

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

*Посвящается 100-летию
со дня рождения ректора СМИ,
доктора технических наук,
профессора Н.В.Толстогузова*

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО
«Металлургия – 2021»**

Труды

XXII Международной научно-практической конференции

10 – 11 ноября 2021 г.

Часть 1

**Новокузнецк
2021**

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИГОТОВЛЕНИЕМ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ	
<i>Князев С.В., Козырев Н.А., Усольцев А.А.</i>	163
КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ЧУГУНОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГАЗОСБОРНОГО КОЛОКОЛА	
<i>Усольцев А.А., Князев С.В., Куценко А.И., Козырев Н.А., Дмитриенко В.И.</i>	167
ОЦЕНКА ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ ЧУГУНОВ ВЧ50 И ЧХ3	
<i>Дмитриенко В.И., Князев С. В., Козырев Н.А., Куценко А.И., Усольцев А.А.</i>	177
ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ХН65ВМТЮ (ЭИ896) МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ	
<i>Комаров Д.В., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Чэнь Д., Панченко И.А.</i>	184
ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ И ДЕФЕКТНОЙ СУБСТРУКТУРЫ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНО ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЛЬСОВ	
<i>Кузнецов Р.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А., Кормышев В.Е., Перегудов О.А., Семин А.П.</i>	189
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ СИЛУМИНОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ И МЕДИ	
<i>Попова М.В., Жибинова И.А., Прудников А.Н.</i>	194
ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛОГРАФИИ ВЫСОКОЧИСТОГО ЖЕЛЕЗА 008ЖР	
<i>Афанасьев В.К., Попова М.В., Долгова С.В.</i>	201
МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ДОМЕННОГО ЧУГУНА ПОСЛЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	
<i>Афанасьев В.К., Попова М.В., Долгова С.В., Сагалакова М.М., Черныш А.П., Жибинова И.А., Малюх М.А.</i>	208
ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА А0 С НИЗКОЙ СТЕПЕНЬЮ ПРОРАБОТКИ ЛИТОЙ СТРУКТУРЫ	
<i>Яшин В.В., Арышенский Е.В., Коновалов С.В., Арышенский В.Ю., Латушкин И.А.</i>	212
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ И ВЫКАТЫВАЕМОСТИ ДЕФЕКТОВ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОКАТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО РЕЛЬСОБАЛОЧНОГО СТАНА	
<i>Уманский А.А., Юрьев А.Б.</i>	216
МЕХАНИЗМЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ И СВОЙСТВ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ ПРИ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	
<i>Арышенский Е.В., Коновалов С.В.</i>	225
ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ЛИТЬЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ СПЛАВА AL-MG-SI С ИЗБЫТКОМ SI ЛЕГИРОВАННОГО МАЛЫМИ ZR, SC ДОБАВКАМИ	
<i>Лапшов М.А, Арышенский Е.В., Коновалов С.В., Арышенский В.Ю.</i>	232
ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ, МИКРОТВЕРДОСТЬ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 9СRМ0V-N ИЗГОТОВЛЕННОЙ МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
<i>Осинцев К.А., Шляров В.В., Чэнь С., Коновалов С.В., Загуляев Д.В., Чаплыгин К.К.</i>	240
ПРОКАТКА ДЛИННОМЕРНОЙ РЕЛЬСЫ С УСКОРЕНИЕМ	
<i>Соловьев В.Н., Белолипецкая Е.С.</i>	248
РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА РЕАКТИВНОЙ ДИФФУЗИИ ПО ТОЛЩИНЕ ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ (ФАЗЫ) ПРИ ВЛИЯНИИ УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО НИКЕЛЯ НА ДИФФУЗИОННЫЕ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ЦИНКОВОГО ПОКРЫТИЯ	
<i>Розентейн Е.О., Бондарева О.С., Коновалов С.В.</i>	255

ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛОГРАФИИ ВЫСОКОЧИСТОГО ЖЕЛЕЗА 008ЖР

Афанасьев В.К., Попова М.В., Долгова С.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, m.v.popova@mail.ru*

Аннотация. Предложено рассматривать диаграмму состояния железоуглеродистых сплавов как многокомпонентную: Fe–C–H–N–O. Настоящий подход базируется на представлении о ведущей роли водорода и его разновидностей в формировании структуры и свойств сплавов на основе железа. Показано, что после обработке в среде с повышенным содержанием водорода в высокочистом железе возможно образование перлита.

Ключевые слова: железо, углерод, диаграмма состояния, водород, атмосфера водяного пара, микроструктура, перлит.

FEATURES OF HIGH-PURITY IRON METALLOGRAPHY

Afanasyev V.K., Popova M.V., Dolgova S.V.

*Siberian State Industrial University
Novokuznetsk, Russia*

Abstract. It is proposed to consider the state diagram of iron-carbon alloys as multicomponent: Fe-C-H-N-O. This approach is based on the idea of the leading role of hydrogen and its varieties in the formation of the structure and properties of iron-based alloys. It is shown that after treatment in a medium with an increased hydrogen content in high-purity iron, pearlite formation is possible.

Keywords: iron, carbon, state diagram, hydrogen, water vapor atmosphere, microstructure, pearlite.

По распространенности в земной коре железо занимает второе место среди металлов после алюминия. Поэтому ему всегда будет уделяться большое внимание, так как сплавы на основе железа (чугуны и стали) до сих пор остаются «становым хребтом» цивилизации [1]. Однако к настоящему времени ресурс свойств чугуна и углеродистой стали остается далеко не выработанным. Неумение получить более высокие свойства их вылилось в особый раздел современных материалов – это легированные сплавы на основе системы Fe–C.

Легирование с нарастающей скоростью повышает стоимость сплавов, что в конечном итоге оправдывает поиск других материалов с требуемыми свойствами (керамических, на основе нитрида бора и других – часто экзотических), стоимость которых еще выше и растет с ускорением. Легированные чугуны и стали практически вытеснили из сферы производственной деятельности нелегированные железоуглеродистые сплавы [2, 3]. Это произошло в связи с недостаточностью, а часто полным отсутствием, основополагающих знаний о сущности формирования их свойств.

Здесь важно отметить, что уже в 1899 году признанный отец диаграммы Fe–C Робертс-Аустен независимо от критических точек $A_{\Gamma 3}$ и $A_{\Gamma 2}$ открыл в электролитическом железе еще неоднократно выделение тепла. Соответствующие температуры он назвал «водородными» точками, так как появление этих тепловых эффектов он приписывал присутствию водорода, поглощенного железом; после неоднократного прокаливания соответствующей пробы в вакууме эти тепловые эффекты не удалось обнаружить. Водородную точку при температуре 487 °С Робертс-Аустен объяснял выделением гидроксида железа из твердого раствора, а водородную точку при температуре 261 °С он приписывал твердой эвтектике железо – гид-

рид железа. Водородную точку при температуре между 600 и 550 °С он не объяснял. Последующие ученые не подтвердили существования «водородных точек», и эти точки в дальнейших диаграммах уже не обозначались.

При температуре около 600 °С Робертс-Аустен в своей диаграмме дал, кроме того, критическую точку A_{r0} , которая, по его мнению, должна была соответствовать магнитному превращению» [4].

Следует считать предложенное великим авторитетом в этой области чрезвычайно важным, так как он первый отметил процессы в интервалах 200–300, 400–450 и 550–600 °С, которые в последующем окажутся важнейшими в металлических системах. То обстоятельство, что он связал процессы, протекающие в этих температурных интервалах, с присутствием водорода, видимо, было главной отправной вехой, которую современники и их последователи аккуратно предали забвению. Последнее оказало катастрофически вредное влияние на дальнейшую историю развития диаграммы.

Видимо, должны были пройти годы, чтобы понять, что исследователи, находившиеся у истоков науки о главном веществе, обеспечивающем жизнедеятельность человека, – железе и его сплавах с углеродом, были очень близки к пониманию сущности формирования его свойств. Однако, имевшаяся на то время информация о Земле и Космосе не позволила признать ведущую роль водорода во всех процессах получения и обработки.

Выдающийся ленинградский ученый Андрей Сергеевич Завьялов в 1948 г. опубликовал монографию «Фазовые превращения в железоуглеродистых сплавах» [5]. В первой главе этой монографии он, детально рассматривая природу полиморфных превращений, сделал следующие выводы:

а) Различные примеси в металлах резко влияют на явление полиморфизма и на процессы полиморфных превращений.

б) Полиморфизм металлов был установлен при изучении не чистых металлов, а твердых растворов различных примесей в этих металлах.

в) По мере разработки способов получения более чистых металлов и совершенствования методов их изучения, количество металлов, которые считаются полиморфными, непрерывно уменьшается; так например, уже не считаются полиморфными литий, натрий, бериллий, стронций, барий, медь, свинец, а за последнее время и алюминий, цинк, висмут и кадмий.

г) В отношении некоторых металлов, считающихся и до сих пор полиморфными (никель, хром и вольфрам), металловедение уже располагает достаточными данными, чтобы исключить их из числа полиморфных и при отсутствии примесей.

д) По мере усовершенствования методов изучения стирается принципиальное различие между металлами „полиморфными" и „неполиморфными". Основное различие между ними начинает сводиться к необходимому количеству тех или иных примесей, вызывающих явление полиморфизма».

Через 10 лет (1958 г.) в изданной в нашей стране монографии Э. Гудремона «Специальные стали» были приведены результаты многих исследований, показавших способность железа терять как α -, так и γ -модификации [6].

Полностью устраняют α -область диаграммы Fe – Л.Э. следующие: Ni, Mn, Co, а частично C, N, Zn. Такие элементы называются аустенитообразующие. Ферритообразующие элементы – это те, которые способны выклинивать γ -область и переводить сплавы Fe – Л.Э. в ОЦК-состояние вплоть до $T_{пл}$. К ним относятся Si, P, Ti, V, Cr, Mo, Sn, W.

Для доказательства правоты первых исследователей, утверждавших ведущую роль примесей в организации полиморфизма, дальнейшее увеличение содержания примесей до ранга легирующих элементов сыграло большую и решающую роль.

В своей монографии Э. Гудремон посвятил большую главу «Водороду в стали», где отметил, что «очевидно, однако, что водород действует как легирующий элемент: повышает прокаливаемость стали и стабилизирует аустенит», ссылаясь на работы, выполненные в 1937 – 1940 гг.

Сегодня, исходя из положения о ведущей роли водорода и на основании водородной

платформы периодической системы химических элементов (ПСЭ) [7–9], нами предлагается ряд действий, позволяющих более глубоко понять основы формирования свойств Fe – С сплавов с целью дальнейшего их повышения [10, 11].

1. Металлургия во всех своих аспектах определяется атмосферой Земли (атмосферой водяного пара, АВП). Из этой атмосферы металлы и сплавы поглощают $H_{изб. АВП}$.

Этот $H_{изб. АВП}$ есть всегда, так как всегда есть влажная атмосфера Земли. Всё, что рождается на Земле, в том числе металлы и сплавы, содержит водород и две его разновидности – азот и кислород, составляющие эту атмосферу. Именно такой водород в трех лицах формирует структуру земных металлов и сплавов в следующем порядке (рисунок 1).

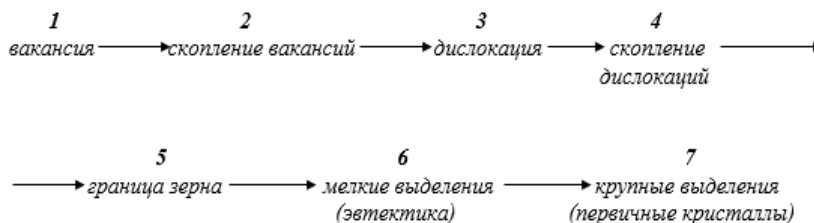


Рисунок 1 – Схема формирования структуры металлов и сплавов с позиций ведущей роли водорода

Такое формирование структуры металлов и сплавов отражается в виде нынешних многочисленных диаграмм состояния (эвтектических, перитектических, монотектических, синтектических и других совмещенных).

Сейчас уже известно, что применение вакуумной обработки даже с высоким остаточным давлением ($10^{-2} - 10^{-3}$ мм.рт.ст.) уже уменьшает «химическую» неоднородность в железе и стали с сопутствующим повышением их свойств, что подтверждает зависимость их структуры и свойств от АВП.

В соответствии с приведенным порядком формирования структуры земных металлов и сплавов они приобретают наследственность, выражающуюся в развитии положительных и отрицательных явлений. К ним, прежде всего, относятся: 1) старение; 2) дисперсионное твердение; 3) водородная хрупкость; 4) отпускная хрупкость; 5) синеломкость; 6) тепловая хрупкость; 7) мартенситное превращение, которое можно рассматривать как закалочную хрупкость.

Эти первые семь качеств приобретаются металлами и сплавами за счет поглощения из АВП водорода $H_{изб. АВП}$, что очень важно, так как именно он оказывает определяющее влияние и на формирование технологических и служебных свойств. В первую очередь таких, как: термообрабатываемость, деформируемость, свариваемость, прочность и жаропрочность, коррозия и коррозия под напряжением, замедленное разрушение, тепловое расширение.

2. Через много лет после представления Робертс-Аустеном в 1899 г. диаграммы Fe – С следует добавить несколько существенных положений.

Во-первых, необходимо рассмотреть процессы, протекающие в веществах при изменении их агрегатного состояния.

В Космосе жидкого состояния нет, а поэтому, согласно основному положению квантовой механики, протекающее в Космосе можно представить следующим образом (рисунок 2).

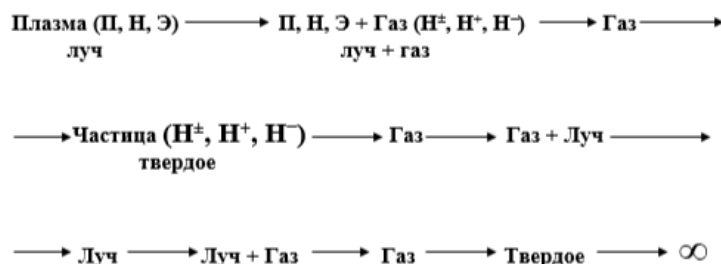


Рисунок 2 – Процессы, протекающие в Космосе при изменении агрегатного состояния веществ

Земля, имеющая свою атмосферу водяного пара АВП, вносит свои изменения в космический порядок. В связи с наличием большого количества $H_{изб. АВП}^-$ процессы, протекающие в веществах при изменении их агрегатного состояния от плазмы до твердого состояния, происходят следующим образом (рисунок 3).

Космический газ (межзвездный, межпланетарный, Солнечный ветер) при встрече с земным $H_{изб. АВП}^-$ образует газоконденсат – вода H_2O , а в данном случае, «металлическая жидкость». Такое добавление очень важно, поскольку нынешняя плавильная металлургия основана на том, что $H_{изб. АВП}^-$ атмосферы Земли в любых нагревательных устройствах встречается с космическими газами, выделяющимися из руды, при этом образуется «металлическая жидкость». В этом расплаве, как известно, рождаются все свойства применяемых сплавов Fe – С.

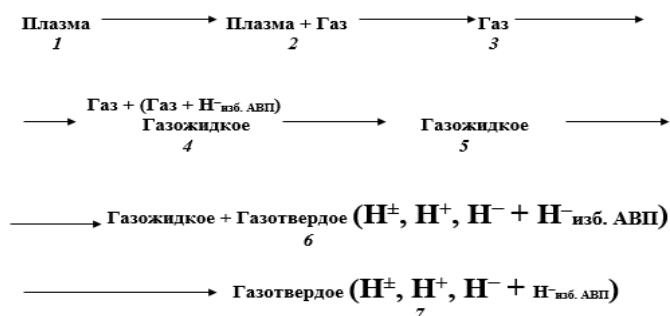


Рисунок 3 – Процессы, протекающие в атмосфере Земли при изменении агрегатного состояния веществ

В естественных земных условиях металлургия реализуется только в виде трех состояний: 7-е – газотвердое, 6-е – газотвердое + газожидкое и 5-е – газожидкое состояние, а остальные четыре существуют в области $T_{исп}$ и выше.

3. Современное представление диаграммы Fe – С может быть сделано в виде схемы, приведенной на рисунке 4.

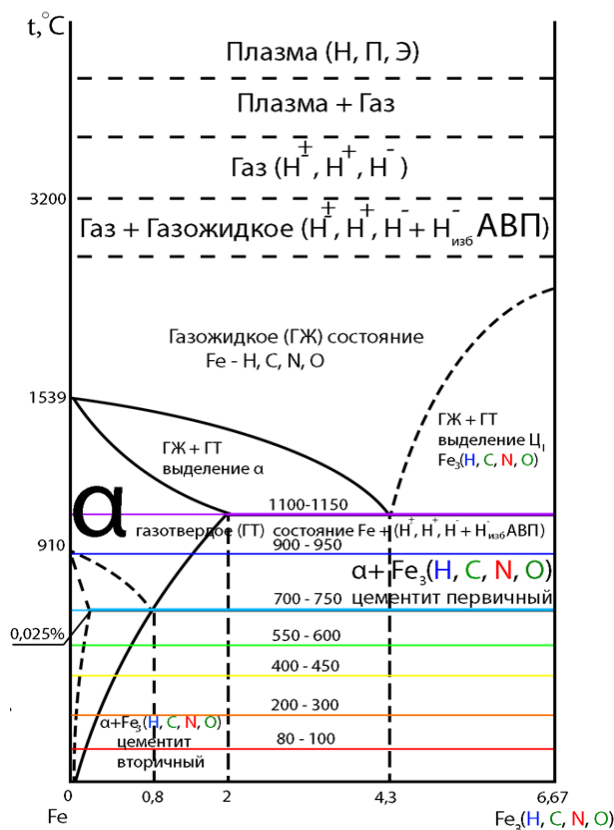


Рисунок 4 – Схематическое изображение водородной диаграммы Fe–С

Здесь важно отметить, что семь температурных интервалов газотвердого состояния проходят через всю жизнь различных металлов и сплавов.

Робертс-Аустен закладывал интервалы 200 – 300, 400 – 450 и 550 – 600 °С, назвав их «водородными точками». Каждый из этих интервалов имеет свой смысл, и в нем протекают все те же три водородные реакции с выдачей своего продукта. На предлагаемой схеме (рисунок 4) пунктиром отмечено наличие γ -Fe и его последствия («стальной угол»).

Таким образом, работы, начатые в 30-х годах XX века и проводимые до настоящего времени специалистами по водороду в металлах, позволяют сделать заключение, что ответственным за существование γ -Fe и всего, связанного с ним ($A \leftrightarrow P$ -превращения, C-кривые изотермического распада, само наличие перлита и аустенита), является присутствие водорода.

Этот важнейший вывод созрел с давних лет, с самого начала становления науки о металлах, которая начиналась со сплавов Fe – C.

Э. Гудремон отмечал «однако, связывать водород и формирование цементованного слоя или образование структуры «перлит» с добавлением водорода всегда казалось странным и неприемлемым». Сейчас пришла пора поставить водород на всегда принадлежащее ему первое место. Только это переведет металлургию железных сплавов в ранг водородной металлургии с соответствующим резким повышением свойств.

Водородная металлургия базируется на представлениях о ведущей роли водорода и его разновидностей в формировании структуры и свойств сплавов и позволяет существенно повысить их механические и физические свойства при снижении стоимости и вредного воздействия на окружающую среду.

Количество H, C, N, O определяет статус железа. При очень малом их содержании – это чистое железо. При увеличении количества этих компонентов – железо называется сталью и далее чугуном.

Приведенное согласуется с трудами родоначальников диаграммы состояния Fe – C. Это Робертс-Аустен (водородные точки и водородное магнитное превращение A_{10} при 600 °С), Йенсен, который отмечал, что «основные примеси в железе – углерод и кислород», а также Эссер, который среди всех примесей на первое место ставил водород.

В данном случае, все отмеченные ими примеси суммируются и выводятся в ранг легирующих элементов для чугуна и стали.

4. Если H, C, N, O растворены в железе, то это состояние называется газожидкое («металлическая жидкость»), а если примеси выделены из железа, то это состояние – газотвердое.

Температура перехода из одного состояния в другое происходит при $T_{пл}$ или $T_{кр}$ (это для металла с очень малым содержанием примесей – «чистого» металла).

Температура плавления ($T_{пл}$) – это земная величина, которая получается человеком-металлургом. Поскольку она полностью определяется содержанием примесей (H, C, N, O) и избыточным водородом из АВП в металлах и сплавах, то ее нельзя считать объективной характеристикой прочности сил межатомной связи. В этом случае принято, что только температура испарения $T_{исп}$ является объективным свойством материального мира, то есть мерой прочности существования твердого вещества. Часто между значениями этих температур для одного и того же металла наблюдается очень большая разница. Особенно, это касается так называемых легкоплавких металлов, так как их легкоплавкость обусловлена наличием поглощенного из АВП водорода ($H_{изб\ АВП}$). На основании изложенного предлагается рассматривать диаграмму состояния с более полным учетом ведущей роли H, C, N, O (ранее известных как «примеси»).

Диаграмма Fe – C – обычная эвтектическая диаграмма состояния, как и все остальные: Fe – легирующий элемент (Cr, V, W и др.). Поскольку в ней второй компонент металлоид (углерод), то «примесей» (H, C, N, O) здесь больше, чем в других бинарных металлических системах Fe – Me. Именно поэтому в ней прочно присутствует γ -Fe и обусловленное им $\gamma \leftrightarrow \alpha$ превращение.

Область стальная (до 2 % C) – это область, в которой основной структурной составляющей является перлит. В результате аустенито-перлитного превращения (распада твердого

раствора) в структуре стали присутствует перлит и другие продукты распада, образующиеся в связи с изменением предела растворимости (перлит, сорбит, троостит, бейнит верхний, бейнит нижний, мартенсит, перлит + цементит).

В связи с этим очень полезен небольшой экскурс в историю. В 1885 г. Сорби впервые применил при изучении микроструктуры стали увеличение микроскопа $\times 650$ и увидел совершенно иного рода структуру в стали и серых чугунах, которая до этого при малых увеличениях обнаруживалась как однородная и темная. Выяснилось, что эта структурная составляющая является смесью, состоящей попеременно из двух видов тонких пластинок разной твердости. Поскольку эта составляющая вследствие своего построения давала световые рефлекссы, напоминающие жемчужную массу, Сорби назвал ее «перлит».

Цвета этой «жемчужной составляющей» - синий, зеленый и красный. С позиций – это цвета, которые дают H^+ , H^\pm , и H^- . Видимо, при получении стали этих водородов настолько много в железе, что они дают свои световые рефлекссы при изучении микроструктуры. Максимально это проявляется в эвтектоидной стали с содержанием $C = 0,8\%$ (У8Л).

При содержании углерода до $0,8\%$ в структуре наблюдаются твердый раствор и «жемчужная масса» (перлит), объемная доля которой увеличивается с повышением содержания C до $0,8\%$. При большем содержании углерода, то есть при увеличении содержания H , C , N , O образуется цементит (известный под названием «цементит вторичный»).

Итак, образование перлита есть прямое следствие выплавки сплавов в АВП, поставляющей в железо H^- из АВП. Если содержание этого водорода увеличивать, то это приводит к увеличению объемной доли перлита в сплавах на основе железа.

На рисунке 5 представлена микроструктура железа 008ЖР в исходном состоянии и после обработки в среде с повышенным содержанием водорода, азота и кислорода.

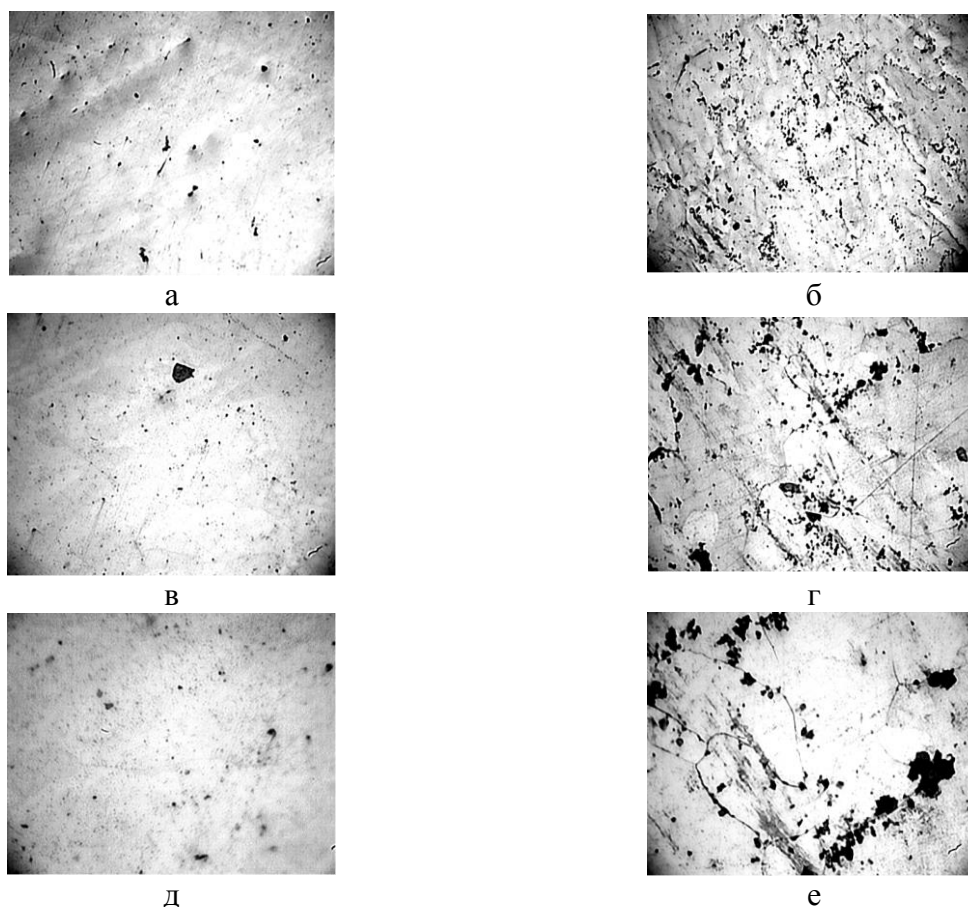


Рисунок 5 – Влияние нагрева во влажном Al_2O_3 (0,5 ч, печь) и последующего старения при $250\text{ }^\circ\text{C}$ (3 ч + 6 ч, воздух) на микроструктуру железа 008 ЖР. Травление в 5%-ном спиртовом растворе HNO_3 , 25с: а, в, д – без обработки; б, г, е – после обработки; а, б – $\times 80$, в, г – $\times 300$, д, е – $\times 750$

Металлографический анализ позволил установить, что нагрев в среде ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$) с последующим старением при температуре 250 °С создает перлит в железе с низким содержанием углерода (до 0,008 %).

Настоящий подход базируется на представлении о ведущей роли водорода и его разновидностей в формировании структуры и свойств сплавов и позволяет существенно повысить их механические и физические свойства при снижении стоимости и вредного воздействия на окружающую среду.

В заключение приведем слова выдающегося ученого-металловеда и специалиста в области водородной металлургии Бориса Александровича Колачева [12]: «В отдельную область под названием «водородное материаловедение» можно выделить разработку материалов и способов их получения, в которых водород играет основную функциональную роль... Учитывая непредсказуемость поведения водорода, можно ожидать новые примеры его полезных проявлений в металлах. Все это, безусловно, будет определять создание материалов третьего тысячелетия».

Библиографический список

1. Леонтьев Л.И. Черная металлургия: состояние и перспективы / Л.И. Леонтьев, К.В. Григорович // Наука в России. – 2011. – № 4. – С. 46-50.
2. Афанасьев В.К. Перспективы развития чугуна и стали / В.К. Афанасьев // Вестник РАЕН. Западно-Сибирское отд. – Вып. 4 – Кемерово, 2001. – С. 182 – 191.
3. Афанасьев В.К. Быстрорежущая сталь и инструментальный чугун / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, М.В. Попова, С.В. Магазов, А.В. Кольба, А.П. Черныш. – под научн. ред. проф. Афанасьева В.К. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 630 с.
4. Тыркель Е. История развития диаграммы железо-углерод / Е. Тыркель. – Москва : Машиностроение, 1968. – 280 с.
5. Завьялов А.С. Фазовые превращения в железоуглеродистых сплавах / А. С. Завьялов. – Ленинград : Судпромгиз, 1948. – 215 с.
6. Гудремон Э. Специальные стали: В 2 т. : Пер. с нем. – 2-е изд., сокр. и перераб. – Москва : Металлургия, 1966. - 2 т.
7. Афанасьев В.К. Водородная платформа периодической системы элементов / В.К. Афанасьев // Металлургия машиностроения. – 2011. – №2 – С. 21-26.
8. Афанасьев В.К. Водородная платформа периодической системы элементов (Сообщение 2) / В.К. Афанасьев // Металлургия машиностроения. – 2012. – №4. – С.3-7.
9. Афанасьев В.К. О современном развитии диаграммы Fe– С и его практическом применении / В.К. Афанасьев // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2015): сборник трудов VII Международной научно-практической конференции / под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово. – 2015. – С. 233–238.
10. Афанасьев В.К. Доменный чугун – металл будущего / В.К. Афанасьев, С.А. Гладышев, Л.А. Годик, А.А. Золотовский, А.И. Катунин, В.Я. Келлер, Н.М. Кулагин, Б.А. Кустов, В.А. Москинов, Л.М. Полторацкий, М.В. Попова, А.В. Сочнев, Ю.А. Селезнев, А.Н. Смирнов, В.Н. Толстогузов, М.А. Усов, В.Я. Целлермаер, М.В. Чибряков, В.И. Чичков. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2005.–343 с.
11. Афанасьев В.К. Металлография чугуна / В.К.Афанасьев, С.В.Долгова, М.В. Попова, М.М. Сагалакова, А.О. Токарев, В.Н. Толстогузов, В.В. Герцен, А.П. Черныш – под научн. ред. проф. Афанасьева В.К. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 482 с.
12. Колачев Б.А. Водород в металлах и сплавах / Б.А. Колачев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1999. – №3. – С. 3–10.