

МЕХАНИКА ДЕФОМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 621.165.532

Бельский С. Е., Пищов М. Н., Блохин А. В., Адель Р.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ С ПОВЕРХНОСТНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

В статье изучены изменения ряда физико-механических характеристик конструкционной стали при проведении усталостных испытаний. Испытания проводились в условиях знакопеременного изгиба с использованием частот нагружения 0,3; 3,0; 9,0 и 18,0 кГц на образцах прошедших поверхностное упрочнение боросилицированием. Показано, что микротвердость и плотность дислокаций исследованного материала на начальном этапе испытаний возрастают, что характеризует развитие процесса упрочнения материала, сменяющегося разупрочнением на заключительном этапе. Установлено, что поверхностное упрочнение принципиально не меняет особенности развития усталостной повреждаемости конструкционной стали в рассмотренном диапазоне частот испытаний.

Работа многих деталей машин и технологической оснастки характеризуется значительными циклическими нагрузками. Такие условия эксплуатации требуют обеспечения высоких усталостных характеристик материалов для их изготовления. В связи с тем, что усталостное выкрашивание развивается преимущественно в поверхностном слое, особо важным является правильное назначение и грамотный выбор процессов диффузионного упрочнения и оптимизация их температурно-временных параметров. Подобные исследования необходимы в связи с тем, что многие процессы химико-термической обработки наряду с существенным возрастанием микротвердости во многих случаях повышают микрохрупкость поверхностного слоя.

Большинство теоретических и экспериментальных исследований развития процесса усталостного разрушения выполнено без учета структурных и металлургических факторов, наличия упрочненных слоев и покрытий; тем самым затрудняется подбор оптимальных технологических параметров процессов поверхностного упрочнения. Недостаточно изучено влияние наиболее распространенных технологических процессов химико-термической обработки сталей (цементации, азотирования, борирования) на дислокационную структуру поверхностных слоев деталей из конструкционных сталей и ее трансформацию в ходе последующей эксплуатации. Исследования проводимые в этом направлении могут обеспечить совершенствование составов и режимов поверхностного упрочнения и, следовательно, повышение эксплуатационной долговечности изделий.

Экспериментальное определение усталостных характеристик различных конструкционных сталей проводились на разработанном в БГТУ комплексе испытательного оборудования [1–4]. Комплексные исследования по влиянию амплитудно-частотных и временных параметров нагружения на протекание процессов усталостного повреждения металлов и сплавов осуществлялись путем прослеживания за кинетикой таких структурно-чувствительных свойств материалов как микротвердость, плотность дислокаций, удельное электросопротивление.

Использование при испытаниях изгибных колебаний не только имитирует режим многих эксплуатационных нагрузок, но значительно повышает точность исследований

физико-механических характеристик благодаря наличию циклических напряжений различной величины, закономерно расположенных вдоль оси образца.

Изучение влияния частоты на кинетику процессов упрочнения-разупрочнения металлов и сплавов осуществлялось путем анализа изменений микротвердости исследуемых материалов в процессе циклического нагружения с различными амплитудами напряжений. Для этого предварительно определялась величина исходной микротвердости перед испытанием, а затем проводились измерения H_{μ} в зоне действия циклических напряжений выбранной величины.

Микротвердость материалов измеряли с помощью прибора ПМТ-3М и Duramin 5 (Struers, Дания) по стандартной методике (ГОСТ 9450-76) при нагрузке на индентор 0,49 Н, что позволяло проводить исследования для всей номенклатуры материалов с одинаковыми относительными ошибками измерений благодаря примерно одинаковым размерам диагоналей отпечатка. Наименьшее расстояние между уколами составляло не менее двух диагоналей.

Для изучения характера протекания процессов усталостного повреждения материалов на микроуровне при циклическом деформировании в широком диапазоне частот проводились исследования кинетики структурно-чувствительных характеристик с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3 и дифрактометра фирмы Bruker.

Из полученных результатов по влиянию амплитудно-частотных и временных параметров нагружения на кинетику физико-механических свойств исследованных материалов видно, что наиболее интенсивно изменения структурно-чувствительных характеристик для выбранных уровней переменных напряжений происходят при циклическом нагружении до 10^7 циклов. Так, например, увеличение микротвердости стали 25ХГТ прошедшей упрочнение боросилицированием (температура процесса 920 °С, время 2-5 часа) отмечалось уже после 10^5 циклов нагружения (рис. 1). Аналогичная склонность к упрочнению на начальном этапе испытаний отмечалась ранее и для стали 20Х13 [5]. Однако, при испытании сталей, прошедших поверхностное упрочнение уровень возрастания микротвердости ниже, а разброс экспериментальных значений значительно больше чем при использовании однородных образцов, что связано с особенностями структуры поверхностных слоев, прошедших диффузионное насыщение.

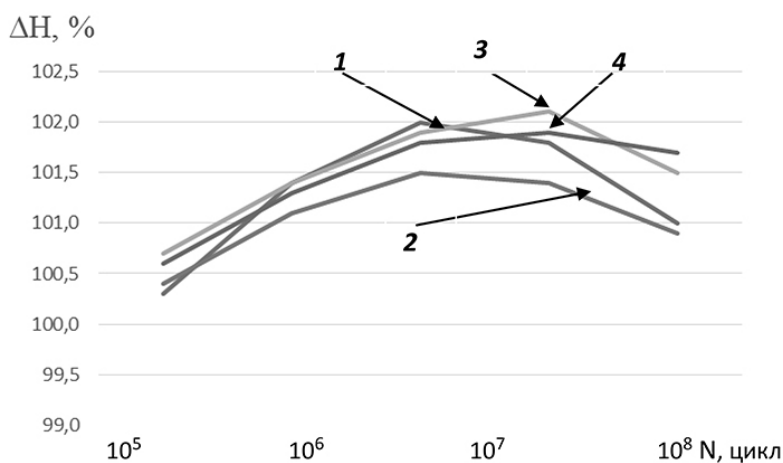


Рис. 1. Влияние частоты нагружения на изменение микротвердости стали 25ХГТ, прошедших поверхностное упрочнение (1 – 0,3 кГц; 2 – 3,0 кГц; 3 – 9,0 кГц; 4 – 18,0 кГц)

Для тонкой структуры исследованных материалов также характерно наиболее существенное изменение относительной плотности дислокаций в течение первых циклов нагружения. В дальнейшем, с наработкой циклов наступает насыщение, сменяющееся на стадии развития микротрещин постепенным переходом через экстремум (рис. 2).

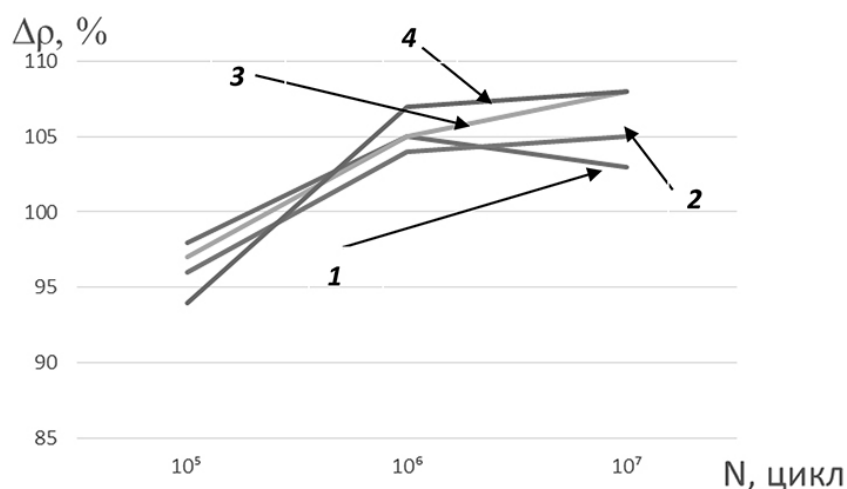


Рис. 2. Влияние частоты нагружения на изменение плотности дислокаций стали 25ХГТ, прошедших поверхностное упрочнение (1 – 0,3 кГц; 2 – 3,0 кГц; 3 – 9,0 кГц; 4 – 18,0 кГц)

Следует отметить, что в связи с высокой чувствительностью величины плотности дислокаций к действию циклических напряжений, процесс упрочнения протекает на базе до 10^6 циклов, и в последующем после $2 \cdot 10^6$ циклов преобладают процессы разупрочнения.

В трансформации физико-механических характеристик материалов просматриваются определенные закономерности. Плотность дислокаций на первой стадии испытаний возрастает на всех исследованных частотах, что свидетельствует о начале протекания процесса упрочнения материала.

В начальной стадии нагружения имеет место лишь колебательное перемещение сегментов закрепленных дислокаций около положения равновесия. Последующее наложение знакопеременных напряжений с высокой частотой полупериода колебаний приводит к активации имеющихся в материале дислокаций, подъему их из энергетических ям, способствует преодолению ими потенциальных барьеров и передвижению через препятствия, вызывая тем самым пластическую деформацию.

Продолжение циклического нагружения вызывает появление новых дефектов за счет действия источников дислокаций, активизированных в первые циклы нагружения, а также источников, возникающих за счет взаимодействия дислокаций, расположенных в соседних параллельных плоскостях скольжения. В результате этого существенно возрастает плотность дислокаций и точечных дефектов (междуузельных атомов и вакансий). При определенной концентрации дефектов, как дислокаций, так и вакансий, происходит их массовый срыв с препятствий, вызывая нарушение межатомных связей. Определяющим фактором при этом является увеличение плотности дислокаций с ростом числа циклов нагружения, что подтверждено проведенными рентгеноструктурными исследованиями (рис. 2). Рост плотности дислокаций объясняется не только поступательным движением раскрепленных дислокаций, но и их размножением преимущественно путем работы источников Франка-Рида [6; 7].

Прекращение возрастания плотности дислокаций связано с торможением действия источника их размножения напряжениями от испущенных ранее дислокаций. Также возможен процесс аннигиляции дислокаций противоположного знака, испускаемых в процессе циклического нагружения источниками, расположенными в параллельных атомных плоскостях. Повышение микротвердости связано с интенсивным пластическим деформированием микрообъемов материала. При этом в стенках дислокационных ячеек происхо-

дит зарождение и развитие субмикротрещин. По мере нарастания пластического деформирования материала развивается процесс разупрочнения, характеризующийся уменьшением плотности дислокаций, снижением уровня микронапряжений и микротвердости.

Отсутствие существенных качественных различий в характере развития дислокационной структуры при высоких и низких частотах нагружения приводит к аналогии кинетики изменений рассматриваемых величин в исследованном диапазоне частот. Очевидно, что с увеличением частоты происходит возрастание скорости деформации металлов при одном и том же числе циклов нагружения. Тем самым релаксационные процессы, играющие существенную роль при статическом нагружении, с ростом частоты нагружения замедляются.

Пропорционально частоте нагружения увеличивается и количество циклов до начала протекания процесса разупрочнения. Увеличение частоты, приводящее к повышению скорости упругой деформации, способствует и росту скорости движения дислокаций; при этом повышается эффективность их размножения. Кроме того, с повышением частоты увеличивается и количество вакансий, возникает их исключительно высокая концентрация, в результате чего происходит конденсация их в диски, параллельные наиболее плотно упакованным плоскостям. При достижении некоторого критического размера диска его стороны сплющиваются и соединяются вместе, образуя дислокационную петлю [6]. Все это приводит к упрочнению, в результате чего повышается плотность дислокаций и микротвердость.

Проведенные исследования показали, что, несмотря на определенные количественные различия кинетики физико-механических характеристик рассматриваемых материалов, процесс усталостного разрушения у них развивается по одним и тем же закономерностям, характеризуясь сочетанием процессов упрочнения-разупрочнения. Это подтверждает единую физическую природу развития усталостной повреждаемости в рассмотренном диапазоне частот и следовательно принципиальную возможность реализации ускоренных усталостных испытаний с использованием высоких частот нагружения и для сталей с поверхностным упрочнением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блохин А. В., Царук Ф. Ф., Гайдук Н. А. Комплекс оборудования для усталостных испытаний элементов технологического оборудования // Труды БГТУ. – Серия П. – Мн., 2002. – Вып. X. – С. 213–215.
2. Блохин А. В. Развитие комплекса оборудования для усталостных испытаний конструкционных материалов // Труды БГТУ. – Серия П. – Мн., 2004. – Вып. XII. – С. 263–267.
3. Капсаров А. Г., Бельский С. Е., Чигринова Н. М. Особенности расчета элементов испытательного оборудования для получения сложного напряженного состояния в широком диапазоне частот // Современные методы проектирования и машин: Труды II Межд. конференции. – Мн., 2004. – Т. 4. – С. 242–245.
4. Коновалов Е. Г., Дроздов В. М., Тявловский М. Д. Динамическая прочность металлов. – Минск : наука и техника, 1969. – 299 с.
5. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / под ред. Кузьменко В. А. – Киев: Наукова думка, 1979. – С. 335.
6. О влиянии сил вязкости на движение дислокационного сегмента и распространение упругих колебаний в металлах / В. Р. Соболев, О. Н. Мазуренко, П. Н. Логвинович, С. Е. Бельский, А. В. Блохин // Доклады национальной академии наук Беларуси. – 2007. – Т. 51, № 3. – С. 121–124.
7. Температурные механизмы взаимодействия дислокаций с примесями в процессах передачи энергии упругих колебаний / В. Р. Соболев, П. Н. Логвинович, С. Е. Бельский, А. В. Блохин // Инженерно-физический журнал. – 2007. – Т. 80, № 4. – С. 193–199.

Поступила 02.11.2023