

ЗАГАДОЧНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ В ЗЕМНЫХ ЯВЛЕНИЯХ

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ

В.Ф. Панов, С.А. Курапов, А.Е. Бояршинов

Пермский государственный национальный исследовательский университет

В условиях действующего производства проведены исследования по обработке расплава металла электромагнитным излучателем малой мощности и получены результаты по улучшению структуры и повышению механических характеристик литья. Приведена конструкция генератора, имеющего направленный излучатель электромагнитных колебаний, который устанавливают напротив плавильной печи на расстоянии до 20 м. Предложено в кратком виде описание возможных физических механизмов воздействия излучения генератора на объем расплава.

Введение

В современной металлургии известен ряд технологий с использованием физических полей и излучений для воздействия на расплавы металлов с целью изменения физико-механических свойств этих металлов [1].

Нами создан генератор нестационарного электромагнитного поля для обработки расплава непосредственно в печи, получивший название СВМ-генератор, с потребляемой мощностью до 50 Вт, работающий в диапазоне частот 10^2 – $8 \cdot 10^7$ Гц, с помощью которого получен эффект глубинного и объемного влияния на расплавы черных металлов, достигнуто улучшение структуры и механических характеристик литья.

Исследования по волновой обработке расплава в объеме от 70 г до 400 т с использованием СВМ-генератора были проведены в 2001–2009 гг. как в лабораторных условиях, так и в условиях действующего производства.

На ОАО «МК ОРМЕТО – ЮУМЗ» (г. Орск) обработка велась в металлургическом цехе № 16, на дуговой сталеплавильной печи ДСП-50, с объемом плавки 50 т, на дуговой сталеплавильной печи ДСП-12, с объемом

плавки 12 т и на печи-ковше. В цехе № 18, на дуговой сталеплавильной печи ДСП-3, с объёмом плавки 3 т и на печи-вагранке, с объёмом копыльника – 1,5 т чугуна.

На ОАО «Мотовилихинские заводы» (г. Пермь), в цехе № 21, на дуговой сталеплавильной печи ДСП-60, с объёмом плавки 60 т и на печи-ковше, в цехе № 32, на дуговой сталеплавильной печи ДСП-6, с объёмом плавки 6 т, в цехе № 33, на индукционной сталеплавильной печи ИСТ-0.4, с объёмом плавки 400 кг, на печах-вагранках с копыльником объёмом 5 т чугуна, в цехе № 36 на индукционных сталеплавильных печах ИСТ-0.28 и ИСТ-0.16 с объёмом плавки 280 кг и 160 кг.

На ОАО «Чусовской металлургический завод», в цехе ферросплавов, на дуговой сталеплавильной печи ДСП-7, с объёмом плавки 7 т, обработка ковшей с чугуном, объёмом 50 т, во время разливки на машине разливки чугуна.

На ОАО «ГУЛАЧЕРМЕТ», горн домны № 3, с объёмом выпуска 400 т.

На ОАО «Авиадвигатель», вакуумные индукционные печи, с объёмом плавки до 50 кг.

В период с 2001 по 2009 г., с помощью СВМ-генератора было выплавлено более 9500 т металла.

Конструкция СВМ-генератора и методика проведения исследований

Принцип действия генератора основан на резонансном отклике обрабатываемого расплава (как неконденсированной среды, находящейся в метастабильном состоянии) на низкоэнергетическое воздействие нестационарного магнитного поля слабого электромагнитного излучения с определённым спектром, в результате которого в металле наблюдаются структурно-фазовые изменения.

Конструктивная схема генератора приведена на рис. 1. Генератор представляет собой антенное устройство направленного действия с перестраиваемым фокусом излучения (волновой излучатель), работающее от преобразователя – формирующего блока-модулятора. Опытная модель генератора имеет наименование «Модулятор электромагнитный типа МЭМ-1», ТУ 3132-001-12019358-2006. Способ обработки расплава с применением генератора запатентован [2]. Конструкция излучателя заявлена в качестве изобретения [3].

Размеры рабочей зоны генератора (зоны фокуса) составляют 0,3 м в поперечнике, волновая обработка производится в течение всего времени плавки (0,5–1 ч). Индукция магнитного поля в рабочей зоне излучателя не превышает 1 Гс, напряженность электрического поля около 2 кВ/м. Эквивалентный уровень шума, создаваемый генератором, в том числе в ультразвуковом диапазоне, не превышает 36 дБ.

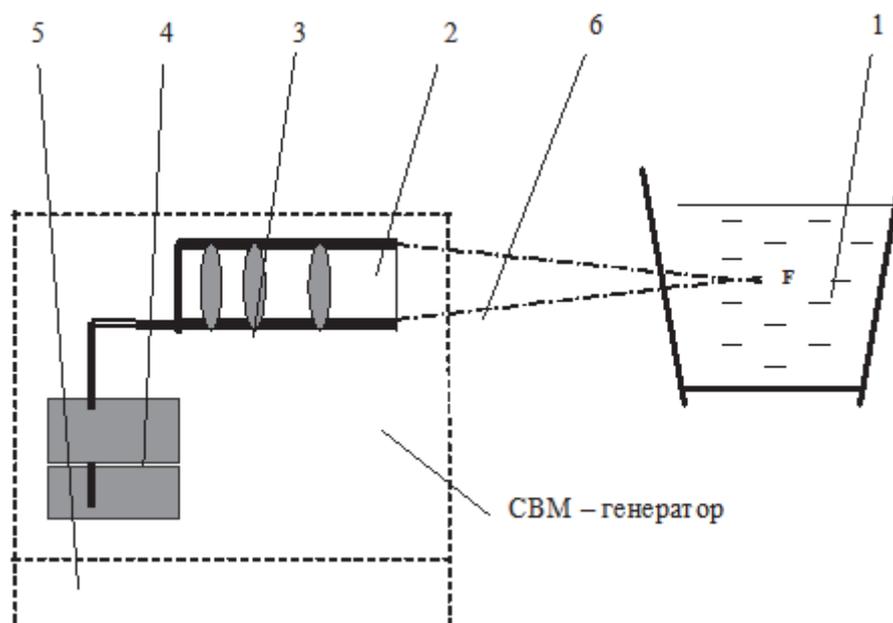


Рис. 1. Схема волновой обработки расплава:

1 – плавильная печь с металлом (ковш); 2 – направленный излучатель (волновой канал) СВМ-генератора; 3 – излучающий элемент; 4 – формирующий блок-модулятор с модификатором; 5 – блок питания; 6 – волновое излучение

В качестве первичного источника питания генератора используется формирователь стандартных сигналов типа ГСС-40. Эксперименты проводились при различных частотах в разных диапазонах и при различной форме импульса напряжения питания. Варьировались также конструкция блока-модулятора и схема его коммутации с излучателем.

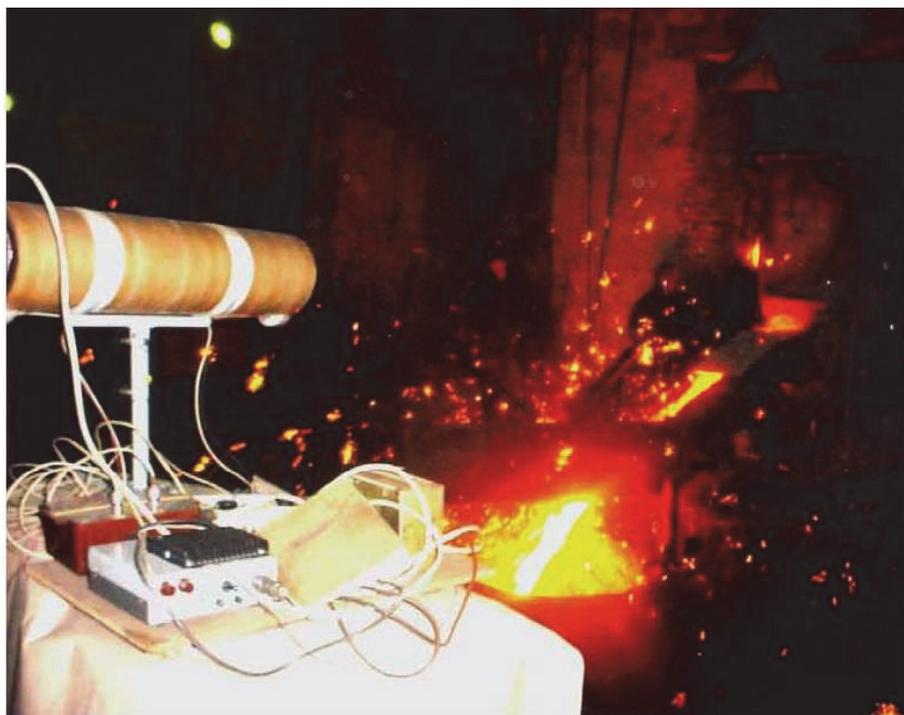
Как было установлено, характер воздействия генератора на расплавы существенно зависит от материала вещества, помещаемого в резонансную камеру блока-модулятора, то есть от вещества-модулятора, выполняющего роль виртуального, или пассивного, модификатора металла. В качестве модуляторов использовались традиционные для металлургии модифицирующие материалы: магний, марганец, редкоземельные металлы и др. Модулятор служит пассивным фильтром, модулирующим спектр излучения генератора. В дальнейшем обработка черных металлов при помощи СВМ-генератора производилась в двух основных режимах:

I – низкоуглеродистые и среднеуглеродистые стали ферритного и феррит-перлитного класса (содержание углерода $< 0,8\%$), в том числе легированные и высоколегированные, аустенитного класса, обрабатывались с использованием модулятора в составе: марганец + никель + ниобий;

II – высокоуглеродистые стали мартенситного и аустенитного класса (содержание углерода $\geq 0,8\%$), в том числе легированные, и чугуны, обрабатывались с использованием модулятора в составе: магний + марганец + редкоземельные элементы, при этом на формирующий блок-модулятор пода-

вался сигнал с частотами ядерного магнитного резонанса вещества модификаторов.

Волновой излучатель СВМ-генератора устанавливался снаружи металлургической печи, рабочая зона генератора ориентировалась внутрь объема расплава. Обработка расплава производилась сквозь стенку металлургической печи (рис. 2).



**Рис. 2. Обработка расплава по СВМ-технологии.
На переднем плане волновой излучатель**

Обработанный металл применялся для изготовления кузнечных слитков весом от 2,8 до 60 т и отливок весом до 3,9 т, а также сортового и листового проката. Кузнечные слитки в дальнейшем применялись для получения поковок. С применением волновой обработки произведено более 150 производственных плавов объемом от 50 т и выше, общим весом около 7000 т и свыше 300 производственных и опытных плавов на объемах от 15 т и ниже. В целях изучения свойств металла, прошедшего волновую обработку, были выбраны следующие изделия: валки холодного проката (кованные, литокованный), направляющие ролики; валки горячего проката; валы; штамповые кубики; лист горячекатаный, сортовой прокат и литые изделия. Данные изделия изготавливались из сталей 09Г2С, 5ХНМ, 10ХНЗМДЛ, 17Г1С, 25Х2МФ, 25Х2М1Ф, 25ГСЛ, 35ХГСЛ, 40ХЛ, 40ХН, 110Г13Л, 12ДН2ФЛ, 30ХМА, 40ХМА, Ст. 20, Ст. 30, Ст. 35Л, Ст. 45, Ст. 50, 20ХГНМ, 25ХМФСЛ, 40Х2Н2МА, 50ХН, 60ХН, 60Х2СМФ, 7ХЗ, 75ХМФ, 75Х2СГФ, 90ХФ, 9Х2МФ, 25Х1М1Ф, 150ХНМЛ и чугуна СЧ25, ИЧХ25, нержавеющей сталей 12Х18Н9Т, 08Х18Н10Т, 02Х22Н5АМЗ, жаропрочных сплавов на никелевой

основе ЖС6У, ЖС88У-ВИ. Для ряда марок стали объём исследования составлял десятки плавок, для других, проводимых с целью определения возможностей метода, единицы плавок.

Исследование металла производилось на различных этапах технологического цикла: после выплавки (приливные пробы); после заливки; после отковки; после термообработки; на финале изготовления. При исследовании применялись следующие способы оценки: макро- и микроструктуры, газового анализа, механических свойств и ультразвукового контроля. Макроструктура оценивалась визуально, микроструктура – на оптических микроскопах, газовый анализ, механические свойства и ультразвуковой контроль проводился с использованием приборов центральной заводской лаборатории.

Результаты исследования

Влияние волновой обработки на структуру, фазовый состав и механические свойства сталей

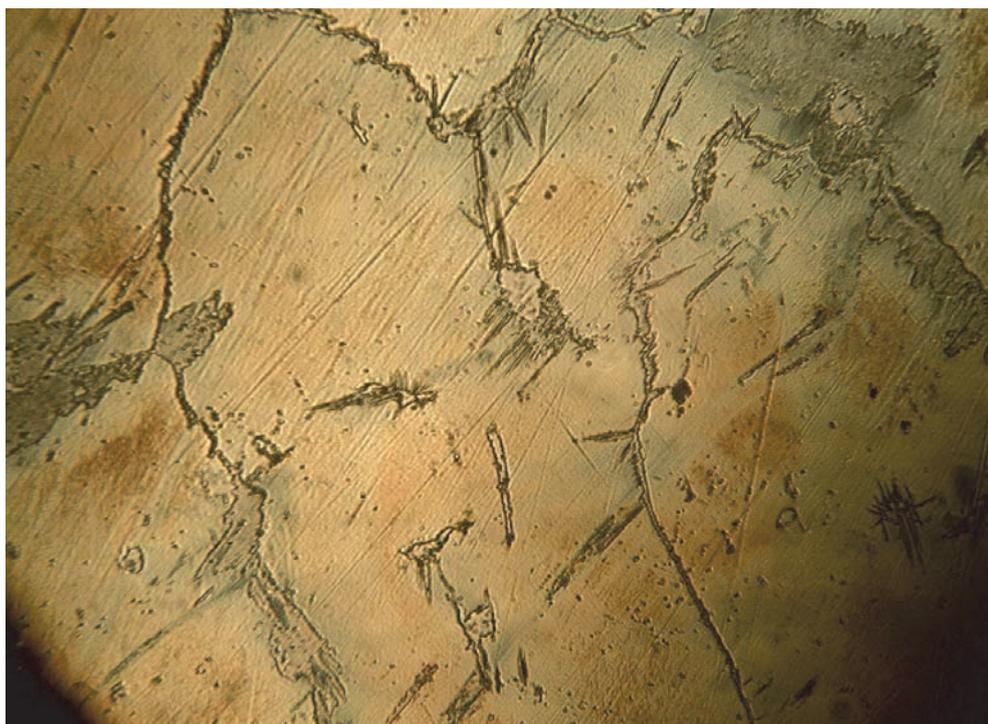
Характерными признаками СВМ-обработки стали являются измельчение структуры металла в среднем на 2–3 балла по аустенитному зерну и повышение однородности структуры, в том числе равномерное распределение карбидов, что, как правило, ведёт к повышению механических свойств в 1,2–1,5 раза, а также снижению анизотропии свойств. Относительное сравнение позволяет утверждать о повышении пластических свойств стали при сохранении прочностных. У перлит-ферритных сталей наблюдаются изменения в фазовом составе в сторону увеличения перлита. Снижается химический градиент фаз, границы фаз становятся более размытыми. Наблюдается положительная зависимость между измельчением микроструктуры и повышением механических свойств литья (исключение составила сталь 110Г13Л), хотя отмечены и случаи повышения механических свойств после СВМ-обработки без видимых изменений в структуре металла.

У чугуна СЧ25 отмечено существенное повышение прочностных характеристик при неизменности формы графита; прочность стержневой пробы (343 МПа) соответствует более прочному чугуну СЧ35; структура – серый чугун с пластинчатым графитом.

Дилатометрические исследования показали понижение критических точек Ас1 и Ас3 на 30–35 °С для простых и низколегированных сталей и до 50 °С для высоколегированных, что учитывалось при термообработке.

На рис. 3 и 4 представлены микрошлифы контрольных и подвергнутых СВМ-обработке образцов стали: на рис. 3 – сталь 110Г13Л; на рис. 4 – сталь 35ХГСЛ.

Механические свойства образцов металла, прошедшего волновую обработку, согласно данным, полученным на ОАО «МК ОРМЕТО-ЮУМЗ» и ОАО «Мотовилихинские заводы», приведены в табл. 1. О результатах проведенных исследований сообщалось в [4].



Плавка № 1813, контрольный образец, без обработки. Крупное аустенитное зерно, балл 1–2. Выделение карбидов как по границам, так и внутри зёрен. Увеличение $\times 100$ крат.



Плавка № 1817, образец, прошедший СВМ-обработку, мелкое аустенитное зерно, балл 4,5–5. Выделение карбидов подавлено. Увеличение $\times 100$ крат

Рис. 3. Микроструктура стали 110Г13Л аустенитного класса, в литом состоянии



Плавка № 2754, контрольный образец. Ферритная сетка, видманштет 2–3 балла, перлитные и ферритные зерна. Увеличение $\times 100$ крат



Плавка № 2755 – после волновой обработки. Ферритная сетка отсутствует, зерна феррита и перлита. Увеличение $\times 100$ крат

Рис. 4. Микроструктура стали 35ХГСЛ в литом состоянии

Более детально образцы обработанного металла были исследованы в Физико-техническом институте и Институте машиноведения УрО РАН, а также во ФГУП «Центр порошкового материаловедения».

Согласно заключению Физико-технического института УрО РАН (г. Ижевск), для стали 40ХМА средний диаметр блока когерентного рассеяния составил, без волновой обработки, 998 ± 96 А, с волновой обработкой 580 ± 18 А. Микротвердость областей микроструктуры, кгс/мм, без волновой обработки: светлых областей – 253, тёмных областей – 278; с волновой обработкой, соответственно, 311 и 317. Отсюда видно, что при волновой обработке уменьшается блочность зерна, происходит рост твердости структурных составляющих.

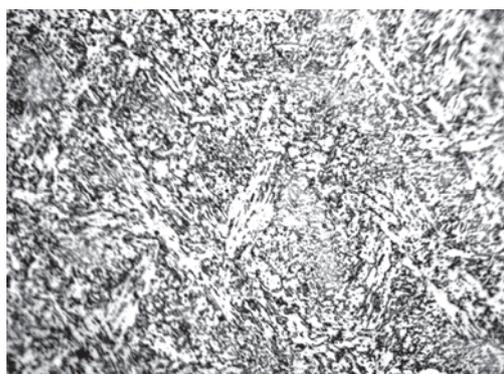
В Институте машиноведения УрО РАН (г. Екатеринбург) на образцах 40ХМА отмечен рост параметров решётки – α -фазы с 2,8685А до 2,8695А, что может быть обусловлено легированием α -твердого раствора. На литых образцах ст. 9Х2МФ в плавках с СВМ-технологией выявлено измельчение дендритов и повышение однородности структуры. Фазовый состав стали 9Х2МФ в исходном состоянии – α -фаза + 30% аустенита. Параметр решётки α -фазы – 2,8712А. После волновой обработки аустенит распался, его количество не превысило 2%. Параметр решётки α -фазы не изменился. Примерно на 20% уменьшилась ширина рентгеновских рефлексов, что свидетельствует о снижении уровня микронапряжений.

Металлографический анализ образцов стали 10ХНЗМДЛ был проведён в ФГУП «Центр порошкового материаловедения», г. Пермь.

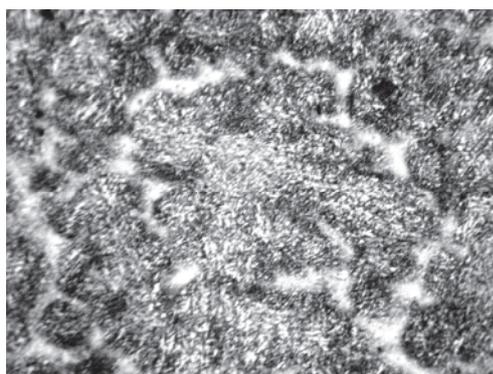
На снимках (рис. 5) микроструктуры необработанного образца при больших увеличениях отмечена хаотичная направленность кристаллизации, а на обработанном образце зерна ориентированы более упорядоченно, с одинаковой кристаллографической ориентировкой, это обеспечило получение более однородной и более мелкой структуры. Сделаны измерения величины зерна: образец без обработки – 4,9 мкм; образец с обработкой – 3,2 мкм. В обработанном образце значения твёрдости выше (соответственно 16,8 и 21 кг/мм²). При механических испытаниях образцов на сжатие образцы приобрели бочкообразную форму, разрушение не произошло при максимальной нагрузке 10 т. Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что микроискажения после обработки стали меньше.

Влияние на механические и эксплуатационные характеристики готовых изделий

Валки холодной прокатки и направляющие ролики, ст. 40ХМА: отмечена более однородная структура металла, без выраженной полосчатости, с равномерным распределением карбидов, низкой анизотропией свойств, что позволяет исключить введение дополнительных режимов термообработки для её улучшения; получены стабильные результаты по ударной вязкости на U- и V-образных образцах, что свидетельствует о снижении чувствительности



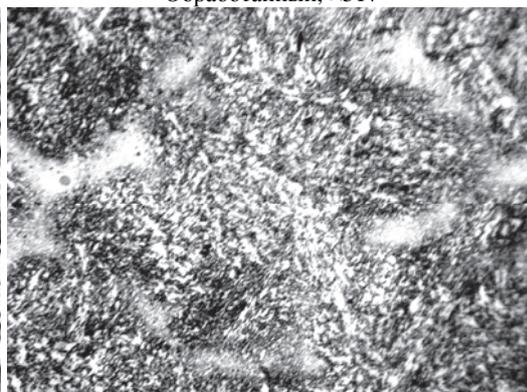
Необработанный, ×517



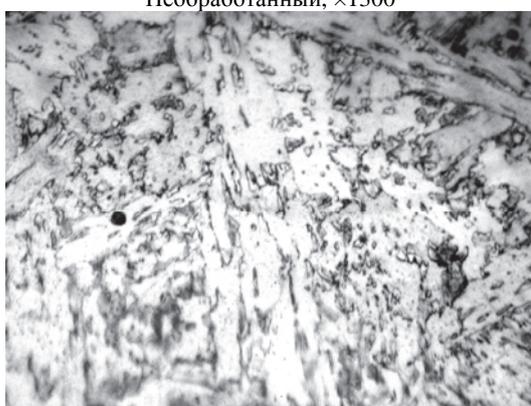
Обработанный, ×517



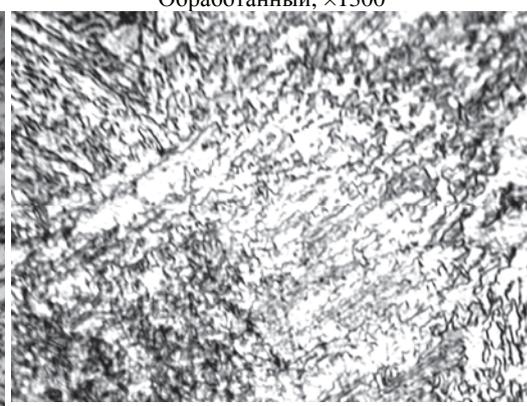
Необработанный, ×1300



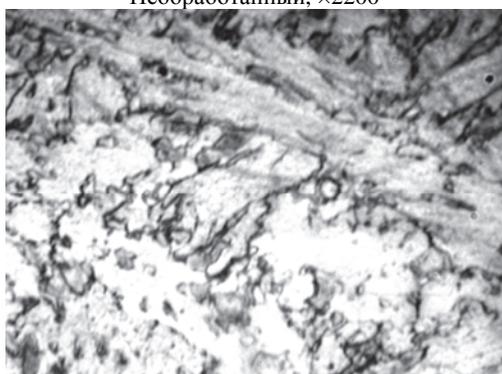
Обработанный, ×1300



Необработанный, ×2200



Обработанный, ×2200



Необработанный, ×4200



Обработанный, ×4200

Рис. 5. Микроструктура образцов необработанной и обработанной стали 10XN3MDL при различном увеличении

металла к надразам и трещинам и предопределяет уменьшение потерь от брака из-за наличия трещин после шлифовки; отмечено улучшение механических свойств и структуры металла, достигнута стабильность получения приёмосдаточных характеристик: отсутствует анизотропия механических свойств, высокая величина балльности зерна (в валах сечением 800 мм – до 8 баллов), что позволяет отказаться от повторной термообработки; отмечено повышение износостойкости валков холодного проката минимум на 20%. Достигнутое улучшение механических свойств валов из стали марки 40ХМА соответствует уровню механических свойств более легированной марки 34ХН3М.

Валы из стали 17Г1С сечением от 350 до 800 мм: отмечено улучшение механических свойств и структуры металла, достигнута стабильность получения приёмосдаточных характеристик; отсутствует анизотропия механических свойств, высокая величина балльности зерна (в валах сечением 800 мм – до 8 баллов), что позволяет отказаться от повторной термообработки; отсутствует грануляционная структура, в результате снижается до минимума образование брака по ультразвуковому контролю (по УЗК валы соответствуют высокому уровню классности – С/с SEP 1921).

Валы из стали 45 сечением до 750 мм: отмечено частичное улучшение механических свойств и структуры металла; валы по своим прочностным характеристикам отвечают требованиям стандарта SEW-550; пластические характеристики исследуемых плавок (удлинение, сужение, работа удара) выше средних значений за 2006 г., соответственно на 12, 10, 6%; по ультразвуковому контролю валы соответствуют техническим требованиям заказчика С/с SEP 1921; сокращение режимов термообработки – выдержки при перекристаллизации на 30%.

О физическом механизме обработки расплава электромагнитным излучателем

Природа явления принципиально не ясна. Физический механизм воздействия СВМ-генератора на расплав в настоящее время изучается. При исследовании за основу нами принят классический электромагнитный подход, то есть главным действующим фактором считается электромагнитное поле, создаваемое излучателем [1, 5].

Согласно опубликованным данным [6], изменения в структуре отливки могут быть получены с помощью очень слабого электромагнитного поля, что свидетельствует о чрезвычайно низкой энергоёмкости способа обработки металла в нестационарных электромагнитных полях. Изменение структурных и прочностных характеристик металла получают при обработке отливок в нестационарном (бегущем) электромагнитном поле с магнитной индукцией в единицы гаусс, создаваемом с помощью индуктора. При этом в расплаве возникают гидродинамические структуры (упорядоченная система плоских вихрей), обеспечивающие интенсивное локальное перемешивание

жидкого металла, а его интегральное перемешивание в объеме отливки осуществляется за счёт конвекции.

Однако воздействие на металл методом СВМ имеет существенные отличия от описанного в [6]. Во-первых, воздействие на расплав производится только в течение плавки и прекращается перед разливкой металла. Во-вторых, измеренная напряженность магнитного поля, создаваемого излучателем генератора в районе печи, в свободном пространстве составляет 0,2...0,6 Гс и ослабевает при проникновении в металл, а это на порядок ниже, чем в [6]. Следует также отметить характерные структурно-фазовые изменения в металле, связанные с использованием в СВМ-генераторе модуляторов из различных материалов (модификаторов), которые могут быть обусловлены различиями в спектре излучения генератора.

Целесообразно дополнительно рассмотреть ряд гипотез.

Ранее, согласно работе [5], нам представлялась интересной следующая гипотеза. Поскольку слабое магнитное поле, создаваемое СВМ-генератором, проникает в металл на определённую глубину, оно влияет на движение коллективизированных электронов в расплаве. При этом меняются квантовые обменные силы и происходят первичные изменения – на уровне кристаллической решетки и вторичные – на уровне изменений в микроструктуре. Явления в кристаллической решетке могут быть резонансными либо определяться изменением вероятности распределения электронов по разным состояниям.

Воздействие магнитного поля и электромагнитных потенциалов генератора (или волн электромагнитных потенциалов, обсуждаемых в [7]) может приводить квантовым образом к определённой поляризации спинов атомов расплава, что сказывается на характере кристаллической решетки твердого металла. Изменения в кристаллической решетке могут быть связаны с рассеянием спин-поляризованных электронов на потенциале Ааронова–Бома [8], который порождается магнитным полем генератора и проникает в металл. Электроны в металле взаимодействуют с потенциалом Ааронова–Бома, при этом меняется плотность вероятности их распределения, квантовым образом меняется характер обменных сил. Меняется поверхностная энергия в расплаве, поверхностное натяжение, что может носить резонансный или синергетический характер, и далее – меняются условия образования зародышей кристаллизации.

На сегодняшний день нам представляется очевидным, что электромагнитное поле, которое сильно затухает в расплаве металла, а также слабый эффект Ааронова–Бома не могут объяснить действие нашего СВМ-генератора. Здесь требуется новая физическая парадигма.

Выводы

1. Применение волновой обработки расплава с помощью СВМ-генератора позволяет получить (табл. 1):

- гарантированное улучшение структуры металла, что, в свою очередь, позволяет пересматривать режимы термообработки;
- существенное повышение прочностных характеристик металла, позволяющее использовать менее легированные марки стали и чугуна;
- улучшение механических характеристик обуславливает повышение износостойкости выпускаемой продукции, например валков, как минимум на 20 %;
- внедрение данного процесса в производстве потребует отработки сквозной технологии: жидкая сталь – волновая СВМ-обработка – разливка – прокатка.

2. Физические механизмы управляющего воздействия СВМ-генератора на расплавы металлов требуют дальнейшего изучения и теоретической разработки.

Таблица 1

Механические свойства образцов металла, прошедшего волновую обработку, после нормализации и отпуска (ОАО «МК ОРМЕТО-ЮУМЗ», ОАО «Мотовилихинские заводы»). Указаны режим СВМ-обработки и количество проведённых экспериментальных плавок

| Марка стали, предприятие, режим / кол-во плавок | Мех. свойства | | | | | |
|--|------------------|------------------|---------------|------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | σ_r , МПа | σ_b , МПа | δ , % | ψ , % | KCU (+20 °C), Дж/см ² | KCU (-50 °C), Дж/см ² |
| 10ХНЗМДЛ РГ115-95ТУ Мотовилих. заводы | ≥883 | ≥940 | ≥10 | ≥20 | ≥38,3 | ≥19,6 |
| 10ХНЗМДЛ Волновая обработка Режим I / >200 | 900– 1120 | 950– 1180 | 13–18 | 42–58 | 65,0–90,0 | 29,0– 55,0 |
| 35Л ГОСТ 977-88 Мотовилих. заводы | ≥350 | ≥550 | ≥16 | ≥20 | ≥30,0 | – |
| 35Л Волновая обработка Режим I / >40 | 620–660 | 830–890 | 16 | 35–44 | 50,0–69,0 | 29,9– 43,0 |
| 40ХЛ ГОСТ 977-88 Мотовилих. заводы | 650 | 500 | 12 | 25 | 40,0 | – |
| 40ХЛ Волновая обработка Режим I / >30 | 700–730 | 790–900 | 14–18 | 36–52 | 70–105,0 | 25–57 |
| 35ХГСЛ ГОСТ 977-88 Мотовилих. заводы | ≥600 | ≥800 | ≥10 | ≥20 | ≥40,0 | ≥14,0 |
| 35ХГСЛ Волновая обработка Режим I / 1 | 883–900 | 990– 1000 | 12,0– 12,5 | 36–39 | 69,6–82,7 | 34,3– 36,8 |

Окончание табл. 1

| Марка стали, предприятие, режим / кол-во плавков | Мех. свойства | | | | | |
|--|--------------------|--------------------|--------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | $\sigma_{т}$, МПа | $\sigma_{в}$, МПа | δ , % | A ₋₂₀ , Дж | KCU (+20°C), Дж/см ² | KCV (+20°C), Дж/см ² |
| 17Г1С поковки Ø300...800 Заводская статистика ОРМЕТО – ЮУМЗ | 275 | 450 | 17 | 23 | 140,0 | |
| 17Г1С Волновая обработка Режим I / >20 | 370 | 550 | 29 | 100–130 | 160–189 | 160–189 |

| Марка стали, предприятие, режим / кол-во плавков | Мех. свойства | | | | | |
|---|--------------------|--------------------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | $\sigma_{т}$, МПа | $\sigma_{в}$, МПа | δ , % | KCU (+20°C), Дж/см ² | KCU (-40°C), Дж/см ² | KCU (-70°C), Дж/см ² |
| 09Г2С ГОСТ 19282-73 Лист 16-18 мм Мотовилих. заводы | ≥325 | ≥470 | ≥21 | ≥29 | ≥34 | ≥29 |
| 09Г2С Лист 16-18 мм Волновая обработка Режим I / >20 | 340–370 | 530–560 | 26–32 | 88–130 | 40–122 | 36–120 |

| Марка стали, предприятие, режим / кол-во плавков | Мех. свойства | | | |
|---|--------------------|--------------------|--------------|-----------------------|
| | $\sigma_{т}$, МПа | $\sigma_{в}$, МПа | δ , % | A ₋₂₀ , Дж |
| 40ХМА поковки до Ø400 Заводская статистика ОРМЕТО – ЮУМЗ | 390 | 590–740 | 16 | 39–59 |
| 40ХМА Волновая обработка Режим I / >10 | 670 | 880 | 12,5 | 70 |

| Марка стали, предприятие, режим / кол-во плавков | Мех. свойства | | | | | |
|---|--------------------|--------------------|--------------|-----|---------------------------------------|------------------------------------|
| | $\sigma_{т}$, МПа | $\sigma_{в}$, МПа | δ , % | НВ | KCU (+20°C), Дж/см ² | Водород, см ³ /100 г |
| 9Х2МФ валы до Ø800 (ОСТ 24.013.20-85). Заводская статистика ОРМЕТО – ЮУМЗ | 390 | 620 | 12 | 200 | 8,0 | 3–4 |
| 9Х2МФ Волновая обработка, режим II / >10 | 784 | 1033 | 12 | 300 | 36 | 2–3 |

ЛИТЕРАТУРА

1. Батышев А.И. Формирование отливок под воздействием давления, вибрации, ультразвука и электромагнитных сил. – М.: НИИМАШ, 1977.

2. Патент № 2324575 РФ. Способ обработки расплавленных материалов электромагнитными полями / А.Е. Бояршинов, А.В. Ключев, Н.А. Кокарева, С.А. Курапов, В.Ф. Панов, В.В. Стрелков. Опубликовано 20.05.2008. Бюл. № 14.
3. Патент № 2336612 РФ. Электромагнитная антенна / А.Е. Бояршинов, А.В. Ключев, Н.А. Кокарева, С.А. Курапов, В.Ф. Панов, В.В. Стрелков. Опубликовано 20.10.2008. Бюл. № 29.
4. *Ключев А.В., Кокарева Н.А., Курапов С.А., Панов В.Ф., Стрелков В.В.* Полевое глубинное воздействие на расплавы металла // Сб. статей по материалам Второй международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». – М.: ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, 2007. – С. 144.
5. *Бояршинов А.Е., Ключев А.В., Кокарева Н.А., Курапов С.А., Панов В.Ф., Стрелков В.В.* Структура и механические свойства металла после обработки расплава в нестационарном электромагнитном поле волнового излучателя // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2009. – № 7(649). – С. 3–9.
6. А.с. 1359998 СССР. Способ получения плоских отливок / А.Б. Капуста, А.И. Лихачева, Л.Р. Реймал. Опубликовано 11.05.1985. Бюл. ВНИИПИ № 1555.
7. *Афанасьев Г.Н.* Физические приложения соленоидов // *Физика элементарных частиц и атомного ядра.* – 1993. – Т. 24. – Вып. 2. – С. 512–593.
8. *Халилов Р.В.* Электрон в потенциале Аронова–Бома и кулоновское поле в 2+1 измерениях // *Теоретическая и математическая физика.* – 2006. – Т. 149. – № 3. – С. 502-517.