

УДК 669-1: 537.9.001

В.А. Доценко¹И.А. Белоус²

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
Владивосток, Россия

Особенности изменения прочностных свойств сплавов на основе железа в области температур магнитных переходов

Целью настоящей работы является изучение особенностей изменения прочностных свойств сплавов на основе Fe в области температур магнитных переходов. В качестве материалов настоящего исследования были выбраны железомарганцевые и железоникелевые сплавы в наиболее широко применяемом в производстве интервале концентраций для марганца (20-25%) и никеля (28-42%). Кроме того, исследования были проведены на металлах и сплавах, непосредственно используемых в промышленности: никеле, армко-железе, Fe-3%Si, Fe-25%Cr. Образцы закаливались от 1050°C в воде для Fe-Mn сплавов; для Fe-Ni, армко-Fe, никеля отжигались в вакууме при 1000°C в течение 1 часа. Для получения возможности изучения влияния магнитного превращения в γ -фазе (аустените) на прочностные свойства в нестабильных при охлаждении сплавах, образец нагревали в установке ИМАШ-50-65 со скоростью 50 град./мин выше $T_{\epsilon \rightarrow \gamma}$ для Fe-Mn и выше $T_{\alpha \rightarrow \gamma}$ для Fe-Ni сплавов, выдерживали в течение 20 мин и затем охлаждали до требуемой температуры испытания. После этого проводили растяжение в изотермических условиях со скоростью $4,4 \cdot 10^{-4}$ м·с⁻¹. При проведенном исследовании температурной зависимости прочностных и пластических свойств отмечается их аномальное изменение в области температур магнитных переходов «парамагнетизм-ферромагнетизм», «парамагнетизм-антиферромагнетизм». Наблюдаемый температурный интервал резкого подъема механических свойств находится в хорошем соответствии с положением температуры магнитного превращения. Аномалия прочностных свойств и пластичности при магнитном упорядочении обусловлена появлением в силе Пайерлса дополнительной магнитной составляющей ниже температуры магнитного упорядочения; наличием у сплава большого магнитообъемного эффекта; нестабильностью кристаллической решетки при магнитном переходе.

¹ Доценко Валентин Антонович – канд. техн. наук, доцент, преподаватель Академического колледжа ВГУЭС, e-mail: valentin.docenko@vvsu.ru.

² Белоус Игорь Александрович – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и систем ВГУЭС, e-mail: igor.belous@vvsu.ru

Предполагается, что в исходной парамагнитной фазе Fe-Mn сплава при приближении к точке Нееля происходит образование областей ближнего магнитного порядка, в данном случае – антиферромагнитных кластеров, которые в свою очередь через магнитоstrictionные напряжения способствуют изменению прочностных свойств.

Ключевые слова и словосочетания: Fe-Mn сплавы, легирование сплавов, аустенит, магнитная перестройка, прочностные свойства.

V.A. Dotsenko

I.A. Belous

Vladivostok State University of Economics and Service
Vladivostok. Russia

Features of changes in the strength properties of iron-based alloys in the temperature range of magnetic transitions

The purpose of this work is to study the features of changes in the strength properties of Fe-based alloys in the temperature range of magnetic transitions. Iron-manganese and iron-nickel alloys in the most widely used concentration range (20-25%) for manganese and (28-42%) for nickel were chosen as materials for this study. In addition, studies were conducted on metals and alloys directly used in industry – nickel, armco iron, Fe-3% Si, Fe-25% Cr. Samples were quenched from 1050 ° C in water for Fe-Mn alloys; for Fe-Ni, Armco-Fe, nickel was annealed in vacuum at 1000 ° C for 1 hour. In order to study the effect of the magnetic transformation in the γ phase (austenite) on the strength properties of the alloys unstable during cooling, the sample was heated in an IMASH-50-65 unit at a rate of 50 K / min above $T_{\epsilon} \rightarrow \gamma$ for Fe-Mn and higher $T \rightarrow \gamma$ for Fe – Ni alloys, held for 20 min and then cooled to the required test temperature. After that, stretching was carried out under isothermal conditions at a rate of $4.4 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. An investigation of the temperature dependence of the strength and plastic properties indicates their anomalous change in the temperature range of magnetic transitions “paramagnetism-ferromagnetism”, “paramagnetism-antiferromagnetism”. The anomaly of the strength properties and plasticity under magnetic ordering is due to the appearance of an additional magnetic component in the Peierls force below the magnetic ordering temperature; the presence of the alloy of a large magnetovoltage effect; instability of the crystal lattice during the magnetic transition. It is assumed that in the initial paramagnetic phase of the Fe-Mn alloy, when approaching the Néel point, a region of near magnetic order is formed, in this case antiferromagnetic clusters, which in turn, through magnetostriction stresses, contribute to the martensitic transformation under the influence of a magnetic field.

Keywords: Fe-Mn alloys, austenite, magnetic alteration, strength properties.

Введение. Магнитные превращения происходят в большом числе металлов и сплавов и оказывают существенное влияние на их физические свойства. Установление магнитного порядка в металлах и сплавах можно рассматривать как появление в основной атомной решетке сопряженной с ней магнитной решетки,

обладающей достаточной жесткостью и энергией. Изучение взаимосвязи атомной и магнитной структур представляет большой интерес, поскольку магнитное упорядочение в ряде случаев определяет кристаллографическую симметрию сплавов, оказывает влияние на процессы движения дислокаций, кинетику и морфологию фазовых превращений, а также изменяет ряд других свойств материалов, в том числе и механических [1–6]. Однако в настоящее время при рассмотрении механизмов упрочнения, фазовых превращений и условий охрупчивания металлов и сплавов взаимосвязи атомной и магнитной структур уделяется недостаточное внимание. Изучение этого вопроса представляет интерес для установления рациональных режимов термической обработки, учитывающих наличие магнитных фазовых переходов, а получение надежных экспериментальных данных, характеризующих поведение прочностных свойств материалов в области температур магнитного превращения, само по себе актуально, так как большинство из них подвергаются таким воздействиям, когда происходит магнитный фазовый переход.

Подготовка образцов и методы исследований. Целью настоящей работы является изучение особенностей изменения прочностных свойств сплавов на основе Fe в области температур магнитных переходов. В качестве материалов были выбраны железомарганцевые и железоникелевые сплавы в наиболее широко применяемом в производстве интервале концентраций для марганца (20–25%) и никеля (28–42%). Кроме того, исследования были проведены на металлах и сплавах, непосредственно используемых в промышленности: никеле, армо-железе, Fe-3%Si, Fe-25%Cr. Образцы закачивались от 1050°C в воде для Fe-Mn сплавов; для Fe-Ni, армо-Fe, никеля отжигались в вакууме при 1000°C в течение 1 часа. Для получения возможности изучения влияния магнитного превращения в γ -фазе (аустените) на прочностные свойства в нестабильных при охлаждении сплавах образец нагревали в установке ИМАШ-50-65 со скоростью 50 град./мин выше $T_{\epsilon \rightarrow \gamma}$ для Fe-Mn и выше $T_{\alpha \rightarrow \gamma}$ для Fe-Ni сплавов, выдерживали в течение 20 мин и затем охлаждали до требуемой температуры испытания. После этого проводили растяжение в изотермических условиях со скоростью $4,4 \cdot 10^{-4}$ м·с⁻¹. Несмотря на то, что фазовый состав и степень стабильности аустенита под воздействием внешней нагрузки в основном, определяют характер температурной зависимости механических свойств сталей и сплавов, изменение их прочностных и пластических характеристик не всегда удается объяснить структурным состоянием сплава. Представляется необходимым принимать во внимание магнитное состояние аустенита. Так, в области магнитного упорядочения в аустенитных Fe-Mn и Fe-Ni сплавов отмечается нехарактерная для металлов и сплавов с ГЦК-решеткой резкая зависимость деформирующих напряжений от температуры [3, 5].

Результаты и обсуждения

Изменение прочностных свойств при магнитном переходе парамагнетизм-ферромагнетизм. Несмотря на то, что фазовый состав и степень стабиль-

ности аустенита под воздействием внешней нагрузки, в основном, определяют характер температурной зависимости механических свойств сталей и сплавов, изменение их прочностных и пластических характеристик не всегда удается объяснить структурным состоянием сплава. Естественно, при рассмотрении механизмов упрочнения исследуемых сплавов представляется необходимым принимать во внимание магнитное состояние аустенита [3, 9, 10]. Для этого определялись температуры магнитных превращений. Многие кинетические свойства (электрические, гальваномагнитные, термоэлектрические) магнитоупорядоченных сплавов и металлов имеют аномальную температурную зависимость вблизи температуры магнитного упорядочения, а в точке Кюри (Нееля) наблюдается резкий максимум или минимум температурного коэффициента соответствующего кинетического явления. По температурному положению излома с большой точностью удастся определить температуру магнитного перехода в исследуемых сплавах. Кроме того, температура Кюри (Нееля) определялась из температурных зависимостей модуля нормальной упругости, коэффициента термического расширения, термоупругого коэффициента (табл. 1).

Таблица 1

**Положение температур магнитных и мартенситных превращений
исследуемых металлов и сплавов**

Марка сплава	Тип магнитного превращения	Температура магнитного превращения, °С	Температура мартенситного превращения M_s , °С ($\gamma \rightarrow \epsilon$)
Никель	Ф – П	350	-
Ni-3,1%Cr	Ф – П	180	-
Ni-5%Cr	Ф – П	85	-
Ni-2,7%Mn	Ф – П	305	-
Ni-6,4%Mn	Ф – П	255	-
Ni-13,8%Mn	Ф – П	155	-
Ni-19,8%Mn	Ф – П	75	-
Fe-25%Mn	AФ→П	127	75
Fe-25%Mn-2%Co	AФ→П	80	70
20Г20	AФ→П	80	12

Результаты проведенных исследований температурной зависимости напряжений деформации Fe-Ni сплавов инварного состава показывают, что эти зависимости являются нетипичными для ГЦК сплавов, в которых отсутствует магнитное превращение. В частности, предел текучести резко возрастает в узком интервале температур, совпадающем с положением температуры Кюри. При этом в ферромагнитной области коэффициент упрочнения больше, чем в пара-

магнитной. Так, для сплава Fe- 43 вес.%Ni предел текучести возрастает с 147 до 205,8 МПа в узком интервале температур, который совпадает с точкой Кюри данного сплава. При охлаждении сплава Fe-29%Ni-10%Co ниже температуры Кюри происходит резкое возрастание механических свойств, при этом $\sigma_{0,2}$ (предел текучести) возрастает с 196 до 323,4 МПа, а σ_b (предел прочности) увеличивается на 78,4 МПа.

В магнитной структуре Fe-Ni инварных сплавов вследствие смешанного обменного взаимодействия имеет место значительная неоднородность пространственной ориентации спинов не только на границах, но и внутри доменов. В связи с этим нам было необходимо исследовать температурную зависимость механических свойств металлов, которые во всем интервале температур до точки Кюри имеют однородную структуру ферромагнетика. При рассмотрении температурной зависимости механических свойств никеля, имеющего ГЦК решетку, найдено, что при нагреве выше температуры Кюри T_C имеет место более интенсивное снижение прочностных характеристик, поэтому на кривых $\sigma_{0,2}$ - $T^\circ\text{C}$ в районе T_C наблюдаются перегибы. Для армко-железа с ОЦК решеткой при температуре магнитного превращения наблюдается резкий скачок на кривых σ - T (рис. 1).

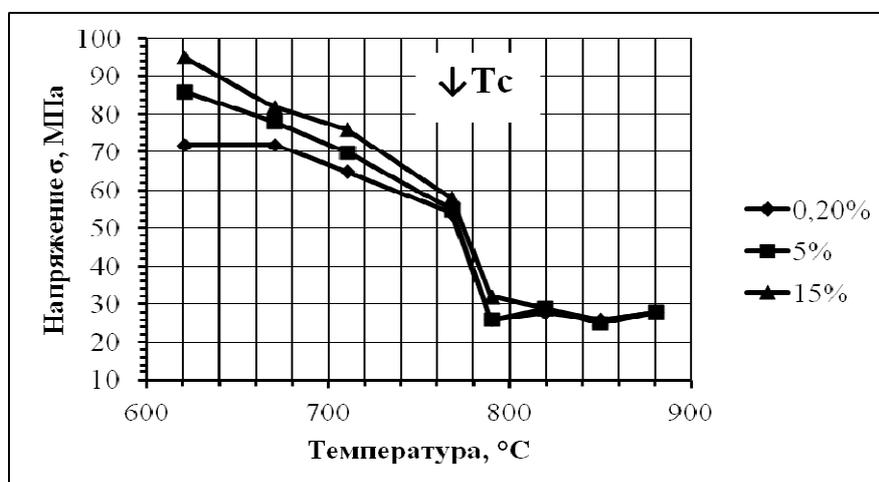


Рис. 1. Температурная зависимость напряжений при различных степенях формирования деформаций для армко-железа

При этом, если в парамагнитной области при деформации выше 1% напряжения остаются почти постоянными, в ферромагнитной – по мере понижения температуры наблюдается увеличение коэффициента упрочнения в зависимости от степени деформации. Заслуживает внимания тот факт, что решетка никеля и железа ниже точки Кюри искажается. Иной характер изменений механических свойств у ферромагнитных сплавов никеля с хромом и марганцем, для которых наблюдается сохранение линейной зависимости прочностных свойств во всем температурном интервале испытаний. Эти сплавы, как и Fe-Ni инвары, обладают смешанным характером обменного взаимодействия между компонентами, а сле-

довательно, и неоднородностью магнитной структуры, но, в отличие от Fe-Ni сплавов, в них не наблюдается такая сильная зависимость магнитного состояния от объема, поэтому у них отсутствуют аномалии на зависимостях прочностных свойств.

Анализируя температурную зависимость ширины линий Fe-Ni инварных сплавов, можно сделать предположение о том, что при температуре Кюри кристаллическая решетка искажается (становится слаботетрагональной).

Определение ширины линий (111) Fe-Ni сплава, деформированного на 15%, показало линейную зависимость этих величин с изменением температуры испытания. Учитывая, что вклад в изменение ширины линий от плоскостей с малой суммой индексов, в основном, обусловлен размером блоков, из приведенных данных следует, что аномалии прочностных свойств аустенитных Fe-Ni сплавов не связаны с изменением этого параметра тонкой кристаллической структуры. Вклад в изменение ширины линий от плоскостей с большой суммой индексов, в основном, обусловлен микронапряжениями. Изменения ширины линий (311) сплава H34, по-видимому, обусловлены явлениями, которые вызывают искажение кристаллической решетки. Повторные нагревы и охлаждения от 20 до 400°C не влияли на температурный ход кривой ширины линии (311). Микроискажения можно определить обычным методом по формуле $\Delta a/a = \beta/4 \tan \Theta$, где β – физическое уширение линии, найденное при предположении, что функция, описывающая распределение интенсивности интерференционной линии, представляет выражением $(1 - \beta x^2)^{-2}$. По аналогии можно предполагать, что процессы, вызывающие искажение кристаллической решетки данных сплавов, имеют магнитную природу и связаны с установлением магнитного порядка, а, следовательно, с микронапряжениями, возникающими за счет спонтанной магнитострикции. На основании наших исследований и литературных данных [1–6] можно сделать заключение, что аномалия механических свойств при магнитных переходах $\Phi \rightarrow \Pi$ обусловлена большим магнитообъемным эффектом (инварностью), искажением кристаллической решетки при магнитном переходе, появлением в силе Пайерлса дополнительной магнитной составляющей ниже температур магнитных превращений.

Механические свойства при магнитном переходе парамагнетизм-антиферромагнетизм. Для исследования влияния антиферромагнитного спинового упорядочения железомарганцевого аустенита на поведение сплавов под нагрузкой были изучены температурные зависимости механических свойств сплавов с содержанием марганца от 20 до 33% в интервале температур (250–200°C). На рисунках 2–5 приведены характерные зависимости деформирующих напряжений от температуры. Кривые могут быть разделены на 3 области: горизонтальный участок, где деформирующие напряжения почти не зависят от температуры, переходная область и резкое возрастание напряжений.

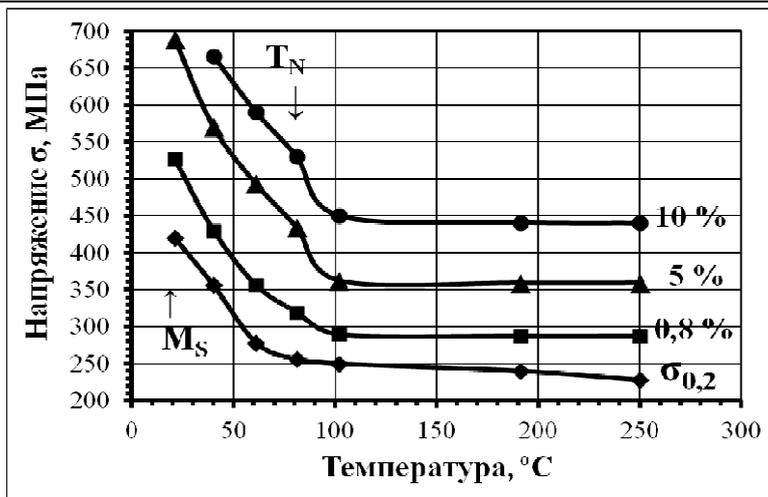


Рис. 2. Температурная зависимость прочностных свойств от степени деформации сплава 20Г20

В качестве общей закономерности отмечается, что слабая температурная чувствительность напряжений с допуском остаточной деформации 0,2–15% при охлаждении ниже определенной для каждого сплава температуры сменяется резкой зависимостью деформирующих напряжений от температуры. Наблюдаемый характер температурной зависимости предела текучести не свойственен металлам и сплавам с ГЦК решеткой. Известно, что предел текучести ГЦК сплавов в интервале (227–270°C) практически не зависит от температуры [3].

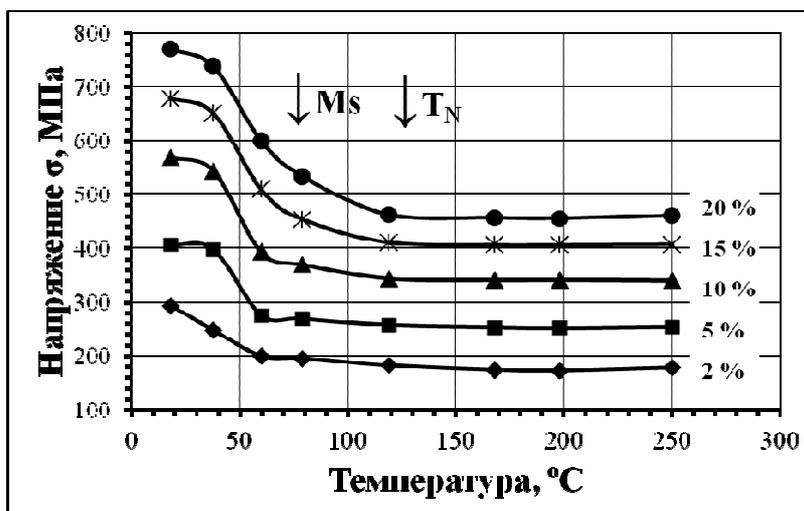


Рис. 3. Температурная зависимость прочностных свойств сплава Fe-25% Mn при различных степенях деформации

Результаты рентгеновского фазового анализа, проведенного на всех образцах после испытаний, позволили установить, что характер температурной зависимости механических свойств не связан с образованием α - и ε -фаз при деформации и однозначно обусловлен магнитной природой ГЦК Fe-Mn твердого раствора. Температура изгиба зависимостей «напряжение-температура» соответствует точкам Нееля сплавов. Это дает основание предположить, что подобное поведение сплавов под нагрузкой обусловлено установлением ниже T_N антиферромагнитного порядка. Прочностные характеристики при охлаждении из парамагнитного состояния до температуры Нееля изменяются слабо. Ниже T_N интенсивность роста этих характеристик резко усиливается.

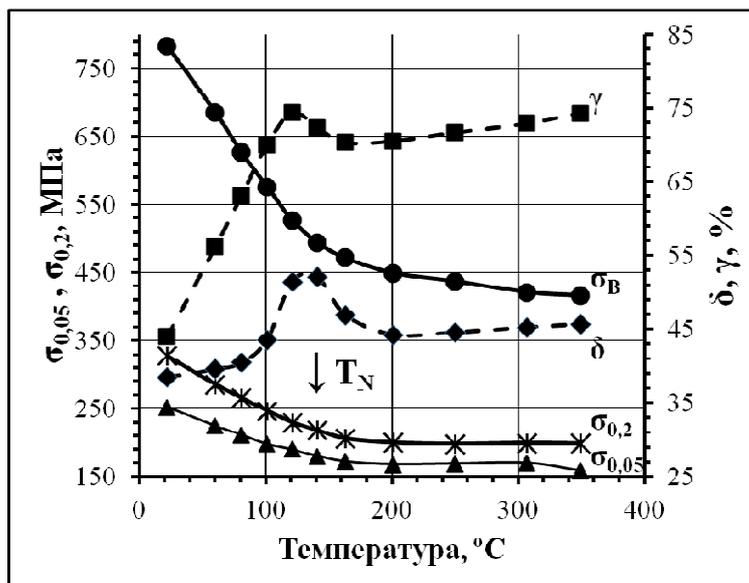


Рис. 4. Температурная зависимость механических свойств сплава Fe-25,8% Mn

Тот факт, что резкая температурная зависимость предела текучести определяется температурной чувствительностью силы Пайерлса, а монотонное и незначительное изменение с температурой предела текучести ГЦК металлов объясняется небольшой величиной силы Пайерлса, дает основание полагать, что наблюдаемая нами нехарактерная для нормальных ГЦК металлов более резкая температурная чувствительность предела текучести Fe-Mn сплавов ниже точки Нееля обусловлена усилением силы Пайерлса при установлении антиферромагнитного порядка за счет дополнительной магнитной составляющей. Упорядоченное расположение магнитных моментов в решетке исследуемых сплавов может привести к особенности движения дислокаций, а именно: дислокации будут испытывать дополнительное торможение, которое будет определяться магнитной структурой по аналогии с [8]. Дополнительное сопротивление возникнет за счет сил отталкивания при переносе дислокации из узла со спином одной ориентации в узел со спином другой ориентации. Кроме того, необходимо учитывать,

160

что антиферромагнитное превращение приводит к аномальной зависимости коэффициента термического расширения железомарганцевых сплавов ниже точки T_N (инварный эффект). Магнитообъемный эффект, присущий инварным сплавам, приводит к тому, что динамическое давление вокруг движущихся краевых дислокаций вызывает резкое локальное снижение намагниченности, то есть изменение магнитного состояния. Это может служить причиной дополнительного сопротивления движению дислокаций из-за появления инварной составляющей силы Пайерлса.

Причиной появления дополнительного упрочнения при антиферромагнитном упорядочении кроме увеличения силы Пайерлса может стать изменение конфигураций дислокаций при установлении антиферромагнитного порядка. Однако электронно-микроскопическими исследованиями, проведенными в работе [7], установлено, что ощутимой разницы в дислокационной структуре деформированного на 1-2% парамагнитного и антиферромагнитного аустенита не наблюдается. Дислокационные структуры после деформации выше и ниже точки Нееля типичны для ГЦК металлов и сплавов конца I и начала II стадии деформации. Характерным является наличие как коротких дислокационных отрезков, так и длинных дислокаций Ломера-Коттерелла. Проведенное изучение структур показало, что характер зависимости напряжения течения ГЦК Fe-Mn сплавов от температуры, по-видимому, не связан с изменением механизма деформации.

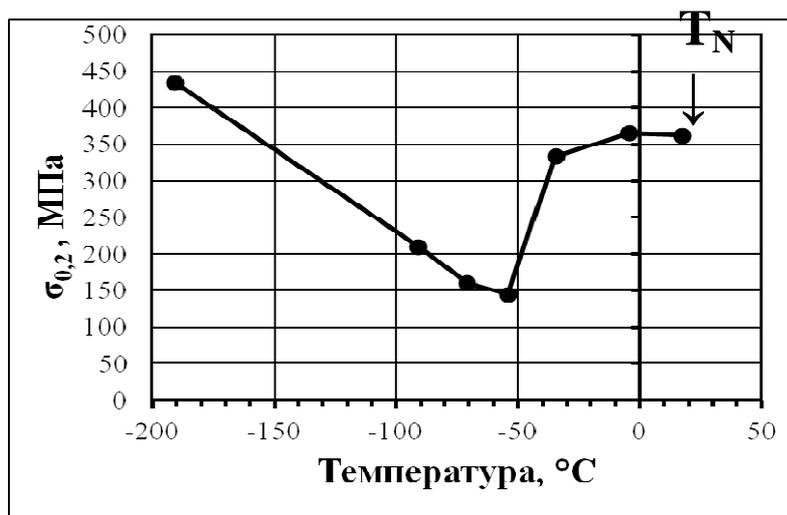


Рис. 5. Зависимость предела текучести сплава 30X16Г10 от температуры деформации

Из анализа ширины линий (220) табл. 2 в районе температуры магнитного упорядочения по аналогии с [4] можно заключить, что при T_N происходит искажение кристаллической решетки. Очевидно, что искажение кристаллической решетки данного сплава при охлаждении связано с установлением магнитного порядка, а за счет спонтанной магнитострикции и с микроискажениями.

Параметры решётки сплавов на Fe-Mn основе

№№ пп	Состав, вес %	a_γ , Å	V_γ , см ³ /г	a_ϵ , Å	c_ϵ , Å	c/a	ϵ , %
1	Fe-20,4Mn	3,5948	0,1258	2,537	4,098	1,6133	64
2	Fe-21,75Mn	3,5963	0,12598	2,537	4,0935	1,6135	58
3	Fe-25,3Mn	3,5998	0,1264	2,538	4,0955	1,6137	23
4	Fe-19,1Mn-5Co	3,5903	0,1251	2,533	4,090	1,6140	68
5	Fe-23,7Mn-5Co	3,5965	0,1257	2,539	4,098	1,6140	51
6	Fe-20,7Mn-5Cr	3,5990	0,1266	2,540	4,099	1,6138	39
7	Fe-22,7Mn-5Cr	3,6040	0,1273	2,529	4,096	1,6196	36
8	Fe-21,2Mn-10Cr	3,6027	0,1275	2,542	4,106	1,6153	36
9	Fe-23,6Mn-10Cr	3,6052	0,1278	2,541	4,108	1,6167	8
10	Fe-18,5Mn-5Ni	3,591	0,1259	-	-	-	-
11	Fe-23,5Mn-5Ni	3,6033	0,1264	-	-	-	-
12	Fe-20,1Mn	3,592	0,1263	2,539	4,0995	1,6144	45
13	Fe-19,4Mn-1,86Si	3,594	0,1258	2,540	4,109	1,6177	75
14	Fe-19,1Mn-6,3Mo	3,5955	0,1232	-	-	-	-

Образование тетрагональной решетки при антиферромагнитном упорядочении может объясняться тем, что минимальная энергия обменного межатомного взаимодействия для антиферромагнетиков будет достигнута только в случае антипараллельного расположения магнитных моментов всех ближайших атомов. Это невозможно для кубической гранцентрированной решетки, в которой из 12 ближайших соседей только 8 будут иметь антипараллельное расположение магнитных моментов, но возможно для тетрагональной решетки, где число ближайших соседей (координационное число) уменьшается до 8.

Очевидно, что причина, вызывающая искажение кристаллической решетки Fe-Mn сплавов, имеет магнитную природу и связана с установлением ниже T_N антиферромагнитного порядка. Кроме того, известно, что железомарганцевый аустенит обладает инварными свойствами a , следовательно, значительным магнитообъемным эффектом [11].

Таким образом, можно заключить, что увеличение напряжения течения Fe-Mn сплавов при антиферромагнитном упорядочении обусловлено следующими факторами:

- появлением в силе Пайерлса дополнительной магнитной составляющей ниже точки Нееля;
- инварностью Fe-Mn аустенита;

– нестабильностью (искажением) кристаллической решетки при антиферро-магнитном переходе.

Особенности изменения пластических свойств в области температур магнитных превращений. Рассматривая механические свойства Fe-Ni и Fe-Mn сплавов, представляет интерес остановиться на изменении их пластичности с изменением температуры. Для сплава Fe-29%Ni-10% в районе температуры магнитного упорядочения (390°C) наблюдается скачкообразное изменение пластических характеристик, при этом пластичность при переходе в ферромагнитное состояние возрастает на 15%. Второй пик пластичности около 100°C обусловлен мартенситным $\gamma \rightarrow \alpha$ превращением.

В таблице 3 приведены характерные зависимости пластических свойств от температуры Fe-Mn сплавов. Пластические свойства при охлаждении из парамагнитного состояния до определенной температуры (точки Нееля) даже незначительно уменьшаются. Ниже температуры Нееля интенсивность роста этих характеристик резко усиливается. Как точки Нееля, так и температура излома понижаются с уменьшением содержания Mn в сплавах. Температурная зависимость, характеризующая пластичности сплава с 25% Mn, имеет следующие особенности: их возрастание, начавшееся около 160°C, ниже 100°C сменяется падением. При испытаниях этот сплав нестабилен. Понижение характеристик пластичности для сплавов с 25% Mn при 100°C можно связать с образованием гексагональной ϵ -фазы при испытаниях ниже этой температуры, а их начальный подъем при 150°C, по-видимому, обусловлен антиферромагнитным превращением в аустените.

Таблица 3

Пластичность в разных магнитных состояниях вблизи температур магнитных переходов

Сплав	Вид магнитного перехода	Температура магнитного перехода, °C	Температура испытания в ферромагнитном состоянии, °C	Пластичность, %	Температура испытания в парамагнитном состоянии, °C	Пластичность, %
Fe-3%Si	ф-П	655	645	20	730	18,6
армко-железо	ф-П	770	760	24,5	800	22
Ni-3,2%Cr	ф-П	175	170	23	200	13,5
Ni-5%Cr	ф-П	80	65	20	87	13,2
Ni-2,7%Mn	ф-П	300	300	19,3	340	16,1
Ni-6,4%Mn	ф-П	270	20	19	275	15,2
Ni-19,9%Mn	ф-П	345	320	19,9	390	17,7
Fe-26%Mn	$\alpha \rightarrow \beta$	125	120	56	160	44
Fe-27%Mn	$\alpha \rightarrow \beta$	130	120	18	170	7,4

Сплав	Вид магнитного перехода	Температура магнитного перехода, °С	Температура испытания в ферромагнитном состоянии, °С	Пластичность, %	Температура испытания в парамагнитном состоянии, °С	Пластичность, %
Fe-33%Mn	а→П	216	20	60	240	50
Fe-27%Ni-10%Co	ф-П	310	310	33	350	24
Fe-29%Ni-10%Co	ф-П	380	360	23	440	7

Возможное объяснение наблюдаемых эффектов может быть дано, если считать, что причиной повышения пластичности магнитоупорядоченной фазы по сравнению с парамагнитной является, с одной стороны, фазовая нестабильность, а с другой стороны, эффект торможения развития трещин в магнитоупорядоченной фазе.

Выводы

1. При проведенном исследовании температурной зависимости прочностных и пластических свойств отмечается их аномальное изменение в области температур магнитных переходов «парамагнетизм-ферромагнетизм», «парамагнетизм-антиферромагнетизм». Причем при переходе в магнитоупорядоченное состояние резко увеличиваются и прочностные свойства, и пластичность. Наблюдаемый температурный интервал резкого подъема механических свойств находится в хорошем соответствии с положением температуры магнитного превращения.

2. Аномалия прочностных свойств и пластичности при магнитном упорядочении обусловлена следующими факторами: появлением в силе Пайерлса дополнительной магнитной составляющей ниже температуры магнитного упорядочения; наличием у сплава большого магнитообъемного эффекта (инвариантность); нестабильностью (искажением) кристаллической решетки при магнитном переходе.

3. Предполагается, что в исходной парамагнитной фазе *Fe-Mn* сплава при приближении к точке Нееля происходит образование областей ближнего магнитного порядка, в данном случае антиферромагнитных кластеров, которые, в свою очередь, через магнитоупорядоченные напряжения способствуют мартенситному превращению под влиянием магнитного поля.

1. Zener C. Kinetics of Decomposition of an Austenite // Trans. AIME. 1946. V. 167, p. 550–595.
2. Разумов И.К., Горностырев Ю.Н., Кацнельсон М.И. К теории фазовых превращений в железе и стали на основе первопринципных подходов // Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118, № 4. С. 380–408.
3. Богачёв И.Н., Звигинцева Г.Е., Доценко В.А. Фазовые превращения в нестабильных аустенитных сплавах // Известия вузов. Чёрная металлургия. 1977. № 6. С. 112.

4. Золотаревский И.В., Лоскутов С.В., Щетинина М.О. Влияние магнитного состояния аустенита на мартенситные превращения в сплавах Fe-Ni в сильном магнитном поле и без него // Физика металлов и металловедение. 2018. Т. 119. №8. С. 794–801.
5. Доценко В.А., Белоус И.А. Влияние магнитного перехода на характер мартенситных превращений в сплавах на Fe-Mn основе // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2018. Т. 10. № 1. С. 124–136.
6. Богачёв И.Н., Доценко В.А., Ромашов Л.Н., Факидов И.Г. Особенности образования α -мартенсита в сплаве G14 под влиянием магнитного поля // Доклады Академии наук СССР. 1978. Т. 242, № 6. С. 1321.
7. Богачёв И.Н., Звигинцева Г.Е., Звигинцев Н.В. и др. Структура и механические свойства железомарганцевых сплавов с ниобием // Физика металлов и металловедение. 1977. Т. 44, № 2. С. 281.
8. Сёмкин С.В., Смагин В.П. Метод циклических кластеров в модели Изинга разбавленного магнетика // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2018. Т. 10, № 1. С. 116–123.
9. Сагарадзе В.В., Старченко Е.И., Пушин В.Г., Турхан Ю.Э. Магнитное упорядочение и механические свойства аустенитных сплавов системы Fe-Ni // Физика металлов и металловедение. 1986. Т. 62, № 6. С. 1144–1155.
10. Влияние магнитного упорядочения на свойства аустенитных сплавов / В.В. Сагарадзе, Н.Д. Земцова, Е.И. Старченко, В.А. Шабашов, Е.Е. Юрчиков // Физика металлов и металловедение. 1983. Т. 1, № 1. С. 113–124.
11. Богачёв И.Н., Звигинцева Г.Е. // Доклады АН СССР. 1974. Т. 215. № 3. С. 570–571.

Транслитерация

1. Razumov I.K., Gornosty`rev Yu.N., Kacznel`son M.I. K teorii fazovy`x prevrashhenij v zheleze i stali na osnove pervoprincipny`x podxodov // Fizika metallov i metallovedenie. 2017. Т. 118, № 4. S. 380–408.
2. Bogachyov I.N., Zvinginceva G.E., Docenko V.A. Fazovy`e prevrashheniya v nestabil`ny`x austenitny`x splavax // Izvestiya vuzov. Chyornaya metallurgiya. 1977. № 6. S. 112.
3. Zolotarevskij I.V., Loskutov S.V., Shhetinina M.O. Vliyanie magnitnogo sostoyaniya austenita na martensitny`e prevrashheniya v splavax Fe-Ni v sil`nom magnitnom pole i bez nego // Fizika metallov i metallovedenie. 2018. Т. 119. №8. S. 794–801.
4. Docenko V.A., Belous I.A. Vliyanie magnitnogo perexoda na karakter martensitny`x prevrashhenij v splavax na Fe-Mn osnove // Territoriya novy`x vozmozhnostej. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta e`konomiki i servisa. 2018. Т. 10. №1. S. 124–136.
5. Osobennosti obrazovaniya α -martensita v splave G14 pod vliyaniem magnitnogo polya / I.N. Bogachyov, V.A. Docenko, L.N. Romashov, I.G. Fakidov // Doklady` Akademii nauk SSSR. 1978. Т. 242, № 6. S. 1321.
6. Bogachyov I.N., Zvinginceva G.E., Zvingincev N.V. i dr. Struktura i mexanicheskie svojst-va zhelezomargancevy`x s niobiem // Fizika metallov i metallovedenie. 1977. Т. 44, № 2. S. 281.
7. Syomkin S.V., Smagin V.P. Metod ciklicheskix klasterov v modeli Izinga razbavlen-nogo magnetika // Territoriya novy`x vozmozhnostej. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta e`konomiki i servisa. 2018. Т. 10. № 1. S. 116–123.
8. Magnitnoe uporyadochenie i mexanicheskie svojstva austenitny`x splavov sistemy` Fe-Ni / V.V. Sagaradze, E.I. Starchenko, V.G. Pushin, Yu.E. Turxan // Fizika metallov i metallovedenie. 1986. Т. 62. № 6. S. 1144–1155.

9. Vliyanie magnitnogo uporyadocheniya na svoystva austenitny`x splavov / V.V. Sagarad-ze, N.D. Zemczova, E.I. Starchenko, V.A. Shabashov, E.E. Yurchikov // Fizika metallov i metallovedenie. 1983. T. 1, № 1.S. 113–124.
10. Bogachyov I.N., Zviginceva G.E. // Doklady` AN SSSR.1974. T. 215. № 3. S. 570–571.

© В.А. Доценко, 2019

© И.А. Белоус, 2019

Для цитирования: Доценко В.А., Белоус И.А. Особенности изменения прочностных свойств сплавов на основе железа в области температур магнитных переходов // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2019. Т. 11. № 3. С. 153–166.

For citation: Dotsenko V.A., Belous I.A. Features of changes in the strength properties of iron-based alloys in the temperature range of magnetic transitions, *The Territory of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service*, 2019, Vol. 11, № 3, pp. 153–166.

DOI dx.doi.org/10.24866/VVSU/2073-3984/2019-3/153-166

Дата поступления: 20.06.2019.