

С.Е. Бельский, доц., канд. техн. наук; Адель Рашид;
М.Н. Пищов, доц., канд. техн. наук;
А.В. Блохин, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРОЧНЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Повышение усталостных характеристик упрочненных материалов требует проведения комплексных исследований влияния параметров нагружения на развитие процессов усталостного повреждения.

Для реализации данной цели осуществлено изучение кинетики изменений таких структурно-чувствительных свойств материалов как микротвердость и плотность дислокаций. Усталостные испытания проводились на оборудовании и по методикам, приведенным в работах [1-4].

Использование для испытаний изгибных колебаний не только имитирует режим 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 развития усталостной повреждаемости материалов осуществлялось путем прослеживания за изменением 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 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 штамповой стали 5 ХНМ прошедшей упрочнение боросилицированием (температура процесса 920°C , время 2–5 часа) отличалась уже после 10^5 циклов нагружения при различных частотах испытаний и различном уровне циклических напряжений (рис. 2). 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. 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. 3).

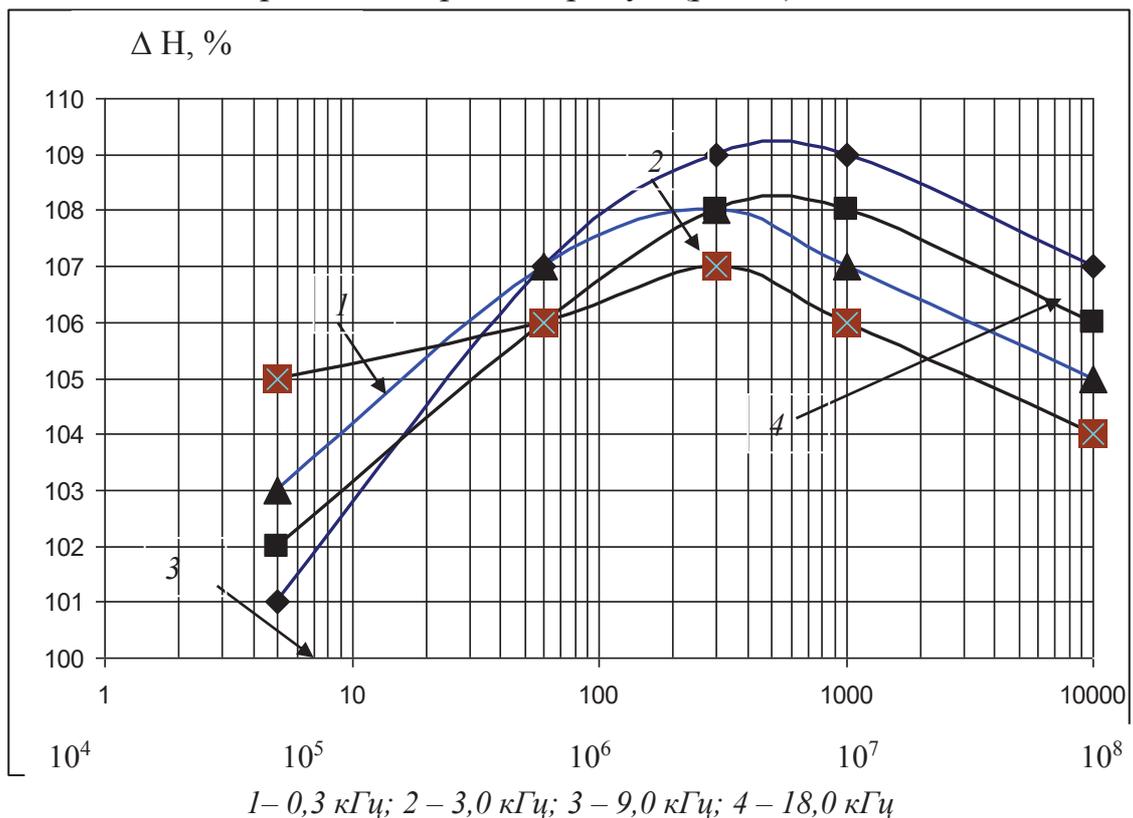
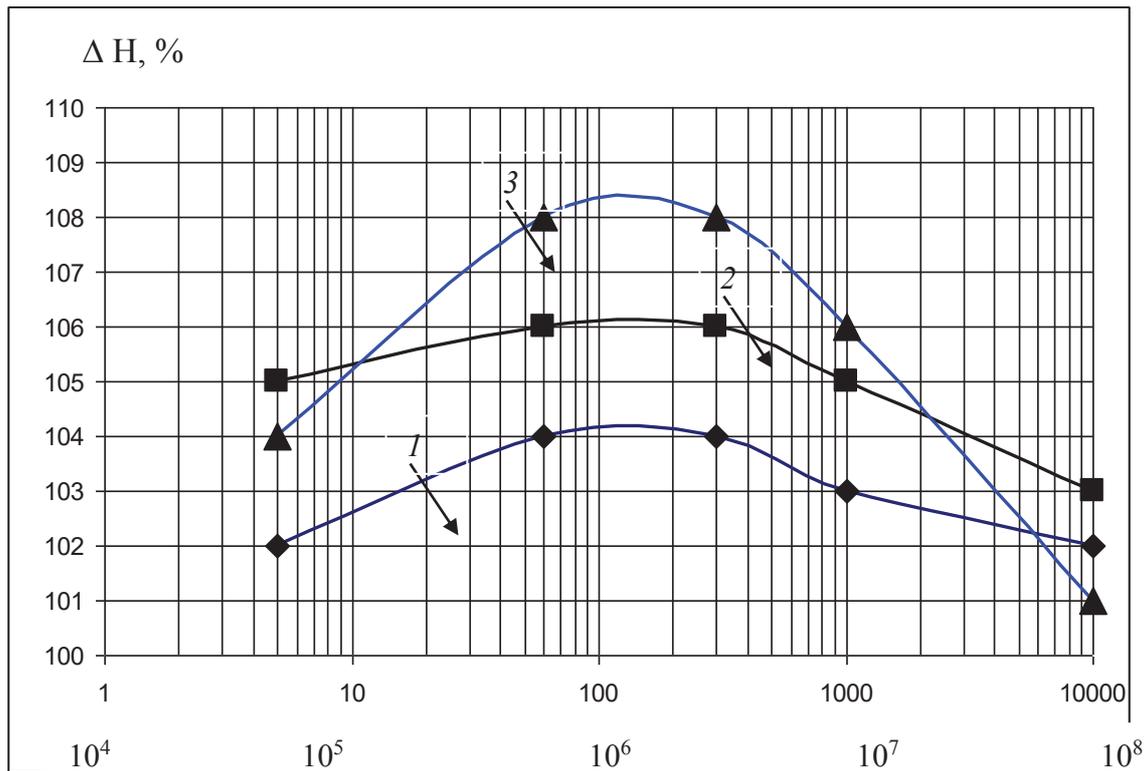


Рисунок 1 – Влияние частоты знакопеременного изгиба на кинетику микротвердости стали 5ХНМ



1 – 346 МПа; 2 – 254 МПа; 3 – 135 МПа

Рисунок 2 – Влияние величины циклических напряжений знакопеременного изгиба на кинетику микротвердости стали 5ХНМ

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. При циклическом деформировании происходит упрочнение материалов на начальных этапах нагружения, что находит свое отражение в повышении микротвердости, увеличении плотности дислокаций и микронапряжений. Затем наступает стадия насыщения, сменяемая на больших базах испытаний стадией разупрочнения, характеризующейся падением значений вышеперечисленных характеристик.

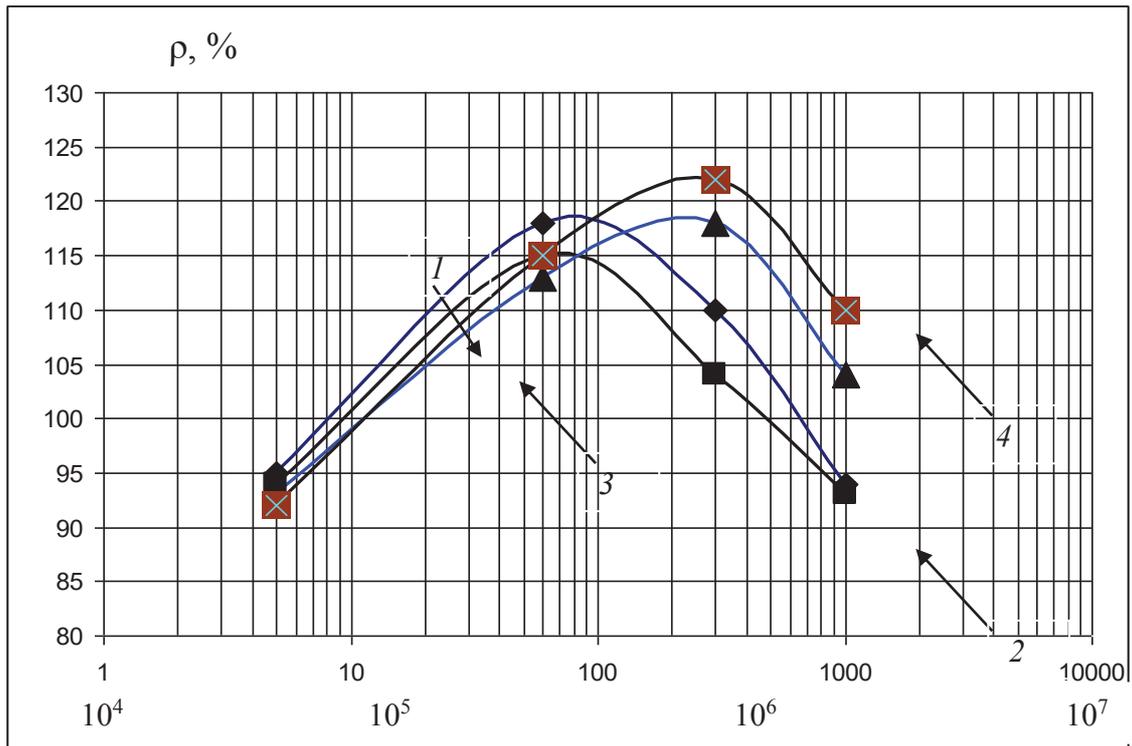
Плотность дислокаций на первой стадии испытаний возрастает на всех исследованных частотах, что свидетельствует о начале протекания процесса упрочнения материала. В начальной стадии нагружения имеет место лишь колебательное перемещение сегментов закрепленных дислокаций около положения равновесия.

Последующее наложение знакопеременных напряжений с высокой частотой полупериода колебаний приводит к активации имею-

щихся в материале дислокаций, подъему их из энергетических ям, способствует преодолению ими потенциальных барьеров и передвижению через препятствия, вызывая тем самым пластическую деформацию.

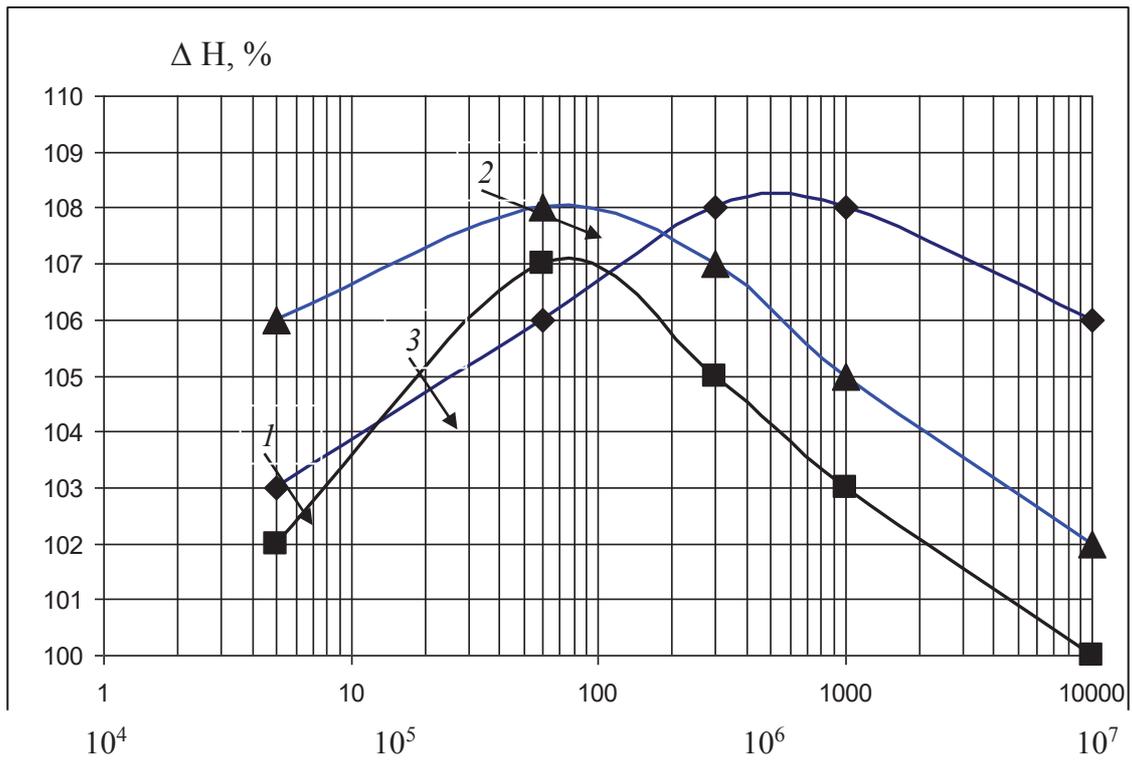
Продолжение циклического нагружения вызывает появление новых дефектов за счет действия источников дислокаций, активизированных в первые циклы нагружения, а также источников, возникающих за счет взаимодействия за счет взаимодействия дислокаций, расположенных в соседних параллельных плоскостях скольжения.

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. 3).



1 – 0,3 кГц; 2 – 3,0 кГц; 3 – 9,0 кГц; 4 – 18 кГц

Рисунок 3 – Влияние частоты знакопеременного изгиба на кинетику плотности дислокаций стали 5ХНМ



1 – 20 °C; 2 – 200 °C; 3 – 300 °C

Рисунок 4 – Изменение микротвердости стали 5ХНМ при различных температурах испытаний (частота нагружения 18,0 кГц)

Рост плотности дислокаций объясняется не только поступательным движением раскрепленных дислокаций, но и их размножением преимущественно путем работы источников Франка–Рида.

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. По мере нарастания пластического деформирования материала развивается процесс разупрочнения, характеризующийся уменьшением плотности дислокаций, снижением уровня микронапряжений и микротвердости. Отсутствие существенных различий в характере развития дислокационной структуры при высоких и низких частотах нагружения приводит к аналогии кинетики изменений рассматриваемых величин в исследованном диапазоне частот (см. рис. 3).

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 нагру-

жения 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.

Следует отметить, что подобные зависимости характерны и для повышенных температур испытаний штамповой стали 5ХНМ (рисунок 4). Повышение температуры способствует более раннему протеканию процессов упрочнения–разупрочнения в связи с активацией взаимодействия дислокаций и точечных дефектов, а также передвижения дислокаций.

Приведенные 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.

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.Х. – С.213–215.

2. Блохин А.В. Развитие комплекса оборудования для усталостных испытаний конструкционных материалов //Труды БГТУ, серия П. – Мн.,2004. Вып.ХII.– 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 машин: Труды II Межд. конференции. – Мн., 2004. – Т.4. – С.242–245.

4. Блохин, А.В. Электросопротивление как структурно–чувствительная характеристика при усталостных испытаниях металлических конструкционных материалов / А.В.Блохин, С.Е. Бельский //Труды БГТУ. Серия П 2 Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2006. – Вып. XIV. – С.248–250.