

УДК 669.296: 539.377,
PACS 62.20.Hg, 61.72.Ff, 61.10.-i

Структурная неустойчивость стали 15X2НМФА в условиях ползучести при 600 К

Е.В.Карасева, А.В.Мац, Е.С.Савчук, В.И.Соколенко

*ІНЦ ХФТИ ул.Академическая, 1, г.Харьков, 61108, Украина,
vsokol@kipt.kharkov.ua*

Изучена ползучесть стали 15X2НМФА при температуре 600 К. Показано, что локальная область неоднородного пластического течения, наблюдаемая в процессе ползучести при напряжениях слегка превышающих предел текучести, возникает в результате неустойчивости структурного состояния. Последующая трансформация структуры в процессе ползучести приводит к изменению характера пластического течения, появлению скачкообразной деформации ползучести особенно при напряжениях близких к пределу прочности.

Ключевые слова: сталь, ползучесть, структурная неустойчивость.

Вивчено повзучість сталі 15X2НМФА при температурі 600 К. Показано, що локальна область неоднорідної пластичної течії, яка спостерігається в процесі повзучості при напругах, що декілька перевищують межу текучості, виникає в наслідок нестійкості структурного стану. Подальша трансформація структури в процесі повзучості призводить до зміни характеру пластичної течії, появі стрибкоподібної деформації повзучості особливо при напружених близьких до межі міцності.

Ключові слова: сталь, повзучість, структурна нестійкість.

Studied creep 15Cr2NMFA steel at a temperature of 600 K. It is shown that the local region of the inhomogeneous plastic flow observed during creep at stresses slightly above the yield stress is the result of the instability of the structural state. Subsequent transformation of the structure during creep leads to a change in the characters of plastic flow, the appearance of jumping creep deformation especially at stresses close to the ultimate strength.

Keywords: steel, creep, structural instability.

Введение

Корпуса реакторов на тепловых нейтронах являются сосудами высокого давления, работают при температурах ~300 С и подвергаются воздействию нейтронного и гамма-излучения. Относительно невысокие температуры эксплуатации в условиях воздействия постоянных механических нагрузок и излучений способны вызывать в материале корпусов микроструктурные изменения, которые могут приводить к деградации механических свойств [1].

Уровень деградации свойств материала определяется степенью устойчивости структуры по отношению к внешним воздействиям. Причем, наиболее сильное изменение структуры некоторых материалов наблюдается на начальных этапах воздействия: облучении малыми дозами [1-3], в процессе растяжения при напряжениях едва превышающих предел текучести [4]. В указанных работах исследовались в основном материалы с предварительно созданной дефектной структурой.

Целью настоящей работы являлось изучение

устойчивости структуры малоуглеродистой низколегированной стали феррито-перлитного класса 15X2НМФА, после стандартной заводской обработки в температурно - силовых условиях подобных эксплуатационным.

Материал и методы исследований

Исследовались образцы, вырезанные из массивной заготовки после стандартной заводской обработки. Испытания проводили на переходной стадии ползучести в режиме ступенчатого нагружения при температуре 600 К. Величина прироста напряжения на каждой ступени составляла 4-5 МПа. Точность измерения удлинения составляла $\sim 5 \times 10^{-5}$ см. Активационные параметры и уровень внутренних напряжений определяли с помощью дифференциальных методик, описанных в работе [5].

Термостатирование осуществлялось с помощью цилиндрического нагревателя, внутри которого находился образец. Ограничение теплопритоков достигалось с помощью специальных экранов и

изоляции. Температуру образца с точностью 10^{-2} К измеряли дифференциальной термопарой хромель-алюмель, ЭДС которой измеряли цифровым вольтметром.

Результаты и обсуждение

В исходном состоянии (состоянии поставки после горячейковки и отпуска) материал имеет блочную (ячеистую) структуру с размером блоков $\sim 0,45$ мкм и с плотностью дислокаций $\sim 10^{10}$ см $^{-2}$ (рис.1).

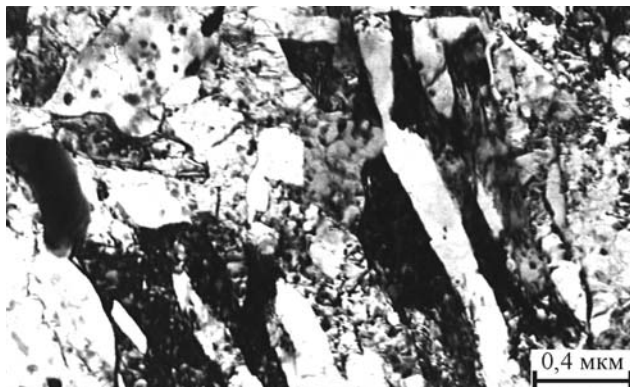


Рис.1. Структура корпусной стали 15X2НМФА в состоянии поставки

Характерной особенностью наблюдаемой ползучести корпусной стали 15X2НМФА при $T=600$ К во всей области напряжений вплоть до разрушения является небольшая величина скорости ползучести ($\sim 10^{-6}$ с $^{-1}$) и активационного объема ($\sim 1,2 \cdot 10^{-21}$ см 3), что свидетельствует о сильной локализации пластической деформации. Пластическая деформация может быть локализована у границ раздела (межзеренных, фазовых, границ фрагментов) и обусловлена движением дислокаций в приграничных областях, а также процессами перемещения и диффузии точечных дефектов.

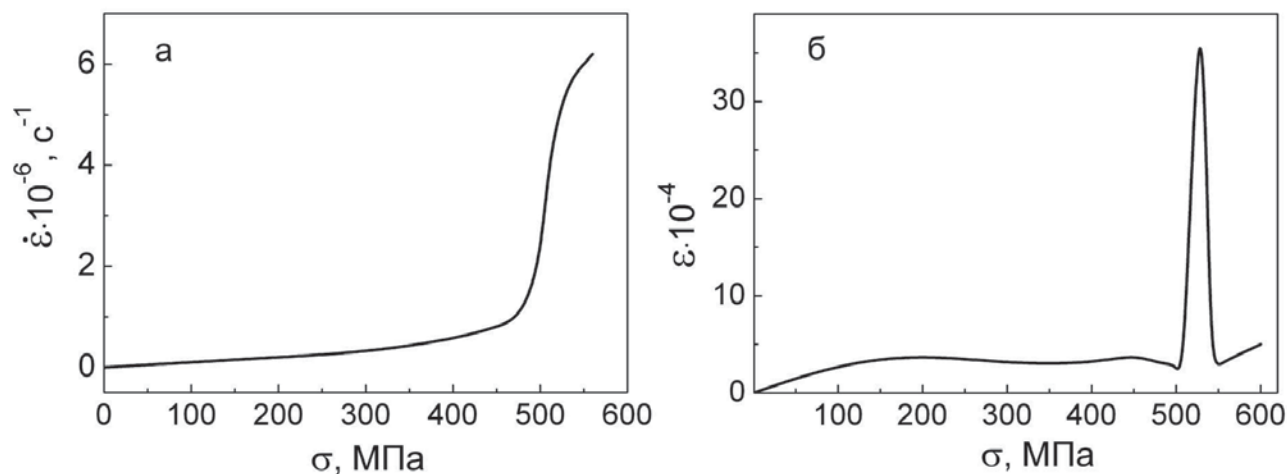


Рис.2. Зависимость скорости ползучести (а) и мгновенной деформации (б) образцов стали 15X2НМФА в исходном состоянии от приложенного напряжения при $T=600$ К.

На рис. 2а приведены зависимости скорости ползучести образцов стали от напряжения.

В процессе ползучести образцов стали при напряжениях слегка превышающих предел текучести наблюдается локальная область неоднородного пластического течения. Это выражается в резком увеличении (\sim на порядок) величины мгновенной деформации (рис.2б). При этом средняя величина скорости ползучести не изменяется. В результате процессов, которые привели к скачку мгновенной деформации, дальнейший ход пластического течения материала перестает быть монотонным, наблюдается скачкообразная деформация ползучести, особенно при напряжениях близких к пределу прочности.

Наблюдаемый эффект может быть результатом кинетической неустойчивости структуры, возникшей вследствие изменения условий деформирования [6]. Структура стали в состоянии поставки, т.е. после заводской обработки, - это структура, которая сформировалась в процессе обработки материала горячейковки и последующих отжигов. В условиях ползучести изменяется геометрия приложенных напряжений и температурно-скоростные условия деформирования. Кроме того в процессе деформации под действием медленно возрастающей нагрузки могут формироваться элементы структуры отпуска, устойчивостью которых будет определяться дальнейшая эволюция структуры материала и его сопротивление ползучести.

Известно, что в условиях совместного действия относительно малых нагрузок, медленно возрастающих во времени, и термической активации процесс макродеформации осуществляется в основном за счет диффузионного перераспределения атомов примесей, вакансий и перемещения имеющихся дислокаций в энергетически более выгодные места. При этом наблюдается снижение плотности подвижных

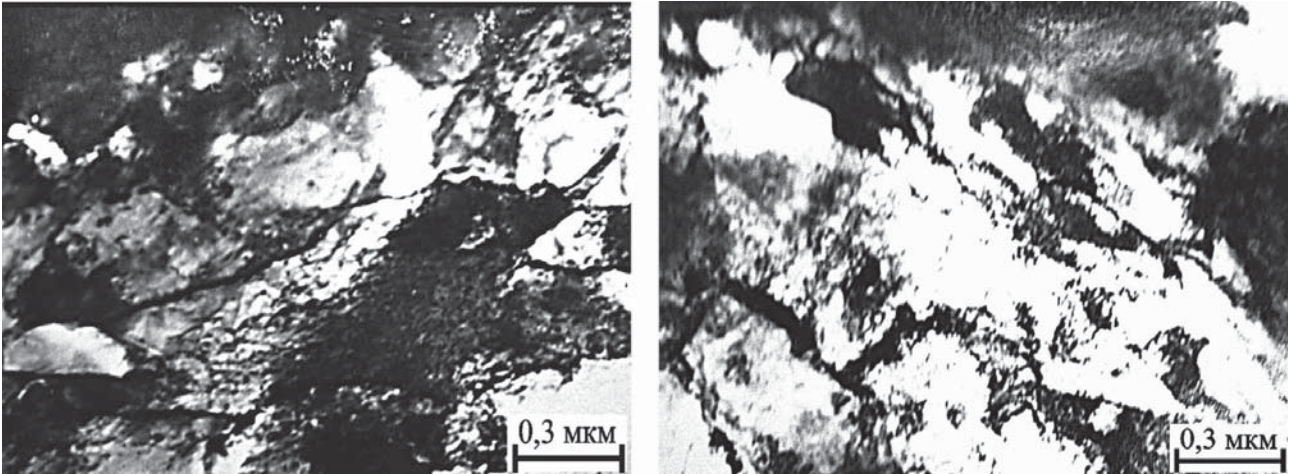


Рис.3 Структура корпусной стали 15X2NMФА после ползучести при $T=600\text{ K}$ и $\sigma \approx \sigma_{0,2}$

дислокаций и очистка объема зерен от точечных дефектов. Это приводит к повышению степени структурного совершенства материала, релаксации локальных напряжений в объеме материала, но не всегда приводит к упрочнению материала и может сопровождаться снижением сопротивления деформированию при ползучести [7].

Процесс пластического течения кристаллов определяются не столько общей плотностью дислокаций, сколько количеством подвижных дислокаций. Истощение подвижных дислокаций происходит за счет их выхода на поверхности раздела или за счет аннигиляции, а также закрепления подвижных дислокаций точечными дефектами и их комплексами. Второй механизм истощения играет главную роль в процессе отпуска под медленно возрастающей нагрузкой при умеренных температурах и небольших напряжениях.

Перемещение точечных дефектов, особенно при наличии их избыточной концентрации, возможно даже при низкой температуре, поскольку коэффициенты диффузии в напряженных микрообластях могут

увеличиваться на несколько порядков. Избыточная концентрация точечных дефектов может возникать под воздействием полей напряжений, аннигиляции дислокаций, залечивания микропор. Как известно, при температуре испытания 600 K вакансии и межузлия становятся подвижными за счет термической активации. Возможна также их кластеризация и захват на стоках, в частности, на примесях внедрения или дислокациях.

В процессе ползучести при 600 K и напряжениях ниже предела текучести фиксируются процессы возврата, происходит очищение объема ячеек от дислокаций. Активизация микропластического течения сопровождается формированием в теле блоков дислокационных стенок полигонального типа (рис.3).

В области напряжений, превышающих предел текучести и вплоть до разрушения образца, активизируются процессы динамической полигонизации и рекристаллизации, где наряду с разрушением старых границ и блоков формируются новые так, что при напряжениях близких к пределу прочности наблюдаются протяженные

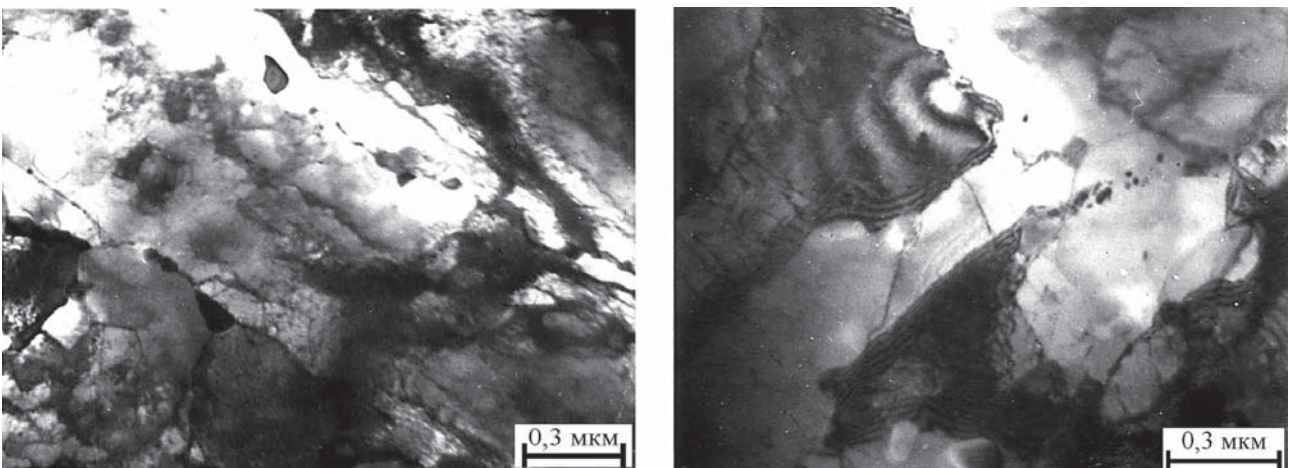


Рис.4 Структура корпусной стали 15X2NMФА после ползучести при $T=600\text{ K}$ и $\sigma \approx \sigma_B$

бездислокационные области, разграниченные высокоугловыми (до 30° разориентировки) границами (рис.4).

Таким образом, в процессе релаксации под медленно возрастающей нагрузкой, т.е. в условиях ползучести при 600 К и напряжениях ниже предела текучести, начинается перестройка исходной структуры, направленная на уменьшение внутренних напряжений. Микродеформации может осуществляться движением имеющихся дислокаций и зарождающихся на ранних стадиях новых дислокаций. Скольжение дислокаций инициируется их взаимодействием с точечными дефектами. Дислокации из-за малой скорости деформирования успевают образовать комплексы, в результате чего снижается их подвижность, т.е. уменьшается плотность подвижных дислокаций. В результате перераспределения дислокаций у препятствий в отдельных областях начинается формирование полигональных стенок. В местах больших локальных напряжений релаксация в процессе ползучести достигается за счет диффузионного перераспределения точечных дефектов [7,8].

Так, в результате ориентированного перераспределения дислокаций в определенных кристаллографических плоскостях наблюдалось образование полигональных стенок после деформации на малую степень аустенитной стали при 400°C [9] в условиях отпуска под нагрузкой.

При напряжениях выше предела текучести эта структура разрушается, что и обуславливает резкий всплеск величины мгновенной деформации. Это означает, что энергия сообщенная металлу оказалась больше энергии связи между дислокациями и точечными дефектами, которые перестали быть эффективными стопорами. Однако развития процесс скольжения не приобретает из-за большой плотности дефектов и границ раздела. При дальнейшем увеличении напряжения формируются новые дислокационные границы, более устойчивые к новым условиям деформирования.

Выводы

В процессе ползучести корпусной стали при напряжениях, незначительно превышающих предел текучести, наблюдается локальная область неоднородного пластического течения, что обусловлено кинетической неустойчивостью исходной структуры.

Перестройка этой структуры в процессе ползучести приводит к изменению характера пластического течения, а именно появлению скачкообразной деформации, особенно при напряжениях близких к пределу прочности.

1. Воеводин В.Н. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов / В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов // Киев: Наукова думка, 2006. С.376.
2. Платонов П.А. Действие ядерных излучений на материалы / П.А. Платонов // Москва: Изд-во АН СССР, 1962. С.258.
3. Дубинко В.И. Влияние высокоэнергетичного электронного облучения на неустойчивость пластического течения промышленного сплава Al-3%Mg / В.И. Дубинко, В.А. Кушнир, И.В. Ходак, В.П. Лебедев, В.С. Крыловский, С.В. Лебедев, В.Ф. Клепиков // Материалы 51 Международной Конференции «Актуальные проблемы прочности», 16-20 мая 2011г. Харьков, с.139.
4. Засимчук Е.Э. Механическая неустойчивость дислокационной ячеистой структуры / Е.Э. Засимчук, С.И. Селицер // Металлофизика, 1982, т.4, №6, с.75-80.
5. Аксенов В.К. Структурные и активационные характеристики ползучести никеля в интервале температур 4,2-140 К / В.К. Аксенов, И.А. Гиндин, В.П. Лебедев, Я.Д. Стародубов // ФНТ, 1980, т.6, №1, с.118-129.
6. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов / В.В. Рыбин // Москва: Металлургия. – 1986. – 224 с.
7. Гиндин И.А. Физика программного упрочнения / И.А. Гиндин, И.М. Неклюдов // Киев: Наукова думка, 1979. С.182.
8. Яковлева Т.Ю. Локализация пластической деформации и усталость металлов / Т.Ю.Яковлева // Киев, Наукова думка, 2003, с.236.
9. Гиндин И.А. Влияние программного нагружения на усталостную прочность аустенитной стали / И.А. Гиндин, И.М. Неклюдов, В.М. Нетесов // ФММ, 1971, 31, №6, с.1324-1328.