

## РАВНОМЕРНАЯ И ЛОКАЛЬНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И КАЧЕСТВО МАТЕРИАЛА

А.М. Паршин, И.М. Горкавчук, А.П. Петкова, Е.З. Степанов

Вопросу влияния нейтронного облучения на деформационную способность аустенитных сталей и сплавов (и других конструкционных материалов) в области температур 20-450°C незаслуженно посвящено гораздо меньше исследований, в сравнении с температурным интервалом 550-800°C. Однако именно в интервале умеренных температур (20-450°), т.е. в температурном интервале, в котором не реализуется длительная прочность в аустенитных хромоникелевых сталях и сплавах, с увеличением флюэнса нейтронов происходит весьма резкое снижение относительного удлинения [1].

Анализ экспериментальных данных [1] показывает, что в рассматриваемом интервале умеренных температур нейтронное облучение оказывает преимущественное влияние на вырождение равномерного относительного удлинения в аустенитных сталях и сплавах. При этом, например, значения равномерного удлинения в сплавах типа X20H45M4B могут снижаться до 5-7%, а в других аустенитных сталях и сплавах даже до 0,5-1% (рис. 1).

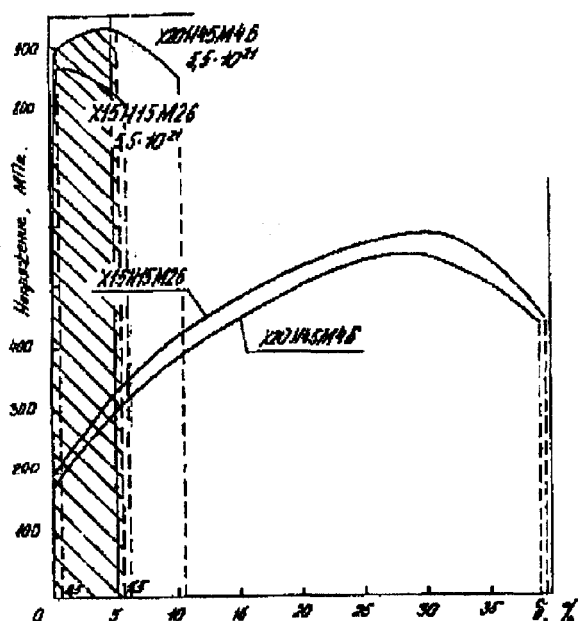


Рис. 1. Вид диаграмм растяжения при 400° С стали X15H15M2B и сплава X20H45M4B до и после нейтронного облучения при 350° С.

Вырождение равномерного удлинения с дозой облучения, т.е. переход от равномерного удлинения всего образца к удлинению его в образовавшейся шейке, с точки зрения механики материалов объясняется недостаточной способностью металла к упрочнению. Из-за недостатка упрочнения деформация теряет устойчивость и локализуется в одном месте. Такая локализация деформации сопровождается интенсивным нарушением сплошности в этой

области. При этом поры и микротрещины наблюдаются в шейке задолго до полного разрушения образца. В связи с отмеченным, способность металла к упрочнению по мере его пластического деформирования имеет огромное значение в технике. Вырождение способности металлов к деформационному упрочнению в облученных металлах требует настороженного подхода при рекомендации их к конкретным условиям эксплуатации. Оценку работоспособности их при этом следует производить не по величине полного относительного удлинения, а по запасу равномерного удлинения.

Дальнейшее рассмотрение экспериментальных данных показывает, что с увеличением дозы облучения кроме вырождения способности аустенитных сплавов к деформационному упрочнению имеет место и вырождение сосредоточенной деформации (см.рис.1), что свидетельствует об интенсификации повреждаемости в шейке в облученных материалах.

Завершение пластической деформации вязких (внутризеренным) разрушением при растяжении свидетельствуют о том, что в интервале температур 200-400°C нейтронное облучение не меняет характера разрушения аустенитных сталей и сплавов.

Рассмотрим и другие особенности поведения облученных аустенитных сплавов в области умеренных температур. Минимальные значения относительного (полного и равномерного) удлинения обнаруживаются в интервале температур 200-400°C. Следует отметить, что иногда аустенитные хромоникелевые необлученные стали проявляют и некоторое снижение пластических свойств при кратковременном растяжении в интервале температур 200-400°C, т.е. в температурном интервале «синеломкости», наиболее часто встречающемся у перлитных сталей.

Удовлетворительного объяснения явление «синеломкости» не имеет [2]. Некоторые исследователи снижение пластичности связывают с выпадением карбидных, особенно нитридных, фаз в процессе деформации.

В сравнении с другими хромоникелевыми аустенитными материалами высоконикелевый сплав X20H45M4B до облучения имеет весьма высокую пластичность в широком интервале температур. Сплав практически не обнаружил снижения пластичности в интервале температур 200-400°C при кратковременном растяжении. Не исключено, что это обусловлено высоким регламентированным отношением содержания ниобия в сплаве к содержанию углерода (и азота) с целью предотвращения его склонности к межкристаллитной коррозии<sup>2</sup>. В связи с отмеченным, исследованный сплав имеет очень небольшое содержание несвязанного азота и углерода, т.е. азота и углерода в твердом растворе.

В таком случае отсутствие проявления «синеломкости» в сплаве типа X20H45M4B в исходном состоянии и обнаружение усиленного снижения пластических свойств в интервале температур 300-400°C может быть доказа-

---

<sup>2</sup> Отношение содержания ниобия к содержанию углерода Nb, С. в сплаве находится в пределах 30-50.

тельством того, что нейтронное облучение ускоряет выпадение карбидных и нитридных фаз. При этом намечаются пути повышения радиационной стойкости аустенитных материалов: дальнейшее подавление избирательных процессов карбидо- и нитридообразования и развитие возможности протекания равномерного, однородного выпадения интерметаллидных фаз, чтобы обеспечить более высокую способность к деформационному упрочнению. Подведем итоги рассмотрения особенностей низкотемпературного радиационного охрупчивания аустенитных сталей и сплавов.

1. Минимальные значения относительного (полного и равномерного) удлинения облученных аустенитных сталей и сплавов обнаруживаются в интервале температур 200-400°C, т.е. в температурном интервале «синеломкости» [1]. Отсутствие проявления «синеломкости» в сплавах типа Х2ОН45М4Б в исходном состоянии и обнаружение усиленного снижения пластических свойств в интервале температур 300-400°C в облученном состоянии может быть свидетельством того, что нейтронное облучение индуцирует выпадение вторичных карбидных и нитридных фаз типа  $Cr_{23}C_6$  и  $Cr_2N$ . Выпадение нитридной фазы типа  $Cr_2N$  в стали типа 18-8 в процессе нейтронного облучения было обнаружено авторами работы [3]. Следует еще отметить, что наиболее сильное охрупчивание аустенитных материалов при комнатной температуре проявляется также тогда, когда нейтронное облучение осуществлялось в интервале 300-400°C. Это нами связывается с интенсификацией процессов карбидо- и нитридообразования в температурном интервале проявления синеломкости. В таком случае уменьшение содержания элементов-внедрения (азота и углерода) может стать действенным фактором в ослаблении радиационного низкотемпературного охрупчивания аустенитных Cr-Ni-Mo сталей и сплавов и, особенно, при работе их в интервале температур 200-400°C.

2. Увеличение содержания никеля и другие особенности легирования повышают радиационную стойкость Cr-Ni-Mo аустенитных сплавов, т.е. с повышением содержания никеля ослабляется охрупчивающее влияние нейтронного облучения (см. рис. 1).

3. Оценку работоспособности материалов в области умеренных температур нужно производить не по предельным значениям полного относительного удлинения, а по изменению и предельным значениям равномерного относительного удлинения. Вырождение равномерного удлинения с дозой облучения, т.е. переход от равномерного удлинения всего образца к удлинению его в образовавшейся шейке, объясняется потерей способности металла к упрочнению. Из-за недостатка упрочнения деформация теряет устойчивость и локализуется в одном месте. Итог - преждевременное развитие повреждений, появление газовой неплотности в тонкостенных конструкциях. Для сохранения работоспособности конструкционных материалов в поле нейтронного облучения в нем необходим определенный запас равномерного удлинения. Эта величина, по-видимому, должна составлять 1-2% [1, 4, 5].

В отсутствие облучения обычных углеродистых и легированных сталей

вопросам роли равномерной составляющей деформации при растяжении, однородности распределения первичных и вторичных фаз и другим различным аспектам локализации деформации на работоспособность указанных сталей особое внимание уделялось Н.Н. Давиденковым и П.О. Пашковым [6-8]. Рассмотренные ими теоретические и инженерные вопросы в значительной мере помогли осмыслить влияние нейтронного облучения на комплекс физических и механических свойств аустенитных сталей и сплавов и дать направление исследованиям по дальнейшему ослаблению нейтронного облучения.

Одним из путей этого ослабления является создание особо чистой аустенитной коррозионно-стойкой стали двойного вакуумного переплава [9,10]. Вакуумная выплавка (индукционная, а затем дуговой переплав) созданной стали 01X18H14ВИ+ВД и ковка заготовок осуществлялись на Челябинском металлургическом комбинате. Исследованный металл обнаружил, как и следовало ожидать, весьма небольшое количество неметаллических включений. Содержание последних не превышало 0,5-1,0 балла. Промышленный металл стали марки 01X18H14ВИ+ВД, хотя она и нестабилизированная, имеет высокое сопротивление межкристаллитной коррозии вследствие очень низкого содержания в ней углерода (0,008%). Химический состав, чистота металла и плотность качественной (типа 18-8) и высококачественной (типа 18-14) аустенитных хромоникелевых сталей представлены в таблице.

Разработанная нестабилизированная титаном (или ниобием) с весьма низким содержанием углерода коррозионно-стойкая двойного вакуумного переплава сталь 01X18H14ВИ+ВД найдет широкое применение в промышленности и, в частности, в ядерной и термоядерной энергетике как высококачественный конструкционный материал (см. табл.). Он более изотропен, газоплотен и меньше загрязняет рабочее пространство.

По радиационной повреждаемости сталь 01X18H14ВИ+ВД не может быть хуже обычных сталей типа 18-8 и 15-15, но следует полагать, что она будет меньше подвержена радиационному набуханию, так как в ней практически подавлено неоднородное, преимущественно граничное, выделение хромистых карбидов, а  $\sigma$ -фаза будет сравнительно однородно зарождаться и обособляться внутри зерен [1,10].

Учитывая вышеизложенное, эта качественная особо чистая сталь должна иметь не только более высокое равномерное удлинение, но и способность ощутимо сохранять его в экстремальных условиях (например, при нейтронном облучении). На рис.2 показано, что особая чистота стали привела, как и следовало ожидать, к уменьшению кратковременных прочных свойств ( $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$ ).

Данные по кратковременной пластичности мелкозернистой (1050°C, 1 ч, вода) и крупнозернистой (1200°C, 5 ч, вода) стали двойного вакуумного переплава 01X18H14ВИ+ВД в интервале умеренных температур представлены на рис. 3. Отмечается весьма незначительное влияние величины зерна (температуры нагрева и выдержки при ней) на изменение пластических

свойств в указанном интервале умеренных температур.

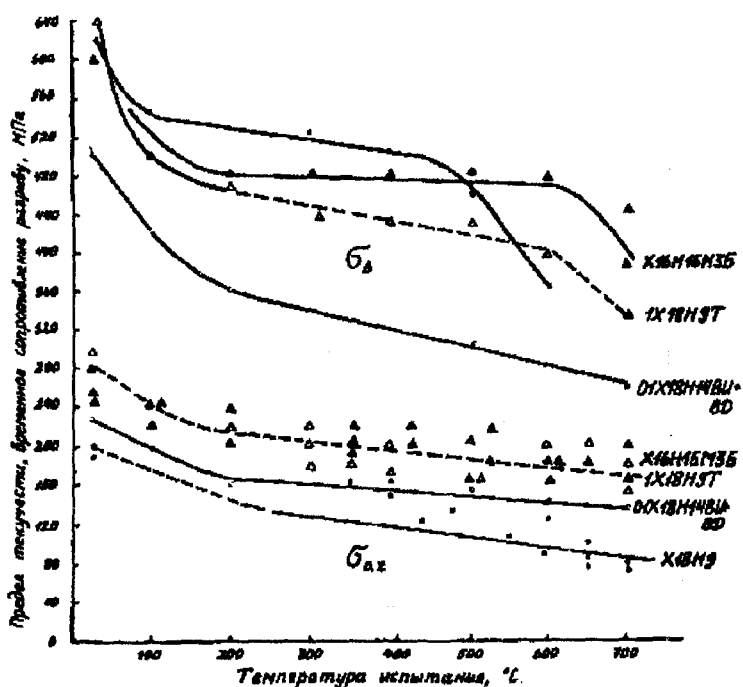


Рис.2. Кратковременная прочность особо чистой стали 01X18H14VI+ВД двойного вакуумного переплава в сравнении со сталями типов 18-8 и 15-5 обычной выплавки.

В то же время эта сталь обнаружила высокое удлинение (и сужение), которое даже несколько выше, чем у стали X15H15M25 и сплава X20H45M4БЧ, выплавленных по специальной технологии с применением особо чистых шихтовых материалов. Для сравнения на рис.3 приведены только данные при температуре 400°С (взяты из рис .1).

Специально проведенные сравнительные исследования при комнатной температуре и при 350°С стали 1X18H9T обычной выплавки обнаружили довольно низкие пластические свойства. Так, при комнатной температуре полное относительное удлинение этой стали было на уровне 21%, а равномерное - 17,3% (средние данные 4-х образцов). При температуре 350°С полное относительное удлинение снизилось до 10%, а равномерное - до 7,3% (средние значения 2-х образцов) (см. рис. 3). Природа такой низкой деформационной способности широко распространенной аустенитной стали 1X18H9T здесь не рассматривается, но она, следует отметить, имела прочностные свойства, соответствующие аустенизированному (не наклепанному) состоянию. Ясно, что работоспособность рассмотренной стали 1X18H9T будет значительно ниже подобной особо чистой двойного вакуумного переплава стали 01X18H14VI+ВД. Особенно это будет проявляться в экстремальных условиях эксплуатации (например, при нейтронном облучении).

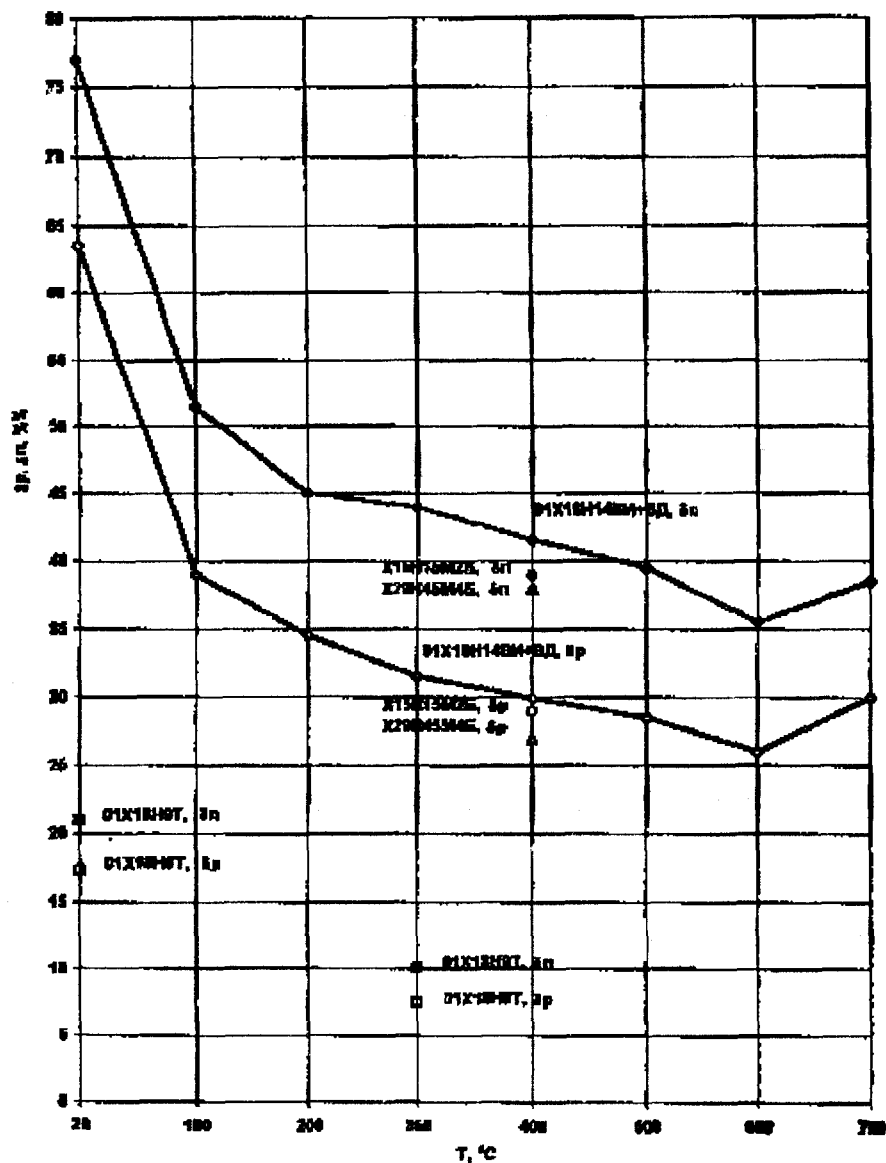


Рис. 3. Равномерное и полное относительные удлинения мелкозернистой (○,△) и крупнозернистой (●,▲) стали 01X18N14 ВИ+ВД в интервале температур 20-700<sup>0</sup>С.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Паршин А.М. Структура, прочность и радиационная повреждаемость коррозионно-стойких сталей и сплавов.- Челябинск: Металлургия, 1988.- 656с.
2. Гуляев А.П. Металловедение.- М:Металлургия, 1978.-648с.
3. Красноселов В.А., Косенков В.М., Островский Э.Е., Гончаренко Ю.Д. //Радиационные дефекты в металлических кристаллах.- Алма-Ата: Наука, 1978.-С.117-123.
4. Паршин А.М., Колосов И.Е., Прокофьев Ю.Г., Станюкович Е.А.//Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез.-ЦНИИАтоминформ, 1984.-Вып. 1(14).- С. 32-41.
5. Орлов В.В., Альтовский И.В.//Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение.- Харьков: ХФТИ АН УССР, 1981.-Вып. 1(15).-С. 9-10.

6. Давиденков Н.Н. Некоторые проблемы механики материалов.-Л.: Лениздат, 1943.
7. Давиденков Н.Н. О природе шейки при растяжении образцов//ЖТФ.-Т. XXV.-Вып.5.-1955.-С.877-880.
8. Пашков И.О. Разрыв металлов.- Л.: Судпромгиз,1960.-243с.
9. Паршин А. М., Бардин В.А., Колосов И.Е. и др. Пути создания особо чистой аустенитной коррозионностойкой свариваемой стали//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез.-Вып. 1-2.-1993.-С.21-28.
- 10.Паршин А.М., Тихонов А.Н., Бондаренко Г.Г., Кириллов Н.Б. Радиационная повреждаемость и свойства сплавов.- СПб.: Политехника ,1995.-301 с.

## **КРИТИЧЕСКАЯ ПЛОТНОСТЬ ДИСЛОКАЦИЙ И КАЧЕСТВО МЕТАЛЛА**

**А.М. Паршин, Н.Б. Кириллов, А.П. Петкова, Ю.В. Шленов**

*Рассмотрено влияние на работоспособность конструкционных материалов таких факторов, как структурные превращения, однородность распада твердых растворов, объемная дилатация на границе раздела «формирующаяся фаза – матрица». Проанализирована зависимость прочности от плотности и равномерности распределения дислокаций. Предложен путь повышения прочности конструкционных материалов с учетом пластичности при помощи повышения качества исходной аустенитной стали, уменьшения общего количества и более равномерного распределения неметаллических включений, дислокационной плотности, первичных и вторичных фаз. Приведена закономерность изменения критической плотности дислокаций, при которой происходит локализация деформации и последующее разрушение металла с повышением качества металла.*

Предотвращение преждевременного хрупкого разрушения, вероятность которого повышается в конструкциях, работающих в особых условиях эксплуатации, например, при нейтронном облучении основных конструкционных материалов реакторов на быстрых нейтронах, предусматривает сохранение во времени в материале достаточной пластичности, позволяющей осуществить релаксацию полей напряжений от скоплений дислокаций и других структурных дефектов и передачу деформации в соседний объем, а не образования при этом зародыша хрупкой интеркристаллитной трещины. Хрупкое разрушение может быть и внутризёренным, транскристаллитным. Это происходит, например, при коррозионном растрескивании аустенитных сталей и сплавов (кроме специальных случаев), контактирующих с хлорсодержащими средами [1-3]. Завершение пластической деформации вязким разрушением