

УДК 539.21:539.12.04:669.3

МАРТЕНСИТНЫЕ ТОЧКИ ДЛЯ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ, ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ

Максимкин О.П.

Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан
НИИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

Рассмотрено влияние нейтронного облучения на мартенситную точку M_d в аустенитных хромоникелевых сталях X18H9T и 12X18H10T – конструкционных материалов ядерных реакторов. Установлено, что вплоть до флюенса $2 \cdot 10^{20}$ н/см² ($E > 0,1$ МэВ) максимально возможная температура проявления фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода для стали 12X18H10T изменяется в диапазоне 100–75 °С.

На основании анализа полученных экспериментальных данных предлагается рассматривать еще одну характерную точку M_p – такую температуру растяжения, при которой сравниваются значения интенсивностей прямого мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения для деформируемых необлученной и облученной стали.

ВВЕДЕНИЕ

Известно [1], что склонность метастабильных аустенитных сталей (γ) к образованию α -мартенсита под влиянием пластической деформации определяется соотношением температуры деформирования относительно некоторых характерных величин T_m (T_m – температура мартенситной точки данной стали, M_s – в другой терминологии) и T_0 (T_0 – температура равенства свободных энергий аустенита и мартенсита). В литературе обычно вместо T_0 приводится температура M_d , выше которой любая деформация не может вызвать образование мартенсита). При температурах ниже M_d , образование мартенсита становится тем более возможным, чем больше степень деформации и чем ближе температура деформирования к мартенситной точке T_m (или M_H) аустенитной стали (рисунок 1).

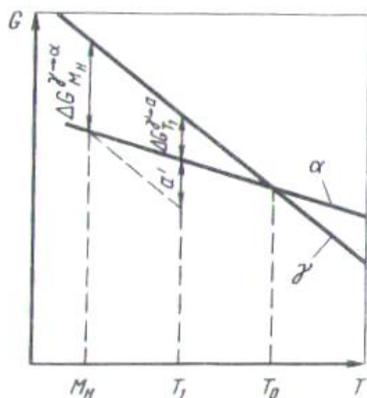


Рисунок 1. Изменение свободной энергии аустенитной стали с температурой

На рисунке 1, где схематично показаны температурные изменения свободной энергии, T_0 – температура равновесного существования исходной аустенитной (γ) и мартенситной (α) фаз, $\Delta\sigma_{M_H}^{\gamma \rightarrow \alpha}$ – критическая величина химической движущей силы, необходимой для начала $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения при охлаждении без нагрузки. Мартенситное превращение может

начаться при некоторой температуре T_1 , $M_H < T_1 < T_0$, если внешняя нагрузка облегчает образование критического зародыша, т.е. если она снижает на некоторую определенную величину U , требуемую химическую движущую силу $\Delta\sigma_{M_H}^{\gamma \rightarrow \alpha}$.

Наиболее детально соотношение температур начала мартенситного превращения и величин приложенных напряжений (σ) иллюстрирует схема, предложенная в [2] (см. рисунок 2). При температуре M_H первые кристаллы α -мартенсита возникают без какого-либо воздействия внешней нагрузки. В температурном интервале $M_H < T < M_i^\sigma$ образование мартенситных кристаллов инициируется упругими напряжениями $\sigma < \sigma_T$. Получаемый в этих условиях α -мартенсит был назван «мартенситом напряжения». При $M_i^\sigma < T < M_d$ пластическая деформация аустенита предшествует появлению мартенсита, который был назван «мартенситом деформации».

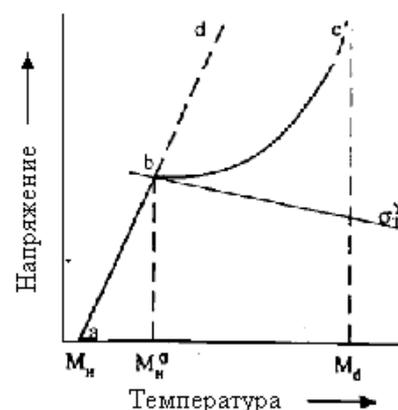


Рисунок 2. Характерные температуры фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения под воздействием напряжений (деформации). Схематическая диаграмма образования мартенсита напряжения и мартенсита деформации

Следует иметь в виду, что любое отклонение параметров эксперимента от равновесных или интенсив-

ное воздействие извне может в значительной степени изменить закономерности фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и в том числе повлиять на положение мартенситных точек. Так, проведенные исследования показали [3], что при термическом измельчении зерен у никелида титана (TiNi) и сплавов на его основе до субмикроструктурных величин понижаются характеристические температуры мартенситных превращений. Показано также, что значение M_d для аустенитных хромоникелевых сталей зависит от химического состава сталей, увеличиваясь с уменьшением содержания Ni [4]. Установлено [5], что облучение нейтронами снижает температуру начала мартенситного перехода, стимулированного холодной деформацией, уменьшается при этом разность $M_d - M_s$, так, что при некоторых высоких значениях повреждающей дозы $\gamma \rightarrow \alpha$ переход происходит непосредственно под облучением без всякой дополнительной деформации [6]. В то же время, в работе [7] для облученной аустенитной хромоникелевой стали X18N10T наблюдали эффект увеличения температуры окончания индуцированного напряжением (деформацией) мартенситного превращения от 130 до 330 °C (что частично соответствует температурам облучения для некоторых моделей реакторов).

Таким образом, несмотря на всю практическую важность проблемы фазово-структурных превращений в конструкционных реакторных материалах под воздействием радиации в литературе сравнительно мало работ, посвященных этой тематике, что не позволяет сделать однозначные выводы. Настоящая статья призвана компенсировать в какой-то степени этот недостаток.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Плоские образцы для механических испытаний с размерами в рабочей части $3,5 \times 10$ мм изготавливали прецизионной штамповкой из листа нержавеющей стали X18N9 толщиной 0,4 мм, подвергали аустенизирующему отжигу (1050 °C, 30 мин), а затем облучали в вертикальном канале активной зоны исследовательского реактора ВВР-К при температуре ~80 °C до флюенсов нейтронов $3,9 \cdot 10^{18}$, $1,9 \cdot 10^{19}$ и $9 \cdot 10^{19}$ н/см² ($E > 0,1$ МэВ).

Необлученные и облученные образцы подвергали пошаговому растяжению на установке Инстрон-1195 со скоростью 0,5 мм/мин в интервале температур от -100 до +20 °C. Синхронно с диаграммой «нагрузка – удлинение» через каждые 5 % регистрировали образование и накопление индуцированной деформацией ферромагнитной α' -фазы (феррозонд, Feritscope MP30). С помощью разработанного экстензометра [8] определяли текущие значения толщины и длины образца. Из полученных экспериментальных кривых наряду с величинами прочности ($\sigma_{0,2}$, σ_B) и пластичности (ϵ_R , ϵ_n) находили также значения критического напряжения ($\sigma_{кр}^{\gamma \rightarrow \alpha}$) и деформации ($\epsilon_{кр}^{\gamma \rightarrow \alpha}$), соответст-

вующих началу мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, индуцированного деформацией. Помимо механических характеристик, были также определены энергетические: работа, затрачиваемая на растяжение образца до образования α -фазы ($A_{кр}$), работа испытательной машины до разрушения образца (A_R). Наряду с тем, были проведены расчеты интенсивности (I) мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода по формуле $I = \frac{M_f}{\sigma_B - \sigma_{кр}}$. При этом M_f определяли в объемных

процентах, а значения σ_B и $\sigma_{кр}$ – в условных напряжениях.

В результате установлено [9], что с понижением температуры испытания величина предела текучести стали возрастает. В то же время при снижении температуры от комнатной до -60 °C, «истинные» (т.е. с учетом изменения геометрических размеров) критические напряжения $\sigma_{кр}^{\gamma \rightarrow \alpha}$ уменьшаются – в этом температурном интервале α -фаза образоваться легче, чем при других температурах. Дальнейшее снижение температуры испытания от -60 °C до -100 °C, напротив, препятствует $\gamma \rightarrow \alpha$ переходу.

Наряду с тем следует отметить, что: 1) Для всего исследованного интервала температур и флюенсов нейтронов напряжение $\sigma_{кр}^{\gamma \rightarrow \alpha}$ для облученной стали выше, чем для необлученной. 2) При температурах испытания -60 °C и -100 °C α -мартенсит образуется сразу по достижению предела текучести.

Можно предположить, что точка (-60 °C) соответствует такой температуре испытания, при которой в кристаллической решетке минимальны значения напряжений сжатия, но максимальны напряжения растяжения. Поэтому при холодной (-60 °C) деформации надо прилагать самое маленькое напряжение растяжения, чтобы начался $\gamma \rightarrow \alpha$ переход (см. рисунок 3).

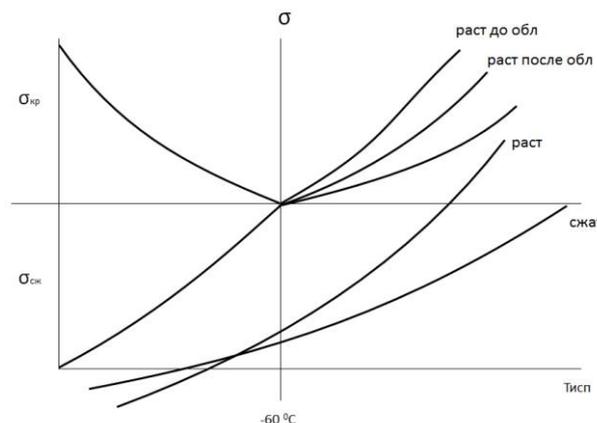


Рисунок 3. Температурная зависимость критического напряжения начала $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода при растяжении и сжатии облученной ($1,9 \cdot 10^{19}$ н/см²) стали X18N9T (схема)

В аустенизированной стали при 20 °С: в центре матрицы зерна преобладают напряжения сжатия, а в приграничной зоне – напряжения растяжения. С уменьшением температуры испытания от 20 до –60 °С кристаллическая решетка сжимается еще сильнее.

На рисунке 4 приведены температурные зависимости величин интенсивности $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода, протекающего при деформации в необлученных (I_1) и облученных (I_2) нейтронами образцах. Обращает на себя внимание тот факт, что начиная с температуры –60 °С и ниже значения интенсивностей I_i фазового превращения становятся одинаковыми независимо от флюенса облучения.

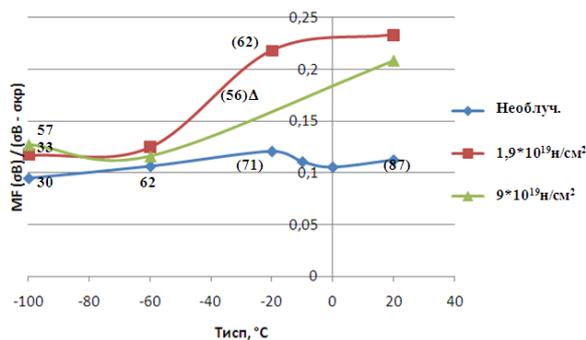


Рисунок 4. Влияние температуры испытания на интенсивность $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода (цифры в скобках у кривых – значения пластичности стали в %)

Этот результат, а также экспериментальные данные, приведенные выше, показывают, что практически все физико–механические величины, описывающие поведение стали при отрицательной температуре –60 °С, имеют следующие характерные особенности.

- При этой температуре испытания (и ниже ее) значения критического напряжения образования α -фазы и предела текучести стали практически совпадают.

- В районе температуры растяжения –60 °С величины равномерной и полной деформации в стали, необлученной и облученной нейтронами вплоть до флюенса $9 \cdot 10^{19}$ н/см², равны.

- При температуре –60 °С (и ниже, до –100 °С) становятся одинаковыми величины интенсивностей $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода для необлученных и облученных нейтронами образцов стали X18H9.

- При температуре –60 °С сравниваются значения критических напряжений образования α -фазы в процессе деформации необлученных и облученных нейтронами стальных образцов.

- С точки зрения работы, затрачиваемой на деформацию в интервале температур от +20 до –60 °С облучение способствует $\gamma \rightarrow \alpha$ превращению, т.е. требуется затрачивать меньше механической работы для создания одного и того же количества α -мартенсита

(а в интервале температур испытания от –60 °С до –100 °С – наоборот).

В результате дополнительно проведенных экспериментов оказалось, что образец стали X18H9 (1050 °С 30 мин), деформированный при –60 °С, не корродировал в течение 2100 часов в растворе 5 % FeCl в отличие от образцов, деформированных при других температурах.

Установлено также, что при отжиге стального образца, предварительно деформированного при –60 °С, эффекта прироста M_f при 450 °С не наблюдали, тогда как в случае температуры предварительной деформации, равной –20 и –100 °С, этот эффект был.

Анализ полученных результатов показал также следующее:

Для случая испытания стали X18H9, аустенизированной при температуре 900 °С (30 мин), установлено, что с понижением температуры испытания:

- предел текучести ($\sigma_{0,2}$) возрастает;
- критическое напряжение образования α -фазы ($\sigma_{кр}$) – уменьшается (за исключением дозы $9 \cdot 10^{19}$ н/см²);
- разница между $\sigma_{кр}$ и $\sigma_{0,2}$, уменьшается, но не при каких параметрах не превращается в 0;
- интенсивность $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в необлученной стали с уменьшением температуры испытания возрастает в 11 раз (при этом пластичность упала в 2 раза);
- интенсивность $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в облученной нейтронами стали с уменьшением температуры испытания возросла в 4,3 раза (–100 °С).

Значительная часть механических испытаний была проведена на образцах стали 12X18H10T при температурах 20–200 °С. В результате установлено, что температура M_d , выше которой α' -фаза при деформации не образуется, составляет 100 °С как в необлученном, так и в облученном нейтронами состоянии, вплоть до флюенса $2 \cdot 10^{20}$ н/см². При энергетическом подходе к рассмотрению процессов образования α' -фазы и разрушения метастабильных реакторных сталей нами было дано новое определение M_d , как температуры, при которой внутренняя латентная энергия, необходимая для начала $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода, становится равной механической энергии, которую надо сообщить материалу, чтобы он разрушился. Таким образом, при температурах деформации, больших, чем M_d , образец разрушается прежде, чем в нем успевает пройти $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение (см. рисунок 5).

Другими словами, M_d – это температура деформации, при которой запаса энергоемкости материала недостаточно, чтобы освоить всю подведенную к нему механическую энергию, которая необходима для начала $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода. Т.е. сталь при деформации разрушается прежде, чем удастся «вложить» в нее энергию, необходимую, чтобы началось фазовое превращение – дополнительный эффективный механизм рассеивания подводимой механической энергии.

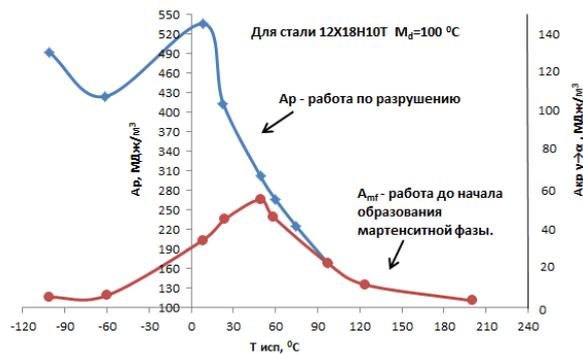


Рисунок 5. Температурные зависимости механической работы, необходимой для начала мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода и для разрушения необлученного образца стали 12X18H10T при деформации

Подводя итог сказанному выше, можно заключить:

1) Для облученных стальных образцов наряду с характерными температурами M_n и M_d целесообразно

ЛИТЕРАТУРА

1. Tamura I. Metals Science. – vol.16. – 1982. – p. 245–253.
2. Olson G.V., Cohen M. Met. Trans. – 1976. – 7A. – Part 1. – p. 1887.
3. Беляев С.П. и др. Эффект памяти формы в сплаве TiNi, стимулированный нейтронным облучением // ФТТ. – 2007. – т. 49. – № 10. – С. 1876–1878.
4. Нижник С.Б., Маклухин О.Г., Фортунатова Н.Н. Моделирование диаграмм деформирования метастабильных аустенитных сталей с учетом характера легирования // Проблемы прочности. – 1988. – № 4. – С. 9–13.
5. Максимкин О.П., Садвакасов Д.Х. Влияние температуры деформации и отжига на мартенситное превращение в стали, облученной нейтронами // ФММ. – 1992. – №5. – С. 136–139.
6. Максимкин О.П. О «мартенсите облучения» вы реакторных нержавеющей сталей аустенитного класса // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – Вып. 1. – С. 17–26.
7. Hashimoto N., Zinkle S.J. Journal of JNM // – 2000. – v. 283–287. – part. 1. – p. 528–534.
8. Бабушкин А.А., Максимкин О.П. Оптико-электронный экстензометр // Известия АН Каз ССР. Серия физ.-мат. – 1986. – № 2. – С. 1.
9. Рубан С.В., Максимкин О.П. Изменения физико-механических свойств аустенитной хромоникелевой нержавеющей стали X18H9, облученной нейтронами и деформируемой при отрицательных температурах // Вестник НЯЦ РК. – 2005. – вып. 1. – С. 5–9.

НЕЙТРОНДАРМЕН СӘУЛЕЛЕНДІРІЛГЕН АУСТЕНИТТІК БОЛАТТАРДАҒЫ МАРТЕНСИТ НҮКТЕЛЕРІ

О.П. Максимкин

Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
Ұлттық ғылыми ядролық университеті «МИФИ», Мәскеу, Ресей

Ядролық реакторлардың құрлымдық материалдары – X18H9T және 12X18H10T аустениттік хромоникелдік болаттардағы мартенситтік M_d нүктесіне әсері қарастырылды. $2 \cdot 10^{20}$ н/см² ($E > 0,1$ МэВ) ағын тығыздығына дейін 12X18H10T болатының фазалық $\gamma \rightarrow \alpha$ ауысуы үшін барынша мүмкін температура 100–75 °C аралығында өзгереді деп анықталған.

Алынған эксперименттік деректерді талдау негізінде тағы басқа M_p сипаттамалық нүктені қарау ұсынылады. M_p – деформацияланатын сәулеленбеген және сәулелендірілген болаттағы тікелей $\gamma \rightarrow \alpha$ мартенситтік өту қарқындылығының мәндері салыстырылатын созылу температурасы.

но ввести еще одну особенную температурную точку M_p , физический смысл которой заключается в том, что по достижению температуры растяжения M_p интенсивность $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода в необлученном и в облученном нейтронами образцах становятся одинаковыми.

2) Для сталей X18H9 и X18H10T, аустенизированных (1050 °C, 30 мин) и затем также облученных нейтронами, температура –60°C это та температура растяжения, при которой для необлученных и облученных нейтронами образцов становятся одинаковыми значения критических напряжений ($\sigma_{кр}^{\gamma \rightarrow \alpha}$) и деформаций ($\epsilon_{кр}^{\gamma \rightarrow \alpha}$), достигают минимального значения величины плотности механической работы, необходимой для разрушения, и сравниваются значения интенсивностей $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода, в то время как при $T=20$ °C различие этих величин было существенно.

MARTENSITE POINTS FOR AUSTENITIC STEELS IRRADIATED WITH NEUTRONS

O.P. Maksimkin

*Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

The effect of neutron irradiation on the M_d martensitic point in austenitic chromium-nickel steels X18H9T and 12X18N10T – structural materials of nuclear reactors is considered. It was established that up to a fluence of $2 \cdot 10^{20}$ n/cm² ($E > 0.1$ MeV), the maximum possible temperature for the manifestation of the phase $\gamma \rightarrow \alpha$ transition for steel 12X18H10T varies in the range of 100–75 °C.

Based on the analysis of the experimental data obtained, it is proposed to consider another characteristic point M_p – a stretching temperature at which the values of the intensities of the direct martensitic $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation are compared for deformable non-irradiated and irradiated steel.