



УДК 532.72:534.8:539.3

© 2011

С. Е. Богданов, В. Ф. Мазанко, Е. Н. Храновская, Е. И. Богданов

Влияние низкоэнергетической ультразвуковой обработки в постоянном магнитном поле на структуру стали 20

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Ю. Н. Ковалем)

Показано, що низкоенергетична ультразвукова обробка сталі 20, проведена у постійному магнітному полі, істотно не впливає на її структурний склад. Встановлено, що густина дислокацій в сталі 20 після впливу, що розглядається, зменшується на 40%. Розраховано значення коефіцієнта масопереносу (D_M) ізотопу ^{63}Ni у зразку, що становить $7,4 \cdot 10^{-11}$ см²/с.

Значительный научный и практический интерес представляет изучение эволюции структуры материалов различного типа (металлы, моно- и поликристаллы, полупроводники) в условиях низкоэнергетической ультразвуковой обработки в постоянном магнитном поле. Упомянутое воздействие способствует локальному изменению структуры обрабатываемой поверхности, обеспечивая минимальную степень ее дефектности в той области, где необходимо получить материал с требуемыми свойствами.

В связи с этим целью настоящей работы является исследование влияния низкоэнергетической ультразвуковой обработки (УЗО), проведенной в постоянном магнитном поле (ПМП), на структурные изменения и особенности диффузии атомов изотопа ^{63}Ni в стали 20.

Материалы и методика эксперимента. Объектом исследования являлась низкоуглеродистая сталь 20 (ферритный класс, $\cong 0,2\%$ (ат.) C). Образцы представляли собой цилиндры высотой и диаметром 10 мм. Для стабилизации структуры был проведен их предварительный отжиг при $T_{\text{отж}} = 1073$ К в течение двух часов. Перед обработкой на торец образцов электролитическим методом наносился слой радиоактивного изотопа ^{63}Ni толщиной 0,3 мкм с исходной активностью $5 \cdot 10^3$ имп/мин. Ультразвуковая обработка стали 20 в постоянном магнитном поле проводилась на установке, детальное описание и принцип работы которой даны в [1] (амплитуда колебаний $\varepsilon = 10$ мкм, частота колебаний $\nu = 18$ кГц, величина магнитного поля $H = 585$ Э, постоянный ток $I = 9$ А, время обработки $\tau = 6 \cdot 10^2$ с, температура обработки $T = 293$ К).

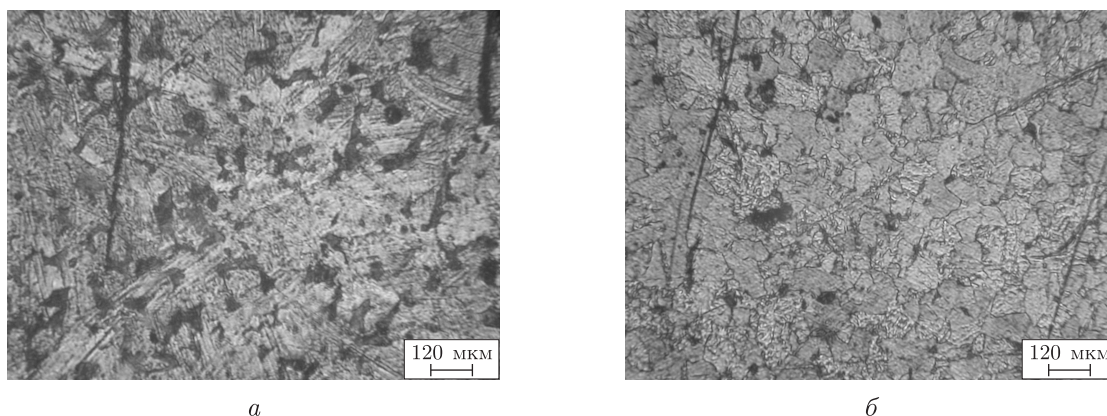


Рис. 1. Структура поверхности стали 20 до (а) и после ультразвуковой обработки в постоянном магнитном поле (б)

Состояние структуры стали 20 после ультразвуковой обработки в ПМП изучали с помощью микроскопа МИМ-8, а изменение ее структурных параметров — методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-3 в железном K_{α} -излучении. Плотность дислокаций в стали 20 после обработки оценивали, используя методику, описанную в работе [2]. Микротвердость протравленных шлифов измеряли на микротвердомере ПМТ-3 под нагрузкой 50 г. Распределение ^{63}Ni в образцах после ультразвуковой обработки в ПМП определяли методом снятия слоев. Расчет величин коэффициента массопереноса (D_m) проводили согласно [3].

Результаты и их обсуждение. Металлографическое исследование стали 20 до и после ультразвуковой обработки в ПМП показало наличие несущественных изменений микроструктуры. До проведения обработки образцы имели ферритно-перлитную структуру (количество феррита $\sim 85\%$, перлита $\sim 15\%$) со средним размером зерна 28 мкм (рис. 1, а).

Ультразвуковая обработка в ПМП приводит к более упорядоченному расположению зерен, увеличению их размера до 31 мкм, большей степени травимости границ зерен. При этом количественного изменения фазового состава стали 20 не наблюдается (см. рис. 1, б). В объеме образца стали 20 после обработки появляются микропоры, расположенные, преимущественно, по границам зерен (см. рис. 1, б). Появление микропор связано, по-видимому, с образованием при ультразвуковой обработке неравновесных вакансий, которые скапливаются на границах зерен. Известно [4, 5], что ультразвуковая обработка металлов способствует как размножению дислокаций, так и увеличению концентрации вакансий до значений, характерных для высоких температур (более $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Посредством микродюриметрического анализа установлено, что микротвердость зерен перлита и феррита стали 20 до обработки составляла 1,9 и 1,4 ГПа, соответственно. Однако после обработки микротвердость зерен феррита понижается до значения 1 ГПа (см. табл. 1).

Согласно данным табл. 1, ультразвуковая обработка стали 20 в постоянном магнитном поле приводит к уменьшению значений микротвердости и плотности дислокаций на 40 и 28%, соответственно, по сравнению со значениям, характерными для исходной стали. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, представленными в работе [5]. Ультразвуковая обработка длительностью более шести минут приводит к уменьшению первоначально увеличивающейся микротвердости стали до исходных значений. По нашему

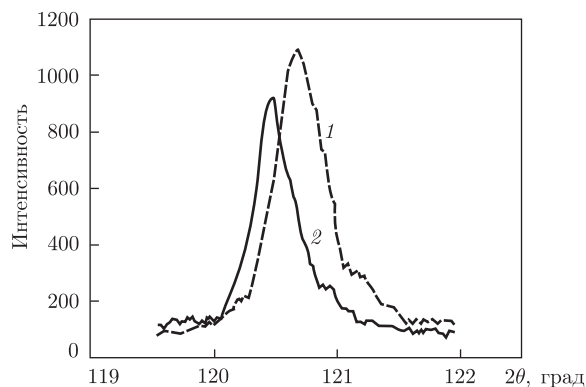


Рис. 2. Дифракционные линии $(220)_\beta$, полученные со стали 20 до (1) и после ультразвуковой обработки в постоянном магнитном поле (2)

мнению, данный факт связан с уменьшением плотности дислокаций в образце после ультразвуковой обработки.

Результаты рентгеноструктурного анализа показали увеличение (на 65%) остаточных напряжений в стали 20 после ультразвуковой обработки в ПМП по сравнению с исходным образцом, что, очевидно, вызвано образованием точечных дефектов. Известно [6], что наличие магнитного поля при ультразвуковой обработке в ПМП не оказывает существенного влияния на дислокационную структуру стали 20, но приводит к дополнительной генерации точечных дефектов, к концентрации которых очень чувствительны остаточные напряжения в решетке металла после обработки.

Рентгенографические исследования показали, что ультразвуковая обработка в ПМП приводит к увеличению параметра решетки феррита стали 20 по сравнению с исходным образцом. Данный факт, по-видимому, связан с распадом карбида Fe_3C , в результате чего может происходить насыщение углеродом феррита, что, в свою очередь, приводит к увеличению параметра его решетки (см. табл. 1, рис. 2). Предположение подтверждается многочисленными экспериментальными результатами других авторов [1, 7], свидетельствующими о том, что наличие атомов внедрения в металле способствует увеличению параметра его решетки.

Приведенные выше экспериментальные результаты (увеличение параметра решетки феррита и остаточных напряжений после ультразвуковой обработки стали 20 в ПМП) могут служить подтверждением существенного влияния данного вида обработки на диффузионные процессы в металле.

На рис. 3 приведена концентрационная кривая распределения радиоактивного изотопа ^{63}Ni в стали 20 после ультразвуковой обработки в постоянном магнитном поле. Глубина проникновения изотопа ^{63}Ni в сталь 20 составила ~ 11 мкм. Экспоненциальный характер

Таблица 1. Структурные параметры стали 20 до и после ультразвуковой обработки в постоянном магнитном поле

Сталь 20	Остаточные напряжения в решетке феррита, МПа	Параметр решетки феррита, нм	Плотность дислокаций, $10^{12}, м^{-2}$	Количество феррита, %
До обработки (исходная)	134	0,2858	10,57	85
После обработки (УЗО+ПМ)	222	0,2862	6,2	83

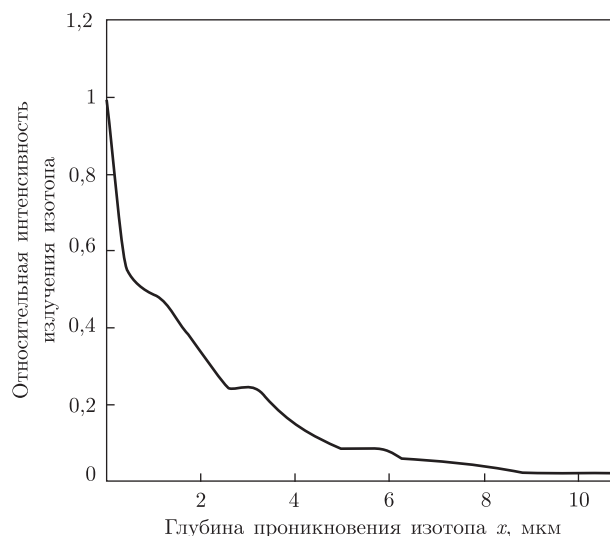


Рис. 3. Концентрационная кривая распределения изотопа ^{63}Ni по глубине стали 20 после ультразвуковой обработки в постоянном магнитном поле

кривой свидетельствует об объемном механизме процесса массопереноса атомов (см. рис. 3). Согласно расчетам, $D_{\text{м}} = 7,4 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$, что совпадает по порядку величины со значением коэффициента массопереноса хрома в железе при ультразвуковой обработке с частотой 20 кГц [3].

Следует отметить, что при обработке металла в условиях низких температур (в нашей работе — 293 К) должно преобладать растворение элементов замещения [3, 6]. Вероятно, при диффузии изотопа ^{63}Ni в сталь 20 после ультразвуковой обработки в ПМП имеет место вакансионный механизм, поскольку размеры атомов никеля (0,249 нм) и железа (0,252 нм) соизмеримы. Искажения решетки железа при проникновении ^{63}Ni в нее минимальны, так как при растворении в этой системе образуется непрерывный ряд твердых растворов замещения.

Таким образом, низкоэнергетическая ультразвуковая обработка стали 20, проведенная при комнатной температуре в постоянном магнитном поле, не приводит к существенным изменениям ее структурного состава. Ультразвуковая обработка стали 20 в ПМП приводит к уменьшению микротвердости феррита и плотности дислокаций, а также к увеличению остаточных напряжений в решетке металла. Коэффициент массопереноса изотопа ^{63}Ni равен $7,4 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$.

Следует отметить, что для получения более полной картины, в частности, процессов диффузии атомов в стали 20 после ультразвуковой обработки в ПМП, необходимо проведение дополнительных экспериментов, в том числе с применением методов электронной микроскопии.

1. Мазанко В. Ф., Богданов Е. И., Мордюк Б. Н. и др. Особенности структурных изменений и диффузионного перераспределения атомов в Ст. 20 при ультразвуковой обработке // Металлофиз. и новейш. технол. — 2007. — **29**, № 3. — С. 305–315.
2. Рябошапка К. П., Богданов Е. И., Богданов С. Е. и др. Упрощенная модель оценки плотности хаотически распределенных дислокаций по уширению рентгеновских дифракционных линий // Там же. — 2005. — **27**, № 3. — С. 407–413.
3. Лариков Л. Н., Исайчев В. И. Диффузия в металлах и сплавах. — Киев: Наук. думка, 1987. — 510 с.

4. Мазанко В.Ф., Прокопенко Г.И., Герцирикен Д.С. и др. Особенности проникновения атомов в железо при ультразвуковой ударной обработке // Доп. НАН України. – 2005. – № 8. – С. 76–83.
5. Белостоцкий В.Ф., Полоцкий И.Г. Размножение дислокаций и вакансий в никеле и молибдене при облучении ультразвуком // Металлофизика. – 1976. – Вып. 63. – С. 81–89.
6. Кузьменко В.А. Ультразвуковые колебания и их влияние на механические характеристики конструкционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1986. – 208 с.
7. Мазанко В.Ф., Прокопенко Г.И., Герцирикен Д.С. и др. Особенности фазообразования в железе и стали в условиях ультразвуковой ударной обработки // Доп. НАН України. – 2005. – № 7. – С. 71–76.

*Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова
НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 20.04.2011

S. I. Bogdanov, V. F. Mazanko, K. N. Khranovskaya, I. I. Bogdanov

Influence of low-energy ultrasonic treatment in constant magnetic field on the structure of steel 20

It is shown that the low-energy ultrasonic treatment of steel 20 in a constant magnetic field doesn't lead to a substantial change in the structure composition. It is established that the dislocation density in steel 20 decreases after the ultrasonic treatment in a constant magnetic field by about 40%. The calculated mass-transfer coefficient of ^{63}Ni into steel 20 is $D_M = 7.4 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$.