

АКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Морозов Б.И.

Херсонська державна морська академія

Предложен акустический метод исследования и оценки физико-механических и технологических свойств материалов, который является одним из показателей оценки качества эксплуатационных свойств металла, определяющих его назначения и практическую направленность. Доказано существование корреляционной связи пределов прочности и текучести с резонансной частотой стали 45.

Ключевые слова: свойства материалов, сталь, акустический метод.

Актуальность темы. Алюминиевые сплавы подвергаются закалке с целью получения пересыщенного твердого раствора, из которого при последующем старении выпадает мелкодисперсная фаза, упрочняющая сплав. Возникающие при этом изменения структуры сопровождаются изменением физико-механических и акустических свойств, исследование которых может служить средствам изучения кинетики их старения и прогнозирования получаемых свойств.

Анализ публикаций по проблеме диагностики и оценки технологических свойств материалов показывает, что изменение скорости распространения ультразвуковых колебаний по мере искусственного старения образца имеет такой же характер, что и изменение твердости, которая может служить характеристикой степени распада твердого раствора. Однако реализация метода измерения скорости ультразвука является довольно сложной практической задачей и не может быть осуществлена в промышленных условиях [1-4]. Известен также, акустический метод исследования структурно-чувствительных характеристик материала основанный на изменении коэффициента затухания ультразвуковых колебаний и установлении зависимостей между коэффициентом затухания, прочностными свойствами сталей и температурой старения алюминиевых сплавов, однако ее характер различен, что требует построения серии тарировочных зависимостей для разных составов и марок материала. К тому же изменение коэффициента затухания носит скачкообразный характер, что затрудняет использование этого параметра как однозначной характеристики степени распада твердого раствора, поэтому разработка метода изучения структурно-чувствительных характеристик сталей и сплавов является важной научной и практической задачей.

Цель работы – исследовать структурно-чувствительные характеристики сталей и сплавов методом ультразвуковой спектроскопии.

Изложение основного материала. Одним из наиболее перспективных направлений повышения информативности акустического контроля механических свойств материалов является метод ультразвуковой спектроскопии, основанный на анализе частотного спектра ультразвукового сигнала, прошедшего через образец. В ультразвуковой спектроскопии при построении схем технической диагностики необходимо использовать пьезопреобразователи с широкой полосой пропускания. Для этого они должны иметь высокую собственную частоту и низкую добротность. Перечисленные рекомендации были учтены при разработке методики измерений. В контролируемом образце возбуждались непрерывные ультразвуковые колебания. Излучателем ультразвуковых колебаний и их приемником служили прямые искательные головки к ультразвуковому дефектоскопу. Излучающий пьезопреобразователь соединялся с генератором высокой частоты типа ГЗ-41, а приемный - с милливольтметром ВЗ-38. Частота напряжения генератора измерялась частотомером ЧЗ-33. Образец вместе с головками

помещался в иммерсионную ванну с водой. Регистрировался акустический спектр прошедшего сигнала в виде частотной зависимости амплитуды этого сигнала. В излучающей головке возбуждались ультразвуковые колебания постоянной амплитуды, их частота плавно менялась в диапазоне 1800-2400 кГц. При этом через каждый 1 кГц измерялась амплитуда прошедшего сигнала. При резонансе колебательной системы, состоящей из пьезопреобразователей, образца и слоев иммерсионной жидкости между головками и образцом, наблюдался максимум амплитуды прошедшего сигнала. Сдвиг положения амплитудных максимумов в акустическом спектре вследствие старения образца служил характеристикой степени распада твердого раствора.

Исследованию подвергались цилиндрические образцы диаметром 35 мм и длиной $50,00 \pm 0,01$ мм, изготовленные из одного прутка. Закалка их производилась в воде при комнатной температуре после трехчасовой выдержки при температуре 530 ± 5 °С. Затем образцы подвергались естественному старению при комнатной температуре в течение 10 суток. Искусственное старение осуществлялось ступенчато путем изотермической выдержки образцов в течение 10 ч при температурах 140, 170, 180, 190, 230, 270 °С. После естественного старения и каждой ступени искусственного старения помимо акустических измерений проводились измерения твердости HRB и удельной электропроводности γ образцов.

На рис. 1 приведены зависимости положений амплитудных максимумов амплитудно-частотных характеристик образцов от температуры старения. Указаны средние значения и 90%-ные доверительные интервалы резонансных частот, вычисленные с использованием распределения Стьюдента по результатам измерений акустических спектров трех одинаковых образцов.

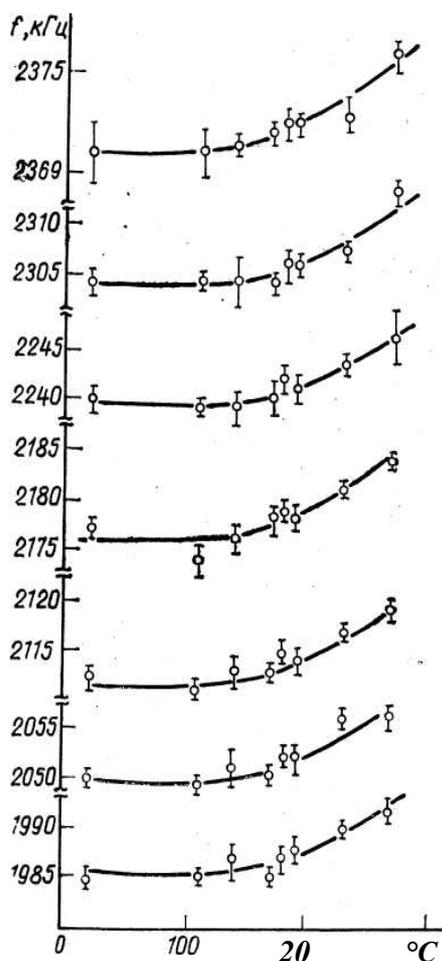


Рисунок 1 – Зависимость положения максимумов амплитуды в акустическом спектре резонатора от температуры старения алюминиевого сплава АК 4-1

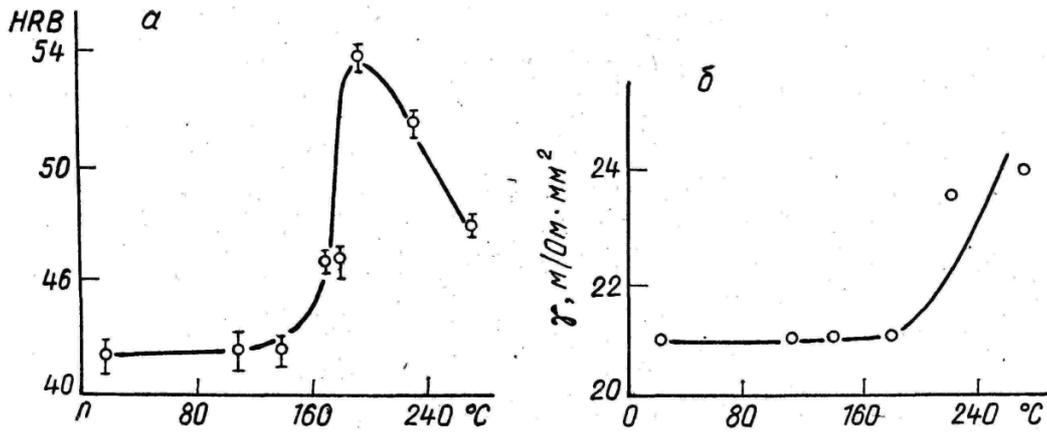


Рисунок 2 – Зависимость твердости (а) и электропроводности (б) от температуры старения

Средние значения и 90%-ные доверительные интервалы твердости найдены при измерении ее значений в разных зонах сечения тех же образцов, для которых получены данные акустических измерений. Еще одним подтверждением справедливости предположения о том, что смещение положения амплитудных максимумов вызвано распадом твердого раствора, служит возрастание электропроводности при повышении температуры старения выше 200 °С (рис. 2 б), что также свидетельствует о коагуляции выделившихся частиц метастабильной фазы.

В работе выполнены параллельные измерения скорости распространения ультразвука в образцах из стали 45 и механические измерения их пределов прочности σ_B и текучести $\sigma_{0,2}$. Измерения проводили на цилиндрических образцах диаметром 25 мм и длиной 40 мм. Для получения разных значений σ_B и $\sigma_{0,2}$ образцы группировали по три штуки и подвергали термообработке при 810–840° в течение 10 ч с последующим охлаждением на воздухе. Результаты измерений по каждой группе усредняли.

Результаты приведены на рис. 3 и 4. Чтобы установить между результатами измерений корреляционную зависимость, подсчитывали их коэффициент корреляции: для связи $f_{рез}$ и σ_B по формуле

$$r_1 = \frac{m \sum_{i=1}^m f_{pi} \sigma_{Bi} - \sum_{i=1}^m f_{pi} \sum_{i=1}^m \sigma_{Bi}}{\sqrt{\left[m \sum_{i=1}^m f_{pi}^2 - \left(\sum_{i=1}^m f_{pi} \right)^2 \right] \left[m \sum_{i=1}^m \sigma_{Bi}^2 - \left(\sum_{i=1}^m \sigma_{Bi} \right)^2 \right]}}$$

для связи $f_{рез}$ и $\sigma_{0,2}$ по формуле

$$r_2 = \frac{m \sum_{i=1}^m f_{pi} \sigma_{0,2i} - \sum_{i=1}^m f_{pi} \sum_{i=1}^m \sigma_{0,2i}}{\sqrt{\left[m \sum_{i=1}^m f_{pi}^2 - \left(\sum_{i=1}^m f_{pi} \right)^2 \right] \left[m \sum_{i=1}^m \sigma_{0,2i}^2 - \left(\sum_{i=1}^m \sigma_{0,2i} \right)^2 \right]}}$$

где m – количество образцов; f_{pi} – резонансная частота i -го образца; σ_B и $\sigma_{0,2}$ – его пределы прочности и текучести.

Как показали расчеты, $r_1 = 0,47$, $r_2 = 0,49$. Заключение о связи между исследуемыми величинами дается на основе сопоставления вычисленного значения коэффициента корреляции с его табличным значением, взятым при степенях свободы $K = m - 2$. Связь эта

имеет место, если $|r| > |r_{табл}(P, K)|$, где P – доверительная вероятность. Для нашего случая выбирали $P = 0,95$. Табличное значение коэффициента корреляции для обоих случаев оказалось равными 0,45.

Для построения линии регрессии мы использовали каналный метод Вернера, заключающийся в том, что через крайние верхние и нижние точки совокупности экспериментальных данных проводят прямые, строя так называемый канал, внутри которого и лежит искомая линия регрессии.

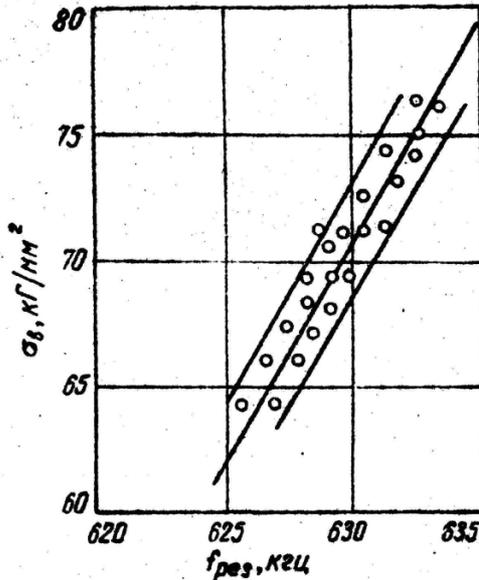


Рисунок 3 – Зависимость предела прочности образцов из стали 45 от резонансной частоты

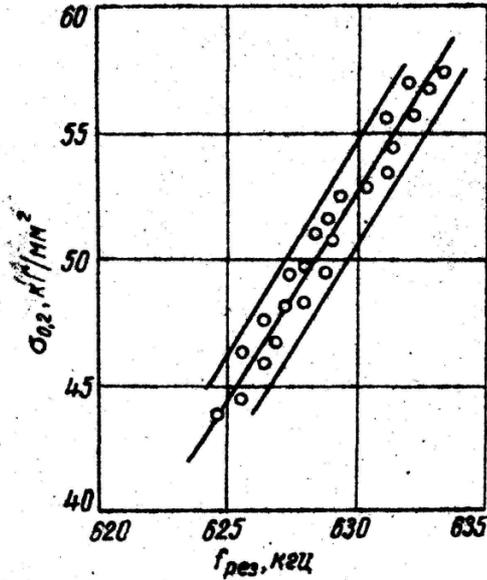


Рисунок 4 – Зависимость кажущегося предела текучести образцов из стали 45 от резонансной частоты

Среднеквадратичное отклонение полученных результатов от прямой регрессии подсчитывали по формуле

$$S = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{fi}} - 1 \right)^2},$$

где m – количество образцов; σ_i – экспериментальное значение σ_B или $\sigma_{0,2}$ i -го образца; σ_{fi} – значение этих величин, полученное на основе прямой регрессии. Величина ее, выраженная в процентах, равна 4,2% для $\sigma_B = \varphi(f_p)$ и 5,3% для $\sigma_{0,2} = \varphi(f_p)$.

Таким образом доказано, что корреляционная связь пределов прочности и текучести с резонансной частотой стали 45 действительно существует. Большое значение доверительной вероятности и малое значение среднеквадратичного отклонения служат основанием для возможности ультразвукового контроля на практике.

Несмотря на смещение акцентов материаловедения в сторону диагностики, оценки состояния конструкций в целом и прогнозирования возможности их эксплуатации при повышенных температурах, радиационных воздействиях и знакопеременных нагрузках, большое внимание следует уделять и вопросам приема и обработки информации, поступающей с объекта контроля, повышению ее достоверности, расширения возможности программного обеспечения и аппаратной части систем технической диагностики конструкций.

Вывод. Предложенный в работе акустический метод исследования и оценки физико-механических и технологических свойств материалов является одним из показателей оценки качества эксплуатационных свойств металла, определяющих его назначения и практическую направленность.

Установленные закономерности связей между изменением положения максимума амплитуды акустического спектра резонатора от температуры старения с аналогичными изменениям твердости и электропроводности сплава АК 4-1, получившим широкое распространение в авиационной и космической отрасли, могут служить основанием для создания эффективных методик контроля и диагностики технологических параметров при решении основных задач материаловедения по созданию новых материалов с заранее заданными свойствами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механіка руйнування і міцність матеріалів : Довід. посіб. / Під ред. В. В. Панасюка. – Т. 9 : Міцність і довговічність авіаційних матеріалів і елементів конструкцій / О. П. Остащ, В. М. Федірко, В. М. Учанів та ін. – Львів : Сполом, 2007. – 1068 с.
2. Бабичев С. А. Применение вейвлет анализа и нейросетевых технологий в системе диагностики и прогнозирования остаточного ресурса промышленного оборудования / С. А. Бабичев, Н. И. Бабенко, И. Ф. Погребняк, А. В. Шарко // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2010) : Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції. Том 1. – Херсон : Видавництво Херсонського державного морського інституту, 2010. – С. 116-121.
3. Бабичев С. А. Модель учета влияния сопутствующих факторов на точность определения механических характеристик металлов на основе сети Байеса / С. А. Бабичев, О. С. Бабичев, О. В. Шарко // Научно-технический и производственный журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль». – К., 2009. – № 2. – С. 15-20.
4. Царенко В. К. Основы ультразвукового неруйнівного контролю : Підручник / В. К. Царенко, Ю. В. Куц. – К. : НТУУ «КПІ», 2010. – 448 с.

Морозов Б.І. АКУСТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНО-ЧУТЛИВИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ

Запропоновано акустичний метод дослідження і оцінки фізико-механічних та технологічних властивостей матеріалів, який є одним з показників оцінки якості експлуатаційних властивостей металу, що визначають його призначення і практичну спрямованість. Доведено існування кореляційного зв'язку між міцності та текучості з резонансною частотою сталі 45.

Ключові слова: властивості матеріалів, сталь, акустичний метод.

Morozov B.I. ACOUSTIC STUDIES OF STRUCTURE-SENSITIVE PROPERTIES OF STEELS AND ALLOYS

We propose a method based on acoustic research and evaluation of physical and mechanical properties of materials and technology, which is one of the indicators of quality assessment of operational properties of metal, defining its purpose and practical. The existence of a correlation of ultimate strength and yield strength with a resonant frequency of 45 steel.

Keywords: properties of materials, steel, acoustic method.