

УДК 502/504:539.38.07

Н. А. КОНОПЛИН

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ УПРУГОСТИ ЖЕЛЕЗА

Представлен обзор экспериментальных исследований параметров упругости полиморфных модификаций железа в широком интервале температур. Проведен анализ полученных результатов.

Железо, фазовые переходы, параметры упругости, модуль объемной упругости, магнитные свойства.

There is given a review of experimental researches of elastic parameters of polymorphic iron modifications in a wide range of temperatures. The obtained results are analyzed.

Iron, change of phases, parameters of elasticity, modulus of volume elasticity, magnetic characteristics.

Железо и его сплавы являются важнейшим конструкционным материалом в различных областях техники, в том числе при создании машин и строительстве объектов природообустройства и водопользования. Основные параметры, учитываемые при эксплуатации конструкционного материала, это характеристики его упругих свойств.

При нормальном давлении железо обладает тремя кристаллографическими полиморфными модификациями. Низкотемпературная α -модификация (α -Fe) имеет структуру объемно-центрированного куба ОЦК(A2), стабильную до температуры $T = 1184$ К. Модификация γ (γ -Fe) имеет структуру гранецентрированного куба ГЦК(A1), стабильную в интервале 1184...1665 К. Модификация δ (δ -Fe) ОЦК(A2) существует в интервале температур от 1665 К до точки плавления $T_m = 1809$ К [1]. Часто α - и δ -фазы, ввиду их структурного изоморфизма, рассматривают как одну полиморфную модификацию α -Fe. Железо обладает особыми магнитными свойствами. В области низких температур до точки Кюри $T_c = 1043$ К α -модификация является ферромагнитной [1]. При $T > T_c$ все указанные модификации парамагнитные.

Характеристики упругости металла могут быть рассчитаны на основе экспериментально определяемых упругих постоянных c_{11} , c_{12} и c_{44} .

Модуль всестороннего сжатия χ является обратной величиной модуля объемной упругости k , который в свою очередь рассчитывается по c_{11} и c_{12} из соотношения $k = \frac{1}{3}(c_{11} + 2c_{12})$. Значения упругих постоянных и модуля объемной упругости k в зависимости от температуры для α -Fe приведены в обзоре экспериментальных исследований [2]. Причем температурная зависимость модуля определена по упругим постоянным, значения которых соответствуют результатам работы [3]. Значения k для остальных исследований приводятся при комнатной температуре.

Измерение упругих постоянных в работе [3] проводили в интервале температур 4,2...300 К через 20 К на отожженном монокристалле железа в направлении, перпендикулярном (110), методом ультразвуковых импульсов на частоте 10 МГц. Для устранения эффекта задержки во времени использовали невыпрямленные импульсы. Погрешность измерений, как утверждают авторы работы [3], не превышала 0,5 %.

Величина сжимаемости при $T = 300 \text{ К}$, рассчитанная по значениям упругих постоянных и равная $\chi = 5,95 \cdot 10^{-3} \text{ ГПа}^{-1}$, находится в соответствии со значением, определенным ранее в работах Бриджмена. В табл. 1 приведены значения постоянных c_{11} , c_{12} и c_{44} , соответствующие результатам работы [3].

Упругие свойства железа при температурах от комнатной (298 К или 25 °С) и выше измерялись Девером в работе [4]. Образцы представляли собой монокристаллы железа, изготовленные методом отжига для снятия деформаций. Один из образцов исследовался в направлении (100) до температуры 650 °С, а второй – в направлении (110) выше указанной температуры. Полученные для них значения упругих постоянных согласуются и обеспечивают плавный ход кривой во всем исследуемом интервале температур. Ультразвуковые измерения проводились методом фазового сравнения в интервале температур 25...900 °С.

Таблица 1

Упругие постоянные железа c_{11} , c_{12} и c_{44} до температуры 300 К [3]

$T, \text{ К}$	$c_{11}, \text{ ГПа}$	$c_{12}, \text{ ГПа}$	$c_{44}, \text{ ГПа}$
4,2	2,431	1,381	1,2190
20	2,431	1,381	1,2190
40	2,428	1,380	1,2183
60	2,424	1,378	1,2168
80	2,416	1,374	1,2148
100	2,409	1,371	1,2125
120	2,400	1,366	1,2100
140	2,392	1,364	1,2070
160	2,384	1,362	1,2040
180	2,377	1,360	1,2005
200	2,368	1,358	1,1970
220	2,361	1,357	1,1938
240	2,354	1,356	1,1900
260	2,346	1,356	1,1862
280	2,338	1,355	1,1825
300	2,331	1,354	1,1783

Значения постоянных c_{11} , c_{12} и c_{44} , соответствующие результатам данного экспериментального исследования, приведены в табл. 2.

Величину c_{11} измеряли до $T = 820 \text{ °С}$, так как при более высоких температурах возникает сильное

ослабление акустических волн, обусловленное, как указано авторами, ослаблением связей в кристалле. При $T > 820 \text{ °С}$ значения c_{11} определяли по другим постоянным. Авторы указывают на нелинейную зависимость упругих постоянных вблизи температуры Кюри, вызванную происходящим магнитным превращением в железе.

Упругие постоянные γ -модификации железа при нормальном давлении не измерялись, что связано, очевидно, с многочисленными дефектами, имеющимися в кристаллической решетке после полиморфного превращения, а также, как отмечено ранее [4], с ослаблением атомных связей при высоких температурах.

Таблица 2

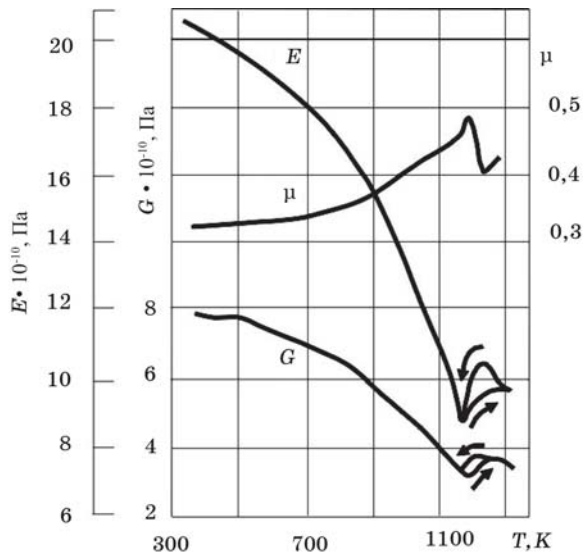
Упругие постоянные железа c_{11} , c_{12} и c_{44} в интервале температур 25...900 °С [4]

$T, \text{ °С}$	$c_{11}, \text{ ГПа}$	$c_{12}, \text{ ГПа}$	$c_{44}, \text{ ГПа}$
25	2,322	1,356	1,170
100	2,277	1,343	1,154
200	2,215	1,333	1,132
250	2,181	1,329	1,122
300	2,142	1,320	1,111
400	2,056	1,296	1,091
500	1,968	1,280	1,072
600	1,867	1,265	1,053
650	1,808	1,252	1,042
700	1,738	1,242	1,031
720	1,703	1,235	1,026
740	1,667	1,229	1,021
760	1,626	1,228	1,016
770	1,598	1,224	1,013
780	1,597	1,235	1,010
800	1,581	1,241	1,005
820	1,559	1,239	1,002
840	1,540	1,236	0,999
860	1,523	1,231	0,996
880	1,505	1,227	0,993
900	1,488	1,222	0,990

По результатам рентгенографических измерений при высоких давлениях и температурах в работе [5] показано, что производная по температуре модуля объемной упругости k для γ -Fe для нормального давления соответствует значению 0,03...0,04. Автором [5] приведено также аналитически полученное значение модуля указанной

модификации при нормальном давлении и $T = 300 \text{ К}$, соответствующее величине $k = 167 \text{ ГПа}$.

Полиморфным переходам $\alpha - \gamma$ и $\gamma - \delta$, а также магнитному переходу (точке Кюри) соответствует изменение температурных зависимостей упругих постоянных железа, в частности модуля Юнга E , модуля сдвига G и коэффициента Пуассона μ , графики которых приведены на рисунке [6].



Температурная зависимость модуля Юнга E , модуля сдвига G и коэффициента Пуассона μ железа [6]

В области фазового $\alpha - \gamma$ перехода на температурной зависимости модуля Юнга E и модуля сдвига G наблюдается характерный гистерезис, а коэффициент Пуассона μ испытывает скачок. В области точки Кюри (1043 К) проявляется незначительное нарушение линейности рассматриваемых температурных зависимостей.

Слабое влияние магнитного перехода на температурную зависимость параметров упругости можно объяснить постепенным уменьшением намагниченности вещества после осуществления фазового превращения, которое выражается в переходе от ближнего к дальнему

порядку магнитных моментов атомов.

Магнитное фазовое превращение обуславливает магнитоэстроционные явления, которые сопровождаются изменением структурных параметров кристаллической решетки металла.

Выводы

Вблизи полиморфного $\alpha - \gamma$ перехода наблюдается значительная нелинейность хода температурной зависимости упругих постоянных и модулей железа. Магнитный фазовый переход в α -железе сопровождается незначительными изменениями хода температурной зависимости. Резкое изменение отсутствует вследствие постепенного убывания намагниченности.

Список литературы

1. **Hultgren, R.** Selected Values of the Thermodynamic Properties of the Elements [Text] / R. Hultgren [et al]. – N.Y. : American Society for Metals. – 1973. – 636 p.
2. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Справочник [Текст] ; под ред. И. Н. Францевич, Ф. Ф. Воронов, С. А. Бакуты. – Киев : Наук. Думка. – 1982. – 286 с.
3. **Rayne, J. A.** Elastic Constants of Iron from 4.2 to 300° K [Text] / J. A. Rayne, B. S. Chandrasekhar // Phys. Rev. – 1961. – V. 122. – № 6. – P. 1714–1716.
4. **Dever, D. J.** Temperature dependence of the elastic constants in α -iron single crystals: relationship to spin order and diffusion anomalies [Text] / D. J. Dever // J. Appl. Phys. – 1972. – V. 43. – P. 3293.
5. **Boehler, R.** X-ray diffraction of α -Fe at high temperatures and pressures [Text] / R. Boehler [et al] // J. Appl. Phys. – 1989. – V. 65. – P. 1795–1797.
6. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах : справочное издание [Текст] ; под ред. В. Е. Зиновьева. – М. : Металлургия. – 1989. – 384 с.

Материал поступила в редакцию 10.09.09.

Коноплин Николай Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика»

Тел. 8 (495) 976-21-89

E-mail: konoplin_nik@mail.ru