

Рис. 3. Работа $A_{\text{деф}}$ деформации оптимальной калибровки в сравнении с действующей на стане 370

Расчеты проводили для среднеуглеродистой стали марки 45 при температуре 1050 °C и скорости прокатки 15,4 м/с.

Суммарная работа деформации единичного объема металла в черновых калибрах 1 – 10 клетей по результатам расчетов снизилась с 725 до 676 МДж, таким образом, снижение работы деформации составляет 7 %.

Экономический эффект от внедрения новой схемы калибровки валков стана 370 заключается в снижении энергопотребления за счет снижения работы деформации.

Выводы. Приведены результаты уточнения методики расчета формоизменения при прокатке в калибрах. Решена задача оптимизации формы калибра по критерию эффективности калибровки, где уточненная методика была использована в качестве ограничения. Обоснован выбор целевой функции – максимальной эффективности калибровки для минимизации энергозатрат.

© 2013 г. О.Б. Калугина, О.Б. Кинзин, А.Б. Моллер
Поступила 14 марта 2013 г.

УДК 621.74(07): 539.186:537

Э.Х. Ри, Ри Хосен, М.А. Ермаков, Г.А. Князев, В.Э. Ри

Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)

ИЗМЕНЕНИЕ ЭВТЕКТИЧНОСТИ СЕРОГО ЧУГУНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОБЛУЧЕНИЯ РАСПЛАВА НАНОСЕКУНДНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Аннотация. Установлено влияние продолжительности облучения расплава наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) и последующего модифицирования кремнием на процессы кристаллизации и структурообразования, физико-механические и эксплуатационные свойства серого чугуна. Установлена причина смещения эвтектичности чугуна в зависимости от содержания кремния при воздействии на расплавы НЭМИ. Доказано методом микрорентгеноспектрального анализа на установке «ДЖОЛ 8600» (Япония), что под воздействием облучения расплава НЭМИ резко повышается растворимость марганца и уменьшается содержание кремния и углерода в избыточном аустените. Следовательно, расплав обогащается углеродом и кремнием, что способствует достижению эвтектического состава расплава.

Ключевые слова: наносекундные электромагнитные импульсы, чугун, эвтектичность, кремний, расплав, кристаллизация, структурообразование.

CHANGING OF THE EUTECTIC OF GRAY CAST IRON WHEN IRRADIATING OF THE MELT BY NANOSECOND ELECTROMAGNETIC IMPULSES

Abstract. It was set the influence of the duration of irradiation of the melt by nanosecond electromagnetic impulses (NEMI) and subsequent silicon modification on the crystallization and structure formation processes, physical-mechanical and operation properties of gray cast iron. The cause of eutectic displacement of gray cast iron depending on the silicon composition when exposed to the melt NEMI was determined. It was proved by the method of X-ray spectrum analysis on the installation “Jolie 8600” (Japan) that under irradiation of the melt by NEMI the solubility of manganese is increased but silicon and carbon content in excess austenite is reduced sharply. Therefore, the melt is enriched with carbon and silicon, thus facilitating the obtaining of eutectic melt composition.

Keywords: nanosecond electromagnetic impulses, cast iron, eutectic, silicon, melt, crystallization, structure formation.

Чугун состава 3,3 % C; 1,5 % Si; 0,7 % Mn; < 0,1 % P и S перегревали до 1550 °C и выдерживали при этой температуре в течение 5 мин. После охлаждения расплава со скоростью 20 °C/мин до температуры 1350 °C производили облучение жидкой фазы НЭМИ в течение 5, 10, 15, 20 и 25 мин, затем расплав модифицирова-

ли ферросилицием марки ФС 45 в количестве 1,0, 2,0 и 3,0 % (по массе), после чего его охлаждали с постоянной скоростью 20 °C/мин до температуры 500 °C.

В процессе охлаждения измеряли интенсивность гамма-проникающих излучений на установке «Параболоид-3М». Характер изменения интенсивности позво-

ляет определить параметры кристаллизации, степень уплотнения расплава в процессе кристаллизации аустенита, эвтектики и эвтектоида. Параллельно строили термограмму кристаллизации методом термического анализа.

В зависимости от величины добавки модификатора увеличение продолжительности облучения расплава НЭМИ до определенного времени способствует снижению температуры начала кристаллизации аустенита ($t_{\text{л}}$) и повышению температуры начала кристаллизации эвтектики ($t_{\text{э}}^{\text{н}}$). Температурный интервал кристаллизации $t_{\text{л}} - t_{\text{э}}^{\text{н}}$ сужается (рис. 1, а). При определенной продолжительности облучения расплава температуры ликвидуса и эвтектики сливаются в одну точку, т.е. чугуны становятся эвтектическими. При длительных продолжительностях облучения расплава НЭМИ температура $t_{\text{л}}$ повышается, а температура $t_{\text{э}}^{\text{н}}$ снижается. Так, например, в чугуне, модифицированном 1,0 % ФС 45, эвтектическая концентрация углерода достигается при облучении расплава НЭМИ в течение 20 мин. В чугуне, модифицированном 2,0 и 3,0 % ФС 45 – соответственно при 15 и 10 мин. Чем больше содержание кремния в исходном чугуне, тем меньшей продолжительностью облучения расплава достигается эвтектическая концентрация углерода. При этом значения степени уплотнения расплава ($-\Delta J_{\text{л}}$) и продолжительности процесса кристаллизации аустенита ($\tau_{\text{л}}$) стремятся к нулю, а значения этих параметров для эвтектики ($-\Delta J_{\text{э}}$ и $\tau_{\text{э}}$) – к максимальным.

В чугунах с 1,0 и 2,0 % ФС 45 температурный интервал кристаллизации эвтектики расширяется, увеличиваются параметры $-\Delta J_{\text{э}}$ и $\tau_{\text{э}}$ до определенной продолжительности облучения, затем при дальнейшем облучении расплава этот интервал сужается и уменьшаются значения $-\Delta J_{\text{э}}$ и $\tau_{\text{э}}$ в области заэвтектического состава. Аналогичная картина наблюдается и в чугуне с 3,0 % ФС 45. Штриховые линии на рис. 1 характеризуют предполагаемые линии изменения кристаллизационных параметров чугуна с 3,0 % ФС 45.

Температуры начала ($t_{\text{А1}}^{\text{н}}$) и конца ($t_{\text{А1}}^{\text{к}}$) эвтектоидного превращения повышаются по мере увеличения продолжительности облучения расплава в чугунах с 1,0 и 2,0 % ФС 45 (до 15 мин облучения расплава НЭМИ). В чугунах с 2,0 % ФС 45 (при облучении более 15 мин) и с 3,0 % ФС 45 увеличение продолжительности облучения приводит к снижению температур $t_{\text{А1}}^{\text{н}}$ и $t_{\text{А1}}^{\text{к}}$ и уменьшению времени $\tau_{\text{А1}}$ кристаллизации эвтектоида (рис. 1). Степень уплотнения возрастает в чугуне с 2,0 % ФС 45, а в чугуне с 3,0 % ФС 45 она практически не изменяется.

Микроструктурный анализ не- и облученных НЭМИ чугунов показал, что по мере увеличения продолжительности облучения расплава размеры графитных включений возрастают до 20 мин облучения в чугунах с 1,0 % ферросилиция и до 15 мин облучения чугуна с 2,0 % ферросилиция. При дальнейшем увеличении продолжительности облучения расплава до 25 мин наблюдалось измельчение графитной фазы. Такой характер

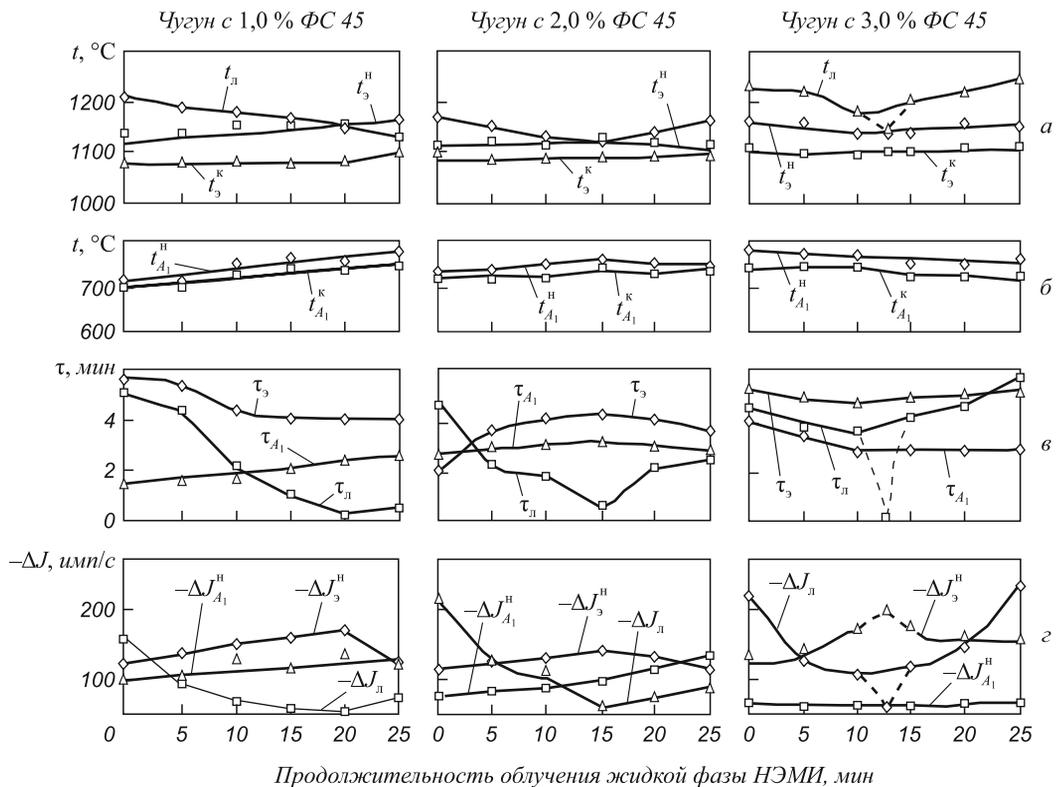


Рис. 1. Влияние продолжительности облучения расплава НЭМИ на кристаллизационные параметры серого чугуна марки СЧ 20 после дополнительного модифицирования ферросилицием ФС 45

изменения микроструктуры наблюдался и в чугунах с 3,0 % ферросилиция до 10 мин облучения расплава, а при длительных облучениях графитные включения измельчаются.

Для выяснения причины смещения эвтектической точки под воздействием на расплавы НЭМИ не- и облученные чугуны с содержанием 0, 2,0 и 3,0 % ФС 45 подвергались микрорентгеноспектральному локальному анализу. В исходном чугуне в металлической основе среднее содержание кремния соответствует 2,24 %, а содержание марганца – 0,33 %. Основная масса серы сосредоточена в сульфиде марганца, в котором содержится 36,67 % (ат.) S (32,66 % (по массе)) и 36,71 % (ат.) Mn (55,70 % (по массе)).

Из рис. 2, а, б следует, что по мере повышения продолжительности облучения расплава содержание марганца в металлической основе (продукте распада пере-

охлажденного аустенита) постоянно увеличивается, а концентрация кремния и углерода уменьшается. Следовательно, можно предположить, что по мере повышения продолжительности облучения жидкая фаза обогащается графитизирующими элементами, увеличивая углеродный эквивалент и способствуя кристаллизации графитных включений. Данный эффект усиливается при дополнительном модифицировании чугуна после облучения расплава НЭМИ ферросилицием в количестве 2,0 % (рис. 2, в). Как видно, до 15 мин облучения расплава НЭМИ содержание марганца возрастает более интенсивно, а концентрация кремния и углерода, наоборот, уменьшается. При длительных облучениях (более 15 мин) расплава НЭМИ содержание марганца в металлической основе уменьшается, а концентрация кремния и углерода возрастает. Следовательно, при 15-мин облучении модифицированного расплава наблюдается максимальная степень насыщения расплава кремнием и углеродом. По этой причине при 15-мин облучении достигается эвтектическая концентрация. При этом в структуре наблюдаются максимальное количество и размеры графитных включений.

Повышение продолжительности облучения расплава, модифицированного 3,0 % ФС 45, до 15 мин способствует более интенсивному растворению марганца и вытеснению кремния из аустенита (рис. 2, д, е). При этом концентрация углерода возрастает в отличие от концентрации исходного чугуна и чугуна с 2,0 % ФС 45. Локальный анализ металлической основы показал (рис. 3, а), что в структуре наблюдается зона, где марганец полностью отсутствует. В этой зоне присутствуют такие элементы, как Fe, Si и C. Повышение продолжительности облучения расплава (рис. 3, а) способствует уменьшению содержания кремния и углерода в избыточном аустените, а концентрация железа, наоборот, возрастает.

Можно предположить, что в этой зоне кристаллизуется карбид кремния (SiC), который при затвердевании разлагается с образованием атомарного углерода, насыщающего аустенит, содержащий марганец, а кремний ликвидируется в расплав (рис. 2, д, е). По этой причине эвтектическая концентрация расплава достигается под воздействием кремния при меньшем времени облучения – 10 мин. На рис. 2, д, е приведены гипотетические штриховые линии, характеризующие распределение компонентов в аустените (продукте распада переохлажденного аустенита). Согласно этим линиям, предполагается достижение эвтектической концентрации при продолжительностях облучения расплава, равных 10 – 15 мин.

В исходном чугуне сульфид марганца кристаллизуется в виде ограненной формы. При облучении расплава НЭМИ до 15 мин наблюдалось измельчение частиц сульфида марганца и превращение его в более компактную форму. При этом содержание марганца и серы уменьшается, а концентрация железа остается без изме-

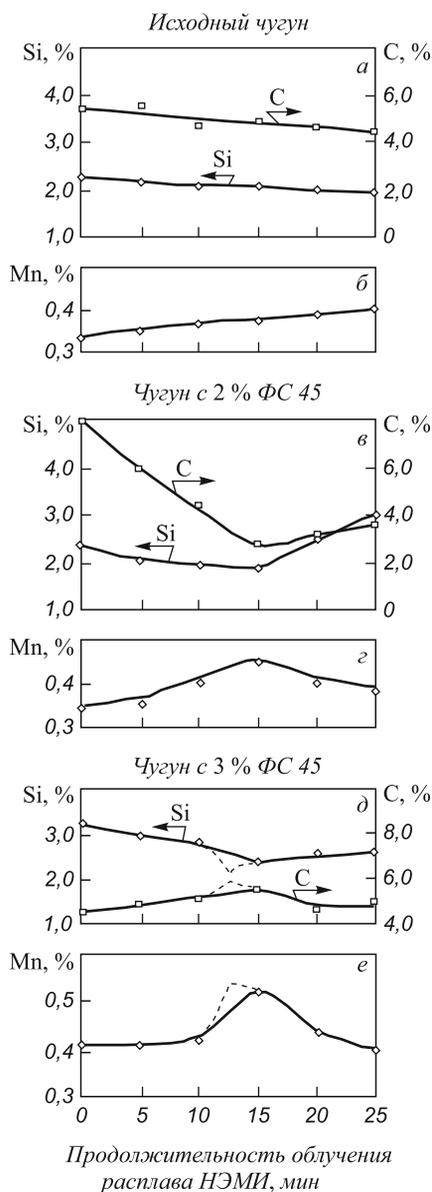


Рис. 2. Распределение компонентов в металлической основе в зависимости от продолжительности облучения расплава

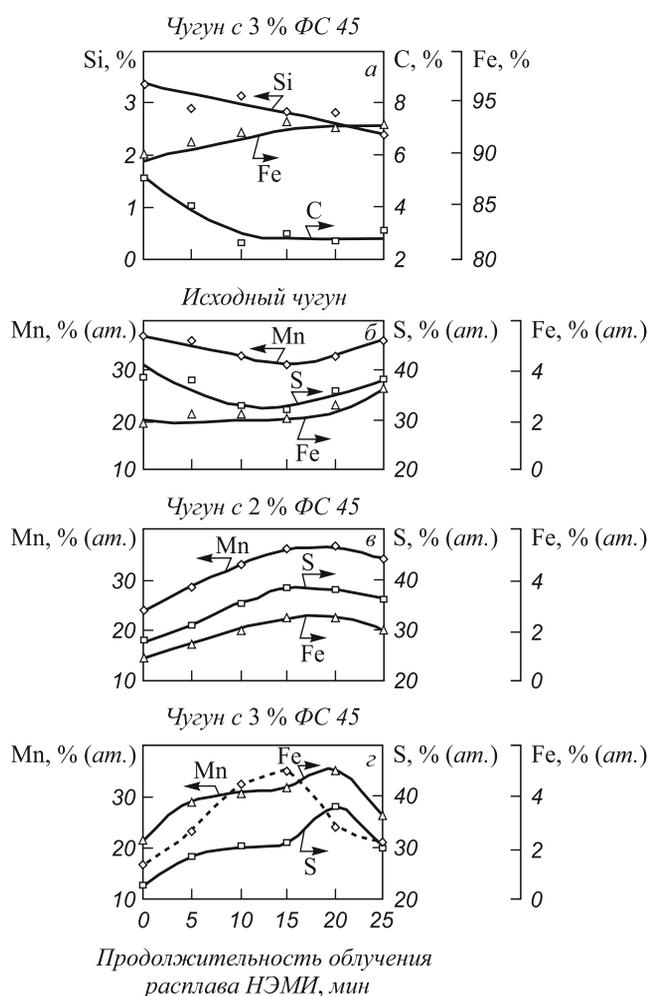


Рис. 3. Распределение компонентов в металлической основе без марганца (а) и в сульфидах марганца (б – з)

нений до 15-мин облучения расплава. При дальнейшем облучении расплава НЭМИ содержание серы и железа возрастает. Стехиометрическое соотношение $Mn:S=1$ сохраняется при повышении продолжительности облучения расплава (рис. 3, б).

В чугунах с 2,0 % ФС 45 увеличение продолжительности облучения расплава до 15 – 20 мин приводит к повышению концентрации Mn, S и Fe с последующим уменьшением их содержания при 25-мин облучении

расплава (рис. 3, в). Аналогичный характер распределения компонентов в сульфидах марганца наблюдается в высококремнистом чугунах с 3,0 % ФС 45. Стехиометрическое соотношение $Mn:S=1$ сохраняется, также при этом в исследованных чугунах в сульфидах марганца всегда присутствует железо в количестве от 1,0 до 3,0 – 4,0 % в зависимости от содержания кремния в чугуне и от продолжительности облучения расплава. Такой экстремальный характер изменения компонентов в сульфидах марганца в зависимости от продолжительности облучения расплава пока не имеет научного объяснения, соответственно, требуется продолжение исследований в этом направлении.

Выводы. Экспериментально установлено, что под воздействием НЭМИ резко повышается растворимость марганца в избыточном аустените и уменьшается растворимость углерода и кремния в нем. Это приводит к увеличению концентрации углерода и кремния в расплаве и кристаллизации эвтектики. Чем больше в чугуне кремния, тем при меньшей продолжительности облучения расплава достигается его эвтектический состав. По мере повышения продолжительности облучения расплава размеры графитных включений пластинчатой формы увеличиваются до 20 мин облучения расплава НЭМИ в чугунах с 1,0 % ФС 45, до 15 мин облучения НЭМИ в чугунах с 2,0 % ФС 45 и 10 мин облучения расплава НЭМИ с 3,0 % ФС 45. При дальнейшем увеличении продолжительности облучения расплава наблюдается измельчение графитной фазы пластинчатой формы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пумпянский Д.А., Пышминцев И.Ю., Фарбер В.М. // *Сталь*. 2005. № 7. С. 67–74.
2. Морозов Ю.Д., Матросов М.Ю., Настич С.Ю., Арабей А.Б. // *Металлург*. 2008. № 8. С. 39–42.
3. Liu S. // *Gas and Oil Journal*. 2009. No. 4. P.10–15.
4. DeArdo A.J. Weldability of Linepipe Steels // Сб. тр. Междунар. конф. «Трубы-2007». – Челябинск: РосНИТИ, 2007. – С. 42–50.

© 2013 г. Э.Х. Ри, Ри Хосен, М.А. Ермаков,
Г.А. Князев, В.Э. Ри

Поступила 4 декабря 2013 г.