

# 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  $\tau$  от 1 с до 5 ч. Интенсивность продольных ультразвуковых механических колебаний (частота  $f = 20,5$  кГц) была постоянной и составляла  $0,6$  Вт/мм<sup>2</sup> (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  $\rho/\rho_0$ , где  $\rho_0$  и  $\rho$  – 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 ( $\tau$  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].

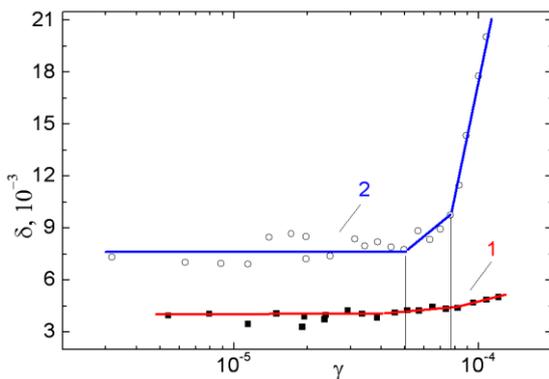


Рис. 1. Амплитудная зависимость внутреннего трения стали 06X16H15M3B, предварительно деформированной волочением при 77 К (1) и прошедшей последующее высокочастотное нагружение (2)

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 К, мартенситная фаза не выявлена, а при последующем УЗВ изменения параметра  $\rho^{77}/\rho_0^{77}$  не существенны. Кроме того, отметим, что измерения  $M(H)$  после высокочастотного нагружения разной продолжительности образцов, деформированных при 77 К, показали, что объёмное содержание остаточного мартенсита, составляющего не менее 10% [3], не изменилось.

На рис. 2 и 3 показаны зависимости изменения параметров  $\rho/\rho_0$  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  $\rho/\rho_0$  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  $\rho^{77}/\rho_0^{77}$ .

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 К), 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  $\rho^{77}/\rho_0^{77}$  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;  $\alpha_i$  – направляющие косинусы  $M$ ;  $\epsilon_{jk}$  – 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.

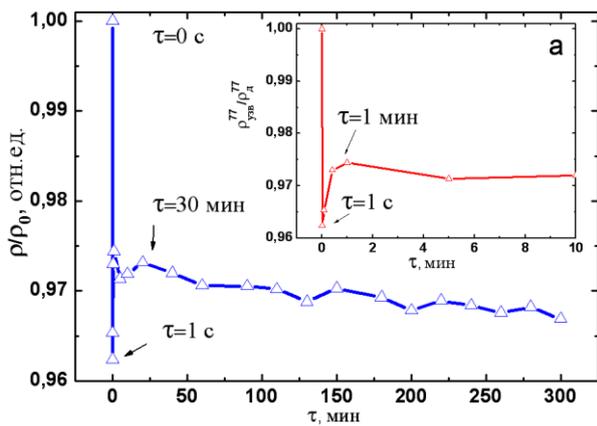


Рис. 2. Зависимость электросопротивления стали 06X16N15M3B, деформированной волочением при 77 К, от времени последующего УЗВ; а – в увеличенном масштабе по времени

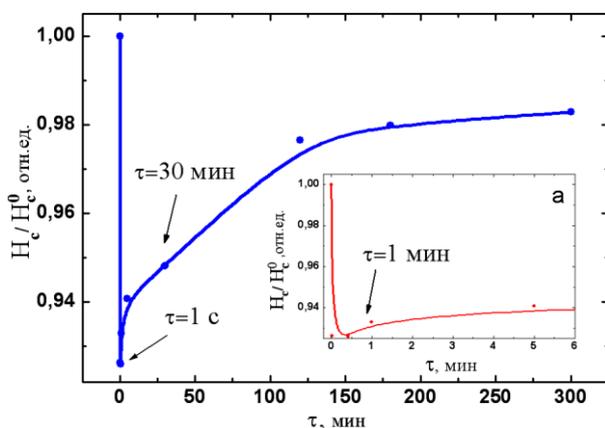


Рис. 3. Зависимость коэцитивной силы стали 06X16N15M3B, деформированной волочением при 77 К, от времени последующего УЗВ; а – в увеличенном масштабе по времени

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  $\rho^{77}/\rho_0^{77}$  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  $\gamma$ -матрице, их перераспределение, а также миграции неравновесных вакансий на стоки. Отметим, что подобная структурная перестройка при УЗВ наблюдалась ранее электронно-микроскопически в корпусной стали 15X2MФА [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 15X2MНФА 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, декремента загасання) деформованої волочінням при 77 К аустенітної сталі 06X16N15M3B від тривалості подальшого ультразвукового впливу. Встановлено, що протікання при цьому релаксаційних 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.