Из рис. 3 видно, что размерная зона ~ 100 мкм является критической, представляет собой область перегиба кривой. В интервале от 1-100 мкм имеет место резкое убывание S_u при малом возрастании величины размера частиц. В интервале размера частиц 100-1000 мкм значение удельной поверхности начинает приближаться к постоянному при значительном росте величин размеров частиц. Это указывает на максимально благоприятный диапазон размеров частиц (1-100 мкм) при их контактном относительном перемещении в процессе пересыпания-протекания порошка.

Таким образом, в размерном интервале 0 – 1000 мкм размер частицы около 100 мкм является наименьшим при минимальной удельной поверхности $S_u = 10^3 - 10^4 \text{ м}^{-1}$. Отсюда, применительно к изучению процесса сверхглубокого проникания размер частиц порядка 100 мкм является размерно значимым фактором, обеспечивающим минимизацию инерционных сил в процессе деформирования среды проникания.

***

1. Ушеренко, С.М. Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов [Текст] / С.М. Ушеренко. - Минск: НИИ Импульсных процессов. - 1998. – 210 с.
2. Алексенцева, С.Е. Повышение эффективности обработки материалов потоком высокоскоростных дискретных частиц [Текст] / С.Е. Алексенцева. Вестник СамГТУ. Серия "Технические науки". - 2015.- N1(45). - С.142-145.
3. Алексенцева, С.Е. Взрывное микролегирование и упрочнение потоком высокоскоростных частиц сварных швов рельсовых стыков и конструкций [Текст] / С.Е. Алексенцева, И.В. Захаров. Технология металлов. - 2018. - N10. - С.18-24.
4. Дерибас, А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом [Текст] / А.А.Дерибас. - Новосибирск: Наука.- 1980. - 222 с.
5. Физический энциклопедический словарь [Текст] / Гл. ред. А.М.Прохоров - М.: Сов.энциклопедия. - 1983. - 928 с.
6. Прокатка металлических порошков [Текст] / Г.А.Виноградов, Ю.Н.Семёнов, О.А.Катрус, В.П.Каташинский. – М.: Металлургия.-1969.-382 с.
7. Алексенцева, С.Е. Дисперсноупрочнённые материалы для биомедицины, полученные обработкой высокоскоростным потоком дискретных частиц, разогнанных энергией взрыва [Текст] / С.Е. Алексенцева. - Образование. Наука. Научные кадры. -2015.- №2.- С.250-253.

Кабалдин Ю.Г., Хлыбов А.А., Аносов М.С., Шатагин Д.А., Рябов Д.А., Головин А.А.

Исследование связи скорости ультразвука в металлах с их твердостью в условиях пониженных температур

*Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
(Россия, Нижний Новгород)*

doi: 10.18411/lj-11-2020-44

idsp: ljjournal-11-2020-44

Аннотация

В данной работе проведено исследование влияния пониженных температур на твердость сплавов Д16, 12Х18Н10Т, ВТ8. Установлена связь твердости исследуемых сплавов со скоростью упругих волн в широком диапазоне пониженных температур. Показано, что понижение температуры сопровождается увеличением твердости и скорости ультразвуковых волн для всех исследуемых сплавов.

Ключевые слова: твердость, пониженные температуры, ультразвуковой контроль

Abstract

In this work, we studied the effect of low temperatures on the hardness of alloys D16, 12Kh18N10T, VT8. The relationship between the hardness of the investigated alloys and the speed of elastic waves in a wide range of low temperatures is established. It is shown that a

decrease in temperature is accompanied by an increase in hardness and speed of ultrasonic waves for all investigated alloys.

Keywords: hardness, low temperatures, ultrasonic testing

Введение

При выборе материалов, работающих в условиях Арктики и Крайнего Севера, возникает необходимость обеспечения постоянства свойств материалов конструкции, либо их незначительное изменение (в пределах заданных норм) в период эксплуатации и при различных температурах, перепад которых очень большой. Однако оценка изменения механических характеристик металлов, особенно при низких температурах, является весьма трудоемкой, а в ряде случаев практически не реализуемой задачей. Это, в свою очередь, требует применения экспресс-методов оценки механических характеристик, в частности, неразрушающими методами контроля.

В связи с этим, одним из перспективных методов оценки механических и эксплуатационных характеристик металлов является метод акустической эмиссии (АЭ) и ультразвукового контроля. Метод АЭ - один из наиболее информативных методов анализа структуры материала на микроуровне, структурно однородных и неоднородных материалов в реальном времени в широком диапазоне температур [1,2]. В работах [3,4] показана связь скорости ультразвука и механических свойств металлов.

Однако возникает необходимость проведения такого рода исследований в широком диапазоне температур, в частности, при низких температурах, так как в литературе такие данные отсутствуют [5,6].

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований были выбраны металлы с различными типами кристаллического строения: ГЦК (12Х18Н10Т и Д16) и ГПУ (ВТ8). Металлы с ОЦК решеткой не рассматриваются вследствие их низкой хладостойкости [5].

Химический состав исследуемых материалов приведен в табл.1.

Таблица 1.

Химический состав материалов

Материал	Массовая доля элементов, %											
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Fe	Ti	Al	Mg	Mo	Zr
12Х18Н10Т	0,11	0,7	0,16	10,2	18,16	–		0,6	–	–	–	–
Д16	–	0,27	0,59	0,08	0,02	4,15	0,03	0,02	92,6	1,4	–	–
ВТ8	0,02	0,32	–	–	–	–	0,01	89,35	6,6	–	3,41	0,18

Материалы были подвергнуты ТО по режимам, указанным в табл. 2.

Таблица 2.

Режимы ТО исследуемых материалов

Материал	Вид ТО
12Х18Н10Т	Закалка 1080 °С
Д16	Закалка 500°С, естественное старение
ВТ8	Двойной отжиг 920 °С 2ч + 570 °С 1ч

Исследования на ударный изгиб проводили на образцах типа Шарпи с V-образным концентратором (рабочее сечение 8×10), изготовленных в соответствии с требованиями ГОСТ 9454–78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах».

Твердость металлов замеряли с использованием твердомера ТШ-2М. В качестве индентора использовался шарик диаметром 2,5 мм. После чего по диаметру отпечатка определялась твердость металла по шкале НВ.

Измерение скорости звука проводились на специально разработанном стенде (рис. 1). Для регистрации сигнала АЭ применялись широкополосные датчики АЭ фирмы ГлобалТест (GT350) и АЦП фирмы National Instruments модели 6636 (рис. 1).

Рис. 1. Схема аппаратного обеспечения при определении скорости звука

Регистрация скорости ультразвука осуществлялась следующим образом. Ультразвуковой дефектоскоп (рис. 1) генерирует прямоугольные импульсы с частотой следования 100 МГц и амплитудой 100 В. С помощью пьезоэлектрического преобразователя генерируется акустическая волна в материале образца. Два акустических датчика, располагающиеся на фиксированном расстоянии друг от друга регистрируют продольные колебания. Датчики подключены к двум синхронизированным каналам АЦП. Оцифрованные сигналы автоматически отправляются на ПК с предустановленным специализированным программным обеспечением, где происходит обработка временного ряда сигналов, выделение импульсов, регистрация запаздывания фронта импульса со второго датчика относительно первого и, на основе этих данных, вычисление скорости звука в материале образца. Скорость звука определяется по формуле:

$$V=L/(t_2-t_1), \quad (1)$$

где L - расстояние между датчиками, t_1 - время регистрации переднего фронта ультразвукового импульсы первым датчиком, t_2 - время регистрации переднего фронта ультразвукового импульсы вторым датчиком.

Образцы для испытаний (рис. 1) охлаждались при помощи подведенных к ним медных хладопроводов от смеси жидкого азота и спирта в необходимых пропорциях для установления температуры испытания. Для регистрации температуры на образцах использовались датчики pt100 (контактного типа) - (-196...+100°C ($\pm 1^\circ\text{C}$)).

Экспериментальные исследования. Анализ экспериментальных исследований.

На рис. 2 и 3 представлены зависимости твердости и скорости звука в широком диапазоне пониженных температур.

Рис. 2. Зависимости твердости металлов от температуры

Как видно из рис. 2, с понижением температуры, твердость металлов возрастает, но с разной интенсивностью.

Анализ рис. 2 и 3 показывает, что увеличение твердости металлов с понижением температуры следует связать с ростом их механических свойств и снижением пластичности. Рост скорости звука при понижении температуры, на наш взгляд, объясняется ростом теплопроводности у металлов при ее снижении. Дело в том, что поглощение ультразвука при распространении упругой волны, сопровождается

необратимым переходом ее энергии в тепло [7]. Поэтому чем выше теплопроводность металла, тем выше скорость звука. В работе [8] показано, что теплопроводность и скорость ее роста при снижении температуры у титанового сплава выше, чем у нержавеющей стали. Алюминиевые сплавы (Д16, АМг3 и АМг6) имеют наибольшую теплопроводность и скорость ее роста с понижением температуры.

Металлы с ОЦК решеткой имеют наименьшую сопротивляемость хрупкому разрушению [5,6]. Но они имеют и наименьшую теплопроводность [7]. Поэтому теплопроводность должна оказывать влияние как на сопротивляемость хрупкому разрушению, так и на температуру вязко-хрупкого перехода ($T_{вх}$).

По полученным значениям твердости (рис. 2) при разных температурах испытания и соответствующих значений скорости звука построены зависимости скорости звука от твердости для исследуемых материалов (рис. 3).

Рис. 3. Зависимости скорости звука от твердости для металлов:
а) сталь 12X18H10T; б) сплав VT8; в) сплав Д16

Таким образом, по значениям скорости распространения звука в металлах, можно прогнозировать уровень ее ударной вязкости, а также твердость при низких температурах, а следовательно, склонность к хрупкому разрушению конструкций.

Исследование выполнено по гранту РНФ № 19-19-00332 «Разработка научно обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях».

***

1. Кабалдин Ю.Г., Хлыбов А.А., Аносов М.С. и др. Анализ хладостойкости металлов с различным типом кристаллического строения / Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова, 2019, Том 22, №3, С. 48-55.
2. Новицкий Л.А., Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник. М.: Машиностроение, 1975, 206 с.
3. Трефилов И.В., Мильман Ю.В., Фирстов В.А. Физические основы прочности тугоплавких металлов.- Киев.: Наукова думка, 1975.-315 с.
4. Панин В.Е., Деревягина Л.С., Лемешев Н.М., Корзников А.В., Панин А.В., Казаченок М.С. О природе низкотемпературной хрупкости сталей с ОЦК – структурой / Физическая мезомеханика, 2013, №6, С. 5-15.
5. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996, - 184с.
6. Полетика И.М., Егорова Н.М., Куликова О.А. Зуев Л.Б. Об ультразвуковом контроле неоднородности механических свойств горячекатаной стали / Журнал технической физики. Томск, 2001. Т.71, №3, С.37-40.
7. Ларионов В.П., Кузьмин В.Р., Слепцов О.И. и др. Хладостойкость материалов и элементов конструкций: результаты и перспективы.-Новосибирск: Наука, 2005.-290с
8. Карслуэу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука. 1964, 352 с.