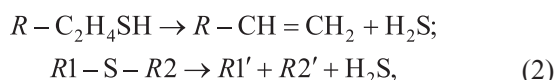


губчатым железом, удельная поверхность которого достигает $2,5 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и более. Согласно экспериментальным данным работы [2], содержание серы в металлизированном продукте растет с увеличением ее количества в угле и зависит от размеров рудоугольных окатышей.

Сера из угля, вероятно, удаляется при металлизации по следующим реакциям [4]:

– разложения алкил (арил) сульфидов $R - S - R$, $Ar - S - R$ и тиолов RSH , $ArSH$



где $R1'$, $R2'$ – непредельные органические соединения;
– высокотемпературного разложения тиофеноподобных фрагментов



Термодинамический анализ этих реакций затруднен из-за отсутствия данных, входящих в уравнения (1).

Выводы. Экспериментальное изучение удаления серы при металлизации железорудных концентратов углем показало, что этот процесс затруднен из-за ее поглощения восстановленным железом и адсорбции серосодержащих газов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Амдур А.М., Потапов А.М., Разницина А.Л., Лхамсурен М. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 8. С. 17 – 19.
2. Кожевников И.Ю. Бескоксая металлургия железа. – М.: Металлургия, 1970. – 336 с.
3. Никольский Б.П., Григоров О.Н., Позин М.Е. Справочник химика. Т. 1. – Л.-М.: Химия, 1966. – 650 с.
4. Гагарин С.Г. // Кокс и химия. 2003. № 7. С. 31 – 38.

© 2013 г. А.М. Амдур, М. Лхамсурен,
Д.В. Благин, В.В. Павлов
Поступила 11 октября 2012 г.

УДК 621.74(07): 539.186:537

**Э.Х. Ри, Ри Хосен, М.А. Ермаков, Г.А. Князев,
Бао Ляо Джоу, В.Э. Ри**

Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ, СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА НИЗКОКРЕМНИСТОГО СЕРОГО ЧУГУНА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА РАСПЛАВ

Аннотация. Исследовано влияние продолжительности облучения расплава наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) на процессы кристаллизации и структурообразования и свойства (твердость, плотность, микротвердость структурных составляющих, коррозионная стойкость, износостойкость) низкокремнистого серого чугуна. Установлено, что увеличение продолжительности облучения расплава НЭМИ способствует повышению температуры начала кристаллизации аустенита, снижению температур эвтектического и эвтектоидного превращений. Физико-механические свойства чугуна изменяются от продолжительности облучения расплава по экстремальной зависимости с максимумами или минимумами при продолжительности облучения 10 – 15 мин. Например, теплопроводность возрастает в 2,0 и более раз.

Ключевые слова: наносекундные электромагнитные импульсы, температура кристаллизации, плотность, твердость, микротвердость, теплопроводность, коррозионная стойкость, износостойкость.

CRYSTALLIZATION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF GREY LOW-SILICON CAST IRON UNDER THE INFLUENCE OF NANOSECOND ELECTROMAGNETIC PULSES ON THE MELT

Abstract. The influence of the exposure duration of nanosecond electromagnetic pulses (NEMI) on crystallization, structure and properties (hardness, density, microhardness of structural parts, corrosion resistance, wear-resistance) of low-silicon cast iron is examined. It is found that the increase in duration of NEMI exposure on the melt results in the increase of starting temperature for eutectic and eutectoid transformation. Physical and mechanical properties of cast iron vary considerably depending on the melt exposition duration (MED) according to extreme dependence with maxima and minima properties under of 10 – 15 min. For example, the thermal conductivity of the melt increases two or more times.

Keywords: nanosecond electromagnetic pulses, crystallization temperature, density, hardness, micro-hardness, thermal conductivity, corrosion resistance, wear resistance.

Применение электромагнитных воздействий на расплавы с целью повышения их свойств – одно из приоритетных направлений современной металлургии и ли-

тейного производства. В настоящей работе в качестве исходного сплава использовали низкокремнистый чугун, содержащий 3,7 % С, 1,0 % Si, 0,5 % Mn, 0,1 % Р

и 0,1 % S. Чугун расплавляли в высокотемпературной установке «Параболоид-4», перегревали до температуры 1550 °С и при 1350 °С производили облучение расплава наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) в течение 5, 10, 15, 20 мин по методике [1, 2]. После облучения расплава его охлаждали со скоростью 20 °С/мин до 500 °С и измеряли интенсивность I гамма-проникающих излучений ($I \approx 1/d$, где d – плотность расплава). Этот метод позволяет зафиксировать критические температуры фазовых и структурных превращений. Параллельно определяли кристаллизационные параметры методом термического анализа.

Генератор наносекундных электромагнитных импульсов (ГНИ-01-1-6) имеет следующие характеристики:

- полярность импульсов – положительная;
- амплитуда импульсов при нагрузке 50 Ом – 6000 В;
- длительность импульсов на половинном уровне – 0,5 нс;
- максимально допустимая частота следования генерирующих импульсов – 1 кГц;
- задержка выходного импульса относительно фронта импульсов ее запуска – 120 нс;
- максимальный ток, потребляемый генератором во всем диапазоне питающих напряжений, – не более 1,7 А при частоте 61 кГц.

На рис. 1 приведены параметры кристаллизации серого чугуна в зависимости от продолжительности

$\tau_{\text{обл}}$ облучения расплава НЭМИ. Как видно, по мере увеличения значения $\tau_{\text{обл}}$ температура начала кристаллизации аустенита ($t_{\text{л}}$) повышается постоянно до $\tau_{\text{обл}} = 20$ мин (рис. 1, а), а температуры начала ($t_3^{\text{н}}$) и конца ($t_3^{\text{к}}$) эвтектического превращения снижаются. С увеличением продолжительности обработки расплава также уменьшаются температуры начала ($t_{\text{л}}^{\text{н}}$) и конца ($t_{\text{л}}^{\text{к}}$) эвтектоидного превращения (рис. 1, б). Время кристаллизации избыточного аустенита ($\tau_{\text{л}}$) постоянно возрастает по мере увеличения $\tau_{\text{обл}}$ расплава (рис. 1, в), так как расширяется температурный интервал его кристаллизации ($\Delta t = t_{\text{л}} - t_3^{\text{н}}$). Время кристаллизации эвтектики (t_3) увеличивается из-за расширения температурного интервала эвтектического превращения ($\Delta t = t_3^{\text{н}} - t_3^{\text{к}}$).

Продолжительность эвтектоидного превращения ($\tau_{\text{л}}$) уменьшается несмотря на расширение температурного интервала превращения $\Delta t_{\text{л}} = t_{\text{л}}^{\text{н}} - t_{\text{л}}^{\text{к}}$. Также увеличивается время охлаждения сплава от $t_3^{\text{к}}$ до $t_{\text{л}}^{\text{н}}$ (рис. 1, в).

Можно предположить, что воздействие облучения расплава НЭМИ приводит к диспергированию неметаллических частиц (оксидов, нитридов, сульфидов), следовательно, – к повышению поверхностной энергии. Уменьшение последней может произойти за счет «налипания» кластеров Fe – C и Fe – Si на поверхность субмикроскопических неметаллических включений, что способствует зарождению и росту центров кристаллизации избыточного аустенита и повышению темпе-

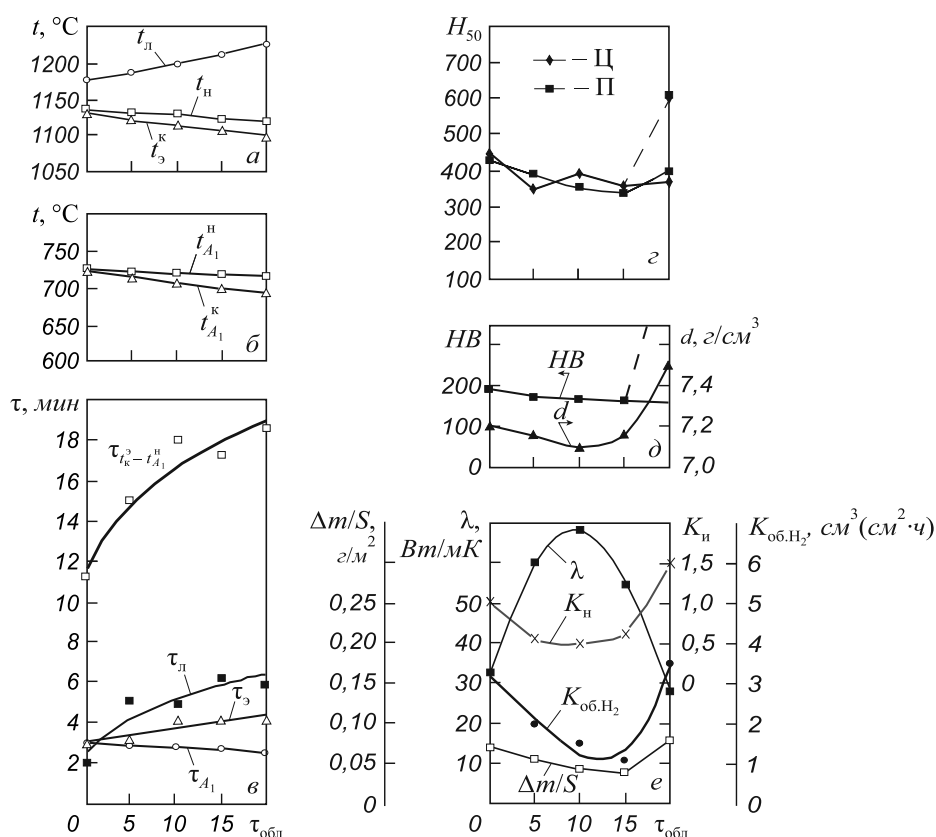


Рис. 1. Влияние продолжительности облучения расплава наносекундными электромагнитными импульсами на параметры кристаллизации, физико-механические и эксплуатационные свойства чугуна

ратуры t_d начала его кристаллизации. Следовательно, состав чугуна под воздействием НЭМИ становится более доэвтектического, и температура начала кристаллизации повышается (рис. 1).

Как видно из рис. 2, до продолжительности облучения расплава $\tau_{обл} = 15$ мин (рис. 2, з) графитные включения пластинчатой формы измельчаются. При $\tau_{обл} = 20$ мин (рис. 2, д) в структуре наряду с графитной эвтектикой кристаллизуется ледебуритная.

Твердость НВ облученных чугунов незначительно снижается по мере увеличения продолжительности облучения расплава до 20 мин (рис. 1, д). При 20-мин облучении расплава НЭМИ твердость отбеленного участка соответствует 58 HRC (штриховая линия на рис. 1, д), а неотбеленного – 160 – 170 НВ.

Для выяснения причины снижения твердости от продолжительности облучения расплава измерялась микротвердость структурных составляющих – дендритов аустенита (перлита) в центре (Ц) и периферии (П). Увеличение $\tau_{обл}$ расплава способствует снижению микротвердости H_{50} перлита по сравнению с микротвердостью необлученного серого чугуна на 100 H_{50} при 15-мин обработке (рис. 1, з). При 20-мин облучении расплава НЭМИ в структуре чугуна наблюдались светлые участки с более высокой микротвердостью (600 H_{50} , штриховая кривая на рис. 1, з), чем у темных (400 H_{50}). В отбеленных участках ледебуритная эвтектика сотового строения имела микротвердость в среднем 1122 H_{50} (от 1092 до 1152 H_{50}). Микротвердость изолированного цемента соответствует 1385 H_{50} (от 1287 до 1481 H_{50}).

Таким образом, некоторое снижение твердости облученных до 15 мин чугунов обусловлено уменьшением микротвердости металлической основы и измельчением графитных включений пластинчатой формы. Увеличение твердости чугуна, облученного в жидком состоянии в течение 20 мин, связано с кристаллизацией ледебуритной эвтектики.

Плотность d и теплопроводность λ облученных серых чугунов НЭМИ изменяются по экстремальной зависимости от продолжительности облучения расплава. Максимальные значения теплопроводности наблюдались при $\tau_{обл} = 10$ мин (рис. 1, е). При этом теплопроводность возрастала в 2,0 и более раз. Плотность d чу-

гуна при 20 °С, наоборот, имеет минимальное значение при 10-мин облучении расплава НЭМИ (рис. 1, д). Причина повышения теплопроводности пока не установлена. Такой характер ее изменения наблюдался и в металлических материалах – меди, алюминии и их сплавах (бронзы, силумине), а также в магниевых сплавах [1, 2]. Уменьшение плотности при облучении расплава НЭМИ связано с измельчением графитных включений пластинчатой формы.

Из рис. 1, е следует, что при облучении расплава НЭМИ в течение 10 – 15 мин относительная износостойкость $K_{и}$ уменьшается, что обусловлено снижением микротвердости металлической основы (перлита) и твердости чугуна. Резкое повышение относительной износостойкости при облучении расплава НЭМИ при $\tau_{обл} = 20$ мин связано с кристаллизацией ледебуритной эвтектики (рис. 1, з – д).

Коррозионная стойкость серого чугуна изменяется от продолжительности обработки расплава по экстремальной зависимости с ее максимумом при $\tau_{обл} = 10 – 15$ мин (уменьшение параметров $\Delta m/S$ – массового показателя коррозии и $K_{об.H_2}$ – объемного показателя коррозии). Наблюдаемое повышение коррозионной стойкости серого чугуна объясняется уменьшением количества и измельчением графитной фазы пластинчатой формы, о чем отмечалось в работе [3].

Выводы. Увеличение продолжительности облучения расплава НЭМИ способствует повышению температуры начала кристаллизации избыточного аустенита и снижению температур начала эвтектического и эвтектоидного превращений. Продолжительность кристаллизации аустенита и эвтектики увеличивается по мере повышения времени облучения расплава НЭМИ до 20 мин. Время кристаллизации эвтектоида уменьшается. По мере увеличения продолжительности облучения расплава НЭМИ до 15 мин включительно измельчаются графитные включения и уменьшается их количество. При 20-мин облучении расплава НЭМИ наряду с точечными графитными включениями кристаллизуется ледебуритная эвтектика. Твердость чугуна, обработанного в жидком состоянии НЭМИ, изменяется по экстремальной зависимости с минимумом ее значения при 10-мин облучении. Существует прямая корреляция твердости чугуна с микротвердостью металлической основы и

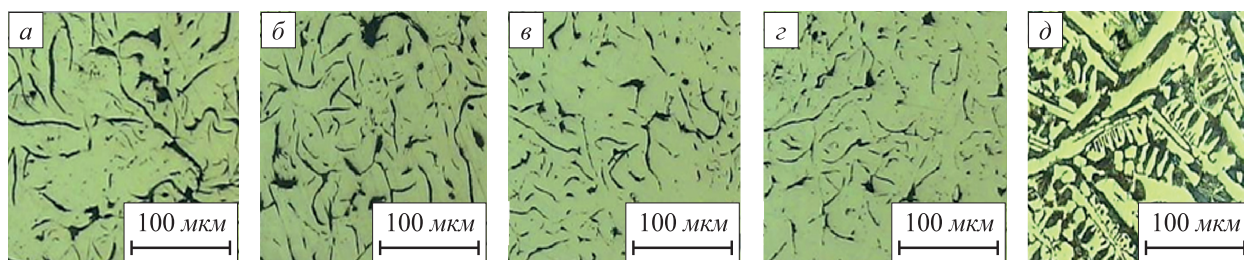


Рис. 2. Микроструктуры чугунов, облученных в жидком состоянии наносекундными электромагнитными импульсами.

Шлифы не протравлены; при 20-мин облучении шлиф протравлен 3 %-ным раствором HNO_3 .

а – д – $\tau_{обл} = 0 – 20$ мин

ее плотностью. При оптимальной продолжительности облучения расплава НЭМИ (10 мин) наблюдаются максимум теплопроводности и коррозионной стойкости и минимум износостойкости и плотности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами на ее строение, процессы кристаллизации, структурообразование и свойства литейных сплавов /

- Э.Х. Ри, Хосен Ри, С.В. Дорофеев, В.И. Якимов. – Владивосток: Дальнаука ДВО РАН, 2008. – 176 с.
2. Электроимпульсные нанотехнологии / В.Ф. Балакирев, В.В. Крымский, Б.А. Кулаков, Хосен Ри. – Екатеринбург: Уральский центр академического обслуживания, 2009. – 141 с.
 3. Г и р ш о в и ч Н.Г. Справочник по чугуному литью. Изд. 3-е перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1978. – 758 с.

© 2013 г. Э.Х. Ри, Ри Хосен, М.А. Ермаков,
Г.А. Князев, Бао Ляо Джоу, В.Э. Ри
Поступила 4 декабря 2012 г.

УДК 669.04:539.32

О.Л. Базайкина¹, Б.Ю. Бобров²

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
² ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»

ОЦЕНКА ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ГОРЯЧЕЙ КОВКЕ КУЗНЕЧНОГО СЛИТКА

Аннотация. В рамках теории плоской деформации поставлена и решена задача для уравнений равновесия в перемещениях, что позволило определить поле термоупругих напряжений в кузнечном слитке многогранного сечения в процессе охлаждения или нагрева. Окружные нормальные напряжения в приповерхностных слоях являются растягивающими и превышают предел упругости тогда, когда перепад температур между осью и гранью слитка достигает наибольшего значения. Методом линий скольжения получено поле пластических напряжений, возникающих при свободной ковке слитка в смешанных бойках. Получен тензор суммарных термоупругих напряжений и пластических напряженийковки, показывающий возможность образования продольных поверхностных трещин. Результаты приложены к ковке слитка массой 7 т восьмигранного сечения из легированной стали при температурах 1100, 850 и 680 °С.

Ключевые слова: кузнечный слиток, свободная ковка, термические напряжения, поле температур, задача плоской деформации.

ESTIMATION OF THERMAL PRESSURE ARISING AT HOT HAMMER FORGING OF FORGE INGOT

Abstract. Within the limits of the theory of flat deformation the problem for the balance equations in displacements that has allowed to define a field of thermoelastic stresses in a forge ingot of many-sided section in the course of its cooling or heating is put and decided. Tangent normal stresses in blankets are stretching and exceed an elasticity limit when difference of temperatures between an axis and an ingot side reaches the greatest value. The method of lines of sliding receives a field of the plastic stresses arising at free forging of an ingot in mixed strikers. It is received a total stress tensor of thermoelastic pressure and plastic hammer forging pressure, showing possibility of formation of longitudinal superficial cracks. Results are enclosed to hammer forging a 7-ton ingot of 8-faced section from the alloyed steel at temperatures 1100, 850 and 680 °С.

Keywords: forge ingot, hammer forging, thermoelastic stresses, field of temperatures, theory of flat deformation.

Кузнечная обработка (билетировка, протяжка) стальных слитков многогранного сечения производится в диапазоне температур 800 – 1100 °С. В процессе обработки слиток охлаждается, перепад температуры на его оси и поверхности достигает нескольких сот градусов. В силу этого в теле слитка возникают термоупругие напряжения, которые накладываются на напряжения, создаваемые усилием обработки. Необходима теоретическая оценка как полей тензоров напряжений этих двух типов (термических и кузнечных обработок), так и их наложения. Обычно термические деформации считают чисто упругими, а деформации обработки – чисто пластическими.

Рассмотрим поле температур цилиндрического бруса многогранного сечения, равномерно прогретого в печи при температуре t_0 , спустя время τ после извлечения из печи в воздушную среду с температурой t_c .

Ранее [1] была решена задача моделирования и вычисления безразмерного поля θ физической температуры t бруса: $\theta = (t - t_c)/(t_0 - t_c)$. Безразмерную температуру представляли следующим рядом:

$$\theta(\varphi, \xi, \eta) = \sum_{i=1}^{\infty} b_i \exp(-v_i^2 \varphi) \cos(\mu_i \cos(\beta)(\xi + \tan(\beta)(\eta))), \quad (1)$$

где b_i – коэффициенты разложения функции $\theta(\varphi, \xi, \eta)$ по собственным функциям задачи; v_i и μ_i – временные и пространственные собственные числа задачи.

Безразмерные время φ и координаты ξ, η сечения бруса выражаются следующим образом:

$$\xi = \frac{x}{R \cos(\beta)}, \quad 0 \leq \xi \leq 1;$$