-110 и составляли 590 А/м ($B \approx 1$ мТл, с погрешностью $\sim 6\%$) и 12700 В/м (с погрешностью $\sim 4\%$) соответственно. Амплитудные значения $H^* = \sqrt{2} \overline{H}$ и $E^* = \sqrt{2} \overline{E}$ достигали 835 А/м ($B \approx 1,5$ мТл) и 17960 В/м. Погрешность воспроизведения режима работы генератора не превышала 0,5%, вследствие чего суммарная погрешность определения величины напряженностей электромагнитного поля, действующего на образец, была не более 10%. Обработка проводилась в воздухе при атмосферном давлении по циклограмме, представленной на рис. 2. Каждый образец подвергался воздействию высокочастотного синусоидального магнитного поля, модулированного по амплитуде в пределах от 0 до 835 А/м. Период модуляции составлял $\Delta t \sim 3$ с и формировал единичный цикл обработки. Количество единичных циклов n изменялось от 1 до 8. При этом нагрев образца не превышал $40\text{--}60^\circ\text{C}$, и тем самым была исключена возможность термического изменения его структуры.

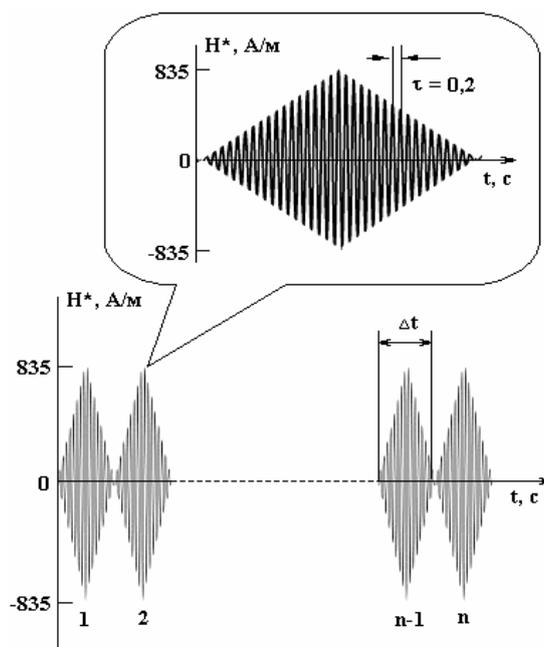


Рис. 2. Временная циклограмма обработки металлических образцов магнитной составляющей высокочастотного электромагнитного поля

Изменения в структуре чугуна после ВЧМИО исследовались методом прицельной металлографии с использованием металлографического комплекса МИКРО-200. Контролируемый участок шлифа помечался меткой (царапиной) на его поверхности. Химическое травление поверхности при изучении ее микроструктуры проводили 3% раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Рентгеноструктурный анализ исследуемых образцов был выполнен на дифрактометре ДРОН-3М в излучении $\text{Cu}_{K\alpha}$.

Результаты исследований и их обсуждение

В исходном состоянии структура чугуна характеризуется перлитной эвтектикой и графитом (рис. 3,а). На некоторых участках шлифа фиксируются отдельные включения свободного феррита и цементита (рис. 4, 5), а также точечный графит. Высокочастотная МИО чугуна приводит к изменению морфологии включений графита, главным образом к увеличению их толщины. Перлитная составляющая также претерпевает изменения, проявляющиеся в диспергировании перлита и повышении его однородности при наращивании количества циклов воздействия. Одной из особенностей ВЧМИО является возможность устранения с ее помощью механических повреждений поверхности (рис.3). Участок шлифа, содержащий царапину (метку), отмечен на рис. 3,а (исходное состояние) стрелкой. На рис.3,б,в представлены изображения метки, из которых прослеживается поэтапная трансформация структуры чугуна в зоне повреждения в зависимости от количества циклов ВЧМИО. Видно, что после двух циклов воздействия (рис. 3,б) резкость изображения метки еще отличается от резкости изображения окружающих ее частей шлифа, но после четырех циклов все участки шлифа уже находятся в одной плоскости и резкость их изображения практически одна и та же, то есть произошло “залечивание” механического дефекта поверхности.

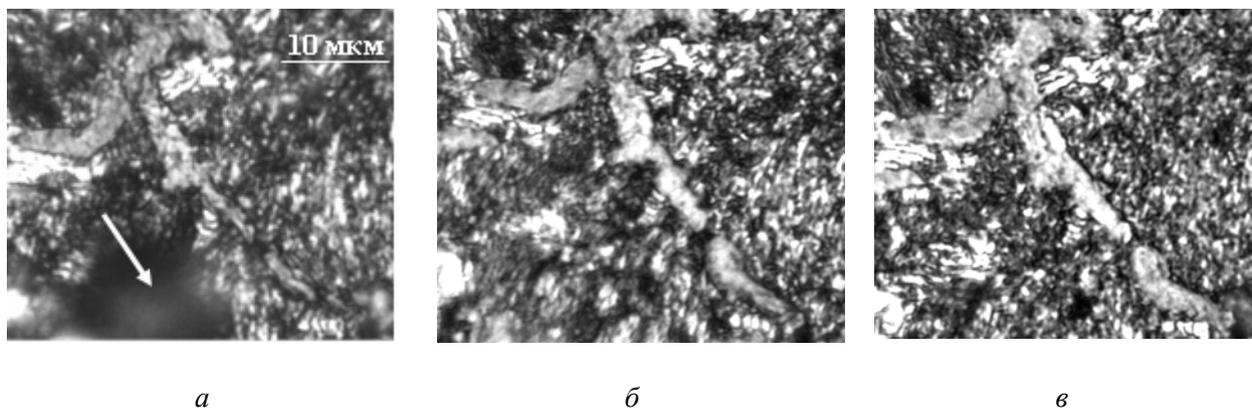
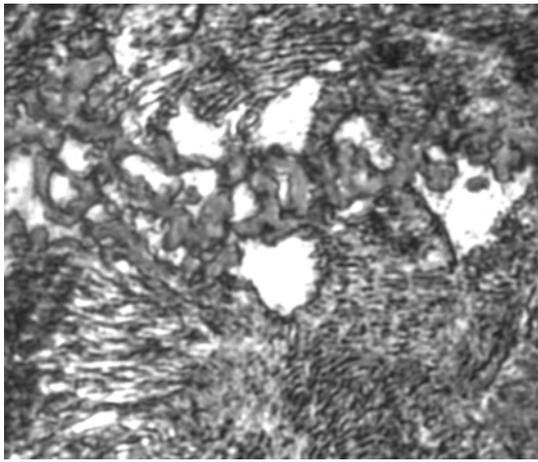
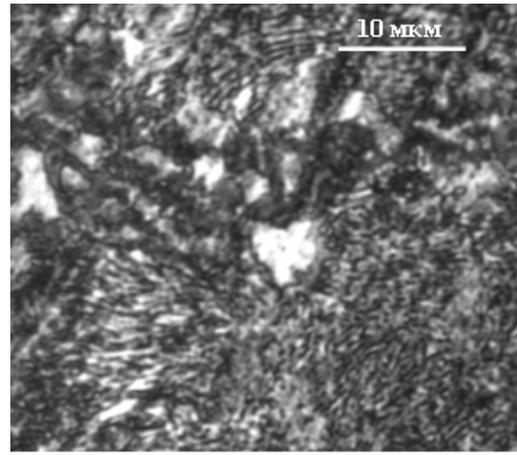


Рис. 3. Изменение структуры чугуна при ВЧМИО: исходное состояние (а); после двух (б) и четырех (в) циклов воздействия

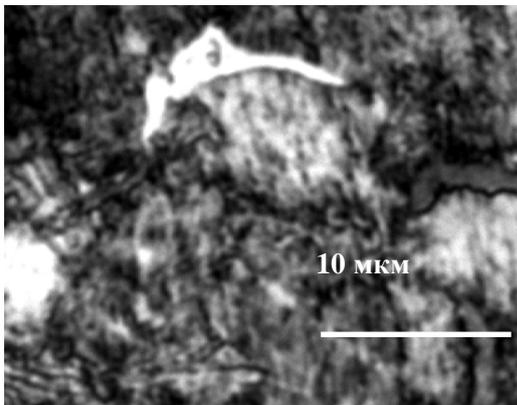


a

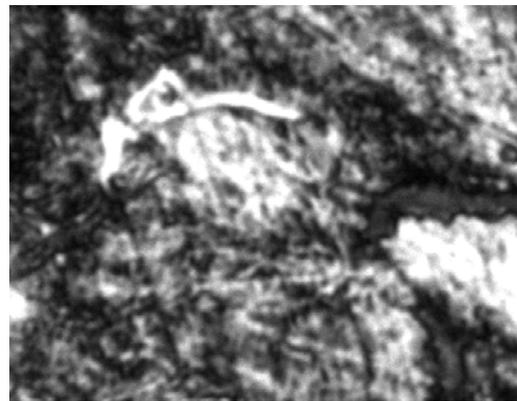


б

Рис. 4. Изменение ферритной составляющей при ВЧМИО после двух (а) и четырех (б) циклов воздействия



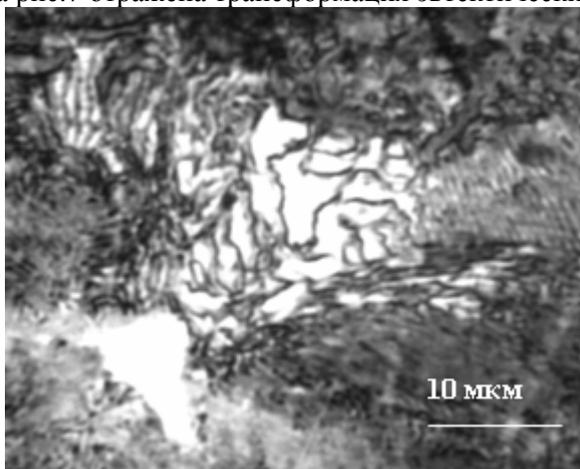
a



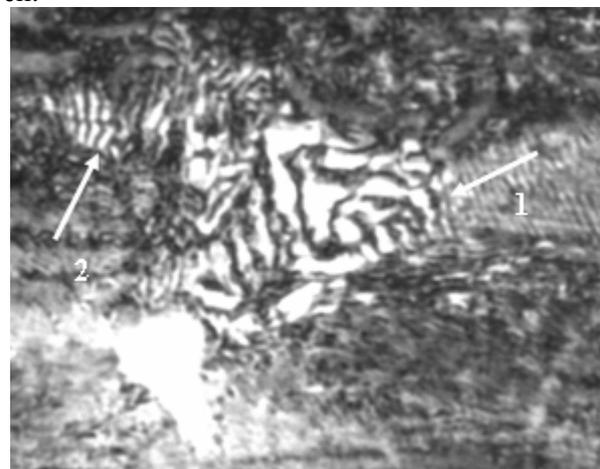
б

Рис. 5. Изменение морфологии включения цементита при ВЧМИО после двух (а) и четырех (б) циклов воздействия

Применяемая обработка способствует снижению количества феррита в структуре чугуна (рис. 4). С увеличением количества циклов воздействия феррито-графитный комплекс (рис. 4,а) трансформируется в перлит (рис. 4,б), при этом дисперсность перлитной матрицы повышается. Более детально изменения в эвтектике видны на рис. 6 и 7, где представлены изменения структуры крупного фрагмента эвтектоида и эвтектического зерна. В результате ВЧМИО наблюдаются утончение пластинок феррита и цементита, их дробление (рис. 6, стрелка 1), изменение длины (рис. 6, стрелка 2). На рис.7 отражена трансформация эвтектических зерен.



a



б

Рис. 6. Изменение крупного фрагмента эвтектики после ВЧМИО: а – исходное состояние; б – после четырех циклов воздействия

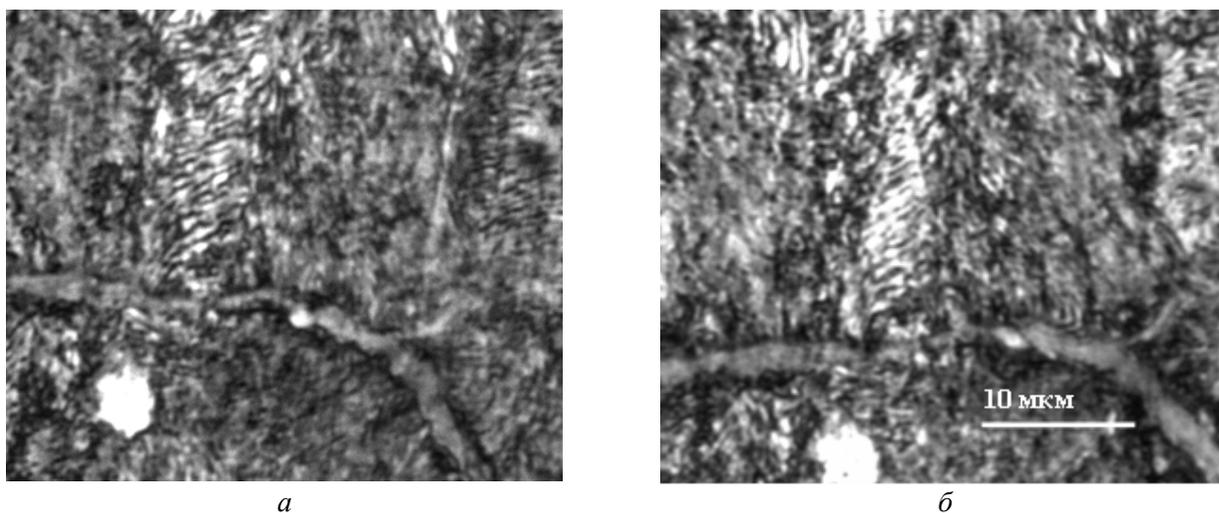


Рис. 7. Изменение морфологии эвтектического зерна после ВЧМИО: а – исходное состояние; б – после двух циклов воздействия

Характерной особенностью процесса ВЧМИО является изменение неферромагнитных фаз чугуна. Включения свободного цементита изменяют форму, наблюдаются уменьшение их толщины, разделение включений на части (см. рис. 5).

Включения же графита укрупняются с одновременным преобразованием их внутренней структуры (рис. 8).

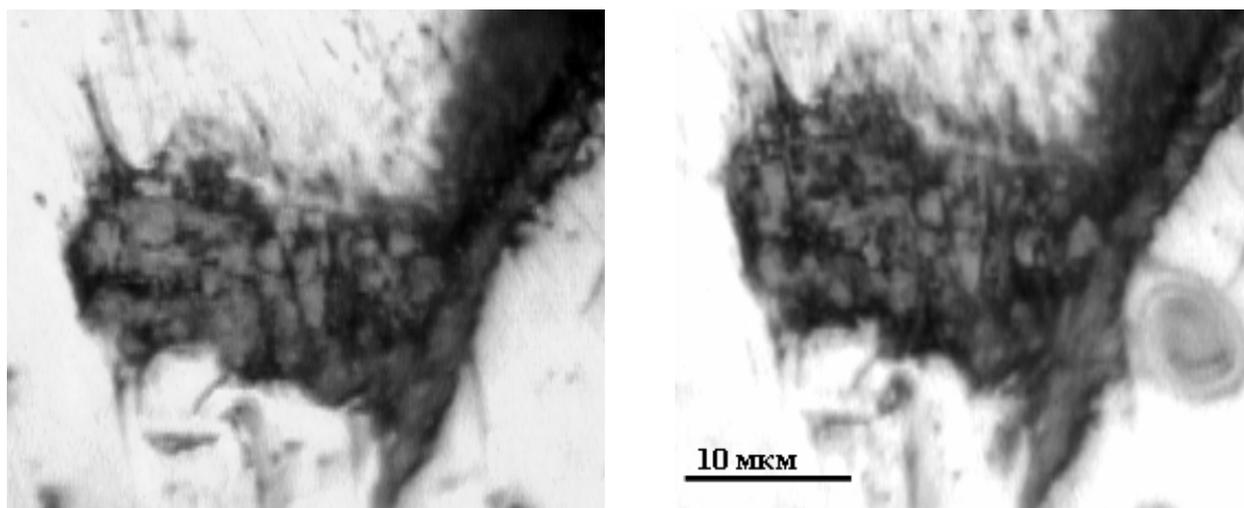


Рис. 8. Изменение структуры графита при ВЧМИО после шести (а) и восьми (б) циклов воздействия

Анализ рентгенограмм образцов показал, что ВЧМИО, не изменяя фазовый состав чугуна, приводит к изменению соотношения между интенсивностями интерференционных линий фаз: феррита, графита и цементита. Как видно из табл. 1, соотношение интенсивностей интерференционных линий в исходном литом состоянии не совпадает с табличными данными [21], в то время как после магнитно-импульсного воздействия соотношение интенсивностей практически совпадает с расчетными значениями [21]. Эффект связан, по-видимому, со стабилизацией ферритной фазы и снижением уровня внутренних напряжений. Происходящее при этом снижение абсолютной интенсивности линии феррита может быть объяснено снижением количества свободного феррита в структуре чугуна. Изменение относительных интенсивностей линий феррита может быть также связано с наличием текстуры. Обычно при литье в железе и его сплавах развивается текстура $\langle 100 \rangle$ [22]. Вместе с тем известно, что при непрерывном и трубном литье может возникать второй вид ориентированных кристаллов литья. Этим может объясняться развитие текстуры $\langle 110 \rangle$ исходного состояния при непрерывном литье. Изменение соотношения интенсивностей интерференционных линий может быть также связано с устранением текстуры литья при ВЧМИО.

Таблица 1. Изменение интенсивностей интерференционных линий феррита для исходного чугунного образца и после его ВЧМИО

HKL	2θ, град	d, Å	Интенсивность		
			Для исходного образца, мм (%)	Для того же образца после ВЧМИО, мм (%)	Расчетные значения, %
(110)	44,833	2,024	1480 (100)	593 (100)	100
(200)	65,083	1,434	103 (7)	90 (17)	19
(211)	82,500	1,170	204 (14)	171 (33)	30
(220)	99,083	1,014	45 (3)	40 (7)	9
(310)	116,500	0,907	39 (2,5)	58 (12)	12

Что касается углерода и цементита, то наблюдаются (табл. 2) повышение интенсивностей их интерференционных линий с малой суммой квадратов индексов относительно интерференционной линии (110) феррита и снижение интенсивностей или же исчезновение линий с большой суммой квадратов индексов. Возможно, это связано с повышением при ВЧМИО уровня микронапряжений в данных фазах за счет изменения их морфологии и структуры (рис. 6).

Таблица 2. Изменение интенсивностей линий углерода и цементита после ВЧМИО

Интенсивность, %					
Углерод			Цементит		
HKL	Для исходного образца	Для того же образца после ВЧМИО	HKL	Для исходного образца	Для того же образца после ВЧМИО
002	0,7	6,8	112	0,4	1,91
100	0,6	2,5	121	0,6	-
004	-	1,09	210	0,9	4,6
112	0,36	-	113	0,14	-
			122	0,4	1,6
			025	0,7	-
			136	1,07	-

Установленные изменения структуры чугуна могут вызывать изменение его прочности. С целью выяснения такой возможности ВЧМИО были подвергнуты автомобильные детали (рис. 9) из чугуна СЧ-25: кольца уплотнительные для трансмиссии 1, 3 и кольцо поршневое для пневмокомпрессора 2. Обработка колец проводилась по временной циклограмме (см. рис. 2). Число единичных циклов n для разных экземпляров каждого образца было равно 2, 4 и 8. Изменение прочности деталей в результате применения ВЧМИО оценивалось путем измерения их твердости с использованием твердомера по методу Супер-Роквелла с последующим переводом полученных значений HRA в их значения по шкале Бринеля HB. Результаты измерений приведены в табл. 3, из которой видно, что ВЧМИО увеличивает твердость чугуна. В частности, после ВЧМИО твердость поршневого кольца пневмокомпрессора возросла от 177 до 208 ед. HB.

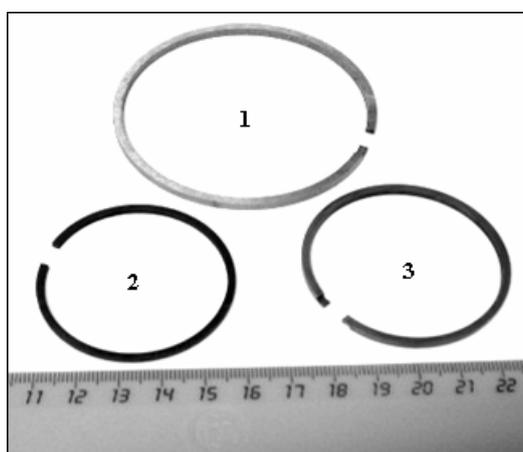


Рис. 9. Автомобильные детали из чугуна

Таблица 3. Изменение твердости деталей из чугуна после ВЧМИО

№ образца	Наименование	Количество циклов n	HRA	HB
1	Кольцо уплотнительное для трансмиссии ($D = 70\text{мм}$)	0	58	197
		2	58	197
		4	58,3	201,6
		8	58	197
2	Кольцо поршневое пневмокомпрессора ($D = 47\text{мм}$)	0	55,6	177,6
		2	59,7	208
		4	57,3	190,6
		8	58,3	201,6
3	Кольцо уплотнительное для трансмиссии ($D = 50\text{мм}$)	0	55	170
		2	55,7	175,6
		4	53	171,3
		8	56	179

Следует отметить, что в настоящее время наибольшее количество работ посвящено изучению влияния магнитного поля на изменения структуры металлов и сплавов одновременно с их термической обработкой [15–16, 23–25]. Достаточно надежно установлено, что при магнитно-импульсном воздействии на металлы и сплавы происходит изменение плотности дислокаций и дисперсности структуры, осуществляются интенсификация диффузионных процессов и повышение концентрации точечных дефектов, наблюдаются изменения структуры и физико-механических характеристик в зависимости от количества циклов воздействия, формируются неоднородные напряженные состояния. Однако четкого и согласованного представления о механизмах взаимодействия магнитного поля с металлами и сплавами пока нет. Это связано как с синергетикой инициируемых полем физико-химических процессов в обрабатываемом образце, так и с трудностью их диагностирования и интерпретации полученных результатов.

Вместе с тем установленные особенности магнитно-импульсного воздействия, а также приведенные в [3] результаты анализа различных методов высокоэнергетической обработки материалов позволяют сделать предположение о схожести структурных эффектов, вызываемых магнитно-импульсными и другими видами кратковременных воздействий.

Исходя из этого можно считать, что формирование структуры металлов и сплавов при МИО определяется процессами, подобными по своему структурному эффекту деформации или нагреву. С одной стороны, укрупнение включений графита – характерная особенность теплового воздействия. Изменение соотношения интенсивности линий на рентгенограмме сплава – процесс релаксационный, результатом которого является формирование равновесной структуры. С другой стороны, явление диспергирования эвтектики при МИО не определяется процессами, подобными отжигу (то есть приводящими к укрупнению структуры). В условиях МИО, когда непосредственные нагрев и пластическая деформация отсутствуют, изменение эвтектической составляющей может иметь место вследствие полной трансформации эвтектического зерна, включая его переориентацию и формирование высокоугловых границ.

Известно, что метод МИО основан на локальном поглощении энергии W_0 магнитного поля структурными неоднородностями материала и переводе его из одного неравновесного состояния в другое, отличающееся более высокой устойчивостью. При этом выделяют два основных канала диссипации W_0 : намагничивание материала и потери W_0 на локальный нагрев вследствие возникновения в его теле вихревых микротоков. В процессе намагничивания в структуре материала под действием момента магнитных сил $K = \mu H$ происходят смещение границ доменов, у которых намагниченность μ ориентирована близко к направлению поля H , приводящего к росту их объемов за счет изменения объема соседних доменов, а также изменение направления самопроизвольной намагниченности отдельных доменов и кристаллитов путем поворота вектора намагниченности μ [14]. В импульсно-периодическом магнитном поле, по мере роста величины его напряженности H , намагничивание структурных элементов в обрабатываемом материале происходит до индукции насыщения, а затем, при уменьшении значений H , спадает до остаточной индукции. В результате за счет разницы величин индукции насыщения и остаточной индукции возникает магнострикционный эффект.

В чугуне из-за различия в магнитных свойствах присутствующих в нем феррита [26], цемента [27] и графита [28] величина магнострикции различных фаз существенно разная, вследствие че-

го в процессе ВЧМИО в чугунах может формироваться неоднородное напряженное состояние. При этом величина микродеформации в максимуме может составлять от единиц до десятков МПа [3]. Магнитоэластическая деформация может играть роль деформационного фактора аналогично термическим деформациям при термоциклировании [3], под действием которого накапливаются дефекты кристаллического строения. Условия пластической деформации при импульсных воздействиях на материалы существенно отличаются от условий статического деформирования в силу кратковременности и периодичности силового воздействия и разнообразия механизмов релаксации внутренних напряжений. Релаксационные процессы в свою очередь оказывают существенное влияние на подвижность атомов и массоперенос в материале.

Соответствующей мощности импульсные воздействия (термические, магнитные, ультразвуковые, лазерные) инициируют аномальный массоперенос в металлах и сплавах. Повышение коэффициента диффузии при импульсных воздействиях может составлять несколько порядков. Интенсивные диффузионные процессы играют роль аналога теплового воздействия.

Структурообразование в металлах необходимо рассматривать как результат деформационного эффекта при импульсном нагружении и релаксационного эффекта при действии и снятии нагрузки. При импульсных воздействиях деформационные процессы и релаксация напряжений повторяются периодически [3]. Основным механизмом релаксации, реализующимся при импульсных воздействиях, можно считать диффузионно-сдвиговую. Основным релаксационным процессом является фрагментация [3], главная особенность которой – формирование высокоугловых границ деформационного типа с повышенной плотностью зернограницных дислокаций.

“Залечивание” дефектов поверхности – непосредственное проявление релаксационных процессов. Возможность “залечивания” дефектов в металлах в импульсных магнитных полях отмечена в работах [29–30]. По аналогии с процессом массопереноса в условиях импульсного механического нагружения авторы [29–30] предполагают, что в условиях воздействия магнитно-импульсного поля преобладающий вклад в перенос вещества вносят межузельные атомы, движение которых обуславливает резкое увеличение диффузии атомов в металлах в импульсном магнитном поле. Однако сведения о влиянии переменных и импульсных магнитных полей на диффузионные и диффузионно-контролируемые процессы в твердых телах крайне ограничены. Прямые исследования влияния переменного магнитного поля на гетеродиффузию в металлах и сплавах приведены в [31].

Классический механизм “залечивания” дефектов связан с формированием и движением высокоугловых границ в процессе рекристаллизации. Этот механизм был предложен в [32] для описания изменения пористости в процессе спекания. В процессе движения граница приближается к отдельным порам, благодаря чему они оказываются вблизи стока вакансий. Двигающаяся граница “сметает” поры на своем пути. Реализация такого механизма требует длительного отжига при повышенной температуре.

Эффект “залечивания” пор при термическом импульсном воздействии был объяснен на основе диффузионно-дислокационного механизма, характерного для высоких значений напряжений и температур в условиях всестороннего сжатия [33]. Дополнительным фактором (кроме деформационного фактора за счет непрерывного изменения температуры), обеспечивающим появление компоненты всестороннего сжатия, служит поверхностное давление на границе матрица-пора, зависящее от поверхностного натяжения и кривизны поверхности раздела. Диффузионно-дислокационный механизм “залечивания” пор учитывает участие дислокаций в процессе массопереноса. Основная роль отводится дислокационным петлям, генерируемым порами при напряжениях, близких к теоретической прочности матрицы. Оценка давления, обеспечивающего “залечивание” поры [33], дает величину порядка 10 ГПа. Для условий импульсных воздействий это давление может снижаться, так как дислокационные петли возникают вследствие “схлопывания” вакансионных дисков и призматических дислокационных петель [27]. Основным механизмом “залечивания” пор при термоциклической обработке, наряду с диффузионно-дислокационным, является вакансионный. Его действие определяется изменением плотности дислокаций на поверхности поры вследствие развития процессов деформационного упрочнения и разупрочнения. При этом напряжения вокруг поры частично релаксируют.

Заключение

В результате выполненных исследований установлено, что структурными эффектами применяемого высокочастотного магнитно-импульсного воздействия на чугун СЧ-25 являются “залечивание” дефектов поверхности, диспергирование перлита, снижение количества феррита в структуре вследствие трансформации феррито-графитного комплекса в перлит, укрупнение и изменение внутренней структуры включений графита, изменение морфологии цементита.

Наблюдаемые структурные изменения обуславливают повышение твердости автомобильных деталей из чугуна СЧ-25.

Детальный анализ механизмов изменения структуры металлов под воздействием импульсно-периодического магнитного поля требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований, в том числе и в смежных металлургических областях.

Работа выполнена при совместной финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь и Могилевского исполнительного комитета в рамках проекта № Мг-01 Программы развития Могилевской области.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Марукович Е.И., Бевза В.Ф., Груша В.П.* Реализация концепции пристеночной кристаллизации для получения высококачественных полых цилиндрических заготовок из чугуна // Сб. научных тр. «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин». Новополоцк. 2007. Т. 1. С. 33–35.
2. *Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М.* Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: МИСИС, 2005. 432 с.
3. *Анисович А.Г.* Закономерности процессов структурообразования и термодинамический аспект организации структуры металлов при нестационарных энергетических воздействиях. Автореф. дис. докт. физ.-мат. наук. Минск, 2005.
4. *Мартин Дж., Доэрти Р.* Стабильность микроструктуры металлических систем. М.: Атомиздат, 1978. С. 247–252.
5. *Анисович А.Г.* Импульсные методы обработки металлов Тендер. 2006. № 56. С. 14–16.
6. *Кокшаров С. А., Константинов О. И., Мельников Б.Н., Морыганов А. П.* Влияние магнитного поля на состояние растворов активных красителей // Журн. прикл. химии. 1990. Т.63. № 3. С. 565–571.
7. *Бинги В.Н., Савин А.В.* Физические проблемы действия слабых магнитных полей на биологические системы // Успехи физических наук. 2003. Т. 173. № 3. С. 265–300.
8. *Городецкая Е.А., Спиридович Е.В., Коревко И.А., Ажаронок В.В., Филатова И.И., Некрашевич Я.И.* Влияние плазменно-радиоволновой обработки на посевные качества семян // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2007. Т.51. №6. С. 256–262.
9. *Ажаронок В.В., Филатова И.И., Воцула И.В., Дзугунович В.А., Царюк О.В., Горжанова Т.Н.* Изменение оптических свойств бумаги под влиянием магнитной составляющей высокочастотного электромагнитного поля // ЖПС. 2007. Т. 74. № 4. С. 421–426.
10. *Персидская А. Ю., Кузеев И. Р., Антипин В. А.* О влиянии импульсного магнитного поля на механические свойства полимерных волокон // Хим. физика. 2002. Т.21. № 2. С. 90–98.
11. *Гуль В. Е., Ханчич О. А., Савченко Н. А.* Воздействие однородного магнитного поля на термотропный жидкокристаллический сополимер оксibenзойной кислоты и этилентерефталата // Механика композиционных материалов и конструкций. 1995. Т.1. № 2. С. 124–128.
12. *Счастливец В. М., Ромашев Л. Н., Яковлева И. Л., Садовский В. Д.* Электронно-микроскопическое исследование структуры кристаллов мартенсита, зародившихся под действием импульсного магнитного поля // Физика металлов и металлургия. 1981. Т. 51. № 4. С. 773–782.
13. *Здор Г.Н., Анисович А.Г., Яскович А.Г.* Применение импульсного магнитного поля для повышения механических свойств сплавов цветных металлов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. №5. С. 65–70.
14. *Малыгин Б.В.* Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. М.: Машиностроение, 1989. 112 с.
15. *Агапова Е.В., Гундырев В.М., Сидоров Е.В.* О структурных изменениях в сплаве ЮНДК35Т5АА при термомагнитной обработке // Физика металлов и металлургия. 2006. Т.102. № 2. С.178–183.
16. *Калетина Ю.В., Фокина Е.А., Счастливец В.М.* Особенности влияния импульсного и постоянного магнитных полей на мартенситное превращение в сплавах с изотермической кинетикой // Физика металлов и металлургия. 2005. Т. 99. № 1. С. 31–37.
17. *Монтгомери Д.Б.* Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. М.: Мир, 1971. 354 с.
18. *Гвоздев А.Г., Бородин И.П., Гвоздева Л.И., Сушкова Т.В., Пахомов А.А.* Исследование влияния обработки в импульсном магнитном поле на свойства стали 4Х5МФ1С // Материалы V Международной

научной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций», 12-14 марта 2008 г., Оренбург, Россия. Т. 1. С. 370–373.

19. Здор Г.Н., Анисович А.Г., Шиманович В.Д., Ажаронок В.В., Дресвин С.В. Трансформация структуры и свойств бериллиевой бронзы под воздействием высокочастотного магнитного поля // Известия РАН, Металлы. 2003. № 4. С.100–105.

20. Масловский В.М. О механизме влияния слабого магнитного поля на структуру конденсированных сред // Материалы IV Международного научно-технического семинара по нетрадиционным технологиям—Ботевград, 1989. София-Горький, 1989. С. 5–14.

21. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: Металлургия, 1970. Приложение. 105 с.

22. Вассерман Г., Гревен И. Текстуры металлических материалов. М.: Металлургия, 1969. 655с.

23. Фокина Е.А., Калетина Ю.В., Счастливец В.М. Особенности мартенситного превращения деформированного аустенита в сплаве 50Н26 при охлаждении и магнитной обработке // Физика металлов и металловедение. 2006. Т.101. № 4. С. 381–391.

24. Пустовойт В.Н., Сорочкина О.Ю. Влияние внешнего магнитного поля в температурном интервале сверхпластичности мартенситного превращения // Бернштейновские чтения «Термомеханическая обработка металлических материалов», 26–27 октября 2004, Москва. С.32.

25. Клевцова Н.А., Клевцов Г.В., Фесенюк М.В. Воздействие магнитного поля и низкой температуры на мартенситные превращения в сплаве Fe-Cr-Mn-V // Материалы V Международной научной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций», 12–14 марта 2008 г., Оренбург, Россия, Т. 1. С.16–20.

26. Прохорова А.М. Физический энциклопедический словарь. Под. ред. Советская энциклопедия, М.: 1983. С. 384–386.

27. Драккин Б.М., Кимстач Г.М. Магнитные свойства цементита в железоуглеродистых сталях // Физика металлов и металловедение. 1995. Т. 80. № 2. С. 163–166.

28. Макарова Т.Л. Магнитные свойства углеродных структур. Обзор // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. № 4. С. 641–664.

29. Ларииков Л.Н. Залечивание дефектов в металлах. Киев. Наукова думка, 1980. 280 с.

30. Ларииков Л.Н., Фальченко В.М., Герцирикен. О механизме влияния импульсного магнитного поля на подвижность атомов в железе и алюминии // Доклады АН СССР. 1978. Т. 239. № 2. С. 312–314.

31. Веражковская М.А., Петров С.С., Покоев А.В. Гетеродиффузия Al в α -Fe в импульсном магнитном поле // Письма в ЖТФ. 2007. Т.33. Вып. 22. С. 43–47.

32. Гегузин Я.Е. Макроскопические дефекты в кристаллах. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1962. 252 с.

33. Тофпенец Р.Л., Соколов Ю.В., Залужный Г.И., Попок Д.А. Механизм и кинетика залечивания пор при ТЦО напыленных покрытий // Весці НАН Беларусі. Сер.Фіз.-тэхн.наук. 1999. № 2. С. 10–13.

Поступила 06.11.08

Summary

The investigation has been made of the effect exerted by high-frequency magnetic field on changing the structure and properties of the gray iron (C -3,16; Si -1,46; Mn-0,9; Cr -0,1; Ni- 0,18; Cu -0,5) produced using the method of continuous cyclic freeze crystallization casting. It is established that structure changes resulting from iron exposure by high-frequency magnetic-pulse field include “healing” of surface defects, perlite dispersion, decrease of ferrite amount in structure due to transformation of ferrite-graphite complex into perlite, coarsening and changing of internal graphite inclusion structures as well as changing the cementite morphology. The observed structure changes determine the hardness decrease of automobile parts of piston-cylinder unit.