

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ СПЛАВА 03Х20Н45М4БРЦ И СТАЛИ 12Х18Н10Т

О.П. Максимкин, О.В. Тиванова

Институт ядерной физики НЯЦ РК, г. Алматы, Казахстан

Изучено влияние облучения нейтронами ($1,8 \cdot 10^{22} \dots 2 \cdot 10^{24}$ нейтр./м²) на особенности процессов пластической деформации и механические свойства железохромоникелевых сплавов типа 12Х18Н10Т и 03Х20Н45М4БРЦ при температурах 293...925 К. Определены эффективные энергии активации процессов пластической деформации.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что уровень прочностных и пластических свойств аустенитных нержавеющей сталей и сплавов как в необлученном, так и в облученном состоянии снижается с повышением температуры испытания [1]. Полагают, в частности, что уменьшение пластичности в интервале 293...423 К связано с явлением динамического деформационного старения (ДДС), по аналогии с материалами с ОЦК-решеткой [2,3].

В то же время показано, что в этом диапазоне температур большую роль в изменении пластичности аустенитной хромоникелевой стали играет также мартенситное превращение, индуцированное деформацией [4]. В этой связи представляет определенный интерес сравнение температурных зависимостей механических свойств таких аустенитных материалов, в которых при деформации преобладают процессы или ДДС, или мартенситного превращения. Это способствовало бы выяснению роли того или иного механизма в низкотемпературном радиационном охрупчивании реакторных материалов.

Исходя из вышесказанного, в данной работе в качестве объекта для исследования был выбран сплав 03Х20Н45М4БРЦ (ЧС-43), а для сравнения - сталь 12Х18Н10Т, которая, как известно, в аустенизированном состоянии метастабильна и при холодном деформировании претерпевает $\gamma \rightarrow \alpha'$ ($\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$) переход.

Установлено также, что с повышением температуры испытания стали 12Х18Н10Т интенсивность мартенситного превращения в процессе деформации резко уменьшается и появляются признаки ДДС [4]. С другой стороны, высокое содержание никеля в высоконикелевом сплаве ЧС-43 делает его стабильным по отношению к превращению даже при отрицательных температурах.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментов по изучению влияния реакторного облучения, температуры и скорости растяжения на физико-механические свойства аустенитных нержавеющей стали 12Х18Н10Т и сплава 03Х20Н45М4БРЦ, деформированных в интервале 295...825 К.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводили на микрообразцах (рис.1), термообработка части которых заключалась в нагреве до 1425 К в вакууме, выдержке в течение 1 ч и охлаждении в воде. Другая часть стальных образцов была аустенизирована при температуре 1325 К 30 мин.

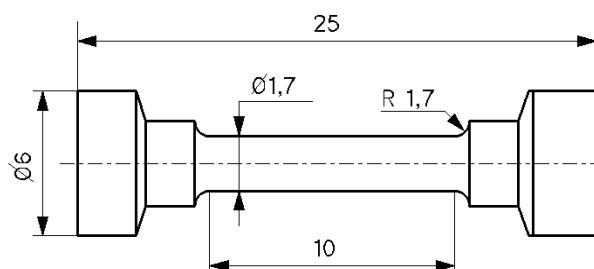


Рис.1. Форма и размеры исследуемого образца

Термообработанные образцы облучали в активной зоне реактора ВВР-К НЯЦ РК ($E=0,1$ МэВ) при температуре не выше 355 К до флюенсов:

- I. Сталь 12Х18Н10Т (1325 К, 30 мин) – $1,8 \cdot 10^{22}$ и $1,8 \cdot 10^{23}$ нейтр./м².
- II. Сплав Х20Н45М4БРЦ (1425 К, 1 ч) – $5 \cdot 10^{24}$ нейтр./м².
- III. Сталь 12Х18Н10Т (1425 К, 1 ч – $5 \cdot 10^{22}$ и $2 \cdot 10^{24}$ нейтр./м².

Механические испытания «на растяжение» со скоростями $2,5 \cdot 10^{-3}$ и $2,5 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹ необлученных и облученных образцов проводили при температурах 295...825 К на лабораторной разрывной машине, размещенной в «горячей» камере [5]. Кроме того, часть образцов для контроля испытывали на более чувствительной и жесткой установке «Инстрон 1195». Перед каждым опытом образцы выдерживали при температуре испытания 20 мин. Накопление и обработку данных, а также анализ кривых упрочнения осуществляли с помощью измерительно-вычислительного комплекса на базе ПК АТ [6]. По окончании растяжения с помощью измерителя феррофазы Ф.1.053 определяли содержание ферромагнитной фазы в зоне разрушения образца и вне ее.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

I. Сталь 12X18H10T (1325 K, 30 мин). На рис.2,а в качестве примера приведены диаграммы растяжения облученных образцов стали 12X18H10T, из которых видно, что при низких температурах они гладкие, а с ее повышением до некоторой критической, зависящей от скорости деформации, включают в себя зубчатые участки, отличающиеся протяжен-

ностью, расположением на кривой упрочнения и видом зубчиков (см. рис.2,б,в). Рассчитанные из диаграмм растяжения характеристики прочности и пластичности приведены в табл.1 и на рис.3, откуда видно, что с ростом температуры испытания механические свойства необлученной и облученной нейтронами стали ухудшаются.

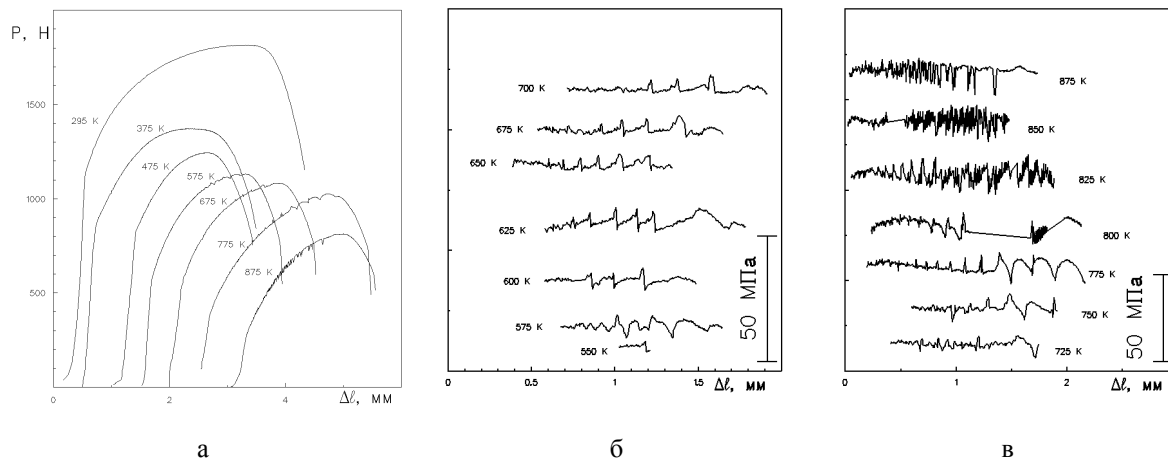


Рис.2. Диаграммы растяжения (а); выделенные из диаграмм растяжения участки (б, в) проявления эффекта Портевена Ле Шателье для облученной нейтронами стали 12X18H10T ($1,8 \cdot 10^{23}$ нейтр./м², $\dot{\epsilon} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$). Цифры у кривых – температура испытания в К

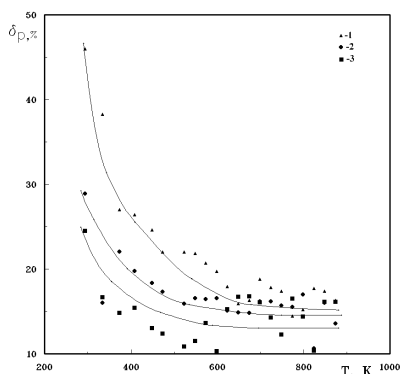


Рис.3. Температурная зависимость пластичности стали 12X18H10T (1325 К, 30 мин):

1 – необлученные; 2 – облученные флюенсом $1,8 \cdot 10^{22}$ нейтр./м²; 3 – облученные флюенсом $1,8 \cdot 10^{24}$ нейтр./м² образцы

Наиболее интенсивное изменение предела текучести $\sigma_{0,2}$ наблюдается при низких (до 425 К) температурах. Так, для стали, облученной флюенсом $1,8 \cdot 10^{23}$ нейтр./м², эффект радиационного упрочнения к 425 К снижается более чем в два раза и практически исчезает в районе 700 К. Для более высоких температур (770...800 К), соответствующих отжигу радиационных дефектов в аустенитной нержавеющей стали, значения $\sigma_{0,2}$ не зависят от интегральной дозы облучения.

У необлученных образцов низкотемпературное уменьшение предела текучести незначительно по сравнению с облученными, а в области 450...750 К величина $\sigma_{0,2}$ сохраняется на одном уровне. Изменение на порядок скорости деформации не оказало су-

щественного влияния на величину предела текучести. Облучение стали нейтронами мало повлияло на предел прочности σ_b ; сравнительно слабое воздействие на него оказало и изменение скорости деформации. С ростом температуры испытания σ_b уменьшается, причем наиболее интенсивно в области 290...580 К, затем до 700...750 К значения предела прочности остаются практически неизменными, после чего вновь наблюдается некоторое его снижение. При уменьшении скорости деформации верхняя граница области интенсивного снижения предела прочности смещается в сторону меньших температур.

Температурные изменения характеристик пластичности нержавеющей хромоникелевой стали более существенны по сравнению с прочностными. Основное уменьшение значения равномерного относительного удлинения δ_r необлученного материала наблюдается в области температур 290...470 К. Однако с дальнейшим ростом температуры скорость снижения пластичности не только уменьшается, но даже наблюдается некоторое увеличение δ_r .

Облучение нейтронами привело к уменьшению пластичности стали в указанном диапазоне тем больше, чем больше флюенс, но уже при 650...700 К различие в величинах δ_r , связанное с радиационным воздействием, исчезает. Влияние скорости растяжения на значения равномерной деформации выражено слабо и заключается в том, что верхняя граница области резкого падения пластичности несколько смещается в сторону низких температур с уменьшением скорости деформации.

Таблица 1

Температурные изменения предела текучести (МПа) необлученной и облученной нейтронами стали 12X18H10T (1320 К, 30 мин)

Т, К		298	323	343	373	393	423	443	473	493	523	543	573	593	623	643	673	693	723	743	773	793	823	843	873
V = 0,16 мм/мин	Необлуч.	225	220	–	190	–	210	170	205	–	–	190	–	170	175	150	160	–	140	160	170	150	125	145	160
	$1,8 \cdot 10^{22}$ нейтр./м ²	410	340	350	250	310	290	260	255	250	220	230	205	220	215	–	190	170	165	–	200	160	–	–	170
	$1,8 \cdot 10^{23}$ нейтр./м ²	490	450	450	360	370	400	370	380	365	–	310	250	300	280	260	250	205	210	200	140	170	–	150	120
V = 1,6 мм/мин	Необлуч.	260	230	225	220	175	180	180	190	180	175	180	150	170	190	150	160	220	180	160	170	170	140	150	130
	$1,8 \cdot 10^{22}$ нейтр./м ²	400	280	250	330	290	340	310	275	250	250	235	220	250	250	220	200	250	180	180	140	230	160	200	–
	$1,8 \cdot 10^{23}$ нейтр./м ²	510	460	430	420	390	380	410	390	380	365	350	340	330	320	320	250	220	220	250	200	200	200	180	200

II. Сталь 12X18H10T (1425 К, 1 ч). В зависимости от температуры испытания кривые «нагрузка - удлинение» были или гладкие, или с зубчатыми участками в области равномерной деформации. У необлученных, а также облученных флюенсом $5 \cdot 10^{22}$ нейтр./м² образцов зубчатые диаграммы зарегистрированы в двух температурных интервалах (473...523 К и 623...823 К), тогда как у образцов, облученных флюенсом $2 \cdot 10^{24}$ нейтр./м², – в одном (523...823 К). Эти зубчатые участки отличаются друг от друга и могут быть характеризованы типом зубцов, значениями деформаций и напряжений, соответствующих началу (ϵ_n, σ_n) и концу (ϵ_k, σ_k) зубчатого участка, а также его протяженностью ($\epsilon_k - \epsilon_n$). С изменением температуры испытания и условий облучения меняется тип зубцов и протяженность зубчатого участка. Наблюдавшиеся в эксперименте зубцы в соответствии с [7] можно свести к трем базовым типам А, В, С (рис.4). Следует при этом отметить, что на кривых упрочнения редко присутствовали зубчики какого-либо одного типа и в каждом конкретном случае определяли преобладающий тип зубцов или их комбинацию.

Результаты идентификации зубцов приведены в табл.2, из которой видно, что при температурах 473 и 523 К на кривых упрочнения всех образцов преобладают, в основном, зубчики простого типа А, тогда как частые и регулярные зубцы типа С появляются при $T > 573$ К. Зубцы типа В наблюдаются только в комбинациях с А и С. На диаграммах образцов, деформированных при высоких температурах (723...823 К), доминировала комбинация зубцов типа А и В. Реакторное облучение не привело к образованию каких-либо качественно новых типов зубцов или их комбинаций.

Что касается протяженности зубчатого участка, то для необлученной и облученной флюенсом $5 \cdot 10^{22}$ нейтр./м² стали с ростом температуры величина ($\epsilon_k - \epsilon_n$) сначала увеличивается, достигая максимума при температурах 473 и 673...723 К, а затем уменьшается до нуля. Для флюенса $2 \cdot 10^{24}$ нейтр./м² на температурной зависимости ($\epsilon_k - \epsilon_n$) ниспадающие участки не наблюдались.

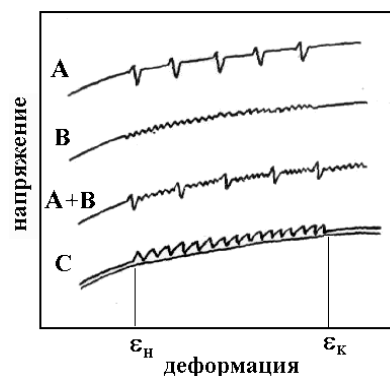


Рис.4. Различные типы зубчиков на кривых упрочнения (схема)

Дальнейшая обработка диаграмм растяжения, проводившаяся с учетом того, что они достаточно хорошо описываются уравнением $P=C(\Delta l)^n$, где P – текущая нагрузка, l – удлинение, C – коэффициент, n – показатель деформационного упрочнения [8], выявила следующее. Кривые упрочнения в логарифмических координатах представляют собой ломаную линию с несколькими, чаще всего с тремя, практически прямолинейными участками (рис.5).

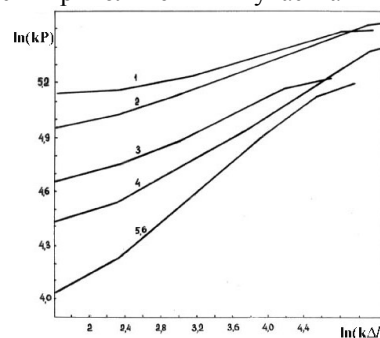


Рис.5. Нормализованные кривые упрочнения стали 12X18H10T: 1 – $2 \cdot 10^{24}$ нейтр./м², 293 К; 2 – $5 \cdot 10^{22}$ нейтр./м², 293 К; 3 – $2 \cdot 10^{24}$ нейтр./м², 573 К

Их протяженность и наклон к оси деформаций (т.е. значения n_1) зависят от температуры испытания и флюенса облучения. Найденные из экспериментов значения n_2 , соответствующие наиболее ярко выраженному второму прямолинейному участку, приведены в табл.2, из которой следует, что они изменяются в пределах 0,3...0,5. При этом, если с ростом температуры показатель деформационного упрочнения, соответствующий второму участку, увеличивается, то с ростом флюенса, напротив, – уменьшается. Общим как для необлученных, так и для облученных образцов является то обстоятельство, что n_2 увеличивается в диапазоне 293...379 и 523...673 К, а в районе 673...723 К достигает максимального значения; при других температурах величина n_2 практически неизменна.

Таблица 2

Тип зубчиков, значения коэффициента ($K_{5\%}$) и показателя (n_2) деформационного упрочнения при различных температурах испытания и степени облучения стали

Состояние материала	Параметры	Температура испытания, К									
		293	373	473	523	573	623	673	723	773	823
Необлучен.	Тип зубчиков	–	–	А	А	–	А	С	А	А+В	Нет

	n K _{5%} , МПа	0,32	0,40	0,45	0,42	0,40	0,40	0,45	0,52	0,45	дан- ных
Облучен. 5·10 ²² нейтр./м ²	Тип зубчиков n K _{5%} , МПа	—	—	A	A	—	C	A	A+B	A+B	0,37
		0,2	0,33	0,38	0,38	0,43	0,43	0,45	0,50	0,50	40,0
		29,0	26,5	33,0	26,5	32,0	30,0	32,5	35,0	33,0	40,0
Облучен. 2·10 ²⁴ нейтр./м ²	Тип зубчиков n K _{5%} , МПа	—	—	A	A	A+B	C	A	A	Нет дан- ных	A+B 0,30 35,0
		0,15	0,20	0,22	0,25	0,27	0,32	0,30	0,32		
		12,5	15,0	17,0	20,0	24,0	26,0	32,0	34,0		

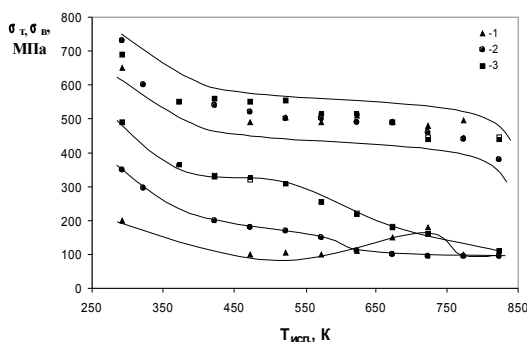
Примечание. Прочерк означает отсутствие зубчиков на диаграммах растяжения.

Определение значений коэффициентов деформационного упрочнения (K_{5%}) для всех диаграмм растяжения (см. табл.2) показало значительное их возрастание выше 500 К у облученных и необлученных образцов.

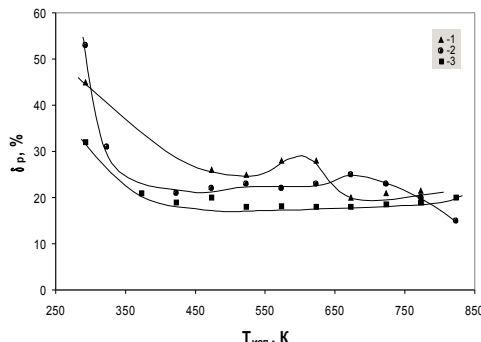
Таким образом, сравнивая температурные зависимости коррелирующих параметров n и K₅, можно заключить, что реакторное облучение не привело к качественному изменению величин, характеризующих ДДС. Этот процесс наблюдается в одной, широкой температурной области (523...823 К) для об-

лученной флюенсом 2·10²⁴ нейтр./м² и в двух областях (473...523 и 623...823 К) для необлученной стали, причем без заметного снижения пластичности.

Основные результаты механических испытаний показаны на рис.6 в виде температурных зависимостей характеристик прочности и пластичности. Видно, что реакторное облучение привело к увеличению предела текучести стали σ_{0,2} и незначительному изменению временного сопротивления разрушению σ_v. Так, при комнатной температуре предел текучести для флюенса 2·10²⁴ нейтр./м² увеличился в 2,4 раза.



а



б

Рис.6. Температурная зависимость пределов прочности и текучести (а) и пластичности (б) стали 12Х18Н10Т (1425 К, 1 ч: 1 – необлученные; 2 – облученные флюенсом 5·10²² нейтр./м²; 3 – облученные флюенсом 2·10²⁴ нейтр./м² образцы

С ростом температуры испытания наблюдается непрерывное уменьшение степени упрочнения необлученного и облученного материалов, и выше 623 К их значения практически совпадают. Обращает на себя внимание некоторое повышение предела текучести необлученной стали в интервале 650...723 К.

Следует отметить, что предел прочности как облученных, так и необлученных образцов после некоторого снижения в области 295...475 К имеет практически одинаковое значение для каждой температуры испытания в интервале 473...673 К. При рассмотрении температурной зависимости пластичности также можно наблюдать область сравнительно резкого уменьшения значений равномерного удлинения (295...475 К) и область (475...825 К), в которой его значения практически не изменяются. Отметим лишь некоторое увеличение пластичности при температурах 575 К у необлученной стали и 675 К у стали, облученной флюенсом 5·10²² н/м².

III. Сплав 03Х20Н45М4БРЦ (1425 К, 1 ч). Из диаграмм растяжения образцов сплава ЧС-43, кото-

рые приведены на рис.7, следует, что их вид зависит от температуры испытания.

Так, для необлученного сплава в интервале температур 295...575 К диаграммы растяжения гладкие, а выше 575 К на кривых течения появляются зубчики. При этом отметим, что деформация, соответствующая началу участка прерывистого течения, уменьшается с ростом температуры. Независимо от условий эксперимента вид зубцов остается неизменным и их можно отнести к типу С. С увеличением степени деформации амплитуда и частота колебаний нагрузки возрастают, так что зубцы наибольшего размера регистрируются при удлинениях, соответствующих условному пределу прочности.

В облученном материале по сравнению с необлученным область прерывистого течения смещена в сторону более низких температур и регистрируется выше 470 К. Вместе с тем облучение не оказало существенного влияния на закономерности проявления и тип наблюдаемой зубчатости.

Показатель деформационного упрочнения n₂ для

необлученного сплава ЧС-43 с ростом температуры испытания остается практически неизменным, в то время как в облученном материале его значение растет и достигает величины необлученного при 675 К.

Рассчитанные из диаграмм растяжения характеристики прочности и пластичности высоконикелевого сплава приведены в табл.3.

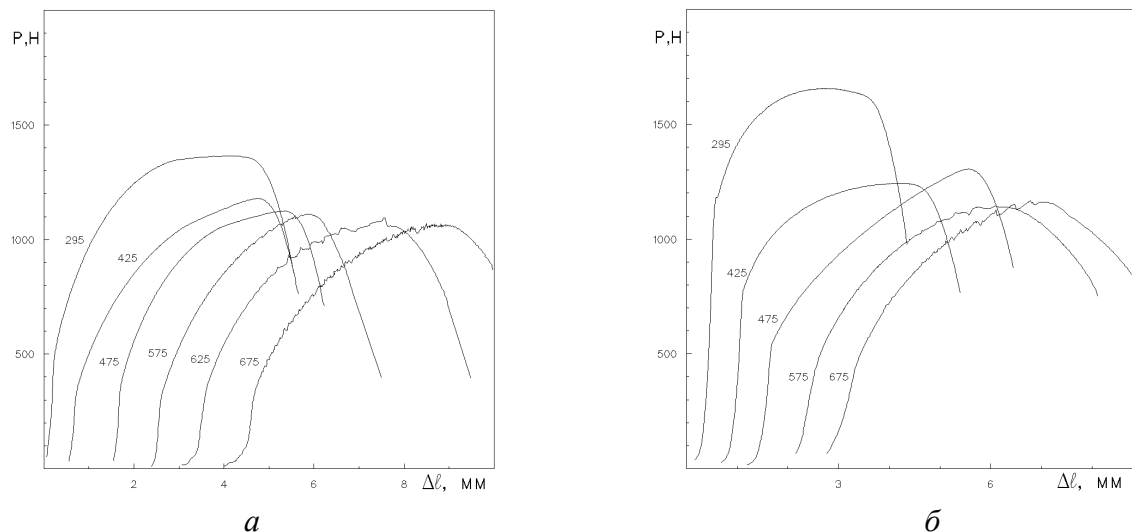


Рис.7. Диаграммы растяжения образцов необлученного (а) и облученного нейтронами ($5 \cdot 10^{24}$ нейтр./ m^2) (б) сплава 03X20H45M4БРЦ. Цифры у кривых – температура испытания в К

Обсуждение закономерностей температурных изменений механических свойств сплава ЧС-43 удобно проводить, разбив интервал исследованных температур на два: 295...475 и 475...675 К в соответствии с различным видом диаграмм растяжения. В области 295...475 К характеристики прочности необлученного и облученного материалов с ростом температуры испытания уменьшаются, причем у подвергнутых облучению образцов гораздо интенсивнее. Уменьшается с температурой также пластичность необлученных образцов, тогда как у облученных она практически не изменяется.

В области температур 475...675 К уменьшение предела текучести как необлученного, так и облученного сплавов замедляется, а предел прочности остается практически неизменным. Общее относительное удлинение сохраняется на одном уровне – до 573 К, затем у необлученного материала оно несколько возрастает. При этом равномерное удлинение необлученного сплава монотонно увеличива-

ется на 30%, тогда как облученного сначала увеличивается на 15% по сравнению с ее значением для 475 К, но выше 575 К уменьшается до прежнего уровня.

Из табл.3 видно, что в областях температур, где наблюдаются зубчики, в облученном сплаве увеличивается коэффициент деформационного упрочнения $K_{5\%}$ (средний прирост составил 65%). Полученные результаты свидетельствуют о том, что в сплаве ЧС-43 при температурах 475...675 К протекает процесс динамического деформационного старения, который тем не менее не приводит к деградации механических свойств сплава.

Сравнивая (см. табл.2) данные для сплава 03X20H45M4БРЦ и результаты для стали 12X18H10Т (см.рис.6), можно отметить, что при 295 К характеристики прочности и пластичности обоих аустенитных материалов практически одинаковы как до, так и после облучения.

Таблица 3

Температурные изменения механических характеристик сплава 03X20H45M4БРЦ до и после облучения флюенсом $2 \cdot 10^{24}$ нейтр./ m^2

Параметр	Состояние	295 К	425 К	475 К	525 К	575 К	625 К	675 К
$\sigma_{0,2}$, МПа	Необлуч.	220	210	200	200	160	180	160
	Облучен.	520	340	285	250	210	190	190
σ_b , МПа	Необлуч.	640	580	560	550	540	530	530
	Облучен.	690	560	540	520	520	520	520
δ_p , %	Необлуч.	42	37	37	43	43	45	48
	Облучен.	32	37	35	43	40	35	37

$\delta_n, \%$	Необлуч.	52	48	44	46	45	52	57
	Облучен.	40	45	47	50	46	44	44
n_2	Необлуч.	0,32	0,30	0,33	0,31	0,35	0,26	0,32
	Облучен.	0,14	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,31
$K_{5\%},$ МПа	Необлуч.	3350	2300	1900	2050	2650	1600	1900
	Облучен.	730	870	1300	1350	2600	2050	2100

С ростом температуры испытания механические свойства ухудшаются, причем скорость изменения характеристик пластичности стали 18-10 с температурой значительно выше, чем сплава ЧС-43. Например, в интервале 295...475 К эффект снижения пластичности для необлученной стали составил 49%, у облученной – 38%, в то время как для сплава соответствующие значения оказались равными 12 и 9% соответственно. Такое значительное отличие в температурном изменении пластических свойств исследуемых материалов можно объяснить их различной стабильностью по отношению к мартенситному превращению. Фазовый переход, протекающий при деформировании стали, вероятно, способствует релаксации пиковых напряжений, уменьшает вероятность локализации течения и в случае оптимальной кинетики превращения приводит к повышению уровня пластических свойств тем интенсивнее, чем ниже температура испытания. Поскольку в сплаве ЧС-43 мартенситное превращение не происходит, то температурное изменение характеристик пластичности выражено значительно слабее.

Таким образом, при температурах 295...675 К уровень механических свойств сплава 03X20H45M4БРЦ сохраняется высоким даже после облучения нейтронами до флюенса $2 \cdot 10^{24}$ нейтр./м². Уменьшение с ростом значений характеристик прочности и пластичности сплава менее выражено, чем у стали 12X18H10Т. Это обусловлено, с одной стороны, отсутствием в деформированном сплаве ЧС-43 мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, а с другой, – тем обстоятельством, что процесс ДДС практически не увеличивает степень его низкотемпературного охрупчивания и поддерживает высокими характеристики прочности.

IV. Определение эффективной энергии активации процессов, протекающих в низко- и высокотемпературной областях.

В температурном интервале 570...670 К пределы текучести необлученной и облученной нержавеющей стали несколько возрастают, и появление этого локального максимума хорошо коррелирует с низкотемпературной областью регистрации прерывистого течения на диаграммах растяжения. Другой локальный максимум $\sigma_{0,2}$ текучести обнаруживается в области 670...870 К, где также наблюдались диаграммы растяжения с зубчатыми участками, причем интенсивность зубчатости намного выше, чем в низкотемпературном интервале.

По нашему мнению, эти особенности на температурной зависимости пределов текучести и диаграммах растяжения можно связать с эффектом ди-

намического деформационного старения, обусловленного взаимодействием между подвижными дислокациями и атомами внедрения и замещения. С целью подтверждения этой гипотезы были проведены расчеты эффективной энергии активации E_a процессов, протекающих в низко- и высокотемпературной областях. Для этого были использованы экспериментальные данные по температурной зависимости предела текучести (см. табл. 1). При этом в случае сравнительно низких (до 470 К) температур испытания использовали представления о термоактивационном характере пластической деформации и методике определения E_a , предложенную Ярошевичем В.Д., в основном, для ОЦК-металлов. В [9] получено аналитическое выражение для энергии активации процесса пластической деформации в виде

$$E_a = E_0 \ln \frac{\sigma_{\tau}(0) - \sigma_0}{\sigma_{0,2} - \sigma_0}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\tau}(0)$ – предел текучести при 0 К; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести при комнатной температуре; σ_0 – температурно-независимая компонента предела текучести; $[\sigma_{\tau}(0) - \sigma_0]$ – эффективное напряжение течения при $T=0$ К.

В то же время для повышенных температур испытания, когда на кривой течения при некоторой критической степени деформации ϵ_n появлялись зубчики (см. рис.4), величину E_a находили, строя графики температурной зависимости ϵ_n в координатах $\ln \epsilon_n - f(1/T)$. Для низких температур испытания графически дифференцировали кривые температурной зависимости пределом текучести, полученные в экспериментах с двумя различными скоростями растяжения образцов стали 18-10 и сплава ЧС-43. Анализ результатов дифференцирования показал, что как для стали, так и для сплава выполняются соотношения:

$$\left(\frac{\Delta \sigma_{0,2}}{\Delta T} \right)_{\dot{\epsilon} = \text{const}} = -m (\sigma_{0,2} - \sigma_0),$$

где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести; σ_0 – некоторое напряжение, не зависящее от $\dot{\epsilon}$ и T ; $m - \text{const}$ при $\dot{\epsilon} = \text{const}$.

На рис.8,а в качестве примера расчета E_a приведена зависимость скорости изменения предела текучести с ростом температуры от величины самого предела текучести для стальных образцов, облученных флюенсом $1,8 \cdot 10^{23}$ нейтр./м² и деформированных со скоростью растяжения 0,16 мм/мин. Видно, что экспериментальные точки с учетом разброса значений для различных образцов ложатся на прямую, отсекающую при $\partial \sigma / \partial T = 0$ отрезок 290 МПа. С использованием этого значения на рис.8,б в полуло-

гарифмических координатах построен график зависимости предела текучести от температуры испытания, из которого следует, что экспериментальные данные хорошо описываются выражением:

$$\ln(\sigma_{0,2}-290 [\text{МПа}]) = \ln [\sigma_r(0) - \sigma_0] - mT,$$

$$\text{где } m = \frac{R}{E_a} \cdot \frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}} = C \cdot E_0^{-1}; R - \text{газовая постоянная.}$$

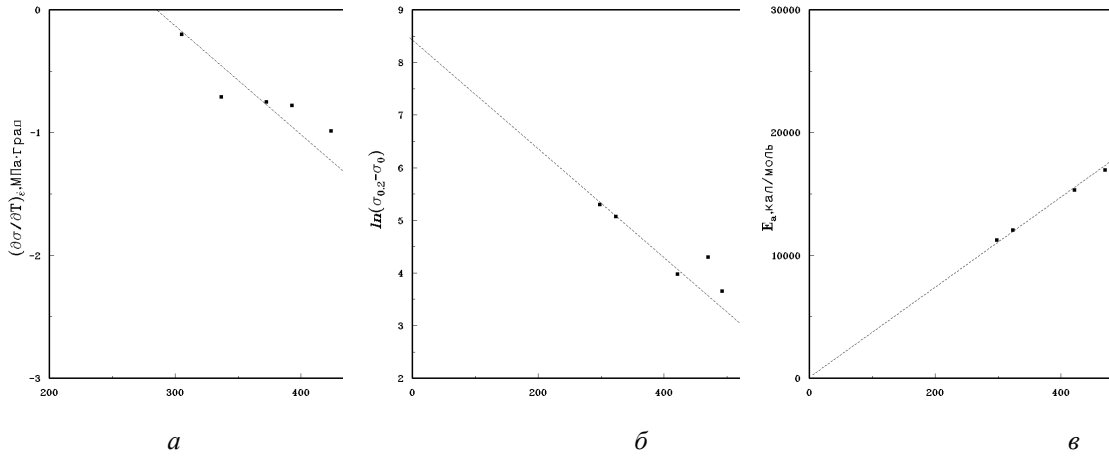


Рис.8. Графики, иллюстрирующие алгоритм определения эффективной энергии активации процессов (а и б) и ее температурную зависимость (в) (сталь 12Х18Н10Т, $1,8 \cdot 10^{23}$ нейтр./м², 0,16 мм/мин)

Учитывая, что значение E_0 хорошо соотносится с температурой плавления, то в пределах ошибки эксперимента можно допустить, что $E_0 \approx RT_{пл}$ и найти значения $\sigma_1(0) = 4,7$ ГПа и $m = 0,009$ K⁻¹.

Подставляя найденные значения в (1) получаем, что $E_{295} = 10$ ккал/моль, $E_{600} = 20$ ккал/моль и температурная зависимость предела текучести стали, облученной флюенсом нейтронов $1,8 \cdot 10^{23}$ нейтр./м², описывается выражением:

$$\ln(\sigma_{0,2} - 290) = 8,4 - 0,0099T.$$

Аналогичные экспериментальные кривые были получены для всех исследованных стальных образцов, а рассчитанные из них значения энергий активации приведены в табл.4.

Наряду с этими данными в табл.4 представлены также величины энергий активаций процесса прерывистого течения, который регистрируется в интервале температур 525...875 К.

С этой целью были использованы экспериментальные значения величин критической степени деформации ϵ_n (рис.9), а энергию активации находили из выражения:

$$E_a = R(\mu + \beta) \ln \frac{\epsilon_{n1}}{\epsilon_{n2}} / \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right),$$

где μ и β – константы, определяющие скорость образования вакансий и дислокаций при пластической деформации, причем

$$\mu + \beta = \ln \frac{v_1}{v_0} / \ln \frac{\epsilon_{n(v_1)}}{\epsilon_{n(v_0)}},$$

и для нашего случая рассчитанные значения оказались практически одинаковыми и равными 2,6.

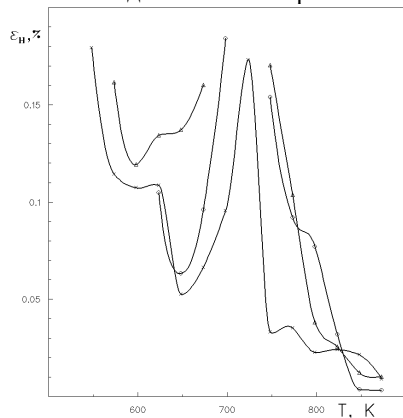


Рис.9. Температурная зависимость критической деформации появления зубчатости в стали 12X18H10T (отжиг при 1325 К, $\dot{\epsilon} = 2,5 \cdot 10^{-3} c^{-1}$); x – необлученной; Δ – $1,8 \cdot 10^{22}$ нейтр./см²; \bullet – $1,8 \cdot 10^{23}$ нейтр./см²

Соответствующие графики Аррениуса для необлученных и облученных стальных образцов приведены на рис.10.

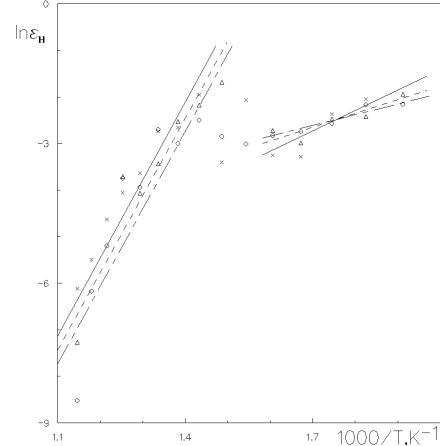


Рис.10. Графики Аррениуса для необлученной (x) и облученной (O) ($1,8 \cdot 10^{24}$ нейтр./м²) стали 12X18H10T

Из рисунка видно, что в стали 12X18H10T регистрируются две области протекания ДДС: низкотемпературная и высокотемпературная, в каждой из которых интенсивность эффекта ПЛШ имеет ярко выраженный максимум. Рассчитанная из линеаризованных температурных зависимостей критической деформации эффективная энергия активации в первой области ДДС равна 85 КДж/моль, что соответствует значению энергии активации миграции углерода или азота в аустените. Аналогичным образом найденное для высокотемпературной области значение E_a оказалось равным 270 КДж/моль, что близко к энергии активации миграции хрома в аустените.

Можно сделать предположение, что ДДС в стали 18–10 в низкотемпературной области обуславливается сегрегацией на подвижных дислокациях атомов углерода или азота, а в высокотемпературной – происходит взаимодействие между движущимися дислокациями и диффундирующими к ним атомами хрома.

Таблица 4

Средние кажущиеся энергии активации [ккал/моль] процессов, протекающих при деформации необлученных и облученных нейтронами образцов стали 12X18H10T

Состояние, скорость деформации	Материал, термообработка, интервал температур 12X18H10T, 1325 К, 30 мин			
	E_a 293...450 К	E_a 450...600 К	E_a 473...723 К	E_a 723...873 К
Необлучен. 0,16 мм/мин	7	13	19	88
$1,8 \cdot 10^{22}$ нейтр./м ² 0,16 мм/мин	9	20	21	79
$1,8 \cdot 10^{23}$ нейтр./м ² 0,16 мм/мин	10	20	20	67
Необлучен.	13	19	29	47

1,6 мм/мин				
1,8·10 ²² нейтр./м ²	11	21	21	80
1,6 мм/мин				
1,8·10 ²³ нейтр./м ²	10	20	22	70±15
1,6 мм/мин				

Это подтверждается результатами, полученными, например в [10], где в хромоникелевой аустенитной стали AISI 316 при температурах 450...525 К обнаружен эффект статического деформационного старения с энергией активации 31 ккал/моль, которая находится в хорошем соответствии с энергией активации диффузии межузельных атомов углерода в аустените. Что касается воздействия облучения нейтронами на динамическое деформационное старение стали 12X18H10T, то это влияние не однозначно и требует детального рассмотрения.

Общепринято, что облучение нейтронами приводит к повреждению кристаллической решетки, образованию различных точечных дефектов и, в частности, к увеличению концентрации вакансий и их комплексов с другими дефектами. Это облегчает диффузию атомов примеси, взаимодействие которых с движущимися дислокациями (судя по эффективной энергии активации эффекта ПЛШ) вызывает ДДС стали. Выделение примесей внедрения из твердого раствора подтверждается еще и тем фактом, что падение с температурой радиационного упрочнения материала в области ДДС прекращается, в то время как в необлученном оно продолжает уменьшаться, т.е. вследствие облегчения диффузии атомов примесей нижняя граница регистрации ДДС в облученном материале смещается в сторону меньших температур. Во второй температурной области ДДС в стали 12X18H10T не наблюдается снижение интенсивности процесса, и практически не заметно некоторое смещение области его регистрации к большим температурам вследствие облучения. Последний факт можно объяснить процессом отжига радиационных дефектов, поскольку вторая область ДДС соответствует температурам 750 К и более, а согласно [1], внесенные облучением вакансии, облегчающие диффузию примесей замещения, практически исчезают при такой температуре. Этот вывод косвенно подтверждается и тем фактом, что при температурах второй области ДДС исчезает эффект радиационного упрочнения материала, и его механические характеристики перестают зависеть от флюенса облучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучено влияние облучения нейтронами ($1,8 \cdot 10^{22} \dots 2 \cdot 10^{24}$ нейтр./см²) на особенности процессов пластической деформации и механические свойства железохромоникелевых сплавов типа 12X18H10T и 03X20H45M4БРЦ при $T=293 \dots 925$ К, $\dot{\epsilon} = 2,8 \cdot 10^{-4}$; $2,8 \cdot 10^{-3}$; $8,3 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹ и показано, что в определенном температурно-скоростном диапазоне как в необлученных, так и в облученных материалах протекают процессы динамиче-

ского деформационного старения: для сплава 03X20H45M4БРЦ процесс ДДС протекает при $T > 470$ К, для стали 12X18H10T – в диапазоне 470...925 К.

2. Определены эффективные энергии активации термоактивационных процессов пластической деформации. Полученные величины 18 ккал/моль для 470...670 К и 70 ккал/моль для температур выше 700К указывают на то, что при ДДС аустенитной нержавеющей стали происходит миграция к дислокациям соответственно атомов внедрения (углерода и/или азота) и замещения (вероятнее всего, хрома).
3. Установлено, что в интервале температур проявления ДДС в облученных нержавеющей аустенитных сталях 12X18H10T и сплаве 03X20H45M4БРЦ наблюдается неизменность характеристик пластичности, в то время как прочностные характеристики исследованных образцов возросли.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.Т. Конобеевский. *Действия облучения на материалы*. М.: «Атомиздат», 1976.
2. В.К. Бабиц, Ю.П. Гуль, И.Е. Долженков. *Деформационное старение стали*. М.: «Металлургия», 1972, 320 с.
3. В.Д. Балашов, С.Н. Вогинов, П.П. Гринчук и др. Деформационное старение стали Х16Н15МЗБ // *ФММ*. 1974, т. 38, № 1, с. 139–144.
4. Ш.Ш. Ибрагимов, О.П. Максимкин. Пластичность облученной стали 12X18H10T в области температур 293–823 К // *Известия АН КазССР*. 1987, № 6, с. 6–9.
5. Г.Е. Бедельбаев, О.П. Максимкин, В.А. Фархутдинов. Разрывная машина с дистанционным управлением для исследования материалов с высокой наведенной активностью // *Известия АН КазССР*. Сер.: «Физ.мат». 1979, № 6, с. 91–92.
6. О.П. Максимкин. Автоматизированный комплекс установок и экспериментальные методики для исследования физико-механических свойств облученных материалов: Препринт ФТИ НАН РК 94-02. Алматы, 1994, 32 с.
7. К.Е. Pin and A. Grinberg. Praktische Aspekte des Portevin-Le Chatelier Effects // *Aluminum*. 1984, v. 50, № 9, p. 687–691.
8. Механические свойства редких металлов / Под редакцией Л.Д. Соколова. М.: «Металлургия», 1972, с. 21.
9. В.Д. Ярошевич, Д.Г. Рывкина. О термоактивационном характере пластической деформации металлов // *Физика твердого тела*. 1970, т. 12, № 2, с. 464–477.
10. M. Marek R.F. Hochman // *Scripta Met.* 1969, v.3, p. 693.

**ВПЛИВ НЕЙТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ТЕМПЕРАТУРНО-ШВИДКІСНІ ЗМІНИ
ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ ТА ПЛАСТИЧНОСТІ СПЛАВУ 03X20H45M4BPЦ**

О.П.Максимкін, О.В.Тіванова

Вивчено вплив опромінення нейтронами ($1,8 \cdot 10^{22} \dots 2 \cdot 10^{24}$ нейтр./см²) на особливості процесів пластичної деформації та механічні властивості залізохромонікелевих сплавів типу 12X18H10T та 03X20H45M4BPЦ при температурах 293...925 К. Визначені ефективні енергії активації процесів пластичної деформації.

**NEUTRON IRRADIATION INFLUENCE ON THE TEMPERATURE - RATE MODIFICATION OF
STRENGTH AND DUCTILITY CHARACTERISTICS OF ALLOY 03CR20NI45MO4BRC AND STEEL
12CR18NI10TI**

O.P. Maksimkin, O.V. Tivanova

Neutron irradiation influence ($1,8 \cdot 10^{22} \dots 2 \cdot 10^{24}$ n/cm²) on the characteristic properties of plastic deformation and on the mechanical properties of alloys of type 08Cr18Ni10T and 03Cr20Ni45Mn4BRC at temperatures 293...925 K. The effective energies of plastic deformation activation are determined.