

УДК: 539.388.1; 620.199

К. В. Вакуленко, канд. техн. наук

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
(г. Харьков, e-mail: matsevlad@ipmach.kharkov.ua)

ОСОБЕННОСТИ РАЗОГРЕВАНИЯ СТАЛИ ШХ15 ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Проведен анализ характера нагревания образцов из стали ШХ15 при высокочастотном циклическом нагружении. Обнаружен немонотонный характер нагревания. Установлено, что рост температуры зависит как от повышения амплитуды нагружения, так и от увеличения времени испытаний, и происходит быстро с почти постоянной скоростью. Высказано предположение о связи особенностей нагревания стали с повышенной концентрацией углерода.

Проведено аналіз характеру нагрівання зразків зі сталі ШХ15 при високочастотному циклічному навантаженні. Виявлено немонотонний характер нагрівання. Встановлено, що зростання температури залежить як від підвищення амплітуди навантаження, так і від збільшення часу випробувань, і відбувається швидко з майже сталою швидкістю. Висловлено припущення про зв'язок особливостей нагрівання сталі з підвищеною концентрацією вуглецю.

Введение

Циклическое нагружение металлов с высокой частотой нередко сопровождается большими тепловыделениями, что связывают с механическим гистерезисом. Он обусловлен рассеянием подводимой к образцу механической энергии, которое происходит на дефектах кристаллической решетки (точечных, линейных и объемных). Чем выше пластичность металла, тем сильнее проявляется гистерезис. Его можно понимать как внутреннее трение в металле, связанное с элементами пластической деформации, осуществляемое движением дислокаций. При усталостных испытаниях на обычных частотах (1–10 Гц) тепловыделения в связи с гистерезисом невелики, нагрев может составлять 10–20°С. При увеличении частоты до 300 Гц и выше интенсивность тепловыделения, естественно, возрастает и создается возможность достаточно быстрого нагрева усталостного образца до нескольких сотен градусов и более, вплоть до плавления.

Принципиально, кроме гистерезисных потерь, при механическом нагружении металла (особенно при импульсном или ударном нагружении, что характерно для частот 300–400 Гц), возможны разрывы межатомных связей, энергия которых также рассеивается в объеме металла и повышает его температуру. Важно заметить, что по причине поверхностной локализации деформации и накопления усталостных повреждений нагревается, главным образом, поверхностный объем образца, откуда теплота распространяется вглубь металла и дальше вдоль оси образца – к его захватам. Поэтому температура поверхности – это не истинная температура в образце, где имеет место градиент температур, а некоторая эффективная температура, отражающая состояние поверхностного слоя.

Нами было показано [1], что эффект разогрева образцов при циклических испытаниях может быть использован как самостоятельный фактор, позволяющий по поведению температуры поверхности образца при испытаниях в конкретных условиях нагружения судить о накоплении в металле усталостных повреждений. Высказано предположение, что под накоплением усталостных повреждений следует понимать накопление разорванных межатомных связей, которое происходит в порах, субмикротрещинах и других дефектах, снижающих плотность металла.

Также из литературных источников известно, что различные металлы при усталостных испытаниях нагреваются с различной скоростью [2].

Методика испытаний

Для подтверждения высказанных предположений были проведены испытания круглых образцов из отожженной стали ШХ15, заключающиеся в их циклическом растяжении-сжатии с резонансной частотой 450 Гц на вибростенде ВДЭС-400 (рис. 1).

Перед проведением испытаний для получения заданных амплитуд нагружений проводилась тарировка стенда. Для этого приводили в соответствие показания деформаций тарировочной балки и ускорения, измеренные датчиком на вибростенде. Выполняли тарировку следующим образом. Сначала задавался прогиб тарировочной балки 1,5 мм, что соответствует деформации 900 единиц относительной деформации (ЕОД) и напряжениям 189 МПа. Измеряли разбалансировку моста при помощи тензометрической станции и цифрового вольтметра, включенного на постоянный режим. Затем балку разгружали. Задавали ряд ускорений на вибростенде и измеряли напряжение разбалансировки при помощи цифрового вольтметра, включенного на переменный режим. Далее находили соответствие между статическим прогибом балки и динамическим нагружением образца и составляли таблицу соответствия амплитуд нагружения образца ускорениям вибростенда. Для измерения температуры поверхности во время испытаний применялся инфракрасный термометр MS6540B с погрешностью измерений $\pm 1,5\%$.



Рис. 1. Образец, подготовленный к испытаниям

Результаты и их обсуждение

Были проведены серии экспериментов по двум схемам.

Первая схема представляла собой нагружение образцов в течение 10^4 циклов при разных значениях амплитуды нагружения σ_a с фиксацией достигнутой к этому моменту максимальной температуры их поверхности. Полученная в результате зависимость максимальной температуры поверхности образцов от амплитуды нагружения (рис. 2) показывает, что до 180 МПа температура поверхности практически не изменяется. Когда σ_a достигает значения 180 МПа, начинается плавный рост температуры, затем скорость ее роста увеличивается и при $\sigma_a = 260$ МПа происходит резкий температурный скачок. Образец при этом разрушается хрупко (рис. 3).

Разрушение образца представляет собой типичную картину усталостного излома, вызванного циклическим растяжением-сжатием [3]. При

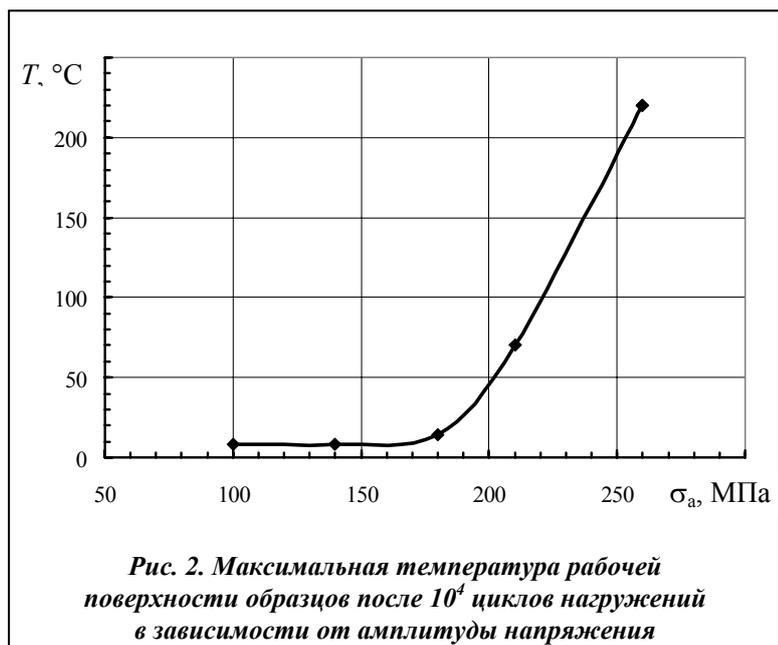


Рис. 2. Максимальная температура рабочей поверхности образцов после 10^4 циклов нагружений в зависимости от амплитуды напряжения



Рис. 3. Образец после испытаний при амплитуде $\sigma_a = 260$ МПа

рассмотрении поверхности излома на ней можно различить зону зарождения разрушения, зону распространения усталости и зону долома.

На рис. 4 представлены значения температуры поверхности в зависимости от времени нагружения для образца, испытанного при $\sigma_a = 260$ МПа.

Видно, что в течение первых 1,5 минуты от момента нагружения температура образца практически не изменяется, затем в течение следующей минуты растет с постоянной скоростью и после достижения 2,5 минут происходит ее резкое возрастание, сопровождающееся разрушением образца.

По второй схеме испытания проводили при конкретном значении амплитуды нагружения до того момента, когда температура образца достигала 70°C , и фиксировали время нагрева, после чего стенд выключали. Далее следили за снижением температуры образца при его остывании до комнатной температуры (13°C), после чего стенд снова включали. Описанный цикл повторяли несколько раз.

На рис. 5 представлены четыре из проведенных таким образом циклов нагружения и разгрузки при $\sigma_a = 210$ МПа. Из рис. 5 следует, что кривые изменения температуры поверхности образца при нагреве (левая ветвь) и охлаждении (правая ветвь) для всех представленных циклов нагружения подобны. Однако следует отметить, что время подъема температуры до 70°C с каждым последующим циклом уменьшается. Если при первом нагружении оно составляло 546 с, то при втором 332 с, при третьем 200 с, а при четвертом уже 122 с. Следовательно, время подъема температуры при повторном нагружении уменьшается сильно, а при последующих нагружениях продолжает уменьшаться, но уже медленнее.

Что касается времени охлаждения образца до комнатной температуры после выключения нагрузки, то оно приблизительно одинаково.

В описанном эксперименте температура 70°C выбрана, с одной стороны, достаточно высокой для того, чтобы за одно включение стенда можно было бы набрать заметное коли-

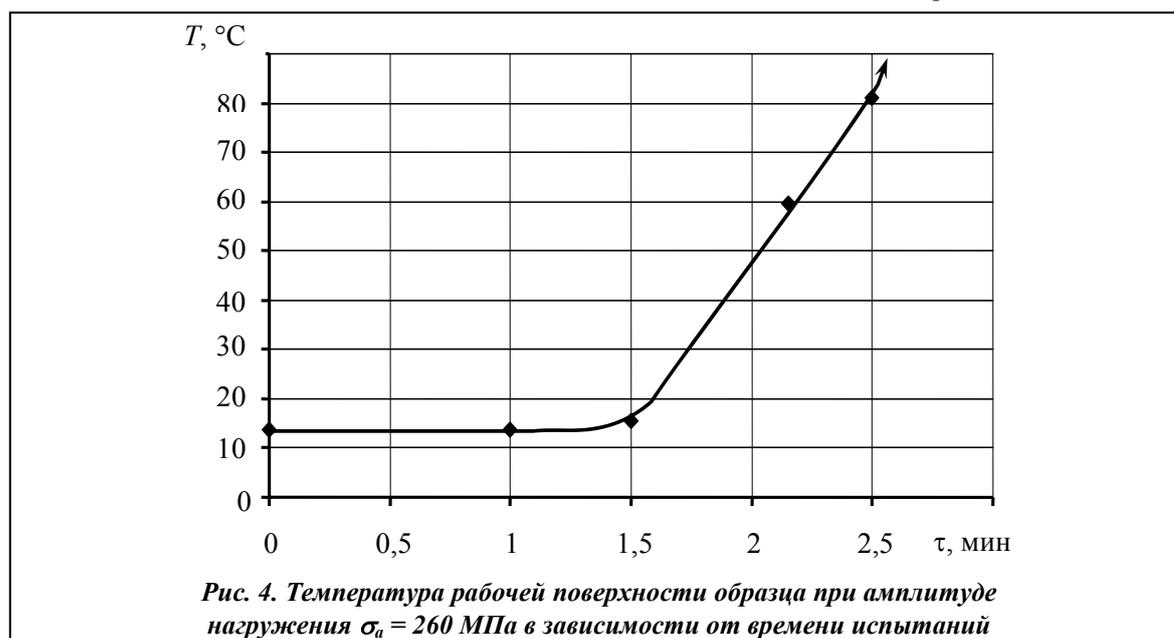
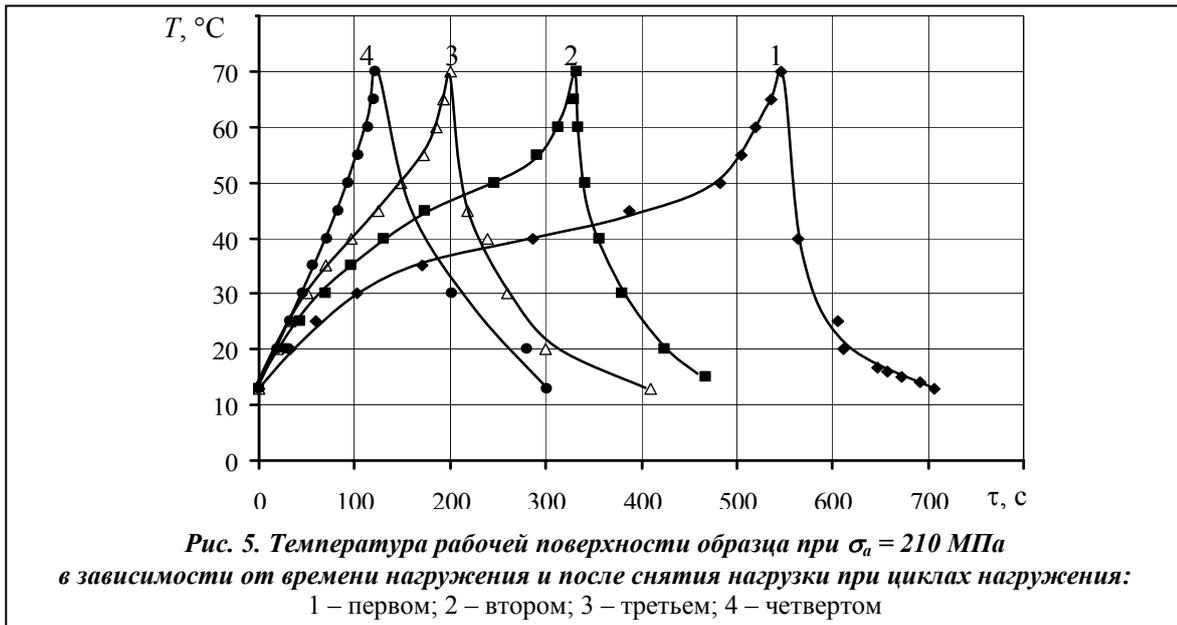


Рис. 4. Температура рабочей поверхности образца при амплитуде нагружения $\sigma_a = 260$ МПа в зависимости от времени испытаний



чество циклов нагружения, а с другой – весьма низкой для того, чтобы иметь уверенность, что в формирующейся структуре металла при испытаниях нагрев играет ничтожно малую роль.

Рассмотрим теперь вероятные причины наблюдаемого характера разогрева испытываемой стали. В работе [1] на основании анализа известных литературных фактов высказано предположение, что наиболее вероятными дефектами, рассеивающими механическую энергию нагружения в металле, являются дислокации.

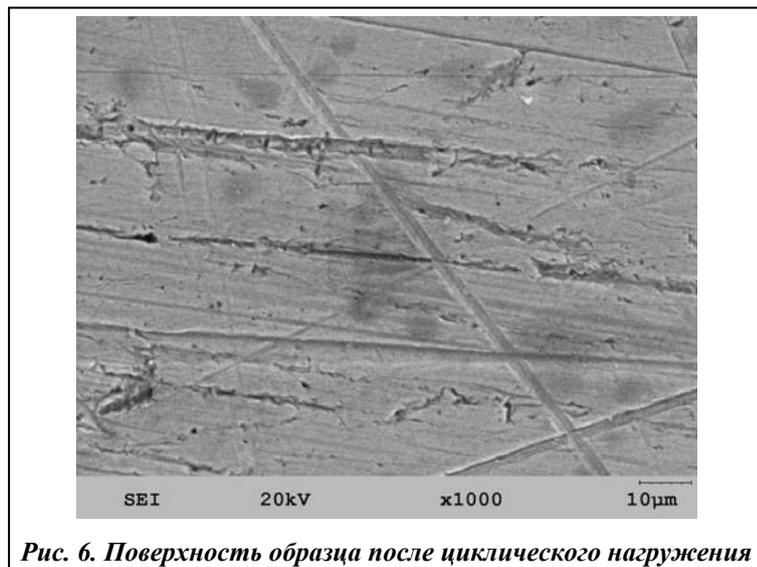
Колебания закрепленных дислокаций, а также частичная аннигиляция дислокаций противоположных знаков, происходящая на стадии сжатия, приводят к выделению теплоты в металле. Поскольку полной аннигиляции дислокаций не происходит, с увеличением числа циклов нагружения накапливается избыток дислокаций одного знака, что приводит к увеличению концентрации напряжений и, в конце концов, – к зарождению субмикротрещин, которые являются еще одним источником теплоты в металле.

Сталь ШХ15 в отожженном состоянии способна к значительному упрочнению, т. е. при циклическом нагружении вероятно существенное повышение плотности дислокаций. Наряду с этим высокая концентрация в ней углерода создает значительное число мест, в которых дислокации блокируются и скапливаются. В результате растет концентрация областей с перенапряжением, где и происходят разрывы сплошности структуры металла.

На рис. 6 представлен вид поверхности образца, подвергнувшегося нагружению при $\sigma_a = 260$ МПа.

Видно, что помимо следов механической обработки (крупных борозд) на поверхности присутствует множество субмикротрещин и углублений, а некоторые субмикротрещины, сливаясь, образуют микротрещины.

Таким образом, быстрый рост температуры образцов



при достижении некоторого значения амплитуды нагружения, а также после определенного количества циклов испытаний при фиксированной амплитуде обусловлен большой концентрацией мест разрыва межатомных связей. Протекание последующего нагрева с почти постоянной скоростью говорит, вероятно, о том, что количество дефектов в металле достигает своего насыщения достаточно быстро. Что касается процесса залечивания образующихся субмикротрещин, то он, несомненно, имеет место, однако, по-видимому, осложняется повышенной концентрацией углерода, который в некоторой степени охрупчивает металл.

Заключение

В ходе проведенных исследований разогревания образцов из стали ШХ15 в состоянии поставки при высокочастотном (450 Гц) циклическом нагружении были выявлены следующие особенности.

1. Повышение температуры образцов зависит от амплитуды их нагружения. При низких значениях амплитуды образцы не нагреваются, но при достижении некоторого ее значения нагреваются быстро сначала с постоянной скоростью, а затем температура повышается скачком, что чаще всего предшествует разрушению образца.

2. При постоянной амплитуде нагружения скорость нагревания образца зависит от количества циклов (времени) нагружения. Сначала образец не нагревается, а далее происходит рост температуры с постоянной скоростью.

3. Высказаны предположения, что характер нагревания стали в процессе циклического нагружения связан с повышенной концентрацией углерода, способствующей ускорению накопления в металле усталостных повреждений.

Литература

1. *Некоторые аспекты разогрева металла в условиях циклического нагружения* / В. М. Мацевитый, И. Б. Казак, К. В. Вакуленко, О. Ф. Полищук // Пробл. машиностроения. – 2011. – Т. 14, № 1. – С. 74–80.
2. *Матохнюк Л. Е. Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением* / Л. Е. Матохнюк. – Киев: Наук. думка, 1988. – 200 с.
3. *Материаловедение: Учеб. для высш. техн. учеб. заведений* / Б. Н. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов и др. / Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.

Поступила в редакцию
06.06.12