

К. Ю. Шахназаров

**ЭКСТРЕМУМЫ НА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗА
КАК СЛЕДСТВИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В НЕМ ПРИ ~ 650 °С**

В представленной работе на основании экстремумов на кривых: усилия сопротивления осадки, параметров тонкой структуры, металлографической структуры в зависимости от температуры, а также многочисленных литературных данных по аномалиям физико-механических свойств железа и сталей декларируется превращение при ~ 650 °С. Исследование проводили на образцах из практически чистого железа (0,008 % С). Эксперимент (металлографическое исследование, рентгеноструктурный анализ, сопротивление осадке (установка Gleeble-3800) проводили через каждые 20 °С.

Ключевые слова: железо, сталь, перлит, закалка, отпуск, полиморфизм, пластичность, твердость, ударная вязкость.

K.Yu. Shakhnazarov

**EXTREMUMS AT TEMPERATURE DEPENDENCIES
PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF IRON, AS A RESULT
OF TRANSFORMATION IN IT AT ~ 650°C**

In the presented work on the basis of extrema on curves: efforts of resistance of draft, parameters of thin structure, metalgraphic structure depending on temperature and also numerous literary data on anomalies of physicomachanical properties of iron and staly transformation is declared at ~ 650 °C. The research was conducted on samples from almost pure iron (0,008% C). An experiment (the metalgraphic research, the X-ray diffraction analysis, resistance to draft (Gleeble-3800) carried out through each 20 °C.

Key words: iron, steel, perlite, training, annealing, polymorphism, plasticity, hardness, impact elasticity.

Введение

Большинство углеродистых и низколегированных сталей имеют структуру продуктов перлитного превращения или высокого отпуска (после закалки).

Максимальная пластичность или ударная вязкость достигаются, когда температуры перлитного превращения t_D или высокого отпуска t_0 равны ~ 650 °С. Это аномально, так как в обоих случаях снижению прочностных свойств или твердости соответствует уменьшение пластичности или вязкости, то есть охрупчивание [1–6].

Охрупчивание при $t_0 > 650$ °С описано в 1915 г.: «Наиболее благоприятным в смысле получения хорошего сжатия при разрыве... оказался отпуск при 650 °С» [7]. Но по поводу природы охрупчивания имеются взаимоисключающие суждения: огрубление карбидов по границам зерен [2] или «увеличение размеров кристалликов α -железа» [3]. Наиболее взвешенная позиция, на наш взгляд, у А. П. Гуляева, показавшего зависимость ψ до $t_0 \sim 680$ °С с максимумом при $t_0 \sim 640$ °С, а монотонные зависимости σ_B , $\sigma_{0,2}$, НВ и δ до $t_0 \sim 640$ °С [4]. Можно предполагать, что подход А. П. Гуляева обусловлен отсутствием версии природы охрупчивания при понижении твердости и прочности.

Охрупчивание при $t_{\text{п}} > 650$ °С в работах [2] и [7] не комментируется, а Э. Гудремон сводит его к дисперсности карбидов [1]. Это вызывает возражение, так как «оценка свойств стали преимущественно при помощи какой-либо одной из структурных составляющих стали не является достаточной» [8]. «Значение свойств ферритной составляющей, помимо дисперсности карбидной фазы... подчеркивается в работах С. С. Штейнберга» [8].

Цель работы – исследование физико-механических свойств железа при ~ 650 °С, что, возможно, предопределяет аномалии на температурных зависимостях его производного железа – сталей.

Методика

Эксперимент проводили на образцах из железа, содержащего 0,008 % С, и сталях с различным содержанием углерода. Исследование микроструктуры (оптический микроскоп «Zeiss», растровый электронный микроскоп (JSM-7001F), рентгеноструктурный анализ, сопротивление осадке (установка Gleeble-3800), твердость и микротвердость проводили через каждые 20–40 °С.

Результаты исследований

Несмотря на то, что Сорби описал перлит в 1886 г., «реалистической теории» [5] перлитного превращения «нет» [5].

Важнее другое: нет данных по значениям твердости (HRC) после изотермического перлитного превращения эвтектоидной стали в интервале ~ 620–670 °С как в «классической работе Гензамера» [7], так и в работе [5], хотя значения $\sigma_{0,2}$, σ_B , σ_{-1} , ψ (но не δ) для этого интервала приведены. Это странно, т. к. HRC определяется гораздо проще. Можно предположить, что значения твердости определены, но опущены, т. к. не устраивали Гензамера с соавторами.

Нами исследовано влияние изотермического отжига в диапазоне температур 580–680 °С (рис. 1) на твердость и микротвердость углеродистых (У8 и 45) [9] сталей и чистого железа (0,008 % С). После нагрева до 820 °С 1 ч образцы переносили в другую печь и выдерживали 24 ч при 580–680 °С, а затем охлаждали в печи. Сравнение вели с образцами, которые непрерывно охлаждали в коробке с песком в печи от 850 до 630 °С, а затем на воздухе в той же коробке.

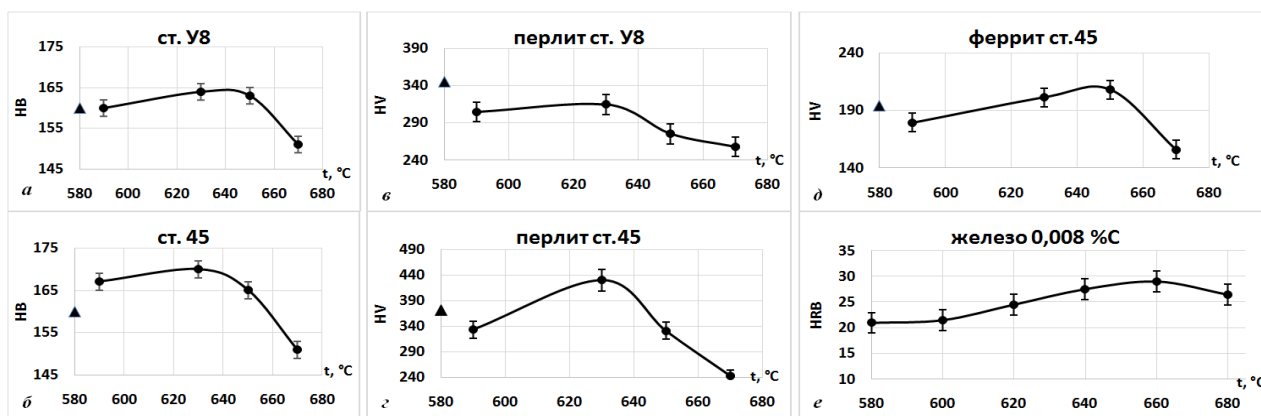


Рисунок 1 – Зависимость от температуры изотермической выдержки (24 ч) твердости (HB) стали У8 (а), стали 45 (б); микротвердости (HV) перлита стали У8 (в); микротвердости перлита и феррита стали 45 (г, д); твердости (HRB) железа (0,008 % С) (е) (▲ – твердость после непрерывного охлаждения)

Максимальную твердость и микротвердость структурных составляющих (феррита и перлита) обеспечивают ступени при 630 или 650 °С. Повышение температуры изотермической выдержки до 660 °С почти в полтора раза увеличивает твердость железа (0,008 % С). Это нонсенс, который требует хоть какого-то объяснения. Им может быть превращение в железе при ~ 650 °С – основе сталей.

Проведение металлографического исследования после нагрева на 850 °С и изотермической выдержке (2 ч) от 580 до 680 °С через каждые 20° (рис. 2 *а, б, в*) шлифов железа (0,008 % С) показало, что после выдержки при 640 °С травимость (в 4 % HNO_3 в спирте) разных соседних зерен резко различна (рис. 2*б*), в отличие от выдержек при других температурах (рис. 2 *а, в*). Контрастная травимость может быть следствием геометрического совершенствования кристаллографических плоскостей относительно плоскости шлифа. Совершенствование может быть вызвано движением атомов во время максимального магнитострикционного изменения объема при ~ 650 °С [10], т. е. превращением.

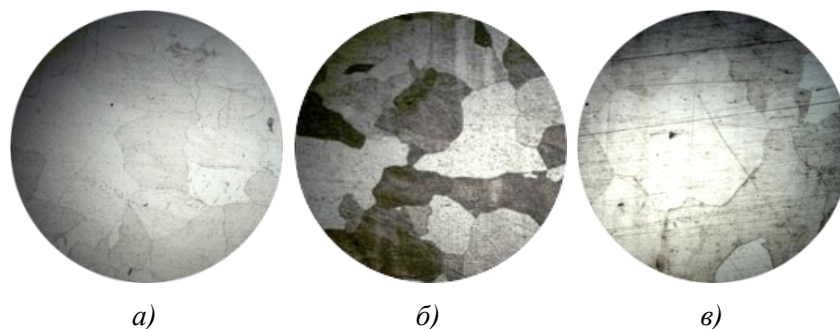


Рисунок 2 – Микроструктура чистого железа после нагрева на 850 °С и изотермической выдержки при 620 (*а*), 640 (*б*) и 660 °С (*в*), $\times 200$

Наряду с контрастной травимостью изотермическая выдержка при 640 °С приводит к измельчению зерна по сравнению с выдержками при 580 и 680 °С. Измельчение зерна отчетливо фиксируется как в оптическом (рис. 3 *а, б, в*), так и в электронном микроскопе (рис. 3 *г, д, е, ж, з, и*).

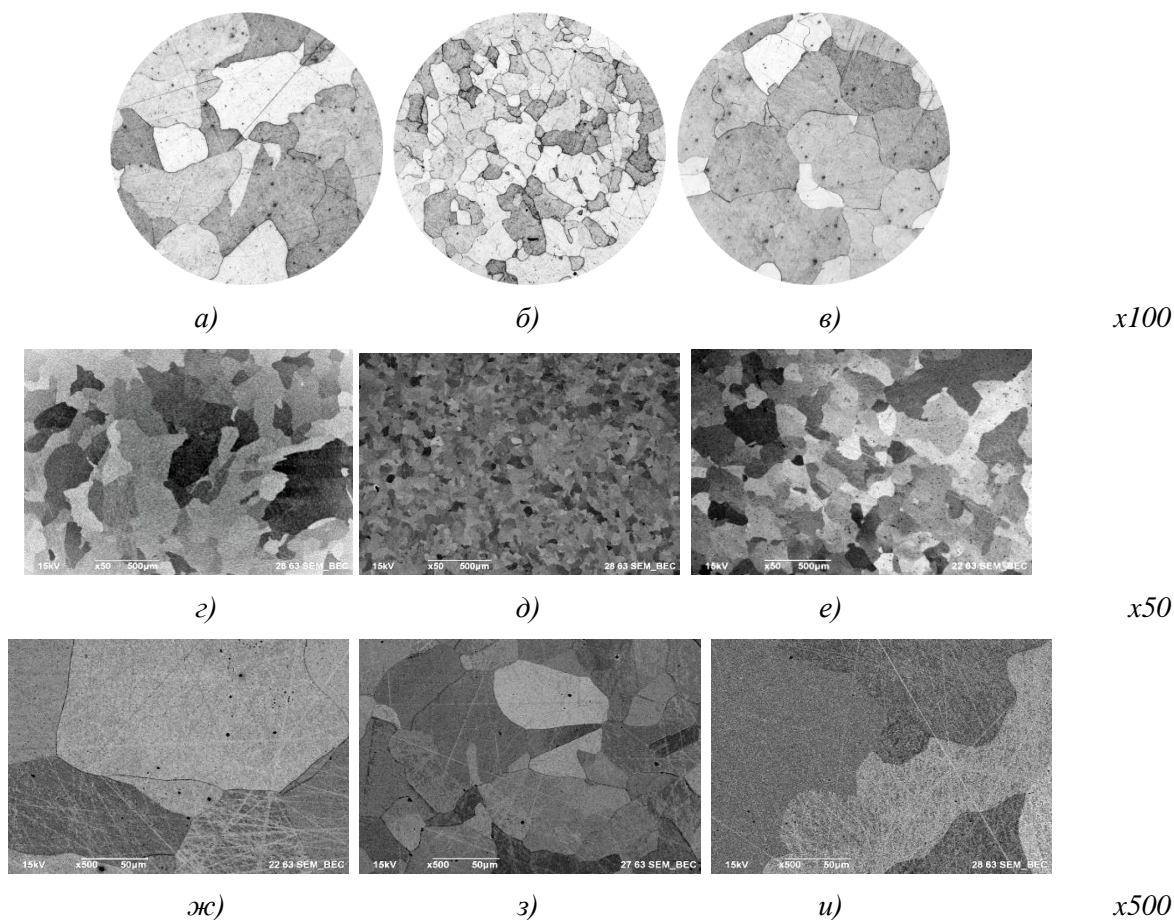


Рисунок 3 – Микроструктура чистого железа после нагрева на 850 °С и изотермической выдержки (2 ч) при 580 (*а, г, ж*), 640 (*б, д, з*) и 680 °С (*в, е, и*)

Измельчение зерна при изотермической выдержке при 640 °C свидетельствует о прохождении рекристаллизационных процессов в железе. «Для рекристаллизации необходим обмен атомов местами» [1]. Полагаем, причиной «обмена атомами» может быть предполагаемое превращение.

Нами проведено рентгеновское исследование характеристик тонкой структуры (параметр решетки, ширина линий (110) и (220) железа с 0,008 % C, подвергнутого отпуску (нагреву) от 500 до 900 °C через каждые 20°. Исследование проводили по двум сериям эксперимента, на каждом образце трижды снимали показания. По усредненным по шести замерам данным построены кривые для параметра решетки, ширины линий (110) и (220). На кривых видны острые минимумы при ~ 650 °C (рис. 4 а, б, в). Их нельзя обнаружить при большем шаге эксперимента. Экстремумы свидетельствуют о значительных изменениях в атомном строении железа.

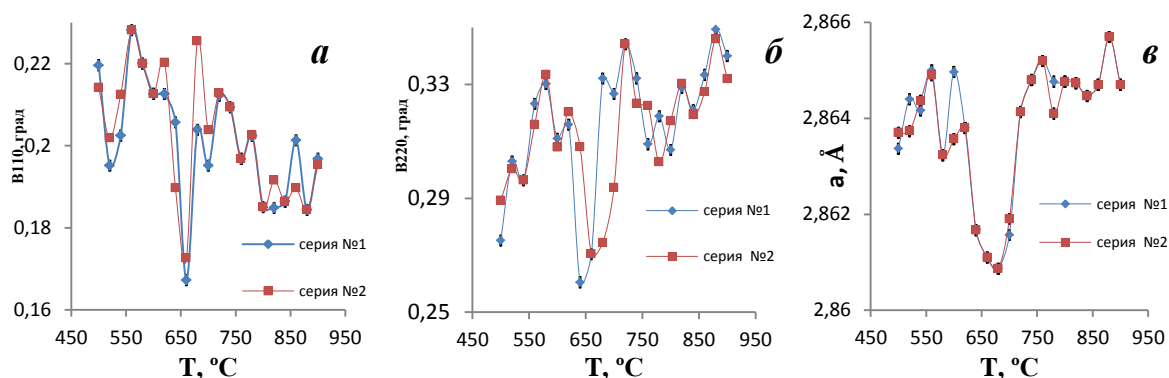


Рисунок 4 – Зависимость усредненного по трем точкам уширения дифракционных максимумов линии 110 (B_{110}) (а), 220 (B_{220}) (б), параметра решетки (в) от температуры отпуска чистого железа. Серия эксперимента № 1 и № 2

Проведение металлографического исследования шлифов железа (0,008 % C) (рис. 5 а, б, в) после закалки от 1050 °C (вода) и отпуска в интервале 580–680 °C (через 20°) показало, что после отпуска при 640 °C (рис. 5б) наблюдается максимальная травимость границ зерен (выдержка для всех образцов в 4 % HNO_3 в спирте составляла 20 сек). Изменение травимости границ зерен объясняют «как относительным обогащением, так и относительным обеднением приграничных зон зерен какими-то элементами» [11]. Для «обогащения или обеднения» необходимо изменение скорости диффузии. Такое ускорение возможно при превращениях, например, вблизи точки Кюри железа.

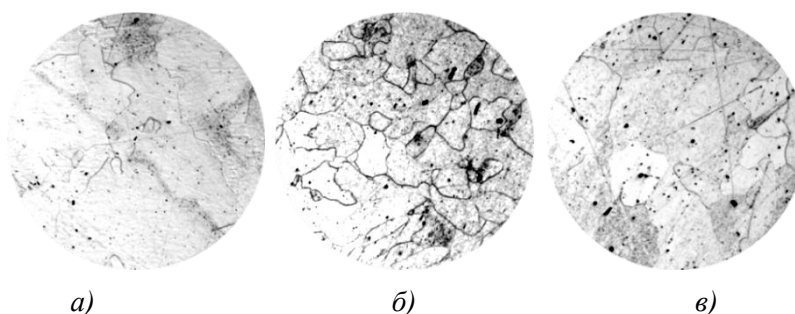


Рисунок 5 – Микроструктура чистого железа после закалки от 1050 °C (вода) и отпуска (2 ч) при 600 (а), 640 (б), 680 °C (в), x100

Горячая осадка (540–740 °C) на половину высоты образцов $\varnothing 10 \times 15$ из железа с 0,008 % C проводилась на установке Gleeble-3800, испытания проводили через каждые 20°. При 640 °C (рис. 6) кривая имеет отчетливый изгиб, повторяя кривую «горячей» твердости М. Г. Лозинского [12], что свидетельствует о качественном изменении сопротивления деформации.

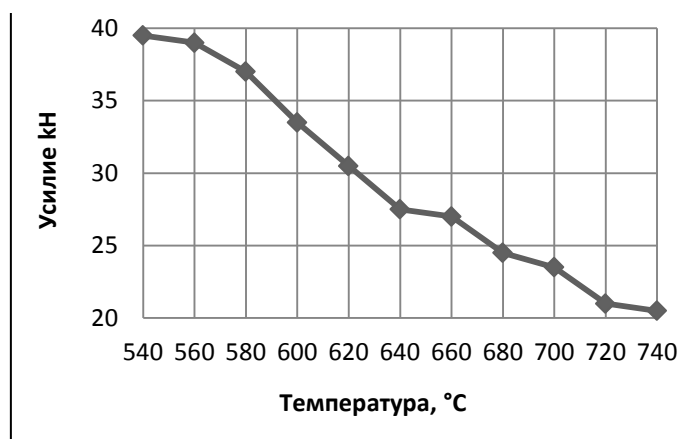


Рисунок 6 – Зависимость усилия при деформации на половину высоты образца железа (0,008 % C) при температуре от 540 до 740 °C

Перегибы на кривых твердости характерны не только для железа, но и для других полиморфных металлов (кобальта, кальция, стронция и лантана), что позволяет, пользуясь методом аналогий, предполагать превращение в железе приблизительно при 650 °C.

Заключение

Экстремальные значения на кривых зависимости физико-механических свойств железа и сталей от температуры при ~ 650 °C могут быть следствием превращения в железе, что, вероятно, определяет аномалии механического поведения и сталей.

Список литературы

1. Гудремон, Э. Специальные стали : в 2-х т. Т. 1 / Э. Гудремон. – Москва : Металлургиздат, 1959. – 952 с. – Текст : непосредственный.
2. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. – 3-е издание. – Москва : Металлургия, 1978. – 392 с. – Текст : непосредственный.
3. Мороз, Л. С. Тонкая структура и прочность стали / Л. С. Мороз. – Москва : Металлургиздат, 1957. – 160 с. – Текст : непосредственный.
4. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – 5-е издание. – Москва : Металлургия, 1986. – 544 с. – Текст : непосредственный.
5. Перлит в углеродистых сталях / В. М. Счастливцев [и др.]. – Екатеринбург, УРО РАН, 2006. – 311 с. – ISBN 5-7691-1713-3. – Текст : непосредственный.
6. Shakhnazarov, K. Yu. Relation between anomalies of ferrum physical properties at ~ 650°C with possible transformation in it / K. Yu. Shakhnazarov, E. I. Pryakhin // CIS Iron and Steel Review. – 2017. – Vol. 13. – P. 24–27.
7. Беляев, Н. И. О пределе упругости стали / Н. И. Беляев, Н. Т. Гудцов. – Текст : непосредственный // Журнал Русского Металлургического общества. – 1914. – Ч. 1, № 3. – С. 332–414.
8. Бокштейн, С. З. Структура и механические свойства легированной стали / С. З. Бокштейн. – Москва : Металлургиздат, 1954. – 280 с. – Текст : непосредственный.
9. Сергеев, Ю. Г. Экстремальные значения твердости и микротвердости фаз после изотермического превращения аустенита при 630–650° C сталей 45 и У8 / Ю. Г. Сергеев, О. В. Курочкина, К. Ю. Шахназаров. – Текст : непосредственный // Сборник трудов XIV международной научно-технической конференции «Проблема ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций». – Санкт-Петербург : СПбГУНиПТ, 2008. – С. 105–107.
10. Бозорт, Р. Ферромагнетизм / Р. Бозорт. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1956. – 784 с. – Текст : непосредственный.
11. Утевский, Л. М. Отпуская хрупкость стали / Л. М. Утевский. – Москва : Металлургиздат. – 1961. – 192 с. – Текст : непосредственный.
12. Лозинский, М. Г. Высокотемпературная металлография / М. Г. Лозинский. – Москва : Машгиз, 1956. – 312 с. – Текст : непосредственный.