

ПРОЦЕССЫ МИКРОПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ С ОСТАТОЧНЫМ МАРТЕНСИТОМ

*В.И. Соколенко, А.В. Пахомов, О.И. Волчок, Н.А. Черняк,
В.С. Оковит, В.В. Калиновский*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: vsokol@kipt.kharkov.ua

Проведено экспериментальное исследование характера изменения физических свойств (электросопротивления, коэрцитивной силы, декремента затухания) деформированной волочением при 77 К аустенитной стали 06X16H15M3B от продолжительности последующего ультразвукового воздействия. Установлено, что протекание при этом релаксационных процессов в структуре с остаточным мартенситом имеет немонотонный (двухстадийный) характер с отличающимися временами релаксации. Показано, что высокочастотное механическое нагружение изменяет степень сопряжения мартенситных фаз с матрицей. Анализируется роль дислокационных и диффузионных процессов при ультразвуковом воздействии в выравнивании уровней полей внутренних напряжений в гетерогенных структурах.

PACS: 43.35.+d, 61.72.Ff, 61.72.Nh, 62.20.Qr, 62.25.Fg, 81.70.Cv, 83.85.Vb

ВВЕДЕНИЕ

Наличие в аустенитных сталях таких структурных элементов, как мартенситные фазы, способствует образованию локальных зон концентраций напряжений, что ухудшает механические свойства и коррозионную стойкость материала. В контурах систем охлаждения парогенераторов, изготовленных из аустенитных нержавеющей сталей, движение жидкости может носить турбулентный характер, из-за чего возникают механические вибрационные нагрузки, вызывающие повышение локальных концентраций внутренних напряжений. Известно, что некоторые амплитудно-временные режимы высокочастотного нагружения (ультразвукового воздействия – УЗВ) реализуют релаксацию внутренних напряжений, что проявляется, например, в повышении термоустойчивости, снижении склонности к радиационному охрупчиванию [1, 2] и др. Ранее показано, что при циклическом высокочастотном нагружении аустенитной стали, содержащей мартенситные фазы, поглощение колебательной энергии имеет селективный характер, что реализует релаксационные процессы на границах раздела мартенсит-аустенитная матрица [3]. Представляется целесообразным изучить механизмы микроструктурных перестроек при высокочастотном механическом нагружении аустенитной стали с остаточным мартенситом, сформированным в результате предварительного деформирования в криогенных условиях.

МЕТОДИКА

Исследовалась нержавеющая сталь 06X16H15M3B с аустенитно-мартенситной структурой, которая создавалась деформацией волочением при 77 К (степень деформации $\varepsilon = 17\%$) на установке, подробно описанной в [4]. Объемное содержание остаточного мартенсита составляло не менее 10% [3].

Деформация проводилась после аустенизации отжига при 1370 К в течение 1 ч.

Экспозиция УЗВ, осуществляемого при 300 К посредством магнитострикционного преобразователя (генератора УЗГ-3-4), варьировалась в диапазоне τ от 1 с до 5 ч. Интенсивность продольных ультразвуковых механических колебаний (частота $f = 20,5$ кГц) была постоянной и составляла $0,6$ Вт/мм² (амплитуда $A \approx 3$ мкм), что обеспечивало уровень циклического напряжения ниже порогового значения для данного материала [5]. Амплитуда колебаний определялась оптически и контролировалась электродинамическим датчиком.

О специфике структурного состояния стали после высокочастотного нагружения разной экспозиции судили из анализа поведения электросопротивления, коэрцитивной силы и амплитудной зависимости внутреннего трения (АЗВТ).

Для измерения параметра ρ/ρ_0 , где ρ_0 и ρ – электросопротивления вдоль оси образца до и после УЗВ при $T = 77$ К соответственно, использовалась потенциометрическая схема. Полевые зависимости намагничивания $M(H)$ снимали при 77 К в замкнутой магнитной цепи по схеме пермеметра при ориентации магнитного поля перпендикулярно оси образца [6]. Из петель гистерезиса определялось относительное изменение магнитной жёсткости H_c/H_c^0 , где H_c^0 и H_c – коэрцитивные силы до и после высокочастотного нагружения соответственно. Исходное значение коэрцитивной силы составляло $H_c^0 = 22,5$ кА/м.

Измерения АЗВТ осуществлялись на установке типа обратного крутильного маятника при комнатной температуре (частота $f = 0,3$ Гц) до и после высокочастотного нагружения с экспозицией $\tau = 10$ мин (τ выбрана из стадийности протекания релаксационных процессов при УЗВ [7]).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сталь 06X16H15M3B после деформирования волочением в среде жидкого азота представляла собой субмелкодисперсную гетерофазную структуру с наличием включений мартенситных фаз нанометрового масштаба и широкого спектра дефектов кристаллического строения неравновесной концентрации [3]. Для исходной (деформированной) стали характерно (рис. 1) отсутствие явно выраженной амплитудной зависимости внутреннего трения и низкие значения декремента затухания АЗВТ, что свидетельствует о наличии в структуре избыточных вакансий [8].

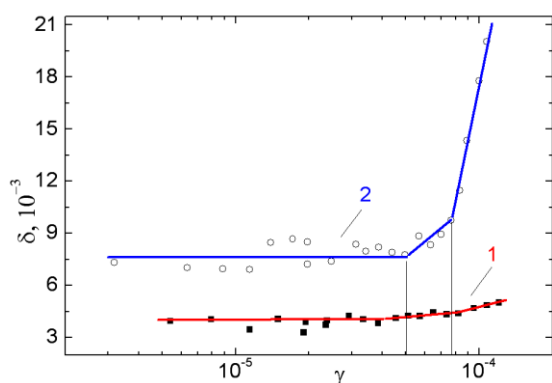


Рис. 1. Амплитудная зависимость внутреннего трения стали 06X16H15M3B, предварительно деформированной волочением при 77 K (1) и прошедшей последующее высокочастотное нагружение (2)

Формирование после деформации такой структуры обеспечивает в материале резко неоднородный рельеф остаточных внутренних напряжений. Обращает на себя внимание, что для материала, предварительно прошедшего деформацию волочением на 17% при 300 K, мартенситная фаза не выявлена, а при последующем УЗВ изменения параметра ρ^{77}/ρ_0^{77} не существенны. Кроме того, отметим, что измерения $M(H)$ после высокочастотного нагружения разной продолжительности образцов, деформированных при 77 K, показали, что объёмное содержание остаточного мартенсита, составляющего не менее 10% [3], не изменилось.

На рис. 2 и 3 показаны зависимости изменения параметров ρ/ρ_0 и H_c/H_c^0 стали 06X16H15M3B после высокочастотного механического нагружения различной продолжительности. Видно, что изменение исследуемых характеристик имеет немонотонный характер. После УЗВ с экспозицией $\tau \approx 1$ с параметры ρ/ρ_0 и H_c/H_c^0 ведут себя подобным образом: наблюдается их резкое снижение, а при дальнейшем увеличении экспозиции УЗВ до $\tau \approx 30$ мин – рост. При более длительных экспозициях УЗВ (до $\tau \approx 150$ мин) наблюдается выход на насыщение H_c/H_c^0 и монотонное падение ρ^{77}/ρ_0^{77} .

Из кривых АЗВТ (см. рис. 1) следует, что после УЗВ критические амплитуды практически не изменились, т. е. не изменилось характерное

распределение длин дислокационных сегментов, сформированных в процессе низкотемпературной пластической деформации. Таким образом, амплитудный режим УЗВ соответствует режиму допороговых значений, когда массовое размножение дислокаций не реализуется. Кроме того, после высокочастотного нагружения наблюдается усиление АЗВТ: появление явно выраженных критических амплитуд, связанных с увеличением диссипации энергии колебаний маятника из-за более свободного перемещения дислокационных сегментов, также повышается фон АЗВТ.

Для интерпретации структурных перестроек, обеспечивающих двухстадийный характер протекания релаксационных процессов как в магнитной (мартенситной) фазе, так и в немагнитной (аустенитной матрице), проанализируем полученные экспериментальные данные. Первоначальным откликом на внешнее периодическое возмущение (УЗВ) неоднородной и неравновесной структуры, сформированной предварительной низкотемпературной деформацией волочением, является активация процессов структурных перестроек в зонах больших концентраций напряжений. Ранее при УЗВ с допороговыми значениями амплитуды в условиях «обострения» границ блоков, которое достигалось температурными условиями нагружения (в среде жидкого гелия – 4,2 K), наблюдалась генерация одиночных дислокаций в локальных объемах, прилегающих к границам блоков [9]. Можно полагать, что подобное проявление микропластичности в стали 06X16H15M3B имеет место вблизи границ раздела мартенситная фаза–матрица и проявляется в изменении условий сопряжения фаз. Последнее может быть также обусловлено стоком вакансий в ультразвуковом поле на границы раздела. Следствием изменений степени когерентности (условий сопряжения фаз) с матрицей является выравнивание уровня полей внутренних напряжений, что отражается в резком падении ρ^{77}/ρ_0^{77} и H_c/H_c^0 при малых экспозициях (см. рис. 2, 3).

За поведение магнитной жесткости мартенситных фаз ответственно формирование в процессе УЗВ наведенной магнитной анизотропии. В рассматриваемом случае (в динамическом режиме) в объёме однодоменной ферромагнитной фазы [3] за счёт магнитоупругого взаимодействия, свободная энергия которого $\Phi \sim M f_{ijk} \alpha_i \epsilon_{jk}$, где M – магнитный момент; f_{ijk} – тензор пьезомагнитных модулей; α_i – направляющие косинусы M ; ϵ_{jk} – компоненты тензора деформации [10], могут возникать вынужденные отклонения ориентаций намагниченности. Индуцированные связанные магнитоупругие колебания [11] вызывают эффекты типа магнитного последствия. Ответственным за поведение наведенной магнитной анизотропии, по видимому, является перераспределение точечных дефектов (в основном, вакансий ультразвукового происхождения) в соответствии с выделенным направлением намагниченности внутри субзёрен мартенсита.

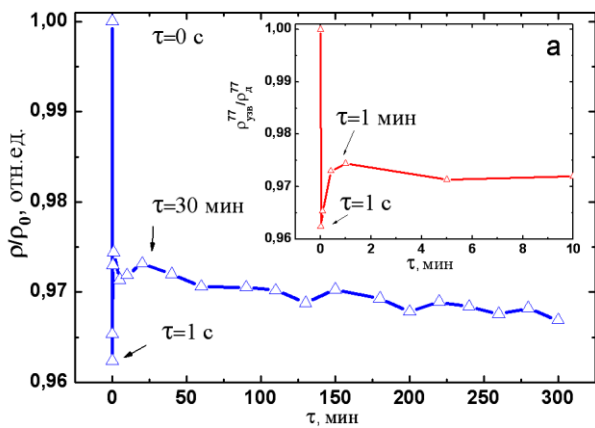


Рис. 2. Зависимость электросопротивления стали 06X16N15M3B, деформированной волочением при 77 К, от времени последующего УЗВ; а – в увеличенном масштабе по времени

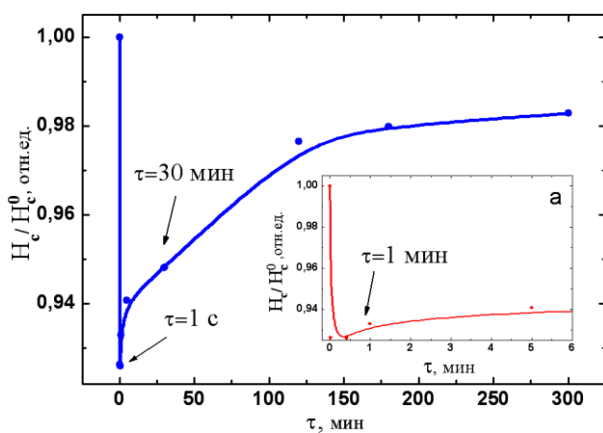


Рис. 3. Зависимость коэцитивной силы стали 06X16N15M3B, деформированной волочением при 77 К, от времени последующего УЗВ; а – в увеличенном масштабе по времени

При этом из-за генерации вакансий при УЗВ коэффициент диффузии может изменяться [5, 12]. Кроме того, ускорение диффузии в мартенситной фазе при данных режимах УЗВ обусловлено взаимодействием примесных атомов с подвижными краевыми дислокациями и перегибами на винтовых дислокациях [13]. В результате генерации вакансий при высокочастотном нагружении будет происходить изменение времени релаксации наведенной анизотропии.

Как уже отмечалось, для материала, предварительно прошедшего деформацию волочением при 300 К, изменение параметра ρ^{77}/ρ_0^{77} после УЗВ незначительно. Это свидетельствует о преимущественной активации при УЗВ процессов структурных перестроек на границы раздела, которыми в нашем случае являются границы мартенситных фаз. Отметим, что дополнительным фактором в изменении структуры является направленная диффузия избыточных вакансий ультразвукового происхождения. Результаты измерения АЗВТ, в частности увеличение после УЗВ фона внутреннего трения (см. рис. 1), находятся в соответствии с наблюдаемой стадией медленного снижения электросопротивления (см.

рис. 2,а). Это свидетельствует о том, что дополнительными факторами, влияющими на такое изменение электросопротивления, могут быть процессы разблокировки скоплений дислокаций в γ -матрице, их перераспределение, а также миграции неравновесных вакансий на стоки. Отметим, что подобная структурная перестройка при УЗВ наблюдалась ранее электронно-микроскопически в корпусной стали 15X2МФА [2]. Из полученных экспериментальных данных следует, что в предварительно деформированной в криогенных условиях аустенитной стали поведения дислокаций и избыточных вакансий в поле механических знакопеременных напряжений определяются эффектами взаимовлияния и самосогласования.

ВЫВОДЫ

Изучен характер изменения физических свойств (электросопротивления, коэцитивной силы, декремента затухания) деформированной волочением при 77 К стали 06X16N15M3B от продолжительности УЗВ с допороговыми амплитудами.

1. Установлено, что протекание релаксационных процессов при УЗВ в структуре стали с остаточным мартенситом имеет двухстадийный характер с отличающимися временами релаксации.

2. Показано, что высокочастотное механическое нагружение стали с остаточным мартенситом изменяет степень сопряжения мартенситных фаз с матрицей.

3. Определена роль дислокационных и диффузионных процессов при УЗВ в выравнивании уровней полей внутренних напряжений в аустенитной стали с деформационным мартенситом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.К. Аксёнов, И.Ф. Борисова, О.И. Волчок, А.Л. Донде. Влияние ультразвукового воздействия на термическое разупрочнение деформированного циркония // *УФЖ*. 1989, т. 34, №9, с. 1415-1417.
2. В.К. Аксёнов, О.И. Волчок, И.А. Гиндин, И.М. Неклюдов, Л.В. Левикова, Л.С. Ожигов, А.А. Яес, И.С. Лупаков, Г.М. Калинин, А.В. Сидоренко. Влияние ультразвукового воздействия на склонность стали 15X2МНФА к низкотемпературному радиационному охрупчиванию // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1990, в. 3(54), с. 44-47.
3. О.И. Волчок, А.В. Пахомов, В.И. Соколенко, Н.А. Черняк. Релаксационные процессы в стали 06X16N15M3B при ультразвуковом воздействии // *Металлофизика и новейшие технологии*. 2013, т. 35, №2, с. 259-264.
4. О.И. Волчок, Л.И. Дмитренко, В.А. Емлянинов. Установка для деформирования волочением в криогенных условиях // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2003, №5, с. 159-161.

5. Н.В. Кулемин. *Ультразвук и диффузия в металлах*. М.: «Металлургия», 1978, 180 с.
6. Б.Г. Лазарев, Л.С. Лазарева, Н.А. Черняк, Б.К. Прядкин. Устройство для непрерывного контроля однородности сверхпроводящих проводов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Общая ядерная физика»*. 1986, в. 2(6), с. 31-33.
7. А.В. Пахомов, В.И. Соколенко, О.И. Волчок, Н.А. Черняк. Влияние временного фактора ультразвукового воздействия на электрофизические свойства и предел текучести аустенитных сталей в мартенситном состоянии // *Материалы докладов 2-й Международной конференции «Высококачественные материалы: получение, применения, свойства»*, сентябрь 2013, Харьков. Харьков: ННЦ ХФТИ, с. 51-52.
8. А. Новик, Б. Берри. *Релаксационные явления в кристаллах*. М.: «Атомиздат», 1975, с. 472.
9. В.К. Аксёнов, О.И. Волчок. Структурные изменения в никеле после ультразвукового воздействия с допороговыми амплитудами в жидком гелии // *ФТТ*. 1982, т. 24, в. 10, с. 3125-3128.
10. G.A. Maugin. *Continuum Mechanics of Electromagnetic Solids*. North-Holland, 1988, 550 p.
11. А.И. Ахиезер, В.Г. Барьяхтар, С.В. Пелетминский. *Спиновые волны*. М.: «Наука», 1967, с. 369.
12. А.С. Бакай, Н.П. Лазарев. Механизмы ускорения диффузии в твердом теле знакопеременным напряжением // *Физика металлов и металловедения*. 1985, т. 60, в. 4, с. 675-682.
13. А.С. Бакай, Н.П. Лазарев. Влияние звука на диффузию атомов примеси внедрения в твердом теле // *ФТТ*. 1986, т. 28, в. 8, с. 2455-2457.

Статья поступила в редакцию 22.10.2014 г.

ПРОЦЕСИ МІКРОПЛАСТИЧНОСТІ ПРИ ВИСОКОЧАСТОТНОМУ МЕХАНІЧНОМУ НАВАНТАЖУВАННІ АУСТЕНІТНОЇ СТАЛІ З ЗАЛИШКОВИМ МАРТЕНСИТОМ

V.I. Sokolenko, A.V. Pakhomov, O.I. Volchok, N.A. Chernyak, V.S. Okovit, V.V. Kalinovskiy

Проведено експериментальне дослідження характеру зміни фізичних властивостей (електроопіру, коерцитивної сили, декременту загасання) деформованої волочінням при 77 К аустенітної сталі 06X16N15M3B від тривалості подальшого ультразвукового впливу. Встановлено, що протікання при цьому релаксацийних процесів у структурі із залишковим мартенситом має немонотонний (двостадійний) характер з відмінним часом релаксації. Показано, що високочастотне механічне навантаження змінює ступінь сполучення мартенситних фаз з матрицею. Аналізується роль дислокаційних і дифузійних процесів при ультразвуковому впливі у вирівнюванні рівнів полів внутрішніх напружень у гетерогенних структурах.

MICROPLASTICITY PROCESSES UNDER HIGH-FREQUENCY MECHANICAL LOADING OF AUSTENITIC STEEL WITH RESIDUAL MARTENSITE

V.I. Sokolenko, A.V. Pakhomov, O.I. Volchok, N.A. Chernyak, V.S. Okovit, V.V. Kalinovskiy

The experimental investigation of the character of changes in physical properties (electric resistance, coercive force and damping decrement) of the 06Ch16N15M3B steel deformed by drawing at 77 K depending on the duration of the ultrasonic irradiation has been carried out. The results show that the behavior of relaxation processes being in the structure of the steel with a residual martensite has a non-monotone (two-stage) nature with different relaxation times. A role of dislocation and diffusion processes, activated by the ultrasound irradiation, for equalizing the internal stress field levels in the heterogeneous structures is analyzed.