

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**Институт металлургии
и материаловедения
им. А.А. Байкова РАН**

80 лет

Москва

ИМЕТ РАН

2018 г.

УДК 669.1; 546.1; 546.3

Институт металлургии материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 80 лет.
Сборник научных трудов.
М.: Интерконтакт Наука, 2018, 644 с.

ISBN 978-5-902063-58-2

Сборник подготовлен в связи с 80-летием создания Института Металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук. В статьях содержатся материалы по основным направлениям научной деятельности в области металлургии черных, цветных и редкоземельных металлов, материаловедения металлических, керамических, нанокристаллических, композиционных материалов, развития методов исследования состава, структуры и свойств материалов.

Материалы сборника могут представлять интерес для ученых и сотрудников научно-исследовательских и учебных институтов и университетов, промышленных предприятий, работающих в области металлургии черных, цветных и редких металлов, материаловедения неорганических материалов и методов исследования.

Редакционная коллегия

Академик К.А. Солнцев (ответственный редактор), академик О.А. Банных (зам. Ответственного редактора), академик В.М. Бузник, академик В.М. Иевлев, академик Ю.В. Цветков, чл.-корр. РАН М.И. Алымов, чл.-корр. РАН С.М. Баринов, чл.-корр. РАН Г.С. Бурханов, чл.-корр. РАН Григорович К.В., чл.-корр. РАН А.Г. Колмаков, чл.-корр. РАН В.С. Комлев, д.ф.-м.н. С.В. Симаков, к.т.н. О.Н. Фомина (ответственный секретарь)

ISBN 978-5-902063-58-2

© ИМЕТ РАН, 2018

Влияние термообработки на свойства сталей.

В.В. Рошупкин, М.М. Ляховицкий, М.А. Покрасин, Н.А. Минина

DOI: 10.30791/978-5-902063-58-2-408-423

Работоспособность оборудования, используемого в энергетическом, нефтехимическом и других производствах, зависит от надежности материалов и изделий, которые находятся под воздействием механических и температурных нагрузок и влиянием агрессивных сред. Использование таких материалов предполагает всестороннее исследование их теплофизических и механических свойств. Перспективными методами оценки физико-механических параметров и структуры материалов являются акустические методы и методы исследования микротвердости.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования скорости ультразвука и микротвердости ряда сталей при высоких температурах, а также рассчитанных на основе опытных данных значений ряда теплофизических и механических свойств. Характерным для исследованных сталей является наличие $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения при высоких температурах и возможность их применения в закаленном и отожженном состояниях. В связи с этим экспериментальные исследования свойств сталей проводились как на отожженных, так и закаленных образцах. Заметим, опытные данные о температурных зависимостях микротвердости сталей в технической литературе отсутствуют. В ряде случаев для уточнения температурных границ фазового перехода использовался акустико-эмиссионный метод.

Методики исследования температурных зависимостей свойств сталей.

Исследование акустических свойств металлов и их сплавов в широком температурном диапазоне представляет достаточно сложную в техническом плане задачу, т.к. пьезоэлектрические датчики используются при температурах близких к комнатной. Следовательно, датчик должен находиться за пределами области нагрева. Для проведения высокотемпературных исследований авторами работы была разработана и аттестована в ФГПУ «Стандартинформ» Методика ГСССД МЭ 216-2014 [1]. В основу методики положен способ измерения скорости ультразвука на проволочных образцах диаметром до 3 мм и соотношением длины образца к их диаметру не менее 25–30 и акустической метки в виде проточки. Однако в методику измерений был внесен ряд конструктивных и методических

изменений [2], позволивших в значительной степени повысить точность и надежность экспериментальных результатов.

Предложенная методика измерений на проволочных образцах дает возможность получать равномерное температурное поле по сечению образца и вдоль всего измерительного участка, избежать нежелательных интерференционных эффектов и упростить способ возбуждения акустических волн.

Измерение скорости ультразвуковых волн проводится импульсным методом, поскольку в данных условиях он позволяет получать наиболее точные и надежные данные.

Основы метода измерения скорости ультразвука в твердых телах при высоких температурах вполне понятны из рис. 1. Акустический импульс, возбужденный на холодном (правом) торце образца, достигает измерительного участка, где часть ультразвуковой волны, отразившись от акустической «метки» – проточки, возвращается к пьезопреобразователю и преобразуется в электрический импульс с амплитудой u_1 . Другая часть волны, пройдя через измерительный участок и отразившись от левого торца образца, также достигает пьезопреобразователя и регистрируется в виде импульса с амплитудой u_2 .

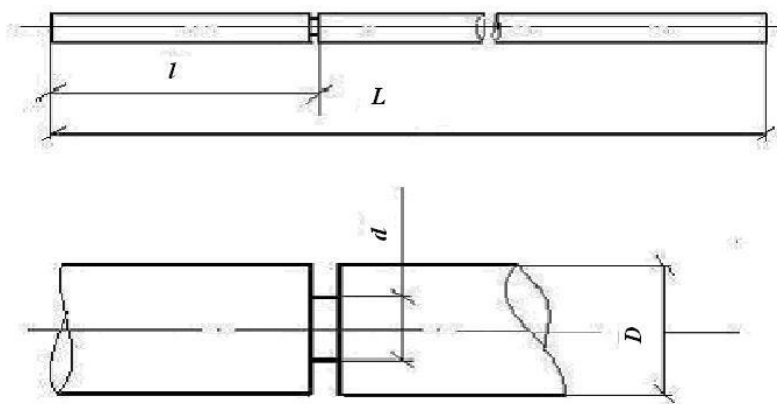


Рис.1. Конструкция образца: L – общая длина образца, l – длина измерительной части образца, D , d – диаметр соответственно образца и проточки (акустическая метка).

Использование исследуемых материалов для акустических исследований в описанном выше виде связано с технологическими трудностями при изготовлении длинномерных проволочных образцов, а так

же, как правило, с малым количеством самого материала. В этих случаях допускается использование образца, приваренного с помощью лазерной или электронной сварки к специальному волноводу. При этом сам образец образует измерительный участок, а место сварки – акустическую «метку». В качестве акустической «метки» можно использовать пропил [3].

На рис. 2 приведена характерная осциллограмма при исследовании скорости ультразвука.

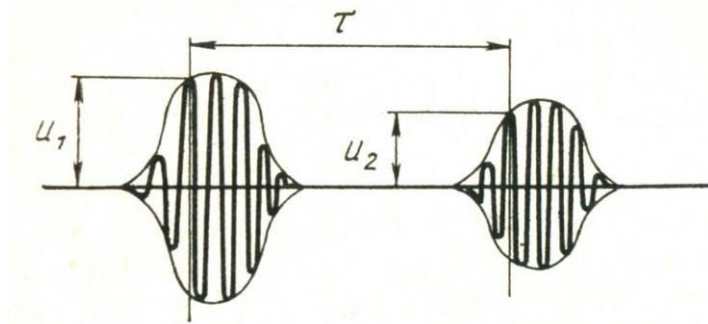


Рис.2. Вид отраженного от проточки и торца рабочей части образца радиоимпульсов.

Скорость ультразвука c определяется по длине измерительного участка образца и времени прохождения импульса между проточкой и нижним торцом образца

$$c = 2l/\tau,$$

где l – длина измерительного участка; τ – время прохождения звукового импульса двойной длины измерительного участка; c – скорость распространения ультразвука при данной температуре. Таким образом, измерение скорости ультразвука сводится к измерению времени между импульсами, отраженными от акустической «метки» и торца образца.

Как следует из приведенного уравнения, в расчетные формулы для определения скорости ультразвука входит длина рабочей части образца. Для учета температурного линейного расширения образцов при расчете значений скорости ультразвука были проведены предварительные исследования на высокоскоростном термическом дилатометре DL-1500-RH (ULVAC SINKURIKO, Japan) в том же температурном интервале и при такой же скорости изменения температуры.

Полученные опытные данные об относительном температурном расширении исследованных материалов позволяют достаточно просто рассчитать значения коэффициента температурного линейного расширения (КТЛР) дифференцированием кривой $\Delta L/L_0 = f(T)$ [4]. Однако при расчете

акустических свойств использовались экспериментальные значения относительного температурного расширения, т.к. использование КТЛР приводило к увеличению погрешности расчетных значений. Кроме того, результаты измерений относительного температурного расширения позволяют рассчитать температурную зависимость плотности исследованного материала. При этом плотность материала при комнатной температуре определяется с высокой точностью методом гидростатического взвешивания. Полученные результаты позволяют рассчитать модуль Юнга E по известному соотношению $E = \rho c^2$ [5].

Исследование микротвердости сталей проводилось в микродиапазоне методом непрерывного индентирования в соответствии с международным стандартом ISO 14577–1.215, 2.215, 3.215 и 4.207 [6–9] на автоматической (с полным компьютерным управлением процессами индентирования и математической обработкой результатов испытаний) установке последнего поколения NanoTest платформы-3 (Англия), позволяющей проводить испытания механических свойств поверхностей и их покрытий в диапазоне нагрузок (0,5–20000 мН) и температур (20–500 °С). Температура индентирования задавалась перед началом испытаний и поддерживалась на заданном уровне с погрешностью $\pm 0,5$ °С. Переход с одного температурного уровня на другой происходил под управлением программного обеспечения, при этом осуществлялся нагрев не только образца, но и самого индентора так, чтобы их температура не отличалась больше, чем на 0,5 °С. При этом происходила автоматическая калибровка системы по глубине индентирования. Количество процессов индентирования на каждом температурном уровне задавалось равным 20. Число отбракованных диаграмм нагружения достигало в ряде случаев 3. Таким образом, статистическая выборка составляла 17–20 диаграмм нагружения. В работе использовался алмазный индентор Берковича. Максимальная нагрузка на инденторе задавалась постоянной и составляла 700 мН. Глубина индентирования в микродиапазоне зависела от твердости материала и температуры испытания и находилась в диапазоне 4–10 мкм. Некоторые особенности при измерении микротвердости представлены в [10]. Последующая математическая обработка диаграмм нагружения осуществлялась автоматически по методу Оливера-Фарра [11, 12], признанному в мировой практике наиболее точным.

Т.к. представленные в работе стали используются как в закаленном, так и отожженном состояниях, экспериментальные исследования температурных зависимостей свойств проводились как на закаленных, так и

на отожженных образцах в температурном диапазоне от комнатной температуры до ~ 1100 °С для скорости ультразвука и относительного температурного расширения и до 500 °С для микротвердости.

Результаты экспериментального исследования свойств сталей

Сталь 09Г2С относится к конструкционным низколегированным (кремнемарганцовистым) сплавам для сварных конструкций. Хорошая свариваемость стали обеспечивается низким содержанием углерода. Области применения этой марки стали весьма разнообразны. Из нее изготавливаются элементы и детали сварных металлических конструкций, которые могут работать при температурах от -70 °С до $+450$ °С. Используется сталь и для производства листовых конструкций в нефтяной и химической промышленности, судостроении и машиностроении. После закалки и отпуска из этого сплава можно изготавливать детали трубопроводной арматуры. Устойчивость к низким температурам позволяет применять трубы из стали в условиях крайнего севера для прокладки нефте- и газопроводов.

Химический состав стали по данным [13] представлен в таблице 1.

Таблица 1.

Химический состав стали 09Г2С по данным [13], масс. %.

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	V
≤ 0.12	0.5-0.8	1.3-1.7	0.30	0.035	0.030	0.30	≤ 0.3	≤ 0.12

На рис. 3 приведены опытные данные о скорости ультразвука в отожженном и закаленном состояниях и относительного температурного расширения исследованной стали. Следует отметить, что опытные данные об относительном температурном расширении для отожженного и закаленного образцов совпали между собой в пределах погрешности измерений. Так же совпали значения их плотности при комнатной температуре. Из рис. 3 видно, что закалка заметно влияет на величину скорости ультразвука. Однако при температуре ~ 750 °С это различие практически исчезает, что позволяет говорить об отжиге образца. В этой же области на температурной кривой скорости ультразвука наблюдается особенность в поведении, связанная с большим содержанием железа и происходящим в стали $\alpha \rightarrow \gamma$ превращением. На температурной зависимости теплового расширения в этой области также наблюдается особенность, характерная для указанного фазового перехода. Подобное поведение относительного температурного расширения отмечалось авторами в работах [14, 15].

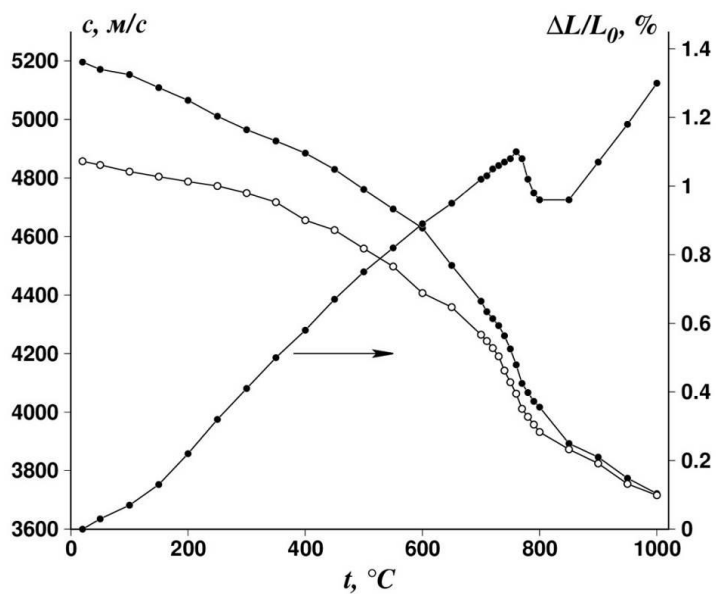


Рис.3. Температурные зависимости скорости ультразвука и относительного температурного расширения закаленного (\circ) и отожженного (\bullet) образцов.

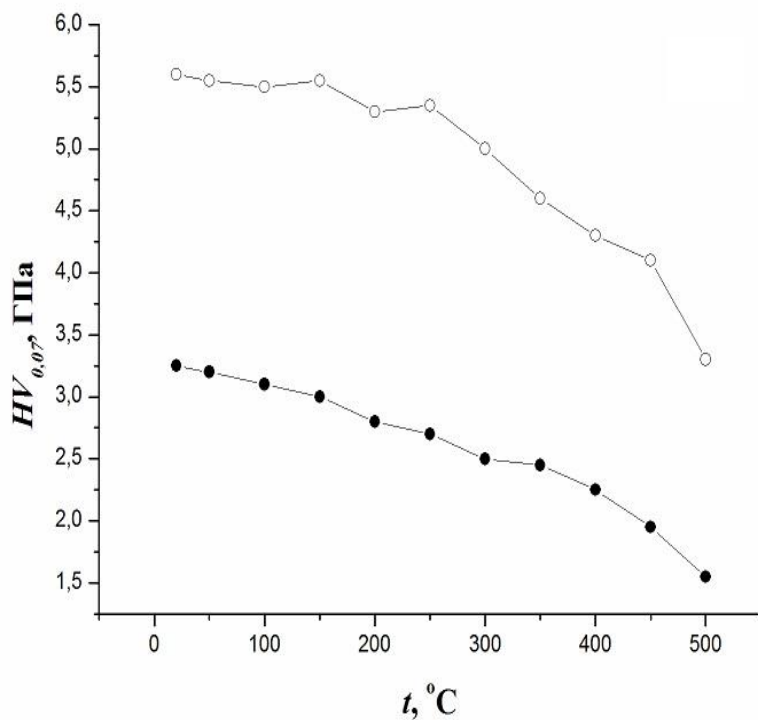


Рис.4. Температурная зависимость микротвердости стали в закаленном (\circ) и отожженном (\bullet) состояниях.

Анализ результатов исследования микротвердости показал, что закалка в значительной степени повышает ее значение, но начиная с 250 °С наблюдается быстрое падение микротвердости, что ограничивает использование стали в закаленном состоянии. На рис. 4 показаны результаты исследования микротвердости стали 09Г2С в отожженном и закаленном состояниях.

Полученные экспериментальные и расчетные значения ряда свойств стали 09Г2С обрабатывались методом наименьших квадратов для получения температурных зависимостей в виде

$$Y = A + Bt + Ct^2 + ,$$

(1)

где Y – свойство, t – температура в °С.

В математическую обработку включались опытные данные при нагревании стали до температуры ~ 700 °С, выше которой наблюдались особенности в поведении исследованных свойств, и до 500 °С – для микротвердости. В таблице 2 приведены коэффициенты аппроксимирующих уравнений для свойств исследованной стали в указанном температурном диапазоне.

Таблица 2

Значения коэффициентов аппроксимирующего уравнения (1) для стали 09Г2С.

Свойство	A	B	C	D
Отожженный образец				
Скорость звука c , м/с	5239.8	-1.192	0.002	$-2.7 \cdot 10^{-6}$
Относительное температурное расширение $\Delta L/L_0$, %	-0.035	$9.6 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-9}$
Плотность ρ , кг/м ³	7820.4	-0.229	$5.1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Модуль Юнга E , ГПа	214.4	-0.097	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$-1.6 \cdot 10^{-7}$
Микротвердость H , ГПа 20–500 °С	3.23	$-7.9 \cdot 10^{-4}$	$-4.8 \cdot 10^{-6}$	–
Закаленный образец				
Скорость звука c , м/с	4859.1	-0.294	$-3 \cdot 10^{-5}$	$-1.0 \cdot 10^{-6}$
Модуль Юнга E , ГПа	184.4	-0.024	$-3.1 \cdot 10^{-5}$	$-4.5 \cdot 10^{-8}$
Микротвердость H , ГПа 20–500 °С	5.52	0.002	$-1.2 \cdot 10^{-5}$	–

Сталь 30ХГСА относится к классу конструкционных легированных (хромокремнемарганцевых) сталей и используется в основном при производстве оборудования, эксплуатация которого не предполагает сильного нагревания. В частности сталь используется при изготовлении валов, осей, зубчатых колес, фланцев, корпусов, лопаток компрессорных

машин, работающих при температуре до 200 °С, ответственных сварных конструкций, работающих при знакопеременных нагрузках.

Исследованная сталь используется как в отожженном (охлаждение от 880 °С с печью), так и в закаленном состояниях (нагрев до температуры 880 °С с последующим охлаждением в масле). Химический состав стали по данным [16] представлен в таблице 3.

Таблица 3.

Химический состав стали 30ХГСА по данным [16], масс. %.

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.28-0.34	0.9-1.2	0.8-1.1	≤ 0.3	≤ 0.025	≤ 0.025	0.8-1.1	≤ 0.3

На рис. 5 приведены опытные данные о скорости ультразвука в отожженном и закаленном состояниях и относительного температурного расширения исследованной стали.

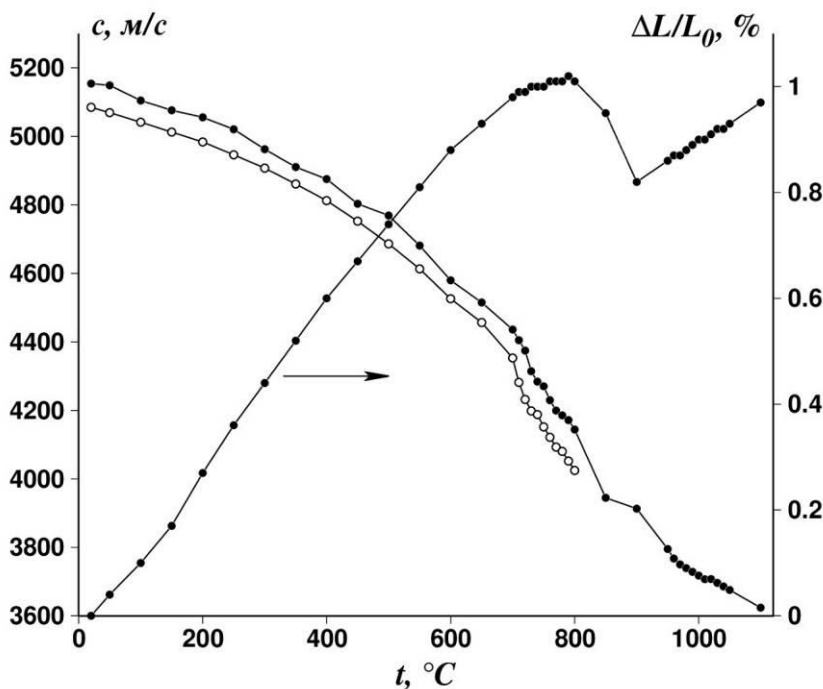


Рис.5. Температурная зависимость скорости ультразвука и относительного температурного расширения стали в закаленном (○) и отожженном (●) состояниях.

Вид температурных зависимостей в значительной мере повторяет их поведение для стали 09Г2С, отличаясь лишь абсолютными значениями.

На рис. 6 показаны температурные зависимости микротвердости. В отличие от стали 09Г2С на кривой наблюдается более четкий излом для закаленного образца, что показывает температурный диапазон возможного использования стали в закаленном состоянии.

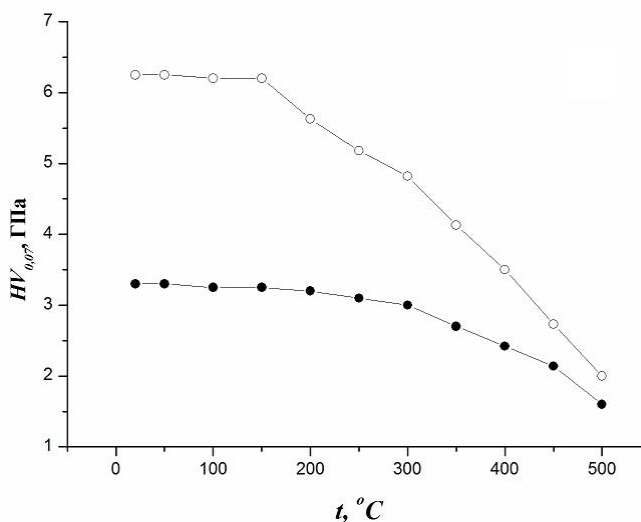


Рис.6. Температурная зависимость микротвердости стали в закаленном (○) и отожженном (●) состояниях.

Проведенная математическая обработка опытных и рассчитанных на их основе данных позволила получить аппроксимирующие уравнения, коэффициенты которых приведены в таблице 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов аппроксимирующего уравнения (1) для стали 30ХГСА.

Свойство	A	B	C	D
Отожженный образец				
Скорость звука c , м/с	5151.0	-0.243	-0.001	-
Относительное температурное расширение $\Delta L/L_0$, %	-0.038	0.002	-	-
Плотность ρ , кг/м ³	7813.7	-0.408	$8.4 \cdot 10^{-5}$	-
Модуль Юнга E , ГПа	207.5	-0.033	$-7.6 \cdot 10^{-5}$	-
Микротвердость H , ГПа	3.30	$-2.78 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$-1.6 \cdot 10^{-8}$
Закаленный образец				
Скорость звука c , м/с	5090.5	-0.456	$-2.5 \cdot 10^{-4}$	$-9 \cdot 10^{-7}$
Модуль Юнга E , ГПа	201.4	-0.296	$-7.5 \cdot 10^{-5}$	-
Микротвердость H , ГПа				
20–150 °С	6.26	$-4.6 \cdot 10^{-4}$	-	-
150–500 °С	7.01	-0.004	$-1.2 \cdot 10^{-5}$	-

Химический состав стали У8 по данным [17], масс. %.

Fe	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
основа	0.75–0.84	0.17–0.33	0.17–0.28	≤0.25	≤0.018	≤0.025	≤0.2	≤0.25

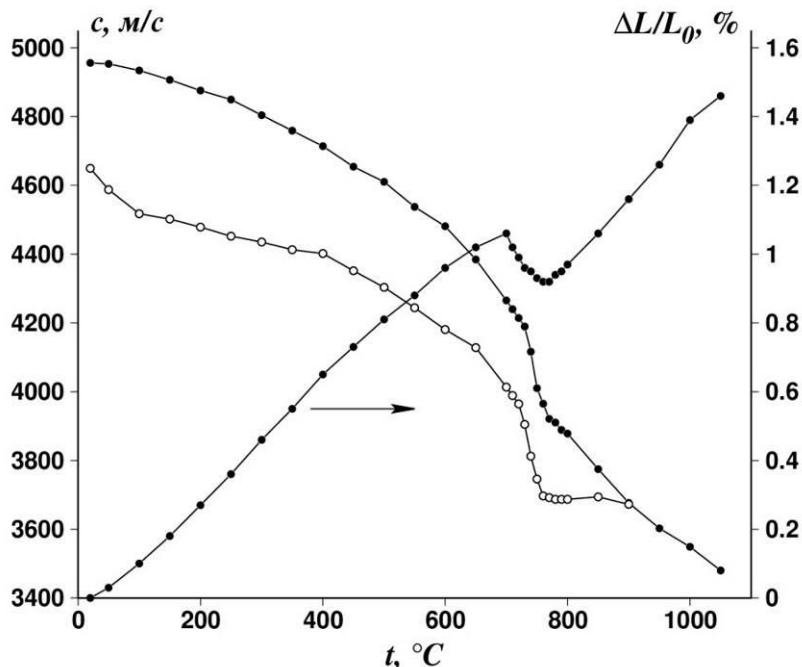


Рис.7. Температурная зависимость скорости ультразвука и относительного температурного расширения стали в закаленном (○) и отожженном (●) состояниях.

Анализ результатов исследования микротвердости показал, что закалка в значительной степени повышает ее значение, но начиная с 250 °С наблюдается быстрое падение микротвердости, что ограничивает использование стали в закаленном состоянии. На рис. 4 показаны результаты исследования микротвердости стали 09Г2С в отожженном и закаленном состояниях.

Сталь У8 относится к классу инструментальных углеродистых сталей и используется в основном при производстве инструментов, эксплуатация которых не предполагает сильного нагревания. Примером инструментов из данной марки стали являются кернеры, фрезы, отвертки, боковые кусачки, витые и плоские пружины, накатные ролики, комбинированные плоскогубцы и т.п. В основном сталь используется в закаленном состоянии (нагрев до температуры 780–800 °С с последующим охлаждением в воду). Химический состав стали по данным [17] представлен в таблице 5.

На рис. 7 приведены опытные данные о скорости ультразвука в отожженном и закаленном состояниях и относительного температурного расширения исследованной стали.

На рис. 7 отчетливо видны температурные границы $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения, происходящего в стали, и заметное влияние закалки на величину скорости ультразвука.

На рис. 8 показаны температурные зависимости микротвердости. Следует отметить значительное повышение величины микротвердости при закалке образца, а также ее резкое падение при температуре 200 °С, что существенно сужает температурную область ее использования в закаленном состоянии.

Проведенная методом наименьших квадратов математическая обработка опытных и рассчитанных на их основе данных позволила получить аппроксимирующие уравнения, коэффициенты которых приведены в таблице 6.

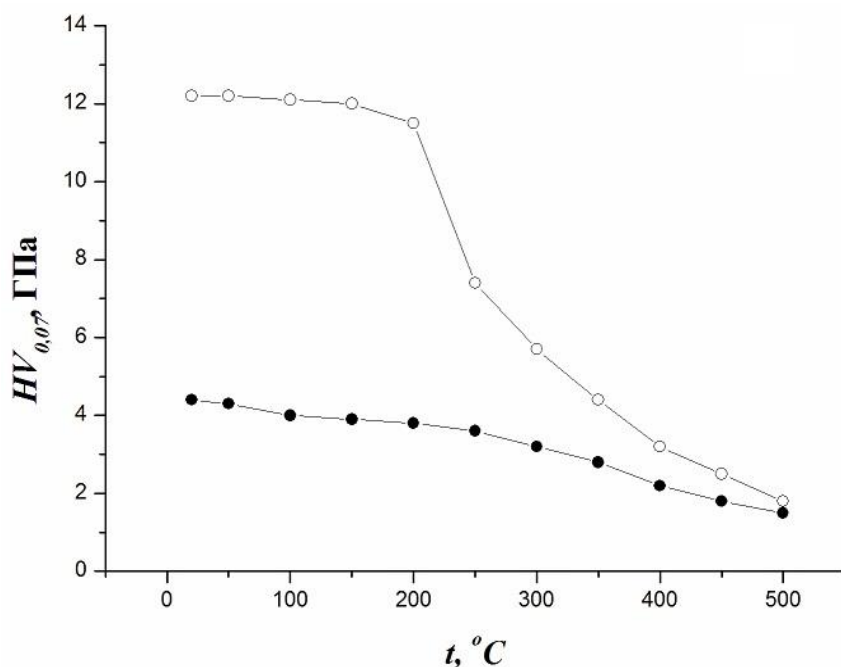


Рис.8. Температурная зависимость микротвердости стали в закаленном (○) и отожженном (●) состояниях.

Сталь 45 относится к конструкционным углеродистым качественным сплавам, которые применяются для конструкций и устройств, функциональным назначением которых является устойчивость к высоким нагрузкам. Следует отметить, что сталь 45 относится к классу

трудносвариваемых, поэтому она используется при изготовлении отдельных узлов механизмов, в частности, коленчатых и распределительных валов, шестерней, шпинделей, бандажей, цилиндров, кулачков и других нормализованных, улучшаемых и подвергаемых поверхностной термообработке деталей, от которых требуется повышенная прочность. Химический состав стали по данным [18] представлен в таблице 7.

На рис. 9 приведены опытные данные о скорости ультразвука в отожженном и закаленном состояниях и относительного температурного расширения исследованной стали.

На рис. 9 отчетливо видны температурные границы $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения, происходящего в стали. На рис. 10 показаны температурные зависимости микротвердости. Следует отметить резкое падение значений микротвердости при температуре 200 °С, что существенно сужает температурную область ее использования в закаленном состоянии.

Таблица 6

Значения коэффициентов аппроксимирующего уравнения (1) для стали У8.

Свойство	A	B	C	D
Отожженный образец				
Скорость звука c , м/с	4	0.0	–	–
	938.0	27	0.001	–
Плотность ρ , кг/м ³	7	–	8.3·	–
	819.0	0.445	10 ⁻⁵	–
Микротвердость H ,	4.	–	–	–
ГПа	36	8.7·10 ⁻⁴	4.0·10 ⁻⁵	–
Модуль Юнга E ,	1	–	–	–
ГПА	89.9	0.014	8.9·10 ⁻⁵	–
Относительное температурное расширение $\Delta L/L_0$, %	-	0.0	-	–
	0.084	02	2.9·10 ⁻⁷	–
Закаленный образец				
Скорость звука c , м/с	4	–	0.0	–
	656.0	1.56	04	4.6·10 ⁻⁶
Микротвердость H ,	1	0.0	–	–
ГПа	2.17	03	2.95·10 ⁻⁵	–
20–200 °С	2	–	1.0·	–
200–500 °С	7.46	0.104	10 ⁻⁴	–
Модуль Юнга E ,	1	–	2.5·	–
ГПА	67.5	0.11	10 ⁻⁴	2.8·10 ⁻⁷

Таблица 7

Химический состав стали 45 по данным [18], масс. %.

Fe	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	As	N	Cu
основа	0.42–	0.17–	0.50–	≤0.040	≤0.035	≤0.30	≤0.30	≤0.08	≤0.008	≤0.30
	0.50	0.37	0.80							

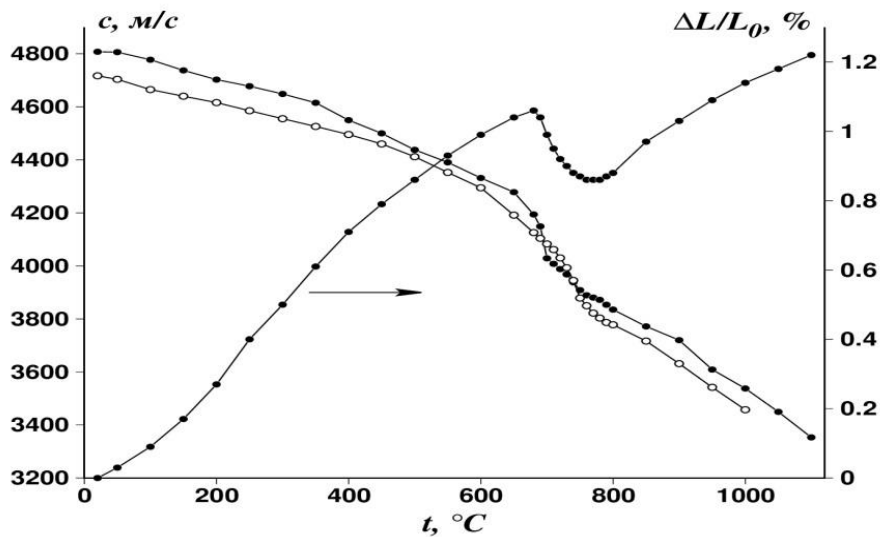


Рис.9. Температурная зависимость скорости ультразвука и относительного температурного расширения стали в закаленном (○) и отожженном (●) состояниях.

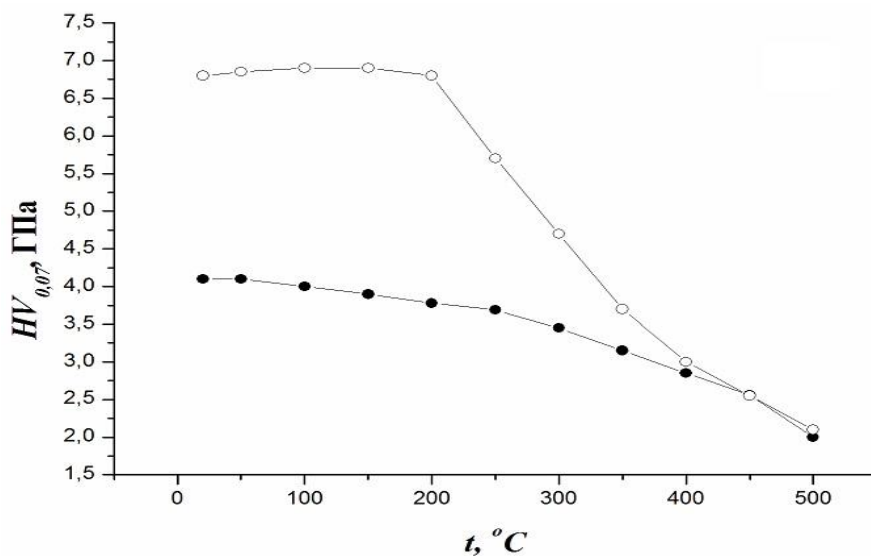


Рис.10. Температурная зависимость микротвердости стали в закаленном (○) и отожженном (●) состояниях.

Проведенная математическая обработка опытных и рассчитанных на их основе данных позволила получить аппроксимирующие уравнения, коэффициенты которых приведены в таблице 8.

Таблица 8

Значения коэффициентов аппроксимирующего уравнения (1) для стали 45.

Свойство	A	B	C	D
Отожженный образец				
Скорость звука c , м/с	4819.2	-0.376	$-7.36 \cdot 10^{-4}$	-
Относительное температурное расширение $\Delta L/L_0$, %	-0.046	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$3.3 \cdot 10^{-6}$	$-4.0 \cdot 10^{-9}$
Плотность ρ , кг/м ³	7797.5	-0.320	$-3.0 \cdot 10^{-5}$	-
Модуль Юнга E , ГПа	177.05	-0.016	$-1.84 \cdot 10^{-4}$	$8.0 \cdot 10^{-8}$
Микротвердость H , ГПа 20–500 °С	4.06	$6.63 \cdot 10^{-4}$	$-9.3 \cdot 10^{-6}$	-
Закаленный образец				
Скорость звука c , м/с	4747.5	-0.977	$1.98 \cdot 10^{-3}$	$-2.7 \cdot 10^{-6}$
Модуль Юнга E , ГПа	170.00	$5.32 \cdot 10^{-3}$	$-1.2 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-8}$
Микротвердость H , ГПа 20–200 °С	6.74	0.003	$-1.3 \cdot 10^{-5}$	-
200–500 °С	13.14	-0.038	$3.14 \cdot 10^{-5}$	-

Заключение

Проведено экспериментальное исследование скорости ультразвука и относительного температурного расширения сталей 09Г2С, 30ХГСА, У8 и стали 45 в температурном диапазоне от комнатной до 1100 °С. Показаны температурные границы происходящих в сталях фазовых превращений. По опытным данным рассчитаны значения плотности и модуля Юнга и построены их температурные зависимости. Проведено экспериментальное исследование микротвердости сталей в диапазоне температур от комнатной до 500 °С. Анализ опытных данных о микротвердости позволил определить температурный диапазон использования стали в закаленном состоянии. Рассчитаны аппроксимирующие уравнения для температурных зависимостей исследованных и рассчитанных свойств сталей в диапазоне температур 20–650 °С (начало фазового перехода) и микротвердости в диапазоне 20–500 °С.

Работа выполнена по государственному заданию № 007-00129-18-00 и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-08-00368а).

Литература

1. Рошупкин В.В., Ляховицкий М.М., Покрасин М.А., Чернов А.И., Кольцов А.Г. Методика экспериментального определения скорости и коэффициента затухания ультразвука в твердых телах в диапазоне температур 20...1000⁰С на проволочных образцах с акустической меткой. ГСССД МЭ 216-2014. М.: ФГПУ «Стандартинформ», 2014. 23 с.
2. Покрасин М.А., Рошупкин В.В., Семашко Н.А., Чернов А.И. Способ определения скорости звука. Авторское свидетельство № 1211611. Бюллетень изобретений. 1986. № 6. С. 188.
3. И.И. Новиков, В.В. Рошупкин, М.А. Покрасин, М.М. Ляховицкий, А.И. Чернов, А.Г. Пенкин, Н.Л. Соболев, А.Г. Кольцов. Акустический и акустико-эмиссионный методы исследования физико-механических свойств конструкционных сталей. Приборы. 2012. № 3. С. 51–57.
4. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974. 294 с.
5. Физическая энциклопедия, М.: Большая Российская энциклопедия», 1994. т. 4. 706 с.
6. ISO 14577–1:2015. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1: Test method. Geneva: ISO Publ., 2015. 46 p.
7. ISO 14577–2:2015. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 2: Verification and calibration of testing machines. Geneva: ISO Publ., 2015. 25 p.
8. ISO 14577–3:2015. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 3: Calibration of reference blocks. Geneva: ISO Publ. 2015. 8 p.
9. ISO 14577–4:2007. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 4: Test method for metallic and non-metallic coatings. Geneva: ISO Publ., 2007. 24 p.
10. Ляховицкий М.М., Рошупкин В.В., Покрасин М.А., Минина Н.А. Размерный эффект при непрерывном наноиндентировании. Сборник материалов VI-ой Всероссийской конференции по наноматериалам с элементами научной школы для молодежи. Москва: ИМЕТ РАН. 2016. С. 537–538.
11. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. J. Mater. Res. 1992. V. 7. No. 6. P. 1564–1583.
12. Oliver W.C., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. J. Mater. Res. 2004. V. 19. No. 1. P. 3–20.
13. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия. ГОСТ 19281-2014. М.: Стандартинформ, 2015. 51 с.
14. И.И. Новиков, В.В. Рошупкин, М.М. Ляховицкий, М.А. Покрасин, Н.А. Минина, А.И. Чернов, Н.Л. Соболев, С.А. Клименко, М.Ю. Копейкина, А.Г. Кольцов. Экспериментальное исследование акустических свойств стали 20. Перспективные материалы. 2014. № 6. С. 79–84.
15. В.В. Рошупкин, М.М. Ляховицкий, М.А. Покрасин, Н.А. Минина. Экспериментальное исследование акустических свойств стали 04Х19Н9. Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 1. С. 143–145.
16. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия. ГОСТ 4543-71. М.: Издательство стандартов, 1996. 49 с.



ИМЕТ РАН

ИМЕТ РАН

80 лет

17. Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали. Общие технические условия. ГОСТ 1435-99. М.: Издательство стандартов, 2001. 23 с.
- 18.Metalloпродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. ГОСТ 1050-2013. М.: Стандартинформ, 2014. 13 с.