

В.Р. Соболев, д-р техн. наук;
А.В. Блохин, доц., канд. техн. наук;
М.Н. Пищов, доц., канд. техн. наук;
С.Е. Бельский, доц., канд. техн. наук, (БГТУ, г. Минск);
Адель Рашид (Ливан)

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССА УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Многими исследованиями усталостного разрушения деталей установлено, что после образования пластических деформаций в локальном объеме образуются микротрещины, развитие которых зависит от величины и знака остаточных напряжений. Так, остаточные напряжения растяжения в ходе длительного воздействия на микротрещины вызывают их увеличение до критических значений, при которых резко снижается прочность и износостойкость деталей, что в итоге приводит к разрушению.

В ряде работ показано, что остаточные напряжения сжатия существенно замедляют рост образования усталостных трещин. Таким образом, остаточные напряжения сжатия в области локальных пластических деформаций будут замедлять процессы разрушения, протекающие, как правило, с образованием остаточных напряжений растяжения. С учетом остаточных напряжений сжатия можно оценивать предельные размеры, а также скорость развития усталостных трещин, а, следовательно, и долговечность всей детали в целом.

В ходе исследований на примере поверхностного упрочнения конструкционных сталей комплексным борированием было изучено влияние составов смеси, а также температурно-временных параметров процессов упрочнения на распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя. Определялся как уровень остаточных напряжений, так и их знак.

На рис. 1 представлены графики распределения остаточных напряжений сжатия по глубине упрочненных боросилицированием слоев при различных температурных параметрах процесса ХТО. Из графиков видно, что в результате изменения удельных объемов при фазовых превращениях, различных коэффициентов линейного расширения материалов упрочненного слоя и основы металла возникают остаточные напряжения сжатия с большим градиентом по глубине поверхностного слоя, величина которого зависит от режима ХТО.

Наибольших значений остаточные напряжения сжатия достигают при проведении боросилицирования с температурой насыщения 1020 °С. Для всех температурных параметров поверхностного упрочнения максимальных значений остаточные напряжения достигают на поверхности образцов и уменьшаются при переходе к основе металла. При этом важно, чтобы переход к основе металла осуществлялся без каких-либо скачков уровня остаточных напряжений сжатия. Для оценки влияния напряжений сжатия в поверхностном слое на усталостные характеристики материалов предпринята попытка теоретического анализа частотной зависимости эволюции элементов дислокационной структуры на первом этапе развития процесса усталостной повреждаемости. Рассмотрена динамика развития дефектов структуры дислокационным источником Франка-Рида в условиях циклического нагружения и напряжений сжатия. Выбор данного источника дислокаций обусловлен не только изученностью этой модели, но и его вкладом в механизм размножения дислокаций.

При оценке движения источника Франка-Рида необходимо: проанализировать влияние частоты и асимметрии цикла знакопеременного циклического напряжения на движение дислокационного сегмента, особенно в процессе «срабатывания» источника при достижении критической дислокации от амплитудного значения знакопеременного напряжения в широком спектре частот.

При дополнительных напряжениях сжатия возмущающая сила по модели Келера дополняется статическим напряжением, как следствием статической нагрузки. Для упрощения исходной схемы нагружения принято, что плоскость напряжений сжатия совпадает с плоскостью знакопеременного циклического напряжения.

Уравнение, моделирующее анализируемый процесс, представим в форме (1).

$$A \frac{\partial^2 \xi}{dt^2} + B \frac{\partial^2 \xi}{dt^2} + C \frac{\partial^2 \xi}{dt^2} = b \sigma \sin \omega t - b \sigma_1 \quad (1)$$

где A – эффективная масса на единицу длины, $A = \rho b^2 / \pi$; w – частота нагружения, Гц; ρ – плотность материалов, г/см³; b – вектор Бюргера, см; B – коэффициент, определяющий силу динамического вязкого трения (г/см); C – коэффициент, определяющий величину силы на единицу длины, обусловленную натяжением изогнутой дислокации; $b\sigma$ – знакопеременная сила (ее амплитуда), действующая на единицу длины за счет внешнего сдвигового напряжения; σ – амплитуда внешнего напряжения, дин/см²; G – упругий модуль сдвига среды, дин/см²; μ – коэффициент Пуассона; $b\sigma_1$ – статическая сила на еди-

ницу длины, обусловленная поверхностными напряжениями сжатия; σ_1 – величина статического сдвигового напряжения, дин/см².

Цель теоретического анализа заключается в определении смещения дислокаций $\xi = f(\rho, G, b, \sigma_1, \sigma, \omega, B)$, а затем при фиксированном ξ в определении σ как функции всех остальных параметров (σ_1, ω, G и т. д.). Это позволит определить пороговое напряжение срабатывания источника Франка-Рида в присутствии знакопеременного нагружения образца и поверхностных напряжений сжатия.

Решение уравнений позволяет определить критические напряжения σ начала развития процесса усталостного разрушения

$$\sigma = \left[\langle \xi \rangle + \frac{\pi \sigma_1 l^2}{2Gb^3} (1 - \mu l^2) \right] \left[\frac{1 + \frac{\omega^2 B^2 l^4}{4G^2 b^4}}{\pi(1 - \mu) l^2} Gb \right] \left[1 + \frac{2\pi B l^2}{Gb^2} \right] \quad (2)$$

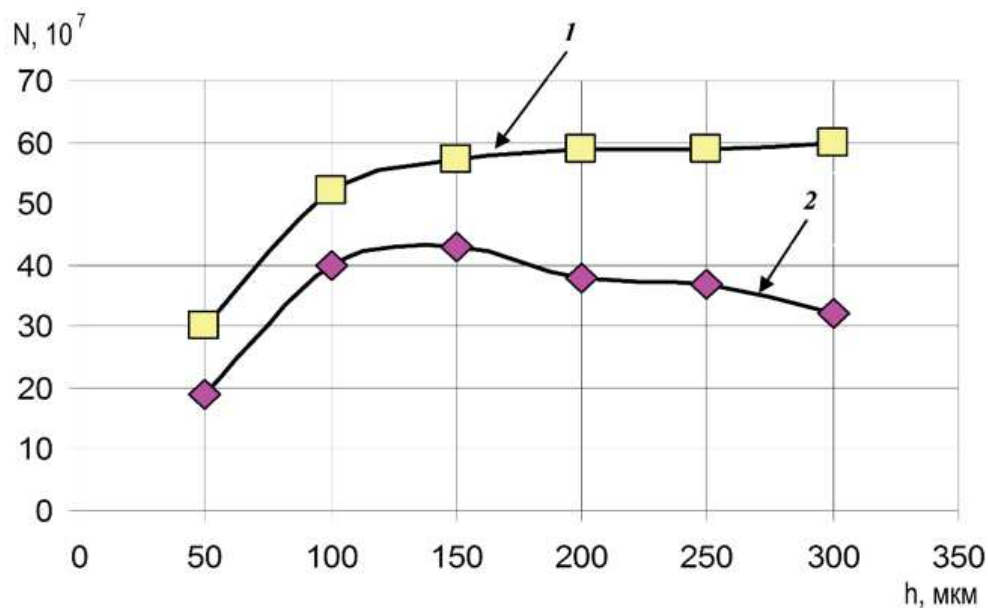
Напряжение, превышающее критическое «пороговое» сопряжено с образованием характерной ячеистой структуры, уменьшением размеров блоков и ростом микротвердости отожженных материалов уже на ранних стадиях нагружения. В этом процессе поверхностные напряжения на каждом уровне нагружения «определяют» свое семейство пороговых напряжений.

Очевидно, что с возрастанием поверхностных напряжений сжатия возрастает величина критических напряжений σ . В большей степени частотная зависимость и влияние дополнительных напряжений выражена у сталей (например, таких как 10 и 40Х), то есть у материалов с решеткой ОЦК. При значительно меньших по модулю напряжениях накопление повреждаемости наблюдается у меди М1 и сплава Д16, обладающих гранцентрированной решеткой.

Для экспериментальной проверки влияния напряжений сжатия, обеспечиваемых поверхностным упрочнением, проведены сравнительные испытания образцов из стали 20ХН3А, прошедших боросилицирование и борирование, в условиях знакопеременного изгиба при температуре 20оС на частоте 18,0 кГц в условиях резонансного нагружения. Нагружение всех образцов проводилось до появления усталостной трещины заданного размера, возникновение которой оценивали по падению резонансной частоты колебаний.

Результаты усталостных испытаний (рисунок 2) показывают, что при циклическом нагружении образцы, упрочненные борированием и боросилицированием, имеют различную способность к сопротивлению усталостному разрушению. Объясняется это в первую очередь неодинаковой чувствительностью материалов покрытий к дисло-

кационному скольжению, а также различным распределением в слое остаточных напряжений сжатия.



1 – боросилицирование (25 % Si); 2 – борирование

Рисунок 1 – Влияние толщины упрочненного слоя на усталостную прочность стали 20ХНЗА

Результаты испытаний позволили установить повышение предела выносливости $\sigma-1$ боросилицированных образцов (содержание Si от 20 %) по сравнению с борированными в 1,4–1,6 раза при меньшем разбросе долговечности благодаря более однородной структуре упрочненного слоя. Повышение усталостных характеристик при боросилицировании связано в основном с образованием в упрочненном слое остаточных напряжений сжатия, которые замедляют образование усталостной трещины. Снижение усталостных характеристик при борировании, отмечаемое при увеличении толщины упрочненного слоя, связано с высокой хрупкостью упрочненного данным методом диффузионного слоя.