

## ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ КОЛЕЦ ИЗ ЧУГУНА ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ

\*Государственное научное учреждение «Физико-технический институт НАН Беларуси»,  
ул. Купревича, 10, г. Минск, 220141, Республика Беларусь, [anna-anisovich@yandex.ru](mailto:anna-anisovich@yandex.ru)

\*\*Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов НАН Беларуси»,  
ул. Бялыницкого - Бирули, 11, г. Могилев, 212030, Республика Беларусь, [sncl@yandex.ru](mailto:sncl@yandex.ru)

\*\*\*Государственное научное учреждение «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси», пр. Независимости, 68, г. Минск, 220072, Республика Беларусь,  
[azharonok@imaph.bas-net.by](mailto:azharonok@imaph.bas-net.by)

### Введение

Одна из практически важных задач в авто- и тракторостроении – увеличение ресурса работы деталей цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания, в частности поршневых колец. В настоящее время основным материалом, используемым при их изготовлении, является чугун с пластинчатой и шаровидной формой графита. Малый срок службы колец чаще всего связан с несоответствием их структуры требованиям ГОСТа.

Высокое качество обеспечивает разработанный в Институте технологии металлов НАН Беларуси принципиально новый технологический способ литья маслотнозатворных заготовок поршневых колец без применения стержня в водоохлаждаемую форму. В основу метода положен принцип литья намораживанием [1], обеспечивающий изготовление чугунных отливок с плотной мелкодисперсной структурой и повышенными физико-механическими свойствами по сравнению с традиционными методами литья. Так, например, относительное удлинение отливок, полученных данным способом из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ) ферритного класса, сопоставимо с аналогичным показателем для стальных образцов и составляет 12–15%. Эти отливки также отличаются высокими показателями упругих свойств, сохраняющимися при нагреве до температур 300–4000<sup>0</sup>С. Как следствие, отливки с такими физико-механическими характеристиками нашли широкое применение при изготовлении поршневых и уплотнительных колец различного назначения, но наиболее эффективным оказалось их использование в производстве уплотнительных колец для турбокомпрессоров, работоспособность и долговечность которых напрямую зависят от уплотнения ротора с корпусом и подшипником. Применяемое в качестве уплотнительного элемента упругое разрезанное кольцо устанавливается беспросветно с тепловым зазором в замке 0,01–0,05 мм, и за счет сил упругости оно должно оставаться неподвижным при вращении ротора с частотой до 160000 об/мин. Заданную величину замка колец в свободном состоянии обычно получают путем их термофиксации. Следует, однако, отметить, что с уменьшением размера колец возрастают трудности как с получением отливки, так и с изготовлением самого изделия. Последнее связано с тем, что, например, диаметральная сила сжатия кольца из ВЧШГ диаметром 13 мм должна быть на уровне аналогичной характеристики для верхнего компрессионного кольца диаметром 85 мм двигателя «мерседес-бенц», которое, в отличие от 13 мм кольца, имеет в 4,5 раза большую площадь поперечного сечения [2].

В этой связи исследования, направленные на изыскание способов и технологий, обеспечивающих получение требуемой структуры используемых в отечественном машиностроении чугунных отливок, и на достижение необходимых физико-механических свойств изготавливаемых из них компрессионных колец небольшого диаметра, являются актуальными.

Традиционные методы улучшения структуры и свойств чугунных отливок изучены на сегодняшний день достаточно полно. Получение же нового комплекса их физико-механических свойств возможно лишь путем применения нетрадиционных воздействий на чугун, в частности, с помощью магнитно-импульсной обработки (МИО). Количество работ, посвященных МИО чугуна, относительно невелико [3–6], но имеющиеся данные подтверждают приемлемость этого метода для изме-

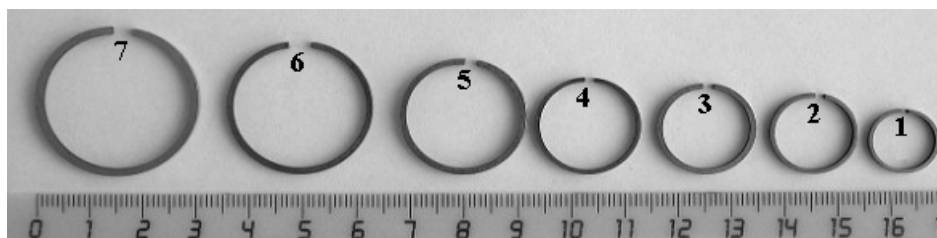
нения структуры и свойств железоуглеродистых сплавов. Так, например, авторами [4] исследовано влияние высокочастотного магнитного поля на изменение структуры и свойств чугуна СЧ-25 с вермикулярным графитом, полученного методом непрерывно-циклического литья намораживанием. Установлено, что структурными эффектами высокочастотного магнитно-импульсного воздействия на чугун 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. Отмечено, что наблюдаемые структурные изменения чугуна сопровождаются повышением твердости изготавливаемых из него автомобильных деталей цилиндропоршневой группы.

В настоящей работе изучена возможность применения высокочастотного магнитно-импульсного воздействия для изменения структуры и повышения упругих характеристик уплотнительных колец из чугуна с шаровидным графитом.

#### **Эксперимент и методики исследований**

В качестве экспериментальных образцов использовались комплектующие турбокомпрессоры уплотнительные кольца различного диаметра (рис. 1, табл. 1). Кольца изготовлены из чугуна с шаровидным графитом (табл. 2) по методу литья намораживанием.

Высокочастотная магнитно-импульсная обработка (ВЧМИО) колец проводилась на экспериментальной установке Института физики НАН Беларуси в соответствии с циклограммой воздействия, приведенной в [7]. Схема расположения образцов в рабочей зоне установки (индукторе) представлена на рис. 2.



*Рис. 1. Уплотнительные кольца*

*Таблица 1. Параметры колец*

№ кольца	Диаметр, мм
1	13,0
2	16,1
3	18,0
4	19,3
5	23,0
6	26,0
7	29,6

*Таблица 2. Состав чугуна*

Содержание элементов, % масс.							
Fe	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mg	C
Осн.	2,8-3,0	0,4-0,6	0,1-0,2	0,5-0,6	0,7-0,9	0,04-0,06	2,8-3,0

Изменения в структуре чугуна в результате ВЧМИО были изучены методом прицельной металлографии с помощью металлографического комплекса МИКРО-200. При этом исследуемый участок шлифа чугуна предварительно помечался меткой, а затем фотографировался до и после обработки. Химическое травление поверхности шлифа при изучении его микроструктуры осуществ-

ляли 4 % раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Макронапряжения изучали путем рентгеноструктурного анализа на установке ДРОН-3М в излучении  $\text{CuK}_\alpha$  по линии (110) феррита.

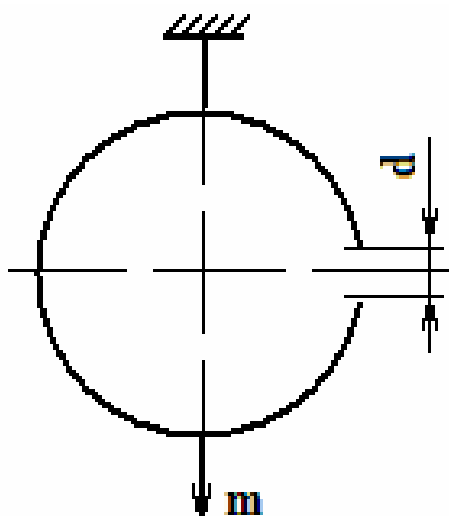
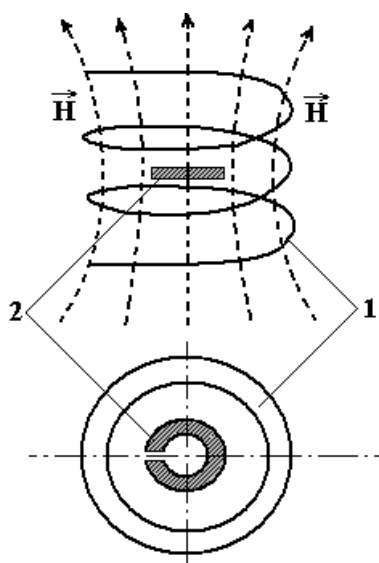


Рис. 2. Схема расположения колец в индукторе: 1 – индуктор; 2 – обрабатываемый образец,  $\vec{H}$  – силовые линии магнитного поля напряженностью  $H$

Рис. 3. Схема определения сопротивления колец растягивающей нагрузке с массой  $m$

Способность сопротивления колец растягивающей нагрузке исследовали на инструментальном микроскопе в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3. В процессе измерений определяли величину разности  $d-d_0$ , где  $d_0$  – зазор между краями кольца в ненагруженном состоянии,  $d$  – при растягивающей нагрузке с массой  $m$ .

#### Результаты исследований и их обсуждение

В исходном состоянии структура материала колец представлена перлитной матрицей (рис. 4,а) с шаровидными включениями графита (рис. 4,б). В результате ВЧМИО распределение графита в матрице существенно не изменяется, однако наблюдаются изменения размеров включения свободного цементита (рис. 5) и морфологии эвтектоида, которые достаточно хорошо заметны в прямоугольном фрагменте на рис. 6, содержащем участок шлифа в окрестности вершины стрелки на рис. 5.

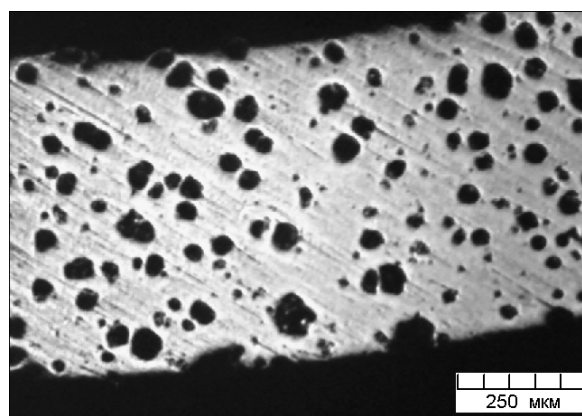
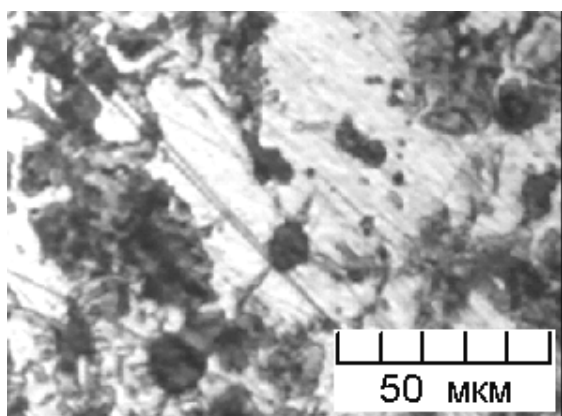
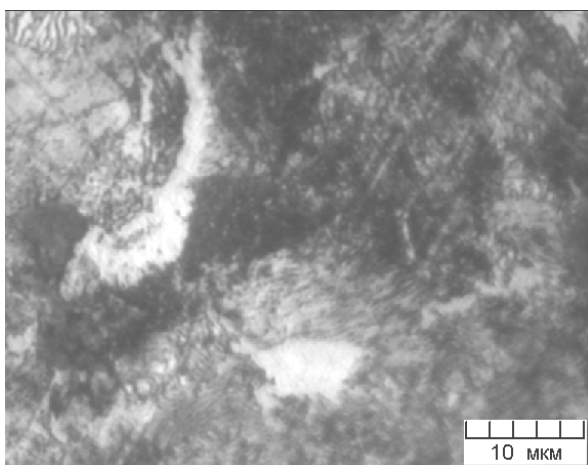
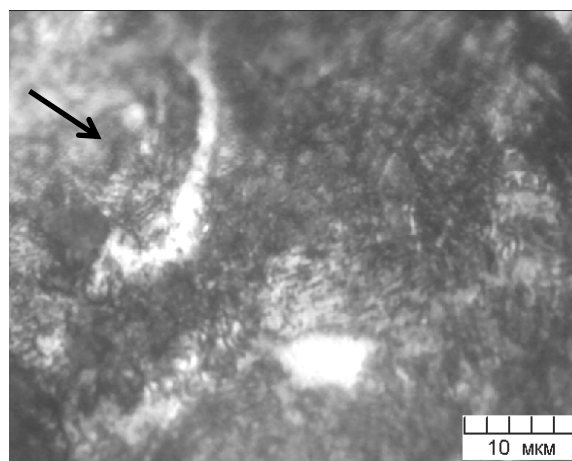


Рис. 4. Структура колец в состоянии поставки: а – перлитная матрица, б – шаровидные включения графита

Одним из следствий изменения структуры перлитной составляющей чугуна является снижение разброса значений микротвердости  $\Delta H_\mu$  (табл. 3), что свидетельствует о повышении однородности его структуры.

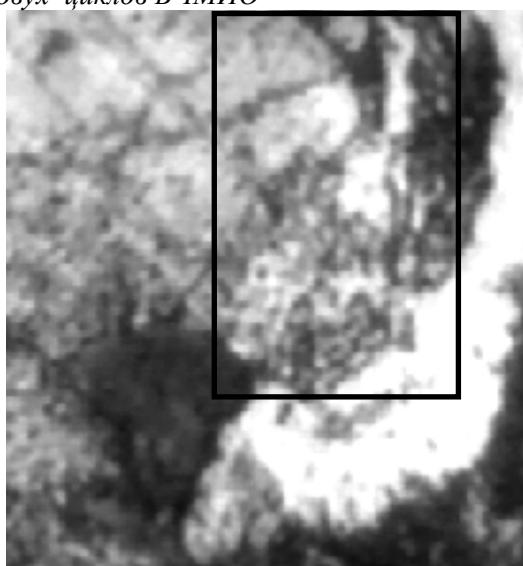


*a*



*б*

*Рис. 5. Изменение размеров включения свободного цемента: а – состояние поставки, б – после двух циклов ВЧМИО*



*a*



*б*

*Рис. 6. Изменение структуры эвтектоида (увеличенный фрагмент рис. 5): а – исходное состояние, б – после двух циклов ВЧМИО*

*Таблица 3. Разброс значений микротвердости  $\Delta H_{\mu}$*

Количество циклов ВЧМИО	Номер кольца						
	1	2	3	4	5	6	7
0	1644,0	1098,8	1275,3	1069,3	1644,0	1098,8	1275,3
2	491,5	1903,6	997,9	878,7	491,5	1903,6	997,9
4	1825,8	1273,1	1690,5	1591,4	1825,8	1273,1	1690,5
6	1910,8	1272,4	1270,8	1427,4	1910,8	1272,4	1270,8

Как видно из табл. 3, после ВЧМИО происходит уменьшение разброса значений до интервала 1000 МПа для колец под номером 1 – после двух и шести циклов воздействия, 2 – после четырех и шести циклов, 3 – после двух и четырех циклов, 4 – после двух и четырех циклов, 6 – после шести циклов, 7 – после двух и четырех циклов.

Наблюдаемое уменьшение разброса микротвердости графически проиллюстрировано на рис. 7.



Рис. 7. Значения микротвердости кольца № 7 в исходном состоянии и после циклов ВЧМИО

С изменением структуры перлита и морфологии цементита связано повышение твердости чугуна НРС по Роквеллу (табл. 4). Наиболее существенно увеличивается твердость у колец №№ 5 и 7. При этом наблюдается особенность проявления высокочастотного магнитно-импульсного воздействия периодическое изменение значений НРС колец в зависимости от количества циклов их обработки.

Таблица 4. Изменение твердости колец НРС в результате ВЧМИО

№ кольца	Количество циклов ВЧМИО			
	0	2	4	6
1	63,600	66,450	53,800	65,950
2	73,100	74,650	73,950	75,200
3	71,850	71,350	70,300	71,800
4	73,625	74,450	73,050	74,700
5	73,900	75,350	74,800	76,450
6	74,300	69,780	72,850	74,950
7	73,450	77,550	76,500	76,150

Характерный эффект, осуществляемый ВЧМИО, – изменение внутренней структуры шаровидного графита, подобное ранее установленному авторами [4] для чугуна с пластинчатым графитом.

В соответствии с [8] структурный тип сечения кристалла шаровидного графита определяется положением (рис. 8) секущей плоскости по отношению к центру сферокристалла. При этом имеется «центральное пятно», которое фиксируется в том случае, когда секущая плоскость пролегает выше центра кристалла.

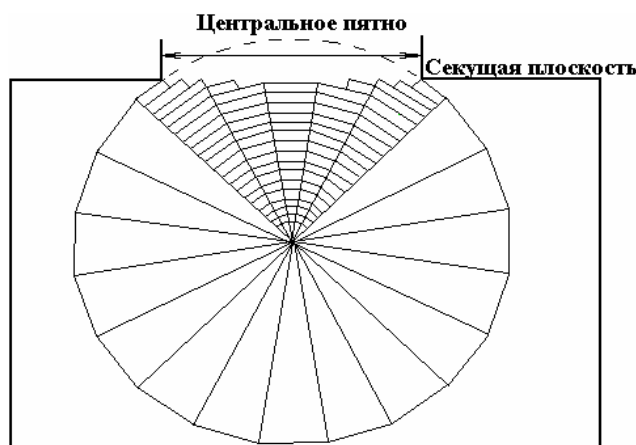


Рис. 8. Схема сечения сферокристалла графита плоскостью шлифа

На рис. 9 (фрагмент □) и 10 представлены микрофотографии включений шаровидного графита. Как видно из приведенных данных, под влиянием ВЧМИО происходит эволюция структуры центральной части включения, сопровождающаяся увеличением размеров «центрального пятна». Изме-

няется также морфология периферийной зоны включения с тенденцией к формированию плоских внешних граней.

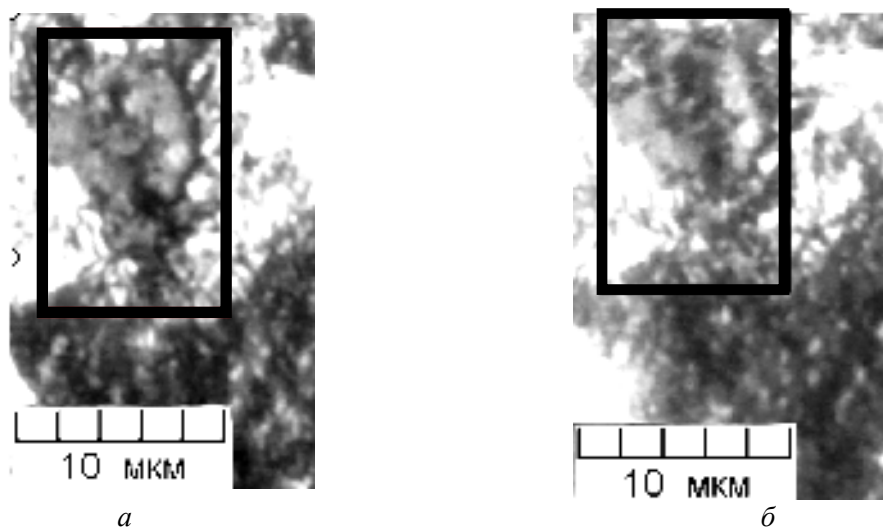


Рис. 9. Структура включения шаровидного графита: а – состояние поставки, б – после двух циклов ВЧМИО

Выявленные изменения структуры включений графита можно объяснить несколькими причинами. Среди них могут быть интенсификация диффузионных процессов, а также возможная диффузия атомов углерода вдоль плоской грани в центральном пятне и изменение ступенчатой структуры периферии сечения. В пользу изменения непосредственно структуры углерода в магнитном поле говорит изменение соотношения интенсивностей его интерференционных линий [4]. Следует также принимать во внимание возможный ферромагнетизм графита чугуна как вследствие большого количества ферромагнитных включений (железо), так и в связи с изменением магнитных свойств графита в магнитном поле [9].

Изменение напряженного состояния феррита в составе чугуна также может оказывать воздействие на вид включения графита, деформируя его аналогично деформированию алмазным индентором микротвердомера [8], когда в сечении появляются концентрические кольца или многоугольники. Результаты рентгеноструктурного анализа показывают, что при ВЧМИО в ферритной фазе реализуются в основном макронапряжения сжатия (табл. 5). Значения напряжений являются разницей между напряжением исходного и обработанного образцов. При проведении соответствующих расчетов напряжение первого рода для исходных колец было принято равным нулю.

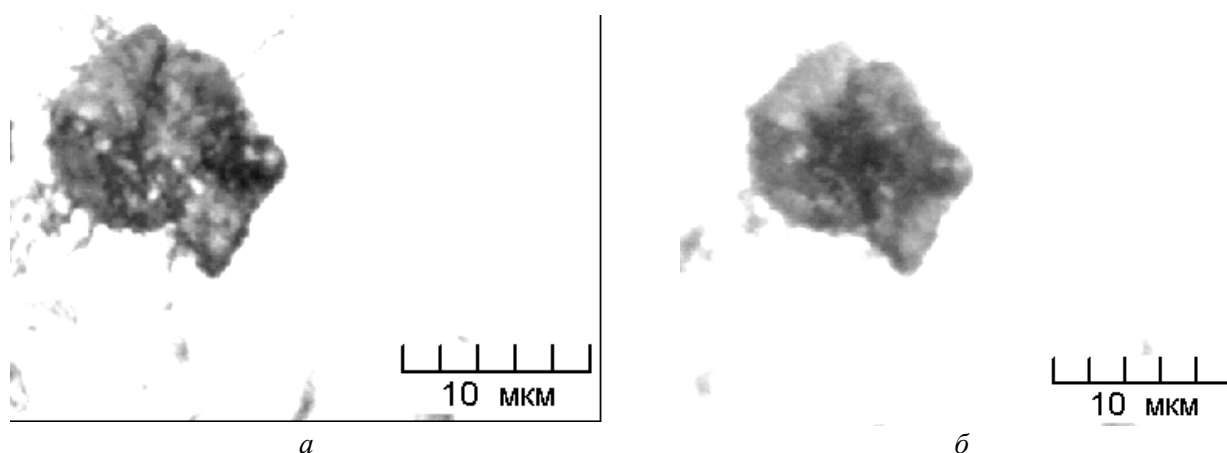


Рис. 10. Изменение внутренней структуры включения графита: а – состояние поставки, б – после двух циклов ВЧМИО

С изменением напряженного состояния связано изменение способности колец сопротивляться растягивающим нагрузкам (табл. 6). Возрастание уровня напряжений сжатия повышает сопротивление при нагружении (снижает, см. табл. 6, величину прогиба  $d-d_0$ ).

Таблица 5. Изменение величины макронапряжений в феррите

№ кольца	$\Delta\sigma$ , МПа		
	2 цикла ВЧМИО	4 цикла ВЧМИО	6 циклов ВЧМИО
1	-0,692	0,576	1,614
2	-3,694	-3,636	0,462
3	-2,886	0,346	-2,651
4	-0,573	-0,459	-2,236
5	0,231	-0,115	0,519
6	-0,347	-0,116	-0,463
7	0,231	0,578	-0,346

Таблица 6. Изменение величины прогиба колец  $d-d_0$  в зависимости от массы нагрузки  $m$  и количества циклов ВЧМИО

№ кольца	Масса нагрузки $m$ , г	Прогиб кольца $d-d_0$ , мм			
		0 циклов ВЧМИО	2 цикла ВЧМИО	4 цикла ВЧМИО	6 циклов ВЧМИО
1	150	1,00	2,00	3,25	2,10
2	175	3,75	5,13	4,10	4,25
3	200	3,00	4,75	4,00	2,25
4	225	6,50	12,75	9,80	12,00
5	250	7,00	7,00	6,00	4,80
6	275	11,00	14,25	8,50	11,10
7	300	8,00	4,75	9,50	6,75

Изменение схемы напряженного состояния образца определяется неравномерным распределением давлений в образце при ВЧМИО (рис. 11).

В соответствии с данными [10] по сечению обрабатываемой в магнитном поле детали чередуются зоны растяжения–сжатия. В зоне I давление имеет отрицательное значение и применительно к нашему случаю направлено в стороны индуктора, вызывая фиксируемые рентгеноструктурным анализом изменения макронапряжений.

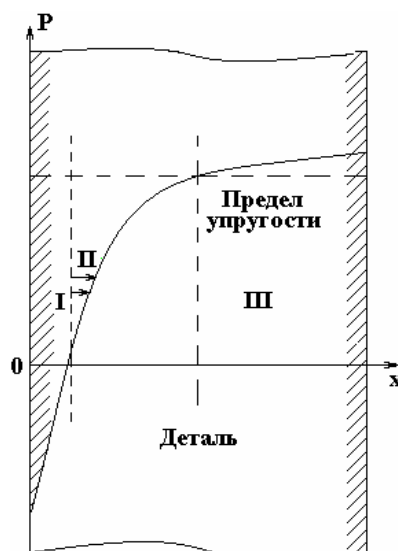


Рис. 11. Распределение давлений в детали при магнитно-импульсном воздействии: II – область растяжения; I, III – область сжатия [10]

### Заключение

В результате выполненных исследований:

- установлено, что при ВЧМИО уплотнительных колец из чугуна с шаровидным графитом происходят изменения морфологии эвтектоида, внутренней структуры включений графита, а также размеров включений свободного цементита, что приводит к повышению твердости колец;

- выявлено, что при ВЧМИО в уплотнительных кольцах формируются напряжения сжатия, вызывающие повышение жесткости колец;

- показано, что приобретаемые в результате ВЧМИО физико-механические свойства колец изменяются периодически при варьировании количества циклов обработки. Оптимальный режим соответствует двум циклам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бодяка А.М., Бевза В.Ф., Галагаев С.В. Непрерывно-циклическое литье намораживанием – эффективная технология получения высококачественных заготовок // *Литье и металлургия*. 2005. № 3 (35). С. 20–27.
2. Марукович Е.И., Бевза В.Ф., Груша В.П. Реализация концепции пристеночной кристаллизации для получения высококачественных полых цилиндрических заготовок из чугуна // *Сборник научных трудов «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин»*. Новополюк, 2007. Т. 1. С. 33–35.
3. 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. 385–391.
4. Анисович А.Г., Румянцева И.Н., Бевза В.Ф., Ажаронок В.В. Изменение структуры и свойств чугуна СЧ-25 в импульсном магнитном поле // *Сборник трудов XV международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века»*. Севастополь, 2008. Т. 1. С. 65–68.
5. Полетаев В. А., Помельникова А. С., Шипко М. Н., Воробьев В. Ф. Влияние обработки в импульсном магнитном поле и коронном разряде на прочность сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2000. №4. С. 34–37.
6. 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 // *Сборник трудов V международной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций»*. Оренбург. 2008. Т. 1. С. 370–373.
7. Анисович А.Г., Румянцева И.Н., Марукович Е.И., Ажаронок В.В., Гончарик С.В. Изменение структуры чугуна СЧ-25 в модулированном по амплитуде высокочастотном электромагнитном поле // *Электронная обработка материалов*. 2009. № 2. С. 47–56.
8. Бунин К.П., Малиночка Я.Н., Таран Ю.Н. Основы металлографии чугуна. М.: Металлургия, 1969. 416 с.
9. Макарова Т.П. Магнитные свойства углеродных структур. Обзор // *Физика и техника полупроводников*. 2004. Т. 38. № 4. С.641–664.
10. Брон О.Б., Епечурин В.П. Распределение давлений в детали при магнитно-импульсной обработке // *Кузнечно-штамповочное производство*. 1968. № 5. С. 26–29.

*Поступила 01.12.09*

## Summary

The investigation is made of structure and properties of sealing rings made from iron (Si - 2,8-3,0; Mn - 0,4-0,6; Cr - 0,1-0,2; Ni - 0,5-0,6; Cu - 0,7-0,9; Mg - 0,04-0,06; C - 2,8-3,0 mass. %) under their exposure to 5.28-MHz pulsed magnetic field. The changes observed are associated with eutectoid morphology, internal structure of graphite inclusions as well as with free cementite inclusion sizes which result in hardness increase. On their pulse magnetic processing the compressive stresses are initiated in sealing rings. Physicomechanical ring properties are periodically changed with varying the number of processing cycles. The optimum mode corresponds to two cycles.