

Исследование структуры и свойств Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-9-30-36>

КОНТРОЛЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ ИЗ СТАЛИ 5ХНМ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

© **Александр Анатольевич Хлыбов***, **Дмитрий Александрович Рябов**,
Константин Александрович Минков

Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Россия, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24; e-mail: hlybov_52@mail.ru

*Статья поступила 15 ноября 2019 г. Поступила после доработки 21 июля 2020 г.
Принята к публикации 23 июля 2020 г.*

Термическая обработка (ТО) — один из основных и наиболее важных этапов технологического цикла производства металлических изделий. При проведении ТО в металлах возникают остаточные напряжения (ОН), оказывающие существенное влияние на эксплуатационный ресурс изделий. Цель настоящей работы — разработка методики неразрушающего акустического контроля ОН в стальных образцах. Акустический метод основан на явлении акустоупругости — зависимости акустических характеристик от параметров контролируемой среды. Поля ОН в прямоугольных образцах из штамповой стали 5ХНМ формировали с использованием различных режимов ТО, включающих охлаждение как в традиционных средах (воде, масле, воздухе), так и с помощью водовоздушной смеси (ВВС). Управляя соотношением параметров воды и воздуха, а также направлением потока ВВС, обеспечивали необходимые скорость охлаждения и локальность процесса. Установили, что при удалении от плоскости охлаждения уровень ОН снижается, меняются микроструктура и упругие характеристики материала. Влияние охлаждения на формирование температурных полей и величину ОН анализировали с применением компьютерного моделирования (программа CAE ANSYS). В качестве задаваемых параметров использовали значения характеристик стали 5ХНМ. Результаты моделирования подтвердили данные экспериментальных испытаний. Акустические измерения проводили на измерительно-вычислительном комплексе «АСТРОН», который позволял определять скорости упругих (продольной и поперечной) волн и модули упругости исследуемого материала. Выявили, что различия измеряемых значений акустическим и рентгеновским методами не превышают 10 %. Полученные результаты могут быть использованы на производстве при измерении ОН акустическим методом в крупногабаритных штампах из стали 5ХНМ.

Ключевые слова: неразрушающий контроль; техническая диагностика; ультразвуковой метод; термическая обработка; остаточные напряжения; сталь 5ХНМ.

ACOUSTIC CONTROL OF THE RESIDUAL STRESSES IN STEEL 5KHNM SAMPLES

© **Alexander A. Khlybov***, **Dmitry A. Ryabov**, **Konstantin A. Minkov**

R. E. Alekseev State Technical University, 24, ul. Minina, Nizhny Novgorod, 603155 Russia; e-mail: hlybov_52@mail.ru

Received November 15, 2019. Revised July 21, 2020. Accepted July 23, 2020.

Heat treatment (HT) is one of the main and most important stages of the technological cycle of manufacturing metal products. Residual stresses (RS) arising in metals upon their heat treatment significantly affect the service life of the products. The goal of the study is developing a technique for non-destructive acoustic testing of the residual stresses in steel samples. The method is based on the phenomenon of acoustoelasticity, i.e., the dependence of the acoustic characteristics on the parameters of the environment under study. The fields of residual stresses in rectangular samples made of die steel 5KhNM were formed

using various HT modes, including cooling both in traditional media (water, oil, air) and using a water-air mixture (WAM). Control of the ratio of water-air parameters as well as the direction of the WAM flow provided the desired cooling rate and locality of the process. It is shown that the level of residual stresses decreases with the distance from the cooling plane, the microstructure and elastic characteristics of the material also change. The effect of cooling on the formation of temperature fields and the value of residual stresses was analyzed using computer simulation (CAE ANSYS program). The values of the characteristics of 5KhNM steel formed a set of input parameters in simulation. The simulation results proved the experimental data. Acoustic measurements carried out on the measuring and computing complex "ASTRON," provided determination of the velocities of elastic (longitudinal and transverse) waves and the elastic moduli of the material under study. The RS values obtained by the acoustic method were compared with the data obtained by the X-ray method. It is shown that the differences between the values measured by acoustic and X-ray methods do not exceed 10%. The results can be used in a production environment when measuring the residual stresses by the acoustic method in large-sized dies made of 5KhNM steel.

Keywords: non-destructive testing; technical diagnostics; ultrasonic method; heat treatment; residual stresses; 5KhNM steel.

Введение

Термическая обработка (ТО) — один из основных и наиболее важных этапов технологического цикла производства металлических изделий. Правильный выбор режимов ТО (температуры нагрева, времени выдержки, скорости охлаждения и др.) обеспечивает качество конструкций [1 – 4]. Однако возникающие в процессе ТО в материале остаточные напряжения (ОН) вместе с рабочими нагрузками оказывают существенное влияние на эксплуатационные характеристики и ресурс деталей. При этом воздействие зависит как от величины и знака напряжений, так и от условий эксплуатации изделия [5].

Появление ОН после закалки вызывается двумя основными причинами: термическими напряжениями при неоднородном температурном поле и структурными превращениями при распаде аустенита. Уровень ОН значительно выше при ТО крупногабаритных изделий (например, молотовых штампов), в которых локальные температурные градиенты достигают значительных величин [6].

Наличие оперативных данных о величине ОН позволяет управлять процессом охлаждения, прогнозировать ресурс изделия и своевременно реагировать на неблагоприятные (с точки зрения надежности) последствия технологических операций. В производственных условиях остаточные механические напряжения определяют с помощью методов неразрушающего контроля. Один из наиболее перспективных среди них — акустический метод, использующий эффект акустоупругости [7 – 11]. В его основе — зависимость скорости прохождения упругих волн через объем металла от уровня механических напряжений [12 – 15].

Цель работы — разработка методики неразрушающего акустического контроля ОН в стальных образцах при различных режимах ТО (скоростях охлаждения).

Материалы, методика, оборудование

Исследовали образцы из штамповой стали 5ХНМ размером $20 \times 20 \times 250$ мм. Химический состав стали, % масс.: С — 0,51; Si — 0,22; Mn — 0,63; P — 0,01; S — 0,01; Cr — 0,58; Ni — 1,51; Mo — 0,19; Cu — 0,34; Al — 0,03; Ti — 0,01; W — 0,01; V — 0,01.

Для изучения влияния скорости охлаждения на структуру, свойства и уровень ОН в материале использовали режимы ТО, которые включали закалку в воде, масле и водовоздушной смеси (ВВС), отжиг, нормализацию. ВВС получали распылением воды в потоке воздуха. Охлаждающую способность смеси варьировали, изменяя расход воды и давление воздуха. Нагрев при ТО проводили до 850°C (время нагрева и выдержки — 30 мин).

Температуру в образце контролировали с помощью термопар хромель-алюмель (ТХА) с диаметром проволоки 0,5 мм. ТХА помещали в высверленные отверстия диаметром 1 и глубиной 10 мм. Схема расположения ТХА на образце приведена на рис. 1.

Термопары подключали к модулю АЦП ЦАП ZET 210, что позволяло осуществлять компью-

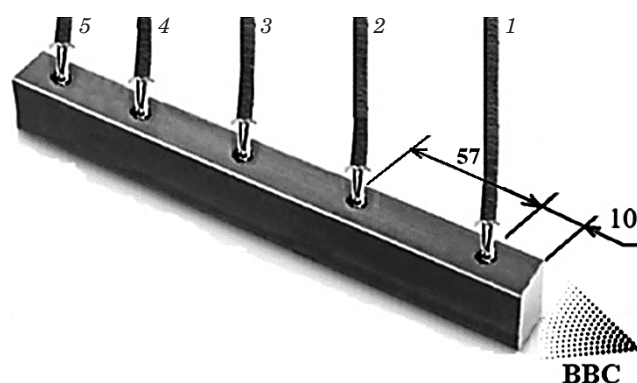


Рис. 1. Схема расположения на образце термопар 1 – 5

Fig. 1. Layout of thermocouples 1 – 5 on the sample

терный контроль температуры (частота опроса термопары — 10 кГц).

Металлографический анализ образцов проводили по стандартной схеме: шлифовка, полировка и последующее травление в 4 %-м растворе HNO_3 в течение 5 – 10 с. Изображения микроструктур получали с применением оптического микроскопа KEYENCE VHX-1000.

ОН определяли с использованием дифрактометра «ДРОН-2» ($\text{FeK}\alpha$ -излучение) по смещению пиков на рентгенограммах после ТО. Расчет проводили по формуле

$$\sum \sigma_i = -\frac{E}{\nu} \frac{\Delta d}{d}, \quad (1)$$

где $\sum \sigma_i$ — сумма напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$; E — модуль упругости (модуль Юнга); ν — коэффициент Пуассона; Δd — разница межплоскостных расстояний напряженного и ненапряженного образцов; d — межплоскостное расстояние отожженного образца [16].

Приняли, что в отожженном состоянии ОН близки к нулю.

При акустических измерениях ОН применяли измерительно-вычислительный комплекс «АСТРОН» (точность измерения времени распространения упругих импульсов — 10^{-9} с, номинальная частота упругих (продольных и поперечных) волн — 5 МГц) [9, 10]. Определения проводили на отшлифованной боковой поверхности образца при температуре 20 °С с шагом от охлаждаемого торца 10 мм (точность измерения толщины образца в точке замера — 0,005 мм).

Скорость упругой волны $C_{l,t}$ при прохождении через образец определяли по формуле

$$C_{l,t} = 2L/t, \quad (2)$$

где L — толщина образца; t — время прохождения волны через образец.

Физико-механические характеристики материала рассчитывали с помощью соотношений [8 – 10]

$$E = \frac{\rho C_t^2 (3C_l^2 - 4C_t^2)}{C_l^2 - C_t^2}, \quad (3)$$

$$G = \rho C_t^2, \quad (4)$$

$$\nu = \frac{C_l^2 - 2C_t^2}{2C_l^2 - 3C_t^2}, \quad (5)$$

где G — модуль сдвига; C_t, C_l — скорости поперечной и продольной волн; ρ — плотность материала.

Плотность определяли методом гидростатического взвешивания на аналитических весах (точность — 10^{-5} г). Перед взвешиванием с образцов удаляли окалину (шероховатость не более 2,5 мкм), образцы обезжиривали спиртом и термостатировали. Точность определения температуры воды до и после взвешивания — 0,1 °С.

Плотность рассчитывали по формуле [16]

$$\rho = \frac{m_{\text{на возд}}}{m_{\text{на возд}} - m_{\text{вода+пр}} - m_{\text{пр}}}, \quad (6)$$

где $m_{\text{на возд}}$, $m_{\text{вода+пр}}$, $m_{\text{пр}}$ — массы образца на воздухе, погруженного в воду образца и проволоки и погруженной проволоки соответственно.

Для расчета двухосного напряженного состояния акустическим методом использовали формулы [8, 9]

$$\sigma_1 = K_1 \left(\frac{t_{01}}{t_{03}} \frac{t_3}{t_1} - 1 \right) - K_2 \left(\frac{t_{02}}{t_{03}} \frac{t_3}{t_2} - 1 \right), \quad (7)$$

$$\sigma_2 = K_1 \left(\frac{t_{02}}{t_{03}} \frac{t_3}{t_2} - 1 \right) - K_2 \left(\frac{t_{01}}{t_{03}} \frac{t_3}{t_1} - 1 \right), \quad (8)$$

где σ_1, σ_2 — напряжения в двух взаимно перпендикулярных направлениях (вдоль и перпендикулярно оси образца); t_1, t_2 — задержки (время распространения) поперечных волн вдоль напряжений σ_1 и σ_2 ; t_3 — задержка (время распространения) продольных волн; t_{01}, t_{02}, t_{03} — соответствующие значения задержек в отсутствие напряжений (после отжига образцов); K_1, K_2 — коэффициенты упругоакустической связи материала.

Коэффициенты k_1 и k_2 определяли, испытывая образцы на растяжение (ГОСТ 1497–84). Нагружение осуществляли с помощью испытательной машины УТС-110М-5-0У с применением деформометра с базой 50 мм. Использовали установленные на образцах датчики продольной и поперечной (в двух взаимно перпендикулярных направлениях) волн.

После многократного (не менее пяти раз) нагружения получили следующие значения коэффициентов, МПа: $k_1 = -1,14 \cdot 10^{-5}$, $k_2 = -0,10 \cdot 10^{-5}$.

Для оценки распределения температуры и ОН при охлаждении применяли также компьютерное моделирование (программа CAE ANSYS). Упругие (модуль Юнга, коэффициент Пуассона), пластические (билинейная диаграмма деформирования с пределом текучести) и тепловые (теплопроводность, теплоемкость, коэффициент теплового расширения, энтальпия) характеристики задавали с учетом их зависимости от температуры.

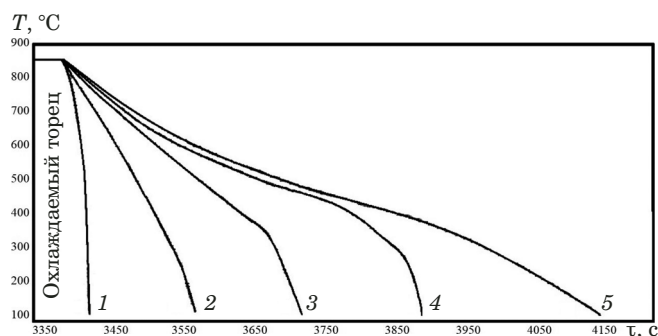


Рис. 2. Зависимости температуры образца в точках 1 – 5 от времени при охлаждении ВВС с торцевой поверхности

Fig. 2. The time dependence of the sample temperature at points 1 – 5 upon sample cooling from the end surface using WAM

Обсуждение результатов

В табл. 1 для диапазона 850 – 400 °C приведены скорости охлаждения образцов при различных режимах ТО, на рис. 2 — изменение температуры в точках 1 – 5 (см. рис. 1) при охлаждении ВВС (1 ат, 164 мл/мин) с торца образца. Скорости охлаждения в точках 1 – 5 составили 17,3, 3,2, 1,7, 1,0 и 0,8 °C/c.

Результаты компьютерного моделирования распределения температурного поля через 1 мин после начала охлаждения ВВС с торца представлены на рис. 3.

Исследование микроструктуры образцов после ТО показало наличие мартенситных (скорости охлаждения более 30 °C/c) и промежуточных ферритно-карбидных структурных составляющих (скорости 1 – 30 °C/c). При скорости охлаждения 0,1 – 0,2 °C/c в микроструктуре наблюдали присутствие ферритно-перлитных составляющих (рис. 4).

По измеренному времени распространения упругих волн в образцах после ТО рассчитывали величину ОН. Результаты определения скоростей упругих волн приведены на рис. 5. Видно,

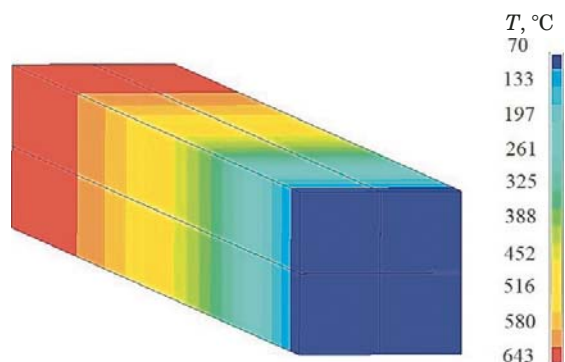


Рис. 3. Распределение температуры в образце через 1 мин после начала охлаждения ВВС с торца

Fig. 3. Temperature distribution in the sample after 1 min of cooling from the end surface using WAM

что с увеличением скорости охлаждения скорости продольной и поперечных волн уменьшаются.

В структуре мартенсита, формируемого закалкой с наибольшей степенью искажения кристаллической решетки, скорость распространения упругих волн минимальна. Последующий отпуск с улучшением (особенно если используются такие смягчающие обработки, как нормализация)

Таблица 1. Скорости охлаждения образцов при различных режимах ТО

Table 1. The cooling rate of the samples at different heat treatment modes

Режим ТО		Скорость охлаждения, °C/c
Закалка	Вода	64
	Масло	34,6
Нормализация		2,6
Отжиг		0,1
ВВС	0,5 ат, расход — 11 мл/мин	5,2
	1 ат, расход — 164 мл/мин	17,3
	4 ат, расход — 240 мл/мин	14
Сжатый воздух	1 ат	2
	4 ат	1,2

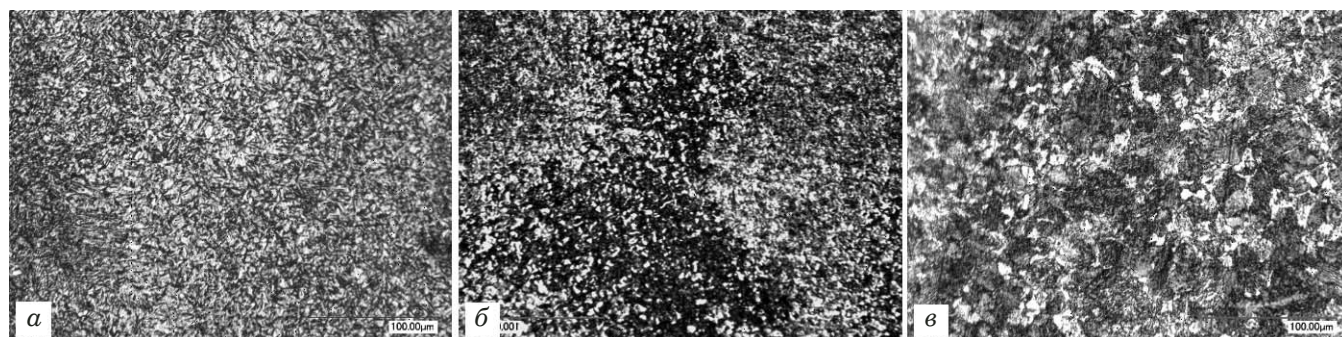


Рис. 4. Микроструктура образцов, охлажденных со скоростями 64 (а), 1,2 (б) и 0,1 °C/c (в)

Fig. 4. The microstructure of samples at different cooling rate 64 (a), 1,2 (b), and 0,1 °C/sec (c)

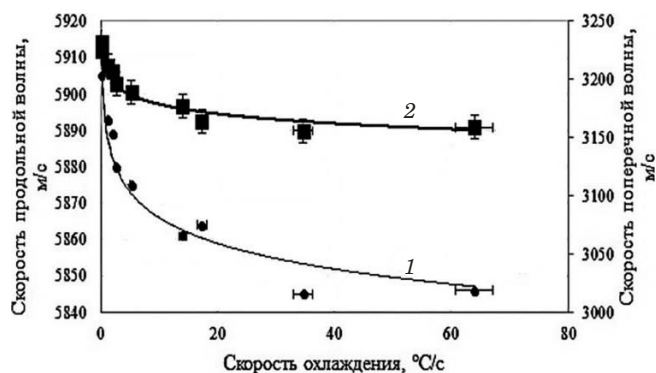


Рис. 5. Зависимости скоростей распространения продольной (1) и поперечной (2) волн от скорости охлаждения образца

Fig. 5. Dependence of the velocity of longitudinal (1) and transverse (2) waves on the sample cooling rate

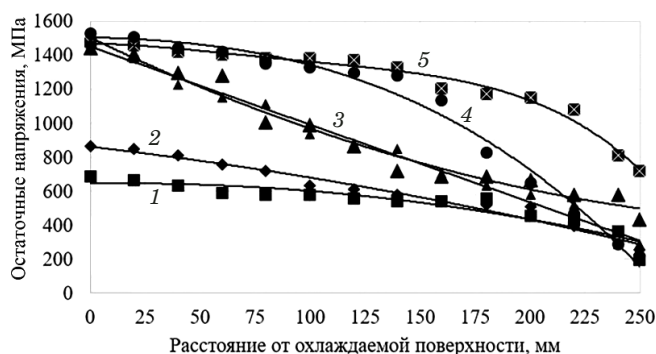


Рис. 6. Зависимости ОН от расстояния от торца при охлаждении воздухом (0; 0,5 ат) (1, 2) и ВВС (0,5 ат, 11 мл/мин; 1 ат, 164 мл/мин (без и с изоляцией)) (3 – 5) соответственно

Fig. 6. Dependence of the residual stresses on the distance from the end surface when cooling by air (0; 0.5 atm) (1, 2) and WAM (0.5 atm, 11 ml/min; 1 atm, 164 ml/min (without and with insulation)) (3 – 5), respectively

приводит к росту скорости ультразвуковых волн [17, 18]. В случае наиболее равновесных ферритно-перлитных структур скорости продольных и поперечных волн максимальны.

На рис. 6 приведены распределения ОН по длине образца при охлаждении с торца в различ-

Таблица 2. Упругие характеристики стали 5ХНМ, определенные акустическим методом

Table 2. The elastic characteristics of 5KhNM steel determined by acoustic method

Скорость охлаждения, °C/c	Модуль Юнга $E_{\text{акуст}}$, ГПа	Модуль сдвига $G_{\text{акуст}}$, ГПа	Коэффициент Пуассона ν	Плотность ρ , г/см ³
64,0	199,8	77,2	0,2942	7,748
34,6	200,3	77,4	0,2938	7,759
2,6	202,4	79,8	0,2684	7,812
0,1	220,1	86,8	0,2679	7,850

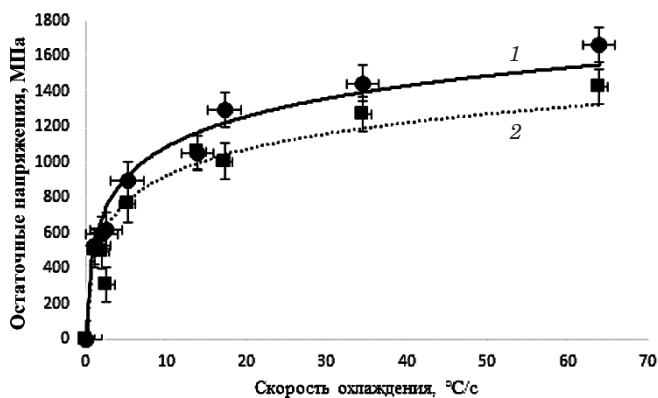


Рис. 7. Зависимости ОН, определенных рентгеноструктурным (1) и акустическим (2) методами, от скорости охлаждения образца

Fig. 7. Dependence of the residual stresses determined by x-ray diffraction (1) and acoustic (2) methods on the sample cooling rate

ных режимах, полученные акустическим методом. Видно, что на торцевой поверхности интенсивное охлаждение приводит к появлению напряжений более 1500 МПа. Это превышает предел прочности материала. Как следствие, в этой зоне фиксировали образование трещин.

Упругие характеристики стали 5ХНМ определяли акустическим методом с использованием выражений (3) – (5) и с учетом изменений плотности материала при ТО (табл. 2).

Выявили, что снижение скорости охлаждения приводит к возрастанию упругих модулей. (Заметим, что аналогичная зависимость получена для стали 40Х [13, 17, 19].) Это можно объяснить изменением кристаллической решетки сплава. Повышение общего уровня компактности, связанной с минимальной тетрагональностью решетки при отжиге, ведет к повышению упругих свойств материала [20].

Значения ОН, полученные акустическим методом, сравнивали с результатами рентгеноструктурного анализа (рис. 7). Наблюдаемый рост ОН с повышением интенсивности охлаждения связан с ограничением времени для диффузии легирующих элементов из решетки Fe при закалке (тем самым увеличивается тетрагональность).

С применением предлагаемой методики акустического контроля ОН исследовали крупногабаритную заготовку из стали 5ХНМ (толщина плиты — 250 мм) после охлаждения на воздухе. На рис. 8 представлены полученные зависимости твердости и ОН от толщины.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования влияния скорости охлаждения образцов из стали

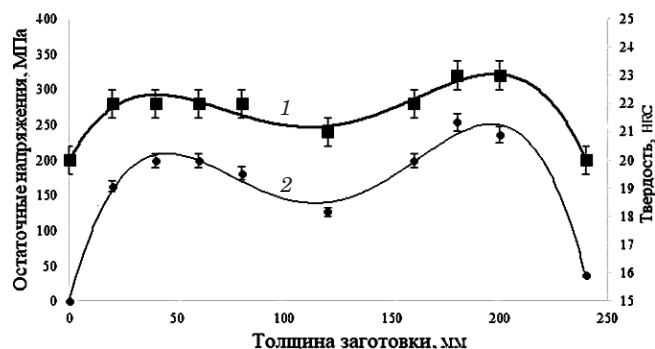


Рис. 8. Зависимости твердости (1) и ОН (2) от толщины заготовки

Fig. 8. Dependence of the hardness (1) and RS (2) on the billet thickness

5ХНМ на скорость распространения упругих волн показали, что с помощью измерения скорости (задержки) упругих волн можно оценить величину ОН. Результаты определения ОН акустическим методом подтверждаются данными рентгеноструктурного анализа (расхождение менее 10 %). Кроме того, они свидетельствуют о высоком уровне ОН в зоне контакта охлаждающей среды с образцом при закалке. При этом скорость распространения ультразвука после закалки минимальна. Вместе с тем равновесная структура, формируемая при отжиге, характеризуется максимальной скоростью ультразвука и наименьшими ОН.

Финансирование

Работа выполнена по гранту РНФ № 19-19-00332.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самохоцкий А. И., Парфеновская Н. Г. Технология термической обработки металлов. — М.: Машиностроение, 1976. — 311 с.
2. Рябов Д. А., Хлыбов А. А., Минков К. А. О перспективе применения водо-воздушной смеси для охлаждения молотовых штампов / Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. 2018. № 1(120). С. 196 – 203.
3. Борисов И. А., Борисов А. И. Разработка технологии спреерной закалки опорных валков прокатных станов / МнТом. 1997. № 8. С. 2 – 4.
4. Пышминцев И. Ю., Эйсмонт Ю. Г., Юдин Ю. В. и др. Закалка крупных поковок в водно-воздушной смеси / МнТом. 2003. № 3. С. 24 – 28.
5. Гуляев А. П. Термическая обработка стали. — М.: Машгиз, 1960. — 495 с.
6. Соколов К. Н. Технология термической обработки стали. — М.: Машгиз, 1954. — 302 с.
7. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуща О. И. Введение в акустоупругость. — Киев: Наукова думка, 1977. — 162 с.
8. Неразрушающий контроль. Справочник / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2004. — 226 с.
9. Хлыбов А. А., Рябов Д. А. Оценка остаточных напряжений в образцах из ферритно-перлитной стали с аустенитной наплавкой / Металловедение и термическая обработка металлов. 2019. № 2. С. 45 – 50. DOI: 10.1007/s11041-019-00385-3

10. Хлыбов А. А., Рябов Д. А., Нуждина Т. В., Минков К. А. Исследование влияния термической обработки на образование остаточных напряжений и разработка методики их определения в образцах из стали 5ХНМ / Черные металлы. 2019. № 5. С. 17 – 24.
11. Никитина Н. Е., Казачек С. В. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин / Вестник научно-технического развития. 2010. № 4(32). С. 18 – 28.
12. Камышев А. В., Никитина Н. Е., Смирнов В. А. Измерение остаточных напряжений в ободьях железнодорожных колес методом акустоупругости / Дефектоскопия. 2010. № 3. С. 50 – 54.
13. Муравьев В. В., Муравьева О. В., Стрижак В. А., Пряхин А. В., Балабанов Е. Н., Волкова Л. В. Оценка остаточных напряжений в ободьях вагонных колес электромагнитно-акустическим методом / Дефектоскопия. 2011. № 6. С. 16 – 28.
14. Javadi Y., Najafabadi M., Akhlaghi M. Residual stress evaluation in dissimilar welded joints using finite element simulation and the LCR ultrasonic wave / Russ. J. Nondestr. Test. 2012. Vol. 48. P. 541 – 552.
15. Qozam H., Chaki S., Bourse G., Robin C., Walaszek H., Bouteille P. Microstructure Effect on the LCR Elastic Wave for Welding Residual Stress Measurement / Experimental Mechanics. 2010. Vol. 50. P. 179 – 185.
16. Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Иванов А. Н., Расторгуев Л. Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. — М.: Металлургия, 2012. — 632 с.
17. Муравьев В. В., Муравьева О. В., Петров К. В. Связь механических свойств пруткового проката из стали 40Х со скоростью объемных и ралеевских волн / Дефектоскопия. 2017. № 8. С. 20 – 28.
18. Carreón H., Barrera G., Natividad C., Salazar M., Contreras A. Relation between hardness and ultrasonic velocity on pipeline steel welded joints / Nondestructive Testing and Evaluation. 2016. Vol. 31. N 2. P. 97 – 108.
19. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. — Новосибирск: Наука, 1996. — 184 с.
20. Елманов Г. Н., Заслужный А. Г., Скрытный В. И., Смирнов Е. А., Перлович Ю. А., Яльцев В. Н. Физика твердого тела. — М.: НИЯУ МИФИ, 2012. — 764 с.

REFERENCES

1. Samokhotsky A. I., Parfenovskaya N. G. Technology of heat treatment of metals. — Moscow: Mashinostroenie, 1976. — 311 p. [in Russian].
2. Ryabov D. A., Khlybov A. A., Minkov K. A. On the prospect of using a water-air mixture for cooling hammer dies / Proceedings of NGTU. 2018. N 1(120). P. 196 – 203 [in Russian].
3. Borisov I. A., Borisov A. I. Development of technology for spray hardening of the support rolls of rolling mills / МнТом. 1997. N 8. P. 2 – 4 [in Russian].
4. Pyshmintsev I. Yu., Eismond Yu. G., Yudin Yu. V., et al. Hardening of large forgings in a water-air mixture / Metalloved. Term. Obrab. Met. 2003. N 3. P. 24 – 28 [in Russian].
5. Gulyaev A. P. Heat treatment of steel. — Moscow: Mashgiz, 1960. — 495 p. [in Russian].
6. Sokolov K. N. Technology of heat treatment of steel. — Moscow: Mashgiz, 1954. — 302 p. [in Russian].
7. Guz' A. N., Makhort F. G., Gushcha O. I. Introduction to acoustoelasticity. — Kiev: Naukova Dumka, 1977. — 162 p. [in Russian].
8. Non-destructive testing. Handbook / V. V. Klyuev, ed. — Moscow: Mashinostroenie, 2004. — 226 p. [in Russian].
9. Khlybov A. A., Ryabov D. A. Assessment of residual stresses in samples of ferritic-pearlite steel with austenitic surfacing / Metal Science and Heat Treatment. 2019. Vol. 61. N 2. P. 114 – 119. DOI: 10.1007/s11041-019-00385-3.
10. Khlybov A. A., Ryabov D. A., Nuzhdina T. V., Minkov K. A. Investigation of the influence of heat treatment on the forma-

- tion of residual stresses and the development of methods for their determination in samples of 5KhNM steel / *Cher. Met.* 2019. N 5. P. 17 – 24 [in Russian].
11. **Nikitina N. Ye., Kazachek S. V.** Advantages of the acoustoelasticity method for non-destructive testing of mechanical stresses in machine parts / *Vestn. Nauch.-Tekhn. Razvit.* 2010. N 4(32). P. 18 – 28 [in Russian].
 12. **Kamyshev A. V., Nikitina N. E., Smirnov V. A.** Measurement of the residual stresses in the treads of railway wheels by the acoustoelasticity method / *Rus. J. Nondestr. Test.* 2010. Vol. 46. N 3. P. 189 – 193.
 13. **Muravyov V. V., Muravyova O. V., Strizhak V. A., Pryakhin A. V., Balabanov E. N., Volkova L. V.** Estimation of residual stresses in rims of wagon wheels by the electromagnetic-acoustic method / *Defektoskopiya.* 2011. N 6. P. 16 – 28 [in Russian].
 14. **Javadi Y., Najafabadi M., Akhlaghi M.** Residual stress evaluation in dissimilar welded joints using finite element simulation and the LCR ultrasonic wave / *Russ. J. Nondestr. Test.* 2012. Vol. 48. P. 541 – 552.
 15. **Qozam H., Chaki S., Bourse G., Robin C., Walaszek H., Bouteille P.** Microstructure Effect on the LCR Elastic Wave for Welding Residual Stress Measurement / *Experimental Mechanics.* 2010. Vol. 50. P. 179 – 185.
 16. **Umansky Ya. S., Skakov Yu. A., Ivanov A. N., Rastorguev L. N.** Crystallography, radiography and electron microscopy. — Moscow: Metallurgiya, 2012. — 632 p. [in Russian].
 17. **Muravyov V. V., Muravyova O. V., Petrov K. V.** Connection between the properties of 40kh-steel bar stock and the speed of bulk and rayleigh waves / *Rus. J. Nondestr. Test.* 2017. Vol. 53. N 8. P. 560 – 567.
 18. **Carreón H., Barrera G., Natividad C., Salazar M., Contreras A.** Relation between hardness and ultrasonic velocity on pipeline steel welded joints / *Nondestructive Testing and Evaluation.* 2016. Vol. 31. N 2. P. 97 – 108.
 19. **Muravyov V. V., Zuev L. B., Komarov K. L.** The speed of sound and the structure of steels and alloys. — Novosibirsk: Nauka, 1996. — 184 p. [in Russian]
 20. **Elmanov G. N., Zasluzhny A. G., Skrytny V. I., Smirnov E. A., Perlovich Yu. A., Yaltsev V. N.** Solid State Physics. — Moscow: NRNU MEPhI, 2012. — 764 p. [in Russian].