

## ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 16ГС В УСЛОВИЯХ УСТАЛОСТНОГО НАГРУЖЕНИЯ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОСТИМУЛИРОВАНИЯ

С. В. Коновалов, С. Н. Горлова, О. В. Соснин, В. В. Целлермаер, В. Е. Громов

*Сибирский Государственный Индустриальный Университет  
654007, Новокузнецк, ул. Кирова, д.42, Кафедра физики  
e-mail: step@sibgiu.kemerovo.su*

В статье проведено исследование физико-механических свойств стали 16ГС, подвергнутой малоцикловой усталости с обработкой мощными импульсами электрического тока ( $j = 80 \text{ MA/m}^2$ ,  $f = 70 \text{ Гц}$ ). Установлено, что при электростимулировании образцов в области резкого спада кривой скорости ультразвука от числа циклов происходит увеличение усталостного ресурса до 74%. Исследовано изменение скорости ультразвука, макронапряжений и изменение распределения зерен по размерам на всем этапе нагружения, а также после обработки электрическими импульсами.

Эксплуатация в режиме как многоцикловой так и малоцикловой усталости является основной для большинства технологического оборудования. Поэтому проблема выявления и отдаления того момента, когда необходимо завершить эксплуатацию данного оборудования является достаточно актуальной.

Проблема выявления дефектов в изделии без прекращения его работы решена с помощью методов измерений скорости ультразвука [1], зависимость которой от числа циклов нагружения ( $\nu/N$ ) является трехстадийной, с резким спадом в области, предшествующей разрушению образца.

В свою очередь увеличение ресурса изделий, работающих в режиме усталостного нагружения, достигается с помощью обработки изделий импульсами электрического тока большой частоты. Эффект может достигать 35% (таблица 1). Такое воздействие сопровождается возрастанием скорости ультразвука.

Т а б л и ц а 1. Увеличение ресурса деталей после электростимулирования.

Марка стали	% увеличения ресурса
40	35.7
40X	20.1-20.9
70ХГСА (М76)	26.3-29.3
08Х18Н10Т	22.9-24.3

Одной из причин эффекта является локальный разогрев металла в областях микроповреждений, в результате чего происходит релаксация напряжений и залечивание микротрещин, образовавшихся в процессе нагружения [2]. Однако до сих пор влияние эффекта электростимуляции на физико-механические свойства металла

подробно не изучено. В частности, очень мало данных о том, как влияет электростимулирование (ЭС) на изменение внутренних напряжений и микроструктуры в процессе малоциклового нагружения.

В связи с этим в работе исследованы изменения физико-механических свойств в низкоуглеродистой стали 16ГС в процессе малоциклового усталости, которые проведены с образцами в состоянии поставки и подвергнутыми разным видам термообработки. А именно – после нормализации ( $950^{\circ}\text{C}$ ) (одна партия) и нормализации ( $950^{\circ}\text{C}$ ) с высоким отпуском ( $650^{\circ}\text{C}$ ) (другая партия).

Эксперимент заключался в нагружении образцов (с концентратором напряжений в виде полукруглого выреза) консольным изгибом (амплитуда напряжения  $\sim 80$  МПа, частота  $\sim 8$  Гц.) Испытания проводились с образцами всех видов термообработки на всей зависимости скорости ультразвука  $v$  от числа циклов нагружения  $N$ . Особое внимание уделялось точкам, находящимся на каждой из трех стадий кривой скорости ультразвука от числа циклов нагружения  $v(N)$ , а именно: 0, 1000, 3000, 5000 и 6000 циклов. В этих точках часть образцов подвергалась действию электрических импульсов ( $j = 80$  МА/м<sup>2</sup>,  $f = 70$  Гц,  $t = 30$  с.), после чего испытание продолжалось до окончательного разрушения образца.

В результате измерений скорости ультразвука, которая фиксировалась ультразвуковым методом автоциркуляции импульсов с помощью прибора ИСП-11, выявлена взаимосвязь повышения скорости ультразвука и режимов термообработки. Так, на всех рассмотренных точках наблюдается увеличение скорости ультразвука при нормализации в среднем на 6 м/с по сравнению с аналогичными измерениями у образцов в состоянии поставки. Для образцов, подвергнутых и нормализации и отпуску наблюдается уменьшение соответственно на 3,4 м/с (по сравнению со скоростью ультразвука у образцов в состоянии поставки).

Число циклов до разрушения составляло – 9290, 8540 и 7360 циклов для образцов в состоянии поставки, нормализованных и отпущенных соответственно.

Образцы всех стадий термообработки, подвергнутые электростимулированию, после дальнейшего нагружения до разрушения выдерживают разное количество циклов. В результате ЭС происходит увеличение числа циклов до разрушения в среднем на 34 %. Наибольшее увеличение наблюдается для нормализованных образцов, простимулированных после 5000 циклов нагружения. Образцы данного вида термообработки после ЭС разрушались после 10000 циклов нагружения. Такое значительное отличие от данных, приведенных в таблице 1, по-видимому, связано с режимами термообработки. При ЭС нормализованных образцов во всех остальных точках значительного увеличения числа циклов до разрушения не установлено.

Измерения скорости ультразвука показали, что происходит увеличение скорости после ЭС в среднем на 14,8 м/с. Также установлена корреляция между скоростью распространения ультразвука в образцах и значениями внутренних напряжений, возникающих в металле в результате малоциклового усталости, которые определялись методами рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-4 на излучении  $\text{Co K}_{\alpha}$ . Значения  $(\sigma_1 + \sigma_2)$  для нормализованных образцов, не обработанных импульсами электрического тока, меньше, чем в состоянии поставки в среднем на 67 %.

Из анализа влияния ЭС на свойства образцов разных стадий термообработки, следует, что для всех рассмотренных циклов нагружения наблюдается увеличение скорости ультразвука после обработки электрическими импульсами образцов независимо от вида термообработки и соответствующее уменьшение напряжений

I рода. Увеличение после ЭС скорости ультразвука в среднем на 14,8 м/с сопровождается уменьшением  $\sigma_1 + \sigma_2$  на 250 МПа.

Т а б л и ц а 2. Сравнительные характеристики свойств нормализованной стали 16ГС при электростимуляции при  $N = 5000$

Параметр	До ЭС	После ЭС	Отношение показателей
$v$ , м/с	$2660,6 \pm 0,8$	$2677,2 \pm 1,1$	1,0006
$\sigma_1 + \sigma_2$ , МПа	754	419	0,56
$d_{cp}$ , мкм	$18,9 \pm 1,3$	$21,2 \pm 1,2$	1,12

В результате проведения микроскопических исследований нормализованных образцов на микроскопе Неофот 21 установлено, что структура низкоуглеродистой стали 16ГС, состоящей из перлита и феррита, в процессе малоциклового нагружения не изменяется. Наблюдается увеличение среднего размера зерен от 17,9 до 28,5 мкм при нагружении до 3000 циклов. При дальнейшем нагружении происходит уменьшение среднего размера зерен от 28,5 до 20,2 мкм. Электростимулирование в указанных точках изменяет средний размер зерен. Так средний размер зерен для образцов после 3000 циклов в результате электростимулирования уменьшается от 28,5 до 25,3 мкм, а после 5000 циклов – увеличивается от 18,9 до 21,2 мкм. Установлен сдвиг распределения частиц по размерам в сторону уменьшения размера частиц. Так, если образец до стимулирования содержал частицы феррита максимального размерного типа  $d > 27,5$  мкм в количестве 13 %, то после – уже 3 %. По-видимому, данные результаты свидетельствуют о том, что процесс обработки электрическими импульсами сопровождается протеканием в приповерхностных слоях стали 16ГС процессов рекристаллизации. Однако, они носят незавершенный характер. В большинстве случаев границы зерен искривлены, что указывает на их неустойчивое (неравновесное) состояние.

### Список литературы

1. Иванова В. С. Усталостное разрушение металлов. – Москва: Металлургиздат, 1963, 272с.
2. Зуев Л. Б., Чиракадзе Д. З., Соснин О. В., Громов В. Е., Трусова Г. В. // Металлофизика и новейшие технологии. – 1997. – том 19. – С.80-84.
3. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1994. - №4. – С.103-106.
4. Громов В. Е., Зуев Л. Б., Козлов Э. В., Целлермаер В. Я. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов. – Москва: Недра, 1996, 280с.
5. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И. // Пробл. прочности. – 1995. - №5/6. – С.74-78.
6. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. – Новосибирск: Наука, 1996, 280с.