

Дислокационная структура и ударная вязкость корпусной стали 15X2НМФА после ультразвукового воздействия

А. В. Мац, В. М. Нетесов, В. И. Соколенко¹

Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Харьков, Украина

¹ vsokol@kipt.kharkov.ua

Исследовано влияние высокотемпературной ультразвуковой обработки на структуру и ударную вязкость стали 15X2НМФА. Наблюдаемое повышение ударной вязкости и снижение температуры вязкохрупкого перехода стали после ультразвуковой обработки определенной продолжительности обусловлены формированием однородной дефектной структуры.

Ключевые слова: сталь 15X2НМФА, структура, ударная вязкость, ультразвук, вязкохрупкий переход.

Введение. Изучение влияния на металлы и сплавы такого вида воздействия без формоизменения, как ультразвук, и связанного с ним изменения прочностных характеристик представляет значительный интерес, поскольку структура материала в этом случае отличается от структуры, формирующейся при интенсивной пластической деформации или статическом деформировании [1]. Исследования в этом направлении имеют самостоятельное значение для более полного понимания физических процессов самоорганизации структуры при внешних воздействиях. Кроме того, их результаты могут способствовать промышленному применению ультразвука при обработке сталей, используемых, например, в реакторостроении.

Поскольку динамические испытания на ударный изгиб позволяют обнаружить склонность материала к хрупкому разрушению, цель настоящей работы заключается в установлении взаимосвязи между изменениями ударной вязкости и структурным состоянием корпусной стали 15X2НМФА, подвергаемой ультразвуковому воздействию (УЗВ).

Материал и методика исследований. Объектом исследований служила корпусная сталь 15X2НМФА ферритно-перлитного класса. Заготовки для образцов вырезали из сегмента заводской поковки, прошедшей штатную механико-термическую обработку и используемую для изготовления корпуса ядерного реактора. Для испытаний на ударную вязкость на маятниковом копре в диапазоне температур (–100...100)°С изготавливали образцы Шарпи квадратного сечения (10×10 мм) длиной 55 мм с V-образным надрезом. Методика ультразвуковой обработки и способы определения амплитуды ультразвуковых напряжений $\sigma_{уз}$ в исследуемых образцах описаны в работе [2]. В нашем случае обработке подвергали центральную часть образца (рис. 1).

С этой целью боковая поверхность образца плотно прижималась специальной накидной гайкой к наконечнику концентратора ультразвуковых колебаний. Частота УЗВ составляла 20 КГц. При УЗВ образцы охлаждали проточ-

ной водой. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3. Структурные исследования проводили на электронном микроскопе ЭМВ-100БР. Фольги для электронно-микроскопических исследований вырезали на фиксированном расстоянии от надреза на образцах Шарпи в зоне УЗВ различных режимов. Определение плотности дислокаций и углов разориентировки соседних микрообъемов проводили по методикам, подробно описанным в [3].

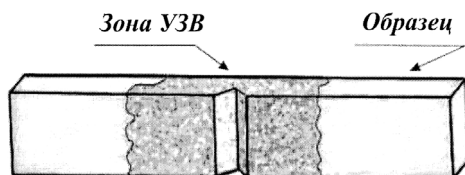


Рис. 1. Размещение зоны ультразвуковой обработки образца Шарпи.

Результаты исследований и их обсуждение. В ряде работ [4, 5] показано, что структурные изменения в кристаллической решетке под воздействием ультразвуковых колебаний при фиксированной температуре зависят от характера исходной структуры и амплитуды ультразвуковых напряжений $\sigma_{уз}$. При этом превышение напряжениями $\sigma_{уз}$ некоторого порогового значения вызывает генерацию точечных и линейных дефектов, их взаимодействие и приводит к необратимым изменениям структурно-чувствительных свойств. Зависимость этих свойств от продолжительности УЗВ носит немонотонный характер [5].

В настоящей работе величина $\sigma_{уз} = 250$ МПа, что составляет 50% предела пропорциональности при деформации растяжением стали в исходном состоянии. Такой режим УЗВ обуславливает достаточно интенсивное развитие исходной дислокационной структуры в процессе обработки, о чем свидетельствует существенно немонотонный характер зависимости микротвердости H_{μ} от продолжительности УЗВ τ (рис. 2).

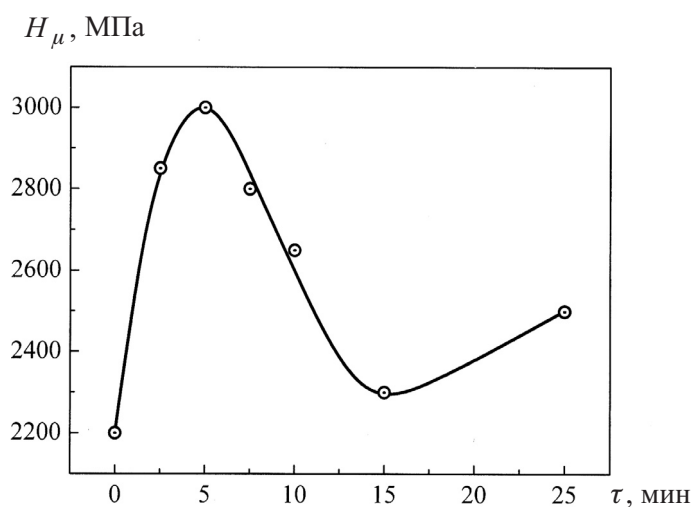


Рис. 2. Зависимость средних значений микротвердости стали 15X2HMФА от продолжительности УЗВ.

Эволюцию дефектной структуры стали при УЗВ иллюстрирует рис. 3. Исходное структурное состояние стали характеризуется наличием частично размытых дислокационных границ с разориентировками до 3° и ячеек со средним поперечным размером 0,45 мкм и плотностью решеточных дислокаций, не превышающей $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Ячейки объединены в зоны, разграниченные высокоугловыми (до 27°) границам (рис. 3,а). Развитие структуры при УЗВ свидетельствует о протекании в материале процессов генерации и аннигиляции дефектов, причем их вклад в формирование структуры с увеличением продолжительности обработки изменяется. На начальных стадиях обработки ($\tau \leq 5$ мин) доминирует интегральное увеличение плотности дислокаций как в результате их генерации, так и вследствие распада наиболее неустойчивых к знакопеременному нагружению границ. При этом средний размер ячеек увеличился до 1 мкм, плотность дислокаций в теле ячеек может достигать 10^{11} см^{-2} (рис. 3,б), что говорит о росте общей степени дефектности кристаллической решетки и увеличении микротвердости H_μ (рис. 2). Структурные изменения при дальнейшем увеличении τ происходят из-за активизации процессов аннигиляции деформационных дефектов. Такие дефекты, как границы ячеек, практически исчезают, снижается скалярная плотность дислокаций. Протяженные высокоугловые границы, являющиеся эффективными стоками для подвижных дефектов, сохраняются (рис. 3,в). Однако и такая структура оказывается неустойчивой к последующему ультразвуковому нагружению, вызывающему активизацию новых источников дислокаций, увеличение их количества сначала в приграничных зонах, а затем в теле крупных фрагментов (рис. 3,г).

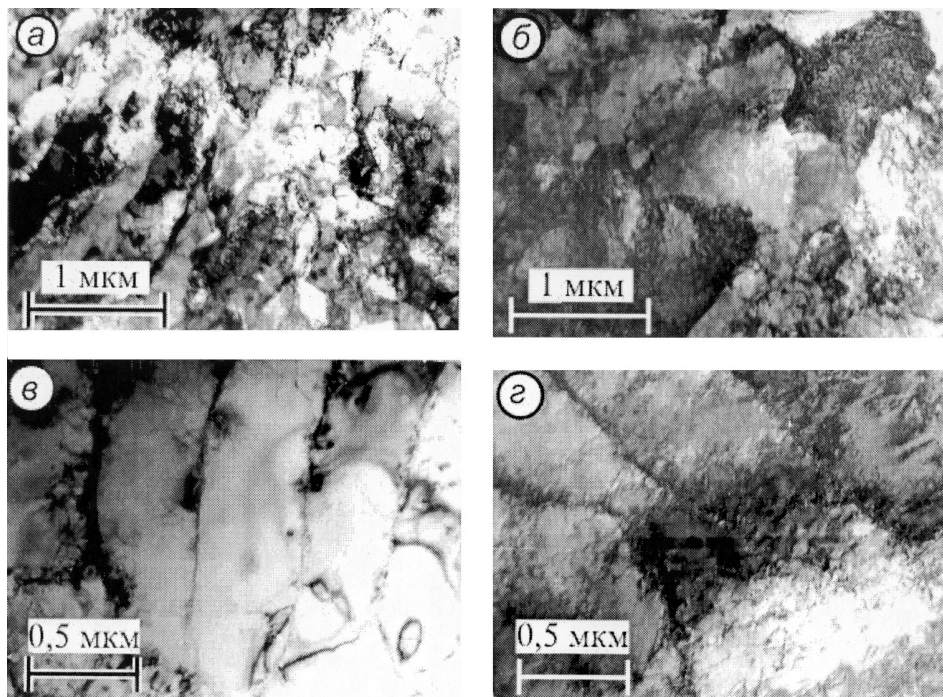


Рис. 3. Дислокационная структура стали 15X2NMФА до (а) и после УЗВ в течение 5, 15 и 25 мин (б, в, г соответственно).

Результаты структурных исследований показывают, что в процессе УЗВ степень дефектности в стали изменяется немонотонно. Это характеризует неустойчивость, в частности, исходного структурного состояния к интенсивному УЗВ. Можно предположить, что дальнейшее увеличение продолжительности обработки ($\tau > 30$ мин) приведет к формированию устойчивой фрагментированной структуры с соответствующими механическими свойствами, так как при постоянстве амплитуды УЗВ со временем достигается квазиравновесное состояние, при котором процессы генерации и аннигиляции дефектов уравниваются друг друга, и плотность малоугловых границ практически не изменяется [5, 6].

Испытания на ударную вязкость проводили на образцах с наиболее изотропной высокодефектной структурой, сформированной после УЗВ в течение $\tau = 5$ мин. На рис. 4 представлены температурные зависимости ударной вязкости a_k образцов стали 15X2НМФА в исходном состоянии и после УЗВ. Видно, что ударная вязкость стали во всем исследованном температурном интервале после УЗВ выше, чем в исходном состоянии. Максимальный эффект ее повышения после УЗВ наблюдается при 300 К и составляет $\approx 25\%$.

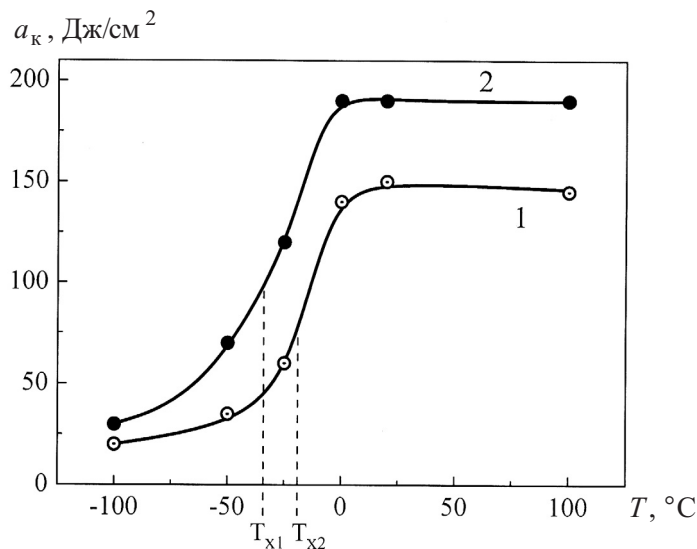


Рис. 4. Температурная зависимость ударной вязкости стали 15X2НМФА до (1) и после УЗВ (2).

Существуют различные методы определения температуры вязкохрупкого перехода при испытаниях конструкционных материалов на ударную вязкость. Здесь за температуру вязкохрупкого перехода стали 15X2НМФА принимали температуру, при которой работа ударного воздействия по отношению к вязкому состоянию материала уменьшалась на 50%. Как следует из рис. 4, температура вязкохрупкого перехода исходной стали (T_{x2}) составляет -20°C . После проведения УЗВ критическая температура (T_{x1}) снижается до -35°C . Повышение сопротивления хрупкому разрушению и снижение условной температуры вязкохрупкого перехода (T_x) после УЗВ можно связать с формированием однородных деформаций и микронапряжений в объеме сплава и

предотвращением образования и развития микронесплошностей. Это позволяет заключить, что формирующиеся в результате УЗВ структуры могут быть достаточно равновесны, а дислокационные ансамбли не обладают высокими полями дальнедействующих напряжений.

Выводы

1. Изучено влияние запорогового ультразвукового воздействия на эволюцию структуры корпусной стали 15X2НМФА и сопротивление хрупкому разрушению в интервале температур $(-100...100)^\circ\text{C}$.

2. После УЗВ продолжительностью 5 мин наблюдается существенное увеличение ударной вязкости и снижение температуры вязкохрупкого перехода T_x на $\approx 15^\circ\text{C}$.

3. Наблюдаемые эффекты изменения ударной вязкости a_k и T_x обусловлены формированием в результате УЗВ более однородной дефектной структуры.

Резюме

Досліджено вплив високотемпературної ультразвукової обробки на структуру та ударну в'язкість сталі 15X2НМФА. Підвищення ударної в'язкості і зниження температури в'язкокрихкого переходу сталі, що мають місце після ультразвукової обробки визначеної тривалості, зумовлено формуванням однорідної дефектної структури.

1. Тяпунина Н. А., Благовещенский В. В., Зиненкова Г. М., Ивашкин Ю. А. Особенности пластической деформации под действием ультразвука // Изв. вузов. Физика. – 1982. – 25, № 6. – С. 118 – 128.
2. Кулемин А. В., Смирнов О. М. Влияние ультразвука на диффузионные процессы, механические свойства и структуру металлов и сплавов // Пробл. металловедения и физики металлов. – 1972. – № 1. – С. 211 – 218.
3. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электроннооптический анализ. – М.: Металлургия, 1970. – 368 с.
4. Кулемин А. В. Ультразвук и диффузия в металлах. – М.: Металлургия, 1978. – 198 с.
5. Белостоцкий В. Ф., Полоцкий И. Г. Влияние ультразвукового облучения на концентрацию вакансий и дислокаций в никеле // Физика металлов и металловедение. – 1973. – № 35, вып. 3. – С. 660 – 662.
6. Гиндин И. А., Аксенов В. К., Лазарева М. Б. и др. Дислокационная структура, предел текучести и критический ток поликристаллического ниобия после ультразвукового воздействия // Металлофизика. – 1986. – 8, № 3. – С. 83 – 87.

Поступила 24. 04. 2009