

ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ*

Баранникова С.А.^{1,2,3}, д.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник (bsa@ispms.tsc.ru)

Бочкарёва А.В.¹, к.т.н., доцент, младший научный сотрудник (avb@ispms.tsc.ru)

Лунёв А.Г.^{1,4}, к.т.н., научный сотрудник, доцент кафедры теоретической и прикладной механики (agl@ispms.tsc.ru)

Шляхова Г.В.^{1,5}, к.т.н., научный сотрудник, доцент кафедры «Машины и аппараты химических и атомных производств» (shgv@ispms.tsc.ru)

Зуев Л.Б.^{1,2}, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией физики прочности, профессор кафедры «Теория прочности и проектирование» (lbz@ispms.tsc.ru)

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
(634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4)

² Национальный исследовательский Томский государственный университет
(634034, Россия, Томск, пр. Ленина, 36)

³ Томский государственный архитектурно-строительный университет
(634003, Россия, Томск, пл. Соляная, 2)

⁴ Национальный исследовательский Томский политехнический университет
(634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30)

⁵ Северский технологический институт НИЯУ МИФИ
(636036, Россия, Северск, Томская обл., пр. Коммунистический, 65)

Аннотация. Исследовано изменение скорости распространения ультразвука при пластической деформации коррозионно-стойкой высокохромистой стали 40X13 с феррито-карбидной (состояние поставки), мартенситной (после закалки) и сорбитной (после высокого отпуска) структурами. Обнаружено, что каждое состояние демонстрирует свой вид кривой нагружения. В состоянии поставки диаграмма нагружения является практически параболической на всем протяжении, в то время как в мартенситном состоянии содержит только стадию линейного деформационного упрочнения, а в сорбитном состоянии кривая пластического течения является трехстадийной. Методами оптической и атомно-силовой микроскопии исследована структура стали при различных видах термической обработки. Одновременно с регистрацией кривых нагружения проводили измерение скорости ультразвуковых поверхностных волн (волн Рэлея) в исследуемой стали при растяжении. Реализация метода измерения скорости волн Рэлея заключалась в периодической генерации прямоугольных импульсов длительностью 100 нс на входе излучающего пьезопреобразователя и регистрации прошедшей по образцу волны посредством приемного пьезопреобразователя, подключенного к цифровому осциллографу. Регистрируемый сигнал в цифровом виде использовали для измерения времени, прошедшего от момента генерации импульса на входе излучающего преобразователя до момента возникновения сигнала на выходе приемного преобразователя. Расстояние между преобразователями в процессе эксперимента остается постоянным. Показано, что зависимость скорости ультразвука при активном нагружении определяется законом пластического течения, то есть стадийностью соответствующей диаграммы нагружения. Структурное состояние исследуемой стали изменяет не только тип деформационной кривой при одноосном растяжении, но и меняет характер зависимости скорости ультразвука от деформации.

Ключевые слова: высокохромистая сталь, структура, пластическая деформация, механические свойства, скорость ультразвука, атомно-силовая микроскопия.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-558-564

Поиск новых закономерностей в изменении физико-механических свойств металлов и сплавов после различных внешних энергетических воздействий является одной из важнейших проблем материаловедения. Изучение закономерностей изменения свойств необходимо для получения сбалансированного комплекса характеристик конструктивной прочности сплавов при энергосиловых воздействиях, таких как

обработка давлением и термическая обработка сплавов.

Общепринятые пути исследования пластических свойств материалов имеют пределы по масштабам объекта анализа: макроскопический, состоящий в исследовании формы кривой пластического течения с одновременным наблюдением за крупными деталями формоизменения образца и сопутствующими явлениями, и микроскопический, сосредоточенный на детальном анализе распределения дефектов в микрообъемах [1]. Изучение границ и тем более выяснение природы каж-

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Государственной академии наук в 2013 – 2020 гг. и гранта РФФИ № 14-08-31310 мол_а.

дой из стадий (в особенности для поликристаллов) оказывается сложной задачей, так как часто отсутствуют достаточно информативные и надежные внешние признаки смены механизмов деформации, наблюдаемые непосредственно во время механических испытаний. Перспективными с этой точки зрения представляются акустические исследования свойств металлов и сплавов [2 – 4]. В работах [5, 6] при растяжении алюминия показано, что анализ изменения скорости распространения ультразвука при деформации растяжения создает возможность выделения стадий пластического течения, обусловленных различием дислокационных дефектов, которые наблюдаются в материале на разных этапах течения. Скорость ультразвука в конструкционных сталях зависит как от уровня остаточных напряжений, так и от концентрационного фактора [6]. Однако детальный анализ влияния термической обработки и структуры на характер зависимости скорости ультразвука в коррозионностойких сталях не проводился.

Целью настоящей работы является исследование изменения скорости распространения ультразвука при пластической деформации коррозионностойкой высокохромистой стали 40X13.

Сталь 40X13 обладает удовлетворительным соотношением прочностных и пластических характеристик, хорошей коррозионной стойкостью в атмосфере воздуха, в воде и в ряде кислот и используется для изготовления ответственных деталей машин и агрегатов. Для аттестации материалов такого назначения важным представляется определение запаса пластичности и перехода к стадии разрушения до появления его видимых признаков. По этой причине в настоящей работе было предпринято исследование изменения скорости ультразвука в процессе активного растяжения стали 40X13, деформационное поведение которой исследовано в работе [7].

Для проведения исследований выбрана высокохромистая нержавеющая сталь марки 40X13, содержащая 0,4 % С, 0,6 % Si, 0,55 % Mn, 12,5 % Cr. Эта сталь после закалки имеет хорошую коррозионную стойкость при температуре, которая способна обеспечить полное растворение карбидов. Сталь 40X13 целесообразно использовать после температурного отпуска при 200 – 400 °С с целью получения высоких коррозионной стойкости и твердости или после высокого отпуска при температуре 600 – 650 °С для получения конструкционного материала [8]. Образцы в форме двойной лопатки с размерами рабочей части 50×10×2 мм были вырезаны электроискровой резкой из горячекатаного листа в состоянии поставки (ГОСТ 5582 – 75). Материал исследовали в состоянии поставки (1), а также в закаленном (2) и в отпущенном (3) состояниях. Закалку проводили после гомогенизации при температуре (Т) 1050 °С в течение 3 ч путем быстрого охлаждения на воздухе. Высокий отпуск проводили от температуры 600 °С с выдержкой в течение 3 ч и охлаждением с печью.

Для структурного анализа использовали оптическую микроскопию (Neophot 21) [9] и атомно-силовую микроскопию (Solver PH47-PRO, изготовлен ЗАО «Нанотехнология-МДТ», Зеленоград, Россия) [9], которые позволяют исследовать особенности структуры различных материалов [10 – 13].

Подготовленные образцы подвергали одноосному растяжению со скоростью $6,67 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ при комнатной температуре на универсальной машине LFM-125. Одновременно с регистрацией кривых нагружения проводили измерение скорости ультразвуковых поверхностных волн (волн Рэлея) в исследуемой стали при растяжении. Реализация метода измерения скорости волн Рэлея заключалась в периодической генерации прямоугольных импульсов длительностью 100 нс на входе излучающего пьезопреобразователя и регистрации прошедшей по образцу волны посредством приемного пьезопреобразователя, подключенного к цифровому осциллографу OWON RDS6062S. Регистрируемый сигнал в цифровом виде использовали для измерения времени t , прошедшего от момента генерации импульса на входе излучающего преобразователя до момента возникновения сигнала на выходе приемного преобразователя. Расстояние (L) между преобразователями в процессе эксперимента остается постоянным. В этом случае скорость рэлеевской волны $V_s = L/t$. Высокая (500 МГц) частота дискретизации цифрового осциллографа позволила проводить измерения скорости с чувствительностью порядка $2 \cdot 10^{-4}$.

Металлографические исследования шлифов показали, что в состоянии поставки (1) образцы стали 40X13 имеют зернистую структуру, состоящую из ферритной и карбидной фаз (рис. 1, а).

Сталь 40X13 (после закалки) в состоянии 2 приобретает мартенситную структуру с небольшим количеством карбидов (рис. 1, б). После высокого отпуска (в состоянии 3) в материале формируется сорбитная структура (феррит и карбиды) [14].

Исследование структуры методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с применением контактного метода в режиме «постоянной силы» [11] показало, что данные оптической микроскопии согласуются с результатами АСМ (рис. 2, а, б). Так, структура стали в состоянии поставки представляет собой смесь ферритной и карбидной фаз (рис. 2, а). В состоянии после закалки и охлаждения на воздухе микроструктура стали состоит из мартенсита и включений карбидов (рис. 2, б). В матрице мартенсит преимущественно имеет игольчатую форму, однако встречается также мартенсит в виде очень тонких пластин шириной менее 200 нм. Нерастворенные карбиды имеют в основном форму глобулей, максимальный размер которых составил до 500 нм. Наряду с крупными частицами карбидов наблюдаются также очень мелкие частицы, имеющие вытянутую форму. Следует отметить, что такие мелкие выделения не могут быть определены оптической микроскопией.

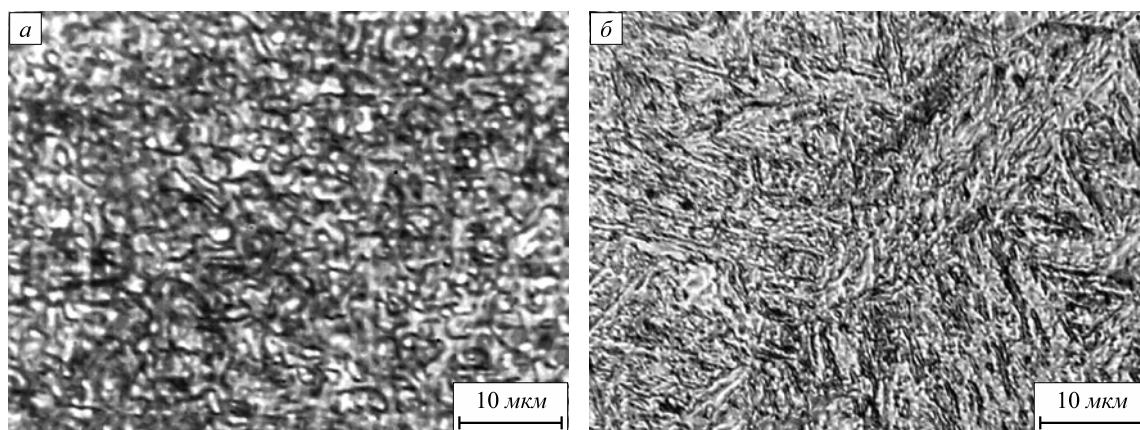


Рис. 1. Микроструктура стали 40X13 в состоянии поставки (а) и в закаленном состоянии (б)

Fig. 1. Microstructure of 40KH13 steel in the as-received condition (a) and in the hardened state (b)

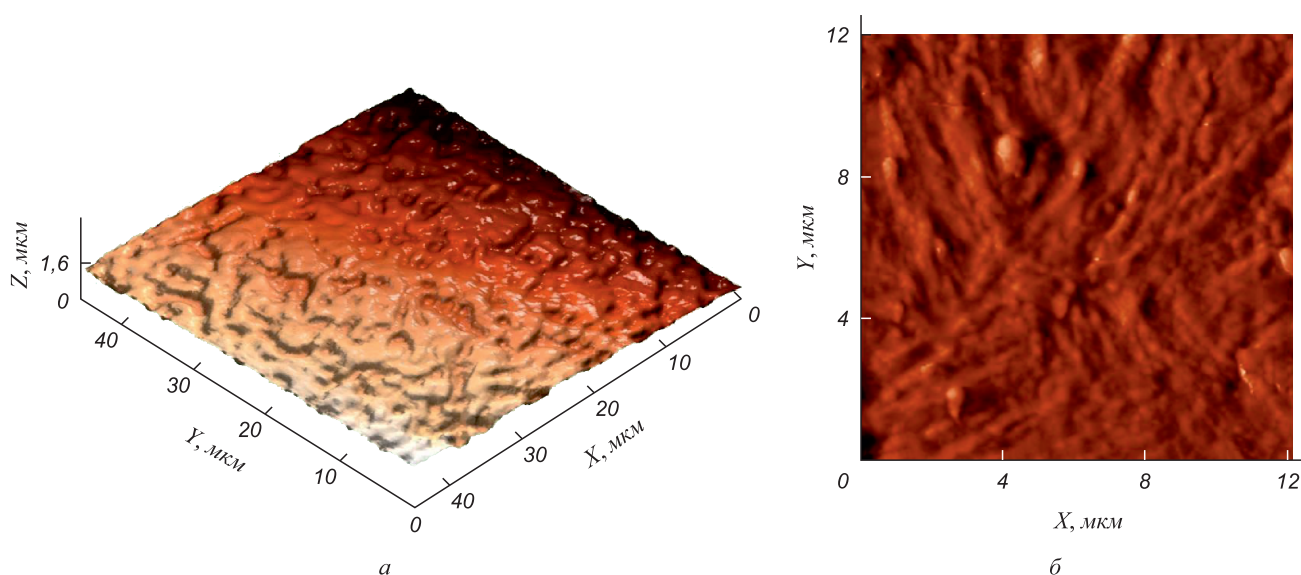


Рис. 2. Топография поверхности стали 40X13:

а – 3D изображение структуры в состоянии поставки; б – рельеф поверхности в закаленном состоянии

Fig. 2. Topography of 40KH13 steel surface:

а – 3D-image of the structure in the as-received condition; б – surface relief in the hardened state

Кривые нагружения стали 40X13 в трех исследуемых состояниях представлены на рис. 3. Механические характеристики и скорость ультразвука (V_{S_0}) в стали 40X13 в состоянии поставки, а также в закаленном и в отпущенном состояниях приведены ниже:

Состояние	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	HV, МПа	V_{S_0} , м/с
1	420,0	676,6	22,7	2060	3067
2	348,5	1233,4	1,97	3880	2958
3	278,6	1098,3	9,6	3498	3034

Характер упрочнения стали в состоянии поставки, в закаленной стали и стали после закалки и высокого отпуска существенно различен, как и характеристики прочности и пластичности (рис. 4). Общее удлинение до разрыва образца в закаленном состоянии составило

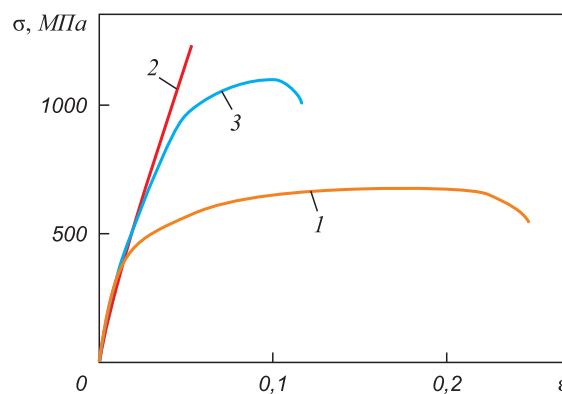


Рис. 3. Диаграммы нагружения стали 40X13 в состоянии поставки (1), в закаленном (2) и в отпущенном (3) состояниях

Fig. 3. Loading diagrams of 40KH13 steel in the as-received condition (1), in the hardened (2) and in the released (3) states

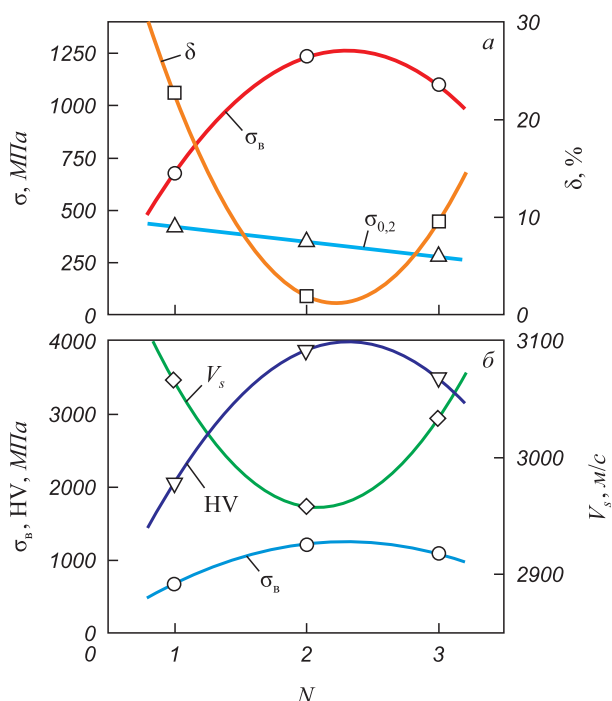


Рис. 4. Изменение предела текучести (Δ), временного сопротивления разрыву (\circ), относительного удлинения при разрыве (\square), твердости HV (∇) и скорости ультразвука (\diamond) в стали 40X13 в состоянии поставки (1), в закаленном (2) и в отпущенном (3) состояниях

Fig. 4. Change of yield strength (Δ), ultimate resistance to the fracture (\circ), specific elongation at the fracture (\square), solidity HV (∇) and ultrasonics rate (\diamond) in steel 40KH13 in the as-received condition (1), in the hardened (2) and in the released (3) states

примерно 2 %. Разрушение закаленной стали происходит псевдохрупко без образования шейки. В образцах стали в состоянии поставки и в отпущенном состоянии формируется хорошо видимая шейка.

В закаленном состоянии в объеме стали сформировалась мартенситная структура, характеризующаяся высокой прочностью, твердостью и низкой пластичностью (рис. 4, б), что видно на диаграмме нагружения (рис. 3). Для увеличения пластичности стали в закаленном состоянии был проведен высокий отпуск при температуре 600 °С.

Состоянию стали с мартенситной структурой (состояние 2) соответствуют максимальное значение предела прочности и твердости HV (рис. 4, а) и минимальные значения общей деформации δ и скорости ультразвука V_s (рис. 4, б), которая является чувствительной к напряженно-деформированному состоянию материала [6].

Для выявления стадий кривых упрочнения в исследуемом материале при разной термической обработке использование метода логарифмирования [15] позволило представить кривую нагружения в системе функциональных логарифмических координат $\ln(S - S_0) - f(\ln \epsilon)$ (для истинных напряжений S и деформаций ϵ) и определить наличие участков на деформационной кривой, где показатель деформационного

упрочнения n является постоянным и меняется дискретно от участка к участку.

Относительная деформация начальная ($\epsilon_{нач}$) и конечная ($\epsilon_{кон}$) (числитель и знаменатель соответственно) на различных стадиях пластического течения при деформировании стали 40X13 с различной термической обработкой приведены ниже:

Состояние	$\epsilon_{нач}/\epsilon_{кон}$, %, на стадии течения		
	линейная $\sigma \sim \epsilon$	параболическая $\sigma \sim \epsilon^{1/2}$	предразрушения $\sigma \sim \epsilon^{1/3}$
1	—/—	1,4/6,8	—/—
2	0,9/4,5	—/—	—/—
3	1,9/4,1	5,3/7,1	7,7/9,5

Анализ стадийности деформационных кривых сплава в состоянии поставки позволил четко выделить один продолжительный прямолинейный участок, для которого показатель деформационного упрочнения n остается постоянным. Таким образом, на диаграмме нагружения сплава в состоянии поставки удалось выделить стадию параболического упрочнения, где $n \approx 1/2$.

В закаленном состоянии диаграмма нагружения содержит стадию линейного деформационного упрочнения ($n = 1$) и последующий участок с непрерывно меняющимся показателем n .

На кривой нагружения отпущенной стали удалось выделить три стадии пластического течения: стадию линейного упрочнения ($n = 1$), стадию параболического упрочнения (Тейлора) ($n \approx 1/2$), стадию предразрушения ($n \approx 0,3$). Полученные данные согласуются с результатами выполненных ранее исследований [7].

В работе проведен анализ изменения скорости распространения ультразвука V в соответствии с кривыми нагружения стали 40X13 при различной термической обработке. Измерения, проведенные на протяжении всего процесса растяжения, привели к обнаружению интересных закономерностей, хорошо выявляемых при анализе зависимостей V от общей деформации. На рис. 5 представлены совмещенные диаграммы нагружения и изменения скорости ультразвука в процессе активного нагружения стали 40X13 для трех режимов термической обработки. Наличие стадий пластического течения для диаграмм нагружения и их интервалы приведены выше. Установлено, что зависимость скорости распространения ультразвука $V(\epsilon)$ существенно меняется при растяжении образцов стали в разных состояниях (рис. 5). В работах [5, 6] установлено, что кривая $V(\epsilon)$ для поликристаллического алюминия имеет N -образную трехстадийную форму, которая указывает на различие природы связи V и ϵ в соответствующих интервалах пластической деформации. В работах [5, 6] установлено, что зависимость $V(\sigma)$ для этого же образца содержит три прямолинейных участка.

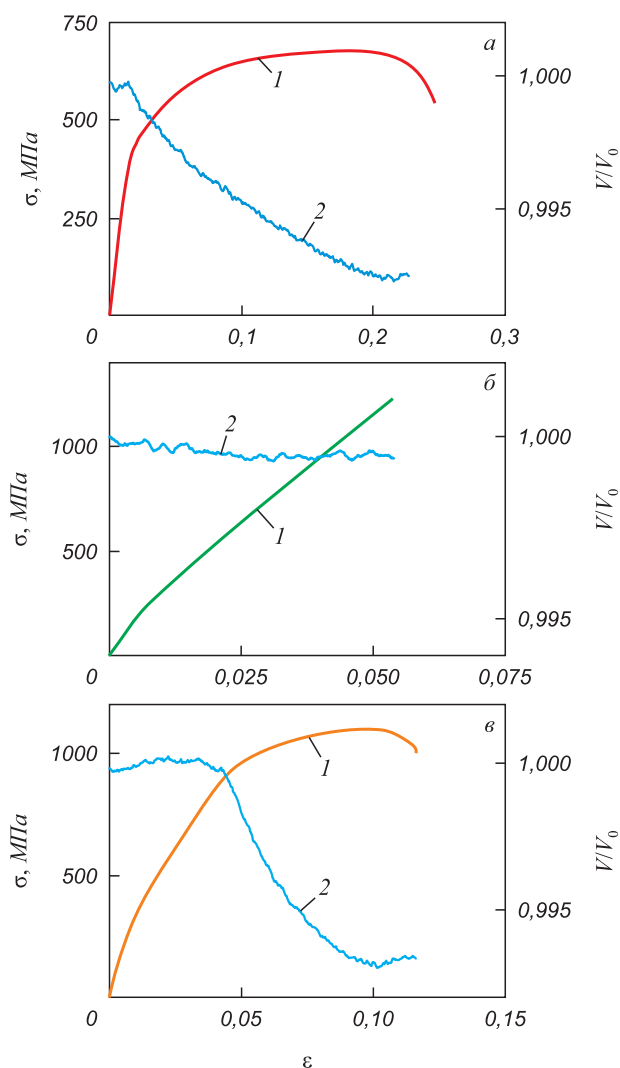


Рис. 5. Диаграммы нагружения (1) и изменения относительной скорости ультразвука (2) в процессе активного нагружения стали 40X13 в состоянии поставки (а), в закаленном (б) и в отпущенном (в) состояниях

Fig. 5. Loading diagrams (1) and changes of ultrasonics relative velocity (2) in the process of active loading of 40KH13 steel in the as-received condition (a), in the hardened (2) and in the released (3) states

Следует отметить, что для большинства материалов наблюдается тенденция снижения скорости распространения рэлеевских волн при увеличении общей деформации образца [16, 17], аналогичная зависимость наблюдается и для образцов стали 40X13 в состоянии поставки (рис. 5, а). Однако вид зависимости изменения скорости рэлеевских волн от деформации определяется стадийностью кривой пластического течения. Диаграмма нагружения стали 40X13 в закаленном состоянии с мартенситной структурой (рис. 5, б) содержит только одну стадию деформирования – линейную, при этом скорость ультразвука остается неизменной на протяжении всего процесса деформирования: $V(\epsilon) \approx \text{const}$. При этом ее значение для недеформированного образца закаленной стали (в состоянии 2) ниже, чем для образцов в состоянии поставки.

Зависимость относительной скорости ультразвука V/V_0 (где V_0 – скорость ультразвука в недеформированном материале) от деформации ϵ в ходе пластического течения стали в отпущенном состоянии также проявляет стадийность (рис. 5, в). На линейной стадии пластического течения скорость ультразвука остается неизменной, тогда как на параболической стадии скорость уменьшается пропорционально общей деформации.

В настоящей работе для образцов стали 40X13 получены также данные об изменении относительной скорости ультразвука V/V_0 от величины относительного действующего напряжения σ/σ_b . Как и в работах [6, 16] при переходе к безразмерным координатам V/V_0 и σ/σ_b удалось получить линейную зависимость (рис. 6, а):

$$\frac{V}{V_0} = \alpha \frac{\sigma}{\sigma_b} + \beta.$$

где α и β – константы, различны для разных участков, определяются экспериментально.

Значения α и β (через косую) различны для разных линейных участков стали 40X13 с различной термической обработкой:

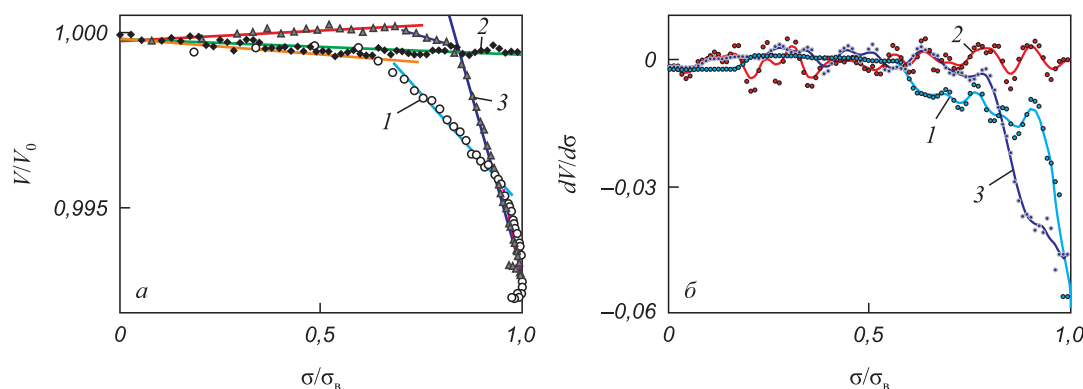


Рис. 6. Изменение относительной скорости ультразвука (а) и производной скорости ультразвука от относительного действующего напряжения (б) в процессе активного нагружения стали 40X13 в состоянии поставки (1), в закаленном (2) и в отпущенном (3) состояниях

Fig. 6. Change of ultrasonics relative velocity (a) and ultrasonics derivative rate on the relative active voltage (b) in the process of active loading of 40KH13 steel in the as-received condition (1), in the hardened (2) and in the released (3) states

Участок	α и β для стали в состоянии		
	поставки	закаленном	отпущенном
I	$-9,4 \cdot 10^{-4}/1$	$-4,37 \cdot 10^{-4}/1$	$5,97 \cdot 10^{-4}/1,000$
II	$-1,29 \cdot 10^{-2}/1,008$	–	$-3,42 \cdot 10^{-3}/1,002$
III	$-5,46 \cdot 10^{-2}/1,048$	–	$-4,07 \cdot 10^{-3}/1,034$

Как было показано в работах [6, 16], изменения скорости ультразвука при деформировании определяются поведением подвижных дислокаций, непосредственно участвующих в процессах скольжения, причем зависимость $V(\epsilon)$ отражает экстремальное поведение плотности подвижных дислокаций в процессе деформирования, а зависимость $V(\sigma)$ связана со скоростью изменения этой величины при деформации.

Соотношение, описывающее связь скорости ультразвука и приложенных напряжений, может быть использовано для оценки прочностных характеристик материала неразрушающим методом, в частности, временного сопротивления [6, 16]. Поскольку в ходе пластического течения картины локализации деформации [7] и скорость распространения ультразвука изменяются согласованно, оказывается возможной оценка механических свойств, основанная на этом соотношении [6, 16].

Выводы. Показаны возможности и преимущества метода атомно-силовой микроскопии для исследования структуры сталей по сравнению с традиционно используемыми оптическими методами. Установлено, что структурное состояние исследуемой стали изменяет не только тип деформационной кривой при одноосном растяжении, но и меняет характер зависимости скорости распространения ультразвука от деформации. Анализ полученных результатов дает возможность установить следующие закономерности. Для стали 40X13 в состоянии поставки диаграмма нагружения является практически параболической, поэтому наблюдается монотонное уменьшение скорости распространения рэлевских волн с ростом общей деформации. В закаленном состоянии диаграмма нагружения представлена только стадией линейного деформационного упрочнения (без учета упругости и микропластичности), которая завершается псевдохрупким разрушением, поэтому наблюдается только постоянная скорость ультразвука на протяжении всего процесса деформирования. На кривой нагружения отпущенной стали помимо линейной стадии и стадии параболического упрочнения (Тейлора) наблюдается стадия предразрушения; на линейной стадии пластического течения скорость ультразвука остается неизменной, на параболической стадии скорость уменьшается пропорционально общей деформации. Подтверждена универсальность линейной связи скорости ультразвука и приложенных напряжений для стали 40X13 в различных состояниях. Это означает, что ультразвуковые измерения могут рассматриваться как альтернатива традиционным методам определения

временного сопротивления металлов и сплавов, требующим изготовления специальных образцов. Измерения скорости распространения ультразвука в материалах при пластической деформации позволяют анализировать стадийность кривых пластического течения непосредственно в ходе эксперимента и прогнозировать, например, переход к стадии квазихрупкого или вязкого разрушения до появления его видимых признаков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pelleg J. Mechanical properties of materials. – Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer, 2013. – 644 p.
2. Murav'ev V.V., Volkova L.V. Estimation of residual stresses in locomotive wheel treads using the acoustoelasticity method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2013. Vol. 49. No. 7. P. 382 – 386.
3. Murav'ev V.V., Murav'ev M.V., Bekher S.A. A novel technique of AE signal processing for upgrading the accuracy of flaw localization // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2002. Vol. 38. No. 8. P. 600 – 610.
4. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Platunov A.V. et al. Investigations of acoustoelastic characteristics of rod waves in heat-treated steel wires using the electromagnetic-acoustic method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2012. Vol. 48. No. 8. P. 447 – 456.
5. Zuev L.B., Semukhin B.S., Bushmeleva K.I. Variation of the ultrasonic velocity in Al under plastic deformation // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2000. Vol. 45. No. 1. P. 50 – 54.
6. Zuev L.B., Semukhin B.S. Acoustic properties of metals and alloys under deformation // Physics and Chemistry of Metal Treatment. 2002. No. 5. P. 65 – 68.
7. Danilov V.I., Orlova D.V., Zuev L.B., Shlyakhova G.V. Special features of the localized plastic deformation and fracture of high chromium steel of the martensitic class // Russian Physics Journal. 2009. Vol. 52. No. 5. P. 525 – 531.
8. Афонин В.К. Металлы и сплавы: Справочник / Под ред. Ю.П. Солнцева. – СПб.: НПО «Профессионал», 2007. – 1092 с.
9. Панченко Е.В., Скаков Ю.А., Кример Б.И. Лаборатория металлографии. – М.: Металлургия, 1965. – 439 с.
10. Сканирующий зондовый микроскоп Solver PRO. Руководство пользователя. – М.: ЗАО «Нанотехнология-МДТ», 2006. – 341 с.
11. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Шляхова Г.В., Орлова Д.В. Мезо- и макроструктурная локализация пластического течения объемного субмикроструктурного титана // Изв. вуз. Физика. 2009. № 9-1. С. 48 – 52.
12. Shlyakhova G.V., Barannikova S.A., Zuev L.B. Nanostructure of superconducting Nb-Ti cable // Steel in Translation. 2013. Vol. 43. No. 10. P. 640 – 643.
13. Shlyakhova G.V., Barannikova S.A., Zuev L.B., Kosinov D.A. Localization of plastic deformation in alloyed γ -iron single crystals electrolytically saturated with hydrogen // Steel in Translation. 2013. Vol. 43. No. 8. P. 480 – 484.
14. Зуев Л.Б., Шляхова Г.В. О возможностях атомно-силовой микроскопии в металлографии углеродистых сталей // Материаловедение. 2014. № 7. С. 7 – 14.
15. Трефилов В.И., Моисеев В.Ф., Печковский Э.П. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. – Киев: Наукова думка, 1989. – 256 с.
16. Zuev L.B., Semukhin B.S., Lunev A.G. On the interrelation between plastic-deformation localization and the acoustic properties of aluminum and D16 alloy // Russian Metallurgy (Metallurgy). 2004. No. 3. P. 286 – 292.
17. Лунев А.Г., Бочкарева А.В. О влиянии структурных превращений в деформируемых материалах на скорость и затухание волн Рэлея // Изв. ТПУ. 2008. Т. 312. № 2. С. 188 – 191.

Поступила 22 сентября 2014 г.

ULTRASOUND VELOCITY VARIATION AT PLASTIC DEFORMATION OF HIGH-CHROMIUM STEEL

S.A. Barannikova^{1,2,3}, A.V. Bochkareva¹, A.G. Lunev^{1,4},
G.V. Shlyakhova^{1,5}, L.B. Zuev^{1,2}

¹Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

³Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

⁴National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

⁵Seversk Technological Institute, National Research Nuclear University, Seversk, Russia

Abstract. The paper is devoted to the research of velocity variation of ultrasound propagation at plastic deformation of corrosion-resistant high-chromium steel 40KH13 with ferrite-carbide (as-received condition), martensitic (after hardening) and sorbite (after high-temperature tempering) structures. It has been revealed that each condition demonstrates its own load curve. In as-received condition the load diagram is practically a parabolic one on the whole extent, while in a martensitic condition there is only the stage of a linear deformation hardening, and in a sorbite condition the plastic flow curve is three-stage. Using the methods of optic and atomic-force microscopy, the authors have researched the structure of steel at different kinds of thermal treatment. Simultaneously with the registration of load curves the researches have conducted the velocity measurement of ultrasound surface waves (Rayleigh waves) in the researched steel at the extension. The realization of the method of velocity variation of Rayleigh waves is in a periodic generation of rectangular impulses with the duration of 100 ns at the input of a radiant piezoelectric transducer and the registration of the passed-by one according to the sample of the wave by means of the receiving piezoelectric transducer, connected up to the digital oscilloscope. The registered signal in a digital form has been used to measure time, passed from the moment of impulse generation at the input of the radiant transducer up to the moment of signal initiation at the output of the receiving transducer. The distance between the transducers during the experiment is constant. It has been shown that the dependence of ultrasound velocity at active loading is defined by the plastic flow rule, i.e. the staging of the appropriate loading diagram. The structural condition of the researched steel changes not only the type of the deformation curve at uniaxial tension, but it also changes the dependence character of ultrasound velocity on the deformation.

Keywords: high-chromium steel, structure, plastic deformation, mechanical properties, ultrasound velocity, atomic-force microscopy.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-558-564

REFERENCES

- Pelleg J. *Mechanical properties of materials*. Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer, 2013, 644 p.
- Murav'ev V.V., Volkova L.V. Estimation of residual stresses in locomotive wheel treads using the acoustoelasticity method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2013, vol. 49, no. 7, pp. 382–386.
- Murav'ev V.V., Murav'ev M.V., Bekker S.A. A novel technique of AE signal processing for upgrading the accuracy of flaw localization. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2002, vol. 38, no. 8, pp. 600–610.
- Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Platunov A.V. etc. Investigations of acoustoelastic characteristics of rod waves in heat-treated steel wires using the electromagnetic-acoustic method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2012, vol. 48, no. 8, pp. 447–456.
- Zuev L.B., Semukhin B.S., Bushmeleva K.I. Variation of the ultrasonic velocity in Al under plastic deformation. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 2000, vol. 45, no. 1, pp. 50–54.
- Zuev L.B., Semukhin B.S. Acoustic properties of metals and alloys under deformation. *Physics and Chemistry of Metal Treatment*. 2002, no. 5, pp. 65–68.
- Danilov V.I., Orlova D.V., Zuev L.B., Shlyakhova G.V. Special features of the localized plastic deformation and fracture of high chromium steel of the martensitic class. *Russian Physics Journal*. 2009, vol. 52, no. 5, pp. 525–531.
- Afonin V.K. *Metally i splavy: Spravochnik* [Metals and alloys: Reference book]. Solntsev Yu.P. ed. St. Petersburg: NPO "Professional", 2007, 1092 p. (In Russ.).
- Panchenko E.V., Skakov Yu.A., Krimer B.I. *Laboratoriya metallografii* [Laboratory of metallography]. Moscow: Metallurgiya, 1965, 439 p. (In Russ.).
- Skanirovushchii zondovyi mikroskop Solver PRO. Rukovodstvo pol'zovatelya* [Scanning probe microscope Solver PRO. User manual]. Moscow: ZAO "Nanotekhnologiya-MDT", 2006, 341 p. (In Russ.).
- Zuev L.B., Danilov V.I., Shlyakhova G.V., Orlova D.V. Meso- and macrostructural localization of plastic flow of volumetric submicrocrystalline titanium. *Izvestiya VUZov. Fizika*. 2009, no. 9-1, pp. 48–52. (In Russ.).
- Shlyakhova G.V., Barannikova S.A., Zuev L.B. Nanostructure of superconducting Nb-Ti cable. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 10, pp. 640–643.
- Shlyakhova G.V., Barannikova S.A., Zuev L.B., Kosinov D.A., Localization of plastic deformation in alloyed γ -iron single crystals electrolytically saturated with hydrogen. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 8, pp. 480–484.
- Zuev L.B., Shlyakhova G.V. On possibilities of atomic-force microscopy in metallography of carbon steel. *Materialovedenie*. 2014, no. 7, pp. 7–14. (In Russ.).
- Trefilov V.I., Moiseev V.F., Pechkovskii E.P. *Deformatsionnoe uprochnenie i razrushenie polikristallicheskih metallov* [Strain hardening and polycrystalline metal fracture]. Kiev: Naukova dumka, 1989, 256 p. (In Russ.).
- Zuev L.B., Semukhin B.S., Lunev A.G. On the interrelation between plastic-deformation localization and the acoustic properties of aluminum and D16 alloy. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2004, no. 3, pp. 286–292.
- Lunev A.G., Bochkareva A.V. On the influence of structural transformations in deformable materials on the velocity and decay of Rayleigh waves. *Izvestiya TPU*. 2008, vol. 312, no. 2, pp. 188–191. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was performed in the framework of the Program of fundamental researches of the State Academy of Sciences in 2013 – 2020 and the RFBR grant no. 14-08-31310 мол_a.

Information about the authors:

S.A. Barannikova, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Assist. Professor, Leading Researcher (bsa@ispms.tsc.ru)
A.V. Bochkareva, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Junior Researcher (avb@ispms.tsc.ru)
A.G. Lunev, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate, Assist. Professor of the Chair "Theoretical and Applied Mechanics" (agl@ispms.tsc.ru)
G.V. Shlyakhova, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate, Assist. Professor of the Chair "Machines and Devices of Chemical and Atomic Productions" (shgv@ispms.tsc.ru)
L.B. Zuev, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Head of the Laboratory of Physics of Strength and Plasticity, Professor of the Chair "Theory of Strength and Designing" (lbz@ispms.tsc.ru)

Received September 22, 2014