

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 20. Выпуск 3.

УДК 539.67:621.785

DOI 10.22405/2226-8383-2019-20-3-514-532

История создания метода оценки поврежденности сталей на базе механической спектроскопии¹

А. Н. Чуканов, А. Е. Гвоздев, А. Н. Сергеев, А. А. Яковенко, П. Н. Медведев,
С. Н. Кутепов, Д. В. Малий

Чуканов Александр Николаевич — доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Сергеев Александр Николаевич — доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: ansergueev@gmail.com

Яковенко Александра Александровна — кандидат технических наук, инженер-технолог, ООО «Металлург-Туламаш» (г. Тула).

e-mail: Alexyakovenk@gmail.com

Медведев Павел Николаевич — кандидат педагогических наук, доцент кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: medvedeff_82@mail.ru

Кутепов Сергей Николаевич — кандидат педагогических наук, доцент кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Малий Дмитрий Владимирович — старший преподаватель кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: maliydmitriy@yandex.ru

Аннотация

На фоне становления и развития одного из перспективных методов физического материаловедения – механической спектроскопии - представлена история открытия тульскими металлофизиками Н.Н. Сергеевым и В.С. Агеевым ранее неизвестного эффекта неупругого поведения сталей. Описана их первая попытка теоретического описания механизма его формирования. Изложена дальнейшая судьба обнаруженного эффекта в переплетении с судьбами его исследователей. Предложена история реновации забытого почти на 30 лет открытия. Подробно представлена реализованная через десятилетия последователями первооткрывателей многоплановая программа масштабного изучения механизма незаслуженно

¹Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (уникальный идентификатор проекта RFMEF 157717X0271)

забытого эффекта. Описаны споры со скептиками. Изложены основные альтернативные идеи, как причины научных споров вокруг природы эффекта. Даны ответы на критические вопросы, позволившие авторам статьи убедить скептиков в реальности обнаруженного явления и создать на его базе новое направление в исследовании сталей и сплавов – метод оценки их повреждаемости по результатам механической спектроскопии. Описаны примеры промышленного применения созданного направления. Перечислены области применения разработанной авторами на основе возрожденного метода методики применения комплекса эффектов неупругости для разномасштабного описания структурных изменений в сталях и сплавах в ходе внешних деструктивных воздействий различной природы. Описаны новые пути развития и совершенствования предложенного авторами метода в исследовании изделий, полученных как по типовой слитковой технологии, так и в условиях аддитивных технологий 3d печати.

Ключевые слова: механическая спектроскопия, внутреннее трение, температурная зависимость, деформация, насыщение водородом, эффект неупругости, механизм, деструкция, новое направление исследований, современное состояние.

Библиография: 37 названия.

Для цитирования:

А. Н. Чуканов, А. Е. Гвоздев, А. Н. Сергеев, А. А. Яковенко, П. Н. Медведев, С. Н. Кутепов, Д. В. Малий. История создания метода оценки поврежденности сталей на базе механической спектроскопии // Чебышевский сборник. 2019. Т. 20, вып. 3, с. 514–532.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 20. No. 3.

UDC 539.67:621.785

DOI 10.22405/2226-8383-2019-20-3-514-532

The story of the creation method of assessing damage of steels on the basis of mechanical spectroscopy²

A. N. Chukanov, A. E. Gvozdev, A. N. Sergeev, A. A. Yakovenko, P. N. Medvedev,
S. N. Kutepov, D. V. Maliy

Chukanov Alexander Nikolaevich — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading researcher of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

Gvozdev Aleksander Evgenievich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief researcher of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: gvozdev.alexandr2013@yandex.ru

Sergeev Aleksander Nikolaevich — Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Head of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: ansergueev@gmail.com

Yakovenko Aleksandra Aleksandrovna — Candidate of Technical Sciences, Process Engineer, «Metallurg-Tulamash Ltd.» (Tula).

e-mail: Alexyakovenk@gmail.com

Medvedev Pavel Nikolaevich — Candidate of Pedagogical Science, Associate Professor of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

²The work was carried out within the framework of the Federal Program "Research and development in priority areas of development of the scientific and technological complex of Russia for 2014–2020"(unique identifier of the project RFMEF 157717X0271).

e-mail: medvedeff_82@mail.ru

Kutepov Sergey Nikolaevich — Candidate of Pedagogical Science, Associate Professor of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Maliy Dmitry Vladimirovich — Senior Lecturer of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: maliydmityriy@yandex.ru

Abstract

Against the background of the formation and development of one of the promising methods of physical materials science – mechanical spectroscopy - the history of the discovery of Tula metal physicists N.N. Sergeev and V.S. Ageev previously unknown effect of inelastic behavior of steels. Their first attempt of theoretical description of the mechanism of its formation is described. Set out the further fate of the detected effect in the interplay with the lives of its researchers. The history of the renovation of the forgotten for almost 30 years of discovery is proposed. A multi-faceted program of large-scale study of the mechanism of undeservedly forgotten effect, implemented in decades by the followers of the pioneers, is presented in detail. Disputes with skeptics are described. The main alternative ideas as the reasons of scientific disputes around the nature of effect are stated. Answers to critical questions are given, which allowed the authors to convince skeptics of the reality of the discovered phenomenon and to create a new direction in the study of steels and alloys – a method of assessing their damage by the results of mechanical spectroscopy. The examples of industrial application of the created direction are described. The areas of application of the method of application of the complex of inelastic effects developed by the authors on the basis of the revived method for a multi-scale description of structural changes in steels and alloys in the course of external destructive effects of different nature are listed. New ways of development and improvement of the method proposed by the authors in the study of products obtained both by standard ingot technology and in the conditions of additive 3D printing technologies are described.

Keywords: mechanical spectroscopy, internal friction, temperature dependence, strain, saturation with hydrogen, the effect of inelasticity, the mechanism of destruction, a new direction of research, the current state.

Bibliography: 37 titles.

For citation:

A. N. Chukanov, A. E. Gvozdev, A. N. Sergeev, A. A. Yakovenko, P. N. Medvedev, S. N. Kutepov, D. V. Maliy, 2019, "The story of the creation method of assessing damage of steels on the basis of mechanical spectroscopy", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 20, no. 3, pp. 514–532.

1. Введение

В период с 40-х и до конца 90-х годов 20 века в физическом материаловедении был крайне популярен и активно использовался метод изучения структурного состояния материалов на их различных масштабных уровнях (атомарном – субзеренном, мезо- и макроскопическом), получивший в последствии название механической спектроскопии (МС). Сейчас активность использования МС по ряду причин снижена. С помощью МС изучали и продолжают изучают природу структурных и фазовых превращений в металлах и сплавах. Выявляют и используют явления, контролирующие свойства сталей и сплавов в ходе различных видов воздействия: термического, деформационного, термо-деформационного, электромагнитного, радиационного, агрессивных сред и др. Во многих случаях метод МС является уникальным с точки зрения избирательности, так как получаемая с его помощью информация (в том числе атомарного уровня) не может быть получена другими методами.

Технически МС заключается в измерении и анализе частотных, температурных, амплитудных и временных спектров рассеиваемой материалом энергии [1]. Подведение энергии к материалу производят как правило в виде колебаний (крутильные, изгибные) или статического нагружения (рис.1).

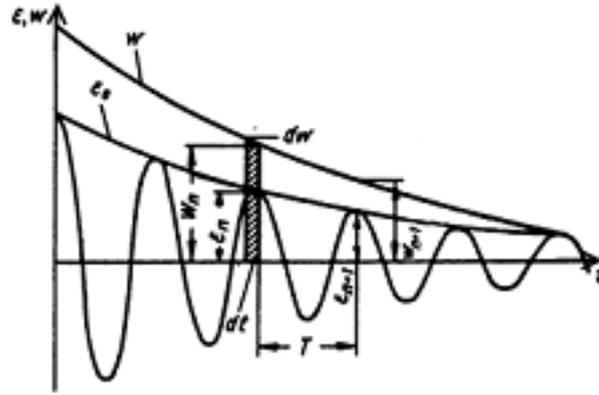


Рис. 1: Развёртка затухающих колебаний стержня и соответствующая ей кривая рассеяний энергии

Рассеивание (диссипация) энергии связана с внутренним трением (ВТ) материала – переходом части энергии упорядоченных процессов в энергию неупорядоченных процессов, в конечном счёте - в теплоту. Процессы рассеяния энергии связаны с явлениями как фундаментальными, присущими идеальным кристаллам, так и со структурными, обусловленными наличием дефектов кристаллической решётки (рис. 2). В кристаллических материалах – диссипация реализуется перемещением и взаимодействием дефектов строения (точечных, линейных, поверхностных, объёмных) [2-5].

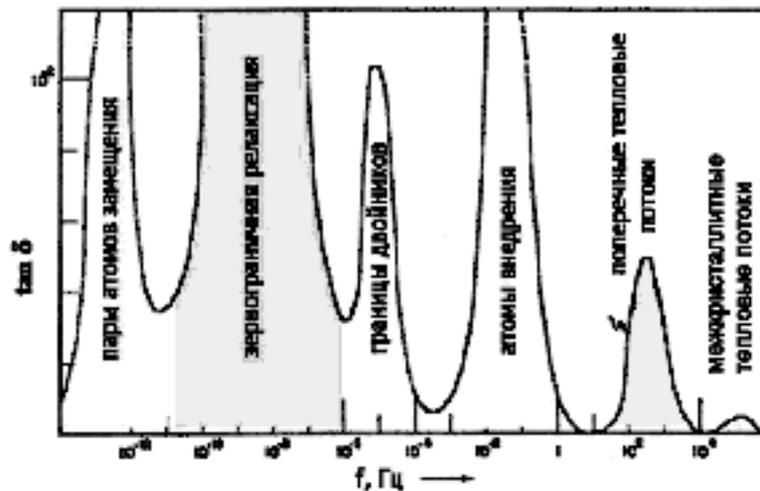


Рис. 2: Частотная зависимость внутреннего трения ($Q^{-1}(\omega)$ (или $tg\delta(f)$) в широком диапазоне частот [1]

За меру ВТ можно принять энергию, рассеянную в единице объёма за одну секунду, т.е. величину:

$$\omega = \bar{\sigma} \dot{\epsilon} \text{ Дж/с см}^3 \quad (1)$$

Удобно пользоваться безразмерными величинами. Фундаментальной мерой ВТ является отношение $\Delta W/W$, где W – энергия колебаний, а ΔW – потеря энергии колебаний за один цикл. Энергия, рассеянная за один период по всему объёму образца:

$$W = \frac{1}{2} \int \sigma_0 \varepsilon_0 dv \quad (2)$$

Важной характеристикой ВТ является величина $\psi = \Delta W/W$ – коэффициент поглощения, который можно определить по развёртке свободных затухающих колебаний образца изучаемого материала – рис. 1.

В таком случае:

$$\psi = \int_t^{t+T} \frac{dW}{W} \quad (3)$$

Полагая $W \sim \varepsilon_0^2$ (из рис. 1), получают:

$$\psi = \int_t^{t+T} \frac{d\varepsilon_0(t)}{\varepsilon_0(t)} = 2 \ln \frac{\varepsilon_0(t)}{\varepsilon_0(t+T)} = 2 \ln \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{n+1}}, \quad (4)$$

здесь $\partial = \ln \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{n+1}}$ – логарифмический декремент колебаний, $\partial = \psi/2$.

По аналогии с терминами, применяемыми в электротехнике, вводят понятие добротности Q системы.

$$Q = 2\pi/\psi = \pi/\partial \quad (5)$$

Для определения ВТ обычно используют логарифмический декремент ∂ или ширину резонансного пика образца при вынужденных колебаниях. В таком случае ВТ выражается следующим образом:

$$Q^{-1} = (\omega_2 - \omega_1)/\omega_\tau \quad (6)$$

где ω_τ – резонансная частота при вынужденных колебаниях, а ω_1 и ω_2 – частоты, при которых амплитуда колебаний снижается до значения, составляющего $1/\sqrt{2}$ от ее максимальной величины. Для образца, деформация в котором имеет гомогенный характер, а ВТ невелико и не зависит от амплитуды колебаний, можно показать, что

$$Q^{-1} = \partial/\pi = \Delta W/2\pi W \quad (7)$$

Выражения (7) справедливы при $(Q^{-1}) \leq 1$. Это условие, как правило, выполняется на практике. Хотя выражения (6) строго справедливы только в случае, когда внутреннее трение не зависит от амплитуды колебаний, их можно применять в качестве первого приближения, если зависимость от амплитуды не очень велика. Иногда внутреннее трение измеряют по затуханию звуковой волны, проходящей через материал; в этом случае

$$\delta = \alpha \lambda \quad (8)$$

где α – константа затухания, λ – длина звуковой волны.

Помимо описанного выше, ВТ весьма наглядно рассматривают с помощью диаграммы напряжение – деформация. В идеально упругом материале кривая в координатах напряжение – деформация является прямой линией; при наличии ВТ кривая образует петлю гистерезиса, площадь которой равна потере энергии на единицу объёма за один цикл (рис.3). (Так как потери за счет ВТ обычно очень невелики ($Q^{-1} < 10^{-2}$), гистерезисная кривая лишь очень слабо отклоняется от прямой).

В случае гистерезиса фаза деформации отстаёт от фазы колебаний на угол φ , следующим образом связанный с декрементом системы:

$$\varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = Q^{-1} = \partial/\pi \quad (9)$$

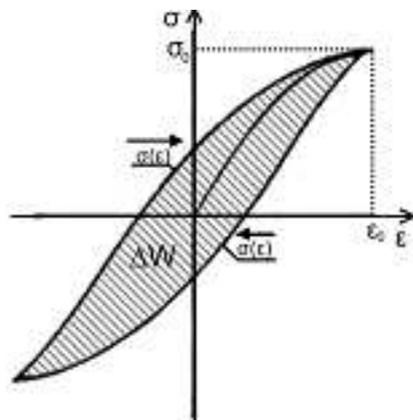


Рис. 3: Петля механического гистерезиса при растяжении – сжатии

Угол сдвига фазы φ также является мерой ВТ.

Явление ВТ материалов неразрывно связано с понятием их упругости и относится к группе явлений несовершенной (не полной) упругости (ВТ, последствие) [1]. Формирование современного металлофизического подхода к анализу неупругого поведения материалов при их циклическом деформировании начато К.М. Зинером [1]. Яркий след в науке о неупругости материалов оставили работы А. Новика, Т.С. Кê, Ч. Верта, Ж. Снука, К. Люкке, А. Гранато, А. Зегера. В России систематическое изучение физики неупругости начато Б.Н. Финкельштейном в середине 1950-х годов в Московском институте стали и сплавов. Исследования неупругости были продолжены Ю.В. Пигузовым, Н.А. Тяпуниной, М.С. Блантером, Г.М. Ашмаринным, И.Б. Кекало, Е.К. Наими и др. Сложилась сильные научные школы в Ленинграде (С.П. Никаноров), Воронеже (В.С. Постников), Туле (М.А. Криштал), Киеве, Харькове, Тбилиси (Ф.Н. Тавадзе), Ереване и других городах.

Наиболее активные исследования в области неупругости металлических материалов ведутся в странах Европы: Швейцарии (В. Бенуа, Г. Гremo, Р. Шаллер, Д. Мари), Германии (К. Люкке, А. Зегер, М. Веллер, Х.-Р. Зиннинг, В. Риemanн), Италии (П. Бордони, Р. Кантелли, Г. Каннели, Ф. Маззолаи, Ф. Кордеро), Испании (Х. Сан Хуан, М. Но, Э. Цезари), Франции (Г. Фантози, А. Ривиер, Дж. Дегог), Бельгии (Р. Де Батист, Я. Ван Хумбек), Великобритании (Р. Адамс, С. Редферн), Польши (Я. Ильчук, Л. Магалас), Чехии (С. Троянова), Словакии (А. Пушкар), Украины (П.П. Паль-Валь, В.Д. Нацик), Азии: Японии (М. Коива, Х. Ми-Зубаяши, Х. Нумакура, И. Нишино, Т. Косуги), Китае (Т.С. Кк, К. Конг, К. Фанг, Ф. Хан, Дж. Джу, М. Ченг), Северной и Южной Америки: США (А. Гранато, Д. Бешерс, Р. Гибала, Р. Лейкс, М. Вутиг), Канаде (З. Пан, Г. Джохари), Бразилии (К. Грандини) и Аргентине (О. Ламбри, А. Сальва).

Первая международная конференция по проблеме неупругости материалов состоялась в 1956 г. в США под названием «Внутреннее трение и рассеяние ультразвука». В 2002 г. ее название было частично изменено на «Внутреннее трение и механическая спектроскопия» (International Conference on Internal Friction and Mechanical Spectroscopy: ICIFMS), а нумерация конференций сохранилась с 1956 г.: ICIFMS-14 прошла в 2005 г. в Японии, ICIFMS-15 – в 2008 г. в Италии, ICIFMS-16 – в 2011 г. в Швейцарии, ICIFMS-17 в 2014 г. в Китае. Впервые за всю историю Международная конференция ICIFMS-19 («Внутреннее трение и механическая спектроскопия») будет проведена в 2020 году (начало июля) в Москве на базе НИТУ МИСиС! Помимо конференций этой серии было проведено шесть Европейских конференций ECIFAS и три Международные школы по механической спектроскопии, в США – серия симпозиумов M3D (Mechanics and Mechanisms of Materials Damping), в Азии, в Китае проведено девять Национальных конференций по внутреннему трению.

В России первая межвузовская конференция «Релаксационные явления в металлах и сплавах» была организована и проведена Б.Н. Финкельштейном в 1958 г. в Москве (МИСиС) и затем, начиная с 1960 г. регулярно проводились национальные и международные конференции по проблемам неупругости в твёрдых телах: в Воронеже (ВорГТУ, В. С. Постников, Б. М. Даринский), в Туле (ТПИ-ТГПУ-ТулГУ, М. А. Криштал, С. А. Головин, Д. М. Левин), а также на Украине (Харьковский университет, Б. Я. Пинес; Университет им. Коцюбинского Винница, Мозговой В. А.), в Грузии (Институт металлургии и материаловедения, Ф. Н. Тавадзе) [1].

Основными количественными мерами ВТ в зависимости от способа внешнего воздействия являются: при затухающих колебаниях - логарифмический декремент затухания или ВТ (Q^{-1}); при статическом нагружении - относительное изменение площади петли механического гистерезиса [1]. Далее будем описывать результаты измерения спектров ВТ в ходе свободно затухающих колебаний (резонансный метод). При описанной реализации МС измеряют и анализируют параметры частотных или температурных зависимостей ВТ (ЧЗВТ, ТЗВТ) (рис. 4).

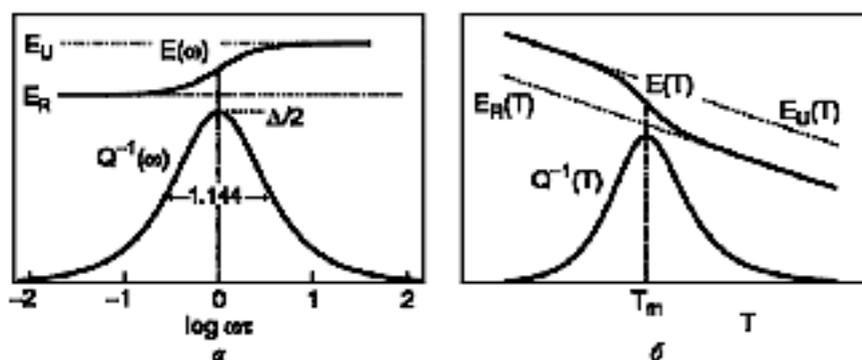


Рис. 4: Частотная (а) и температурная (б) зависимости внутреннего трения ($Q^{-1}(\omega)$ и $Q^{-1}(T)$) и модуля упругости ($E(\omega)$ и $E(T)$) в районе релаксационного пика

На территории России наибольшее распространение получили измерения ТЗВТ. Указанные зависимости представляют собой зависимости $Q^{-1}(T)$ с характерными максимумами (диапазонами интенсивного затухания), отражающими эффекты неупругости (ЭН) различной природы в определенном диапазоне температур.

Природа подавляющего большинства наблюдаемых ЭН хорошо изучена. Подробно описаны их механизмы и произведены расчеты термодинамических параметров ЭН (температурного положения T_{max} , высоты максимума ВТ Q_{max}^{-1} , энергии активации $H_{ак}$).

Рассеяние энергии механических колебаний из-за движения дефектов кристаллического строения получило большое практическое использование и определило области применения метода МС. Исследования спектров ВТ для различных материалов при различных условиях эксперимента позволили обнаружить ЭН (пики ВТ), отвечающие за те или иные процессы релаксации в материалах. Обнаружение и изучение релаксационных процессов для разнообразных металлов и сплавов, раскрытие физических механизмов их структурообразования можно считать современной историей механической спектроскопии и физики неупругости (рис.5).

В середине XX в. с помощью метода МС было сделано множество открытий о строении, поведении и взаимодействии дефектов строения кристаллических и аморфных металлических материалов под нагрузкой. Были обнаружены и получили своё объяснение базовые эффекты релаксационного (эффекты Зинера и Снука, Бордони, Хазигути, Финкельштейна – Розина, Снука – Кёстера, Горского и др.) и гистерезисного (теории Давиденкова, Гранато и Люкке, Бешерса, Греммо и др.) рассеяния энергии. Метод МС укрепил связь между материаловедением, кибернетикой (программирование аппаратуры быстрого и точного измерения рассеяния

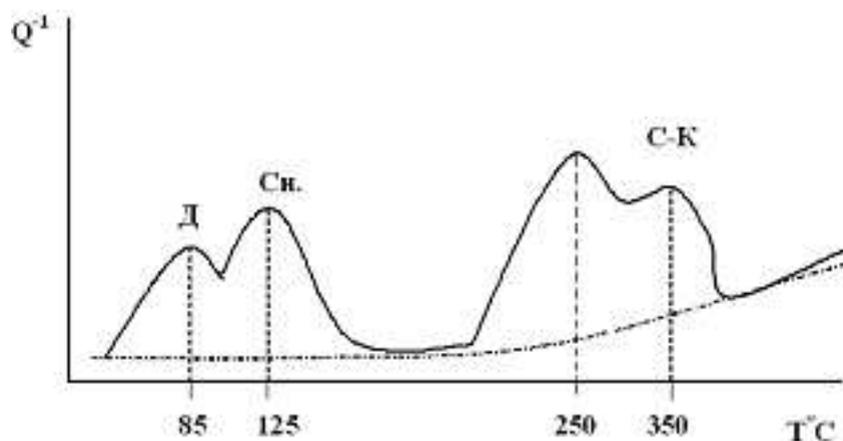


Рис. 5: Схема типичной ТЗВТ сплавов системы $Fe - C (f \sim 1 \text{кГц})$ (Сн – максимум Снука, С-К – максимум Снука – Кестера, Д – деструкционный максимум)

энергии в исследуемом материале), акустикой и электрофизикой (создание схем для моделирования поведения твёрдого тела под нагрузкой).

Анализ пиков ВТ является эффективным, а иногда и уникальным инструментом изучения структуры материала и соответствующих физических механизмов релаксации. Он позволяет оценивать поведение структуры материала в различных режимах и средах эксплуатации и формировать в нём заведомо известные физико-механические свойства за счёт разработки новых сплавов и технологий обработки.

Цель работы – знакомство с историей открытия нового эффекта неупругости (ЭН), его забвением более, чем на 25 лет, и последующим возрождением приведшим к разработке нового направления МС - исследования деградации и деструкции сталей и прогнозирования перехода стали к локальному разрушению.

Основная идея. Открытие и забвение. В конце 80-х годов прошлого века активность использования МС снизилась. Казалось, что новую информацию с помощью метода МС получить сложно. Однако в 1974 году в Тульском политехническом институте его сотрудниками Николаем Николаевичем Сергеевым и Виталием Степановичем Агеевым при измерении ТЗВТ образцов арматурных сталей после термомеханической обработки был открыт ранее не описанный ЭН [6, 7]. Новый ЭН фиксировали совместно с уже известным эффектом Снука, который вуалировал «новичка». Исследователи определили, что интенсивность обнаруженного ЭН возрастала вместе с ростом интенсивности внешнего термического и деформационного воздействия. К анализу физической природы обнаруженного ЭН был привлечен перспективный и молодой тогда физик-теоретик, выпускник Харьковского университета, Даниил Михайлович Левин (будущий заведующий кафедрой физики ТулГУ). Совместно была высказана гипотеза о связи появления нового ЭН с формированием и эволюцией микротрещин в объёме образцов, подвергшихся ТМО разной интенсивности [8] (рис. 6, 7).

Специфической особенностью обнаруженного пика являлось то, что он достигал заметной величины в момент предразрушения образца. Энергия активации данного максимума, рассчитанная по температурному сдвигу, составила 57,8 кДж/моль (0,6 эВ), а вычисленная по формуле Верта-Маркса 57,8–69,4 кДж/моль (0,6–0,72 эВ).

Авторы предполагали, что пик затухания на температурной зависимости ВТ соответствовал моменту появления микротрещин, а также накоплению других дефектов кристаллического строения типа скоплений дислокаций, пор и т. д.

Природа описанных экстремумов до конца не была выяснена и предположения о процессах, приводящих к их появлению, были неоднозначны.

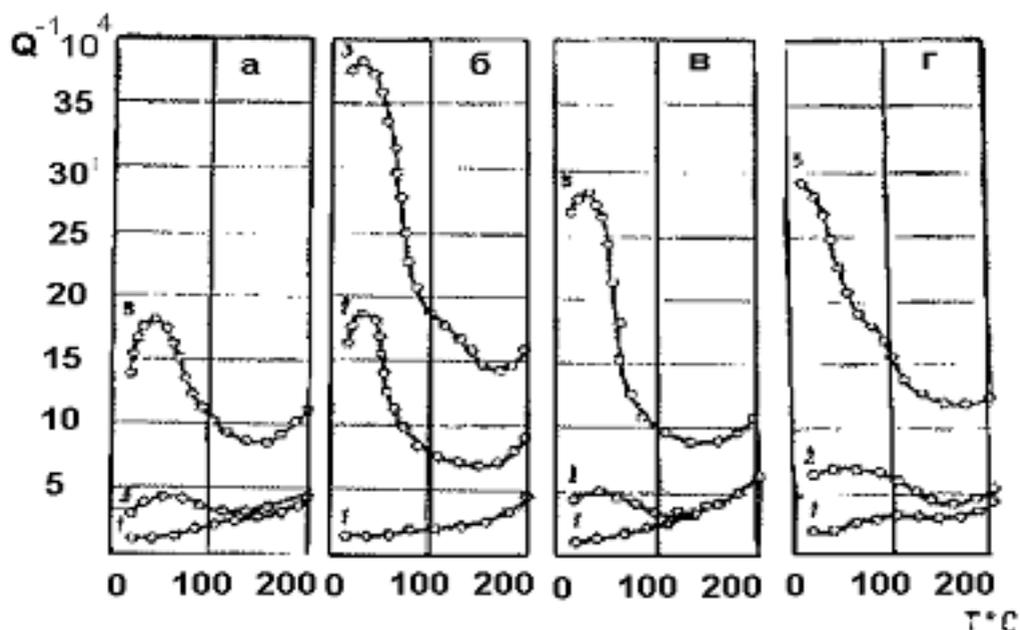


Рис. 6: Температурные зависимости ВТ стали 20ГС2 после испытаний на длительную прочность в водородосодержащей среде при уровнях напряжений 0,5 (а); 0,6 (б); 0,7 (в) и 0,8 (г) от предела прочности. Цифры у кривых – время испытаний, час: а) 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 2; б) 1 – 0,25; 2 – 1; 3 – 2; в) 1 – 0,26; 2 – 0,5; 3 – 1; г) 1 – 0,25; 2 – 0,5; 3 – 0,55 [6]

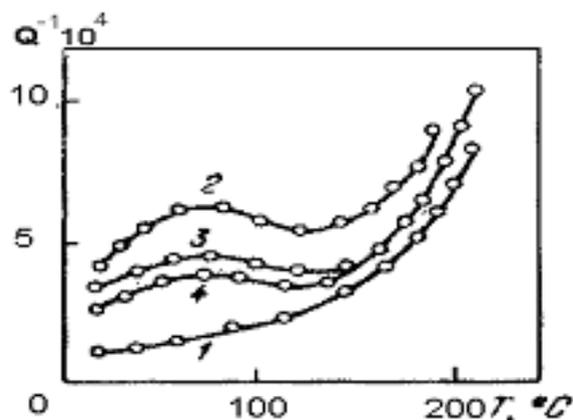


Рис. 7: Температурная зависимость ВТ образцов стали 20ГС2 в исходном состоянии (1) и после растяжения до момента предразрушения (2-4). Шейка разрушения находится: 2 – в средней части образца; 3 – вблизи торца образца; 4 – удалена от места вырезки образца на 200 мм [7]

Однако, вследствие близости значений температурных и энергетических характеристик эти эффекты можно отнести к одному классу явлений. Особенно важно отметить, что проявление эффектов наблюдается в материалах, находящихся в предельном состоянии.

Однако, к сожалению, на этом активные исследования природы обнаруженного ЭН были приостановлены. Причин было несколько. С одной стороны, это изменения в личной и научной жизни исследователей. Трагически ушёл из жизни талантливейший экспериментатор и специалист в области МС В.С. Агеев. Научные и практические интересы Н.Н. Сергеева привели его на новую работу в НИИ при ТулаЧермете. Д. М. Левин активно включился в исследовательский и учебный процессы кафедры физики.

С другой стороны, выдвинутая авторами гипотеза о механизме формирования обнаруженного ЭН и его связи с трещинообразованием не нашла поддержки у коллег, работавших в данной области. Главная причина этого – отсутствие масштабных теоретических и экспериментальных исследований, подтверждающих описанную гипотезу, а также наличие альтернативных взглядов на природу обнаруженного ЭН.

Таким образом, обнаруженный в 1974 году Н. Н. Сергеевым и В. С. Агеевым интереснейший ЭН был забыт. Вопрос о его природе был отложен до 1997 года.

2. Возрождение открытия. Новое – это хорошо забытое старое?

Вопрос о природе ЭН, зафиксированного Н. Н. Сергеевым и В. С. Агеевым был поднят автором этой статьи А. Н. Чукановым при подготовке его докторской диссертации. Проведя обширный анализ литературы о свойствах (и в частности ВТ) сталей, подвергшихся различным деструктивным воздействиям, А. Н. Чуканов обратил внимание на появляющуюся у разных исследователей информацию о некотором ЭН, встречающемся после деформации, деформационно-термического воздействия и обработок, приводящих к поверхностному трещинообразованию. Практически все исследователи никак не пытались идентифицировать его природу. Вот тут-то и были подняты архивы с работой Н. Н. Сергеева и В. С. Агеева. После предварительных экспериментов с арматурными и конструкционными сталями стало понятно, что ранее обнаруженный ЭН действительно существует. А. Н. Чуканов решил сделать его центральным в своей диссертационной работе. К исследованиям был вновь привлечен Д. М. Левин и группа аспирантов. А. Н. Чуканов и Д. М. Левин провели подробные теоретические и экспериментальные исследования, воспользовавшись помощью коллег из ЦНИИЧерМет им. И. П. Бардина (Институт качественных сталей, Москва).

На специально разработанном А. Н. Чукановым оборудовании [9-11, 12-14] были проведены измерения и выполнен анализ температурных и амплитудных спектров ВТ и модулей упругости углеродистых, конструкционных, легированных сталей и чугунов различных марок, после разных видов деструкционных воздействий (деформация, ТМО, водородная коррозия) (рис. 8).

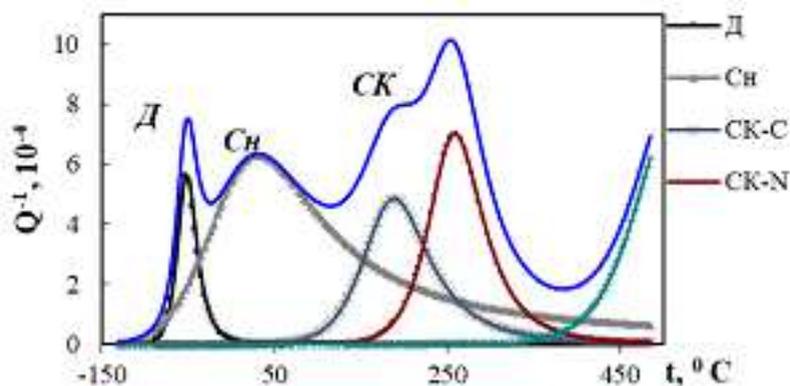


Рис. 8: ТЗВТ сплава $Fe-0,09\%C$, $\varepsilon_{пр} = 17\%$, $f \sim 1$ Гц после компьютерного анализа [23]

Оценен комплекс физико-механических свойств этих материалов (прочность, пластичность, упругость, плотность, электросопротивление и др.) [15–22]. Проведен микроструктурный анализ наличия микротрещин и пор с использованием программной обработки (рис. 8, 9). Проведены рентгеноструктурные исследования наличия и количества дефектов кристаллического строения. В итоге было четко определено, что ЭН, обнаруженный Сергеевым-Агеевым действительно имеет место.

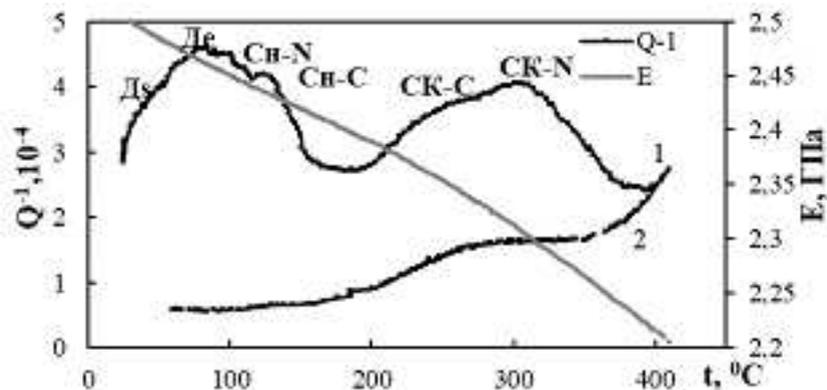


Рис. 9: Температурные зависимости внутреннего трения (ТЗВТ) и модуля упругости (ТЗМУ) (сталь 20; $\varepsilon_{пр} = 8\%$; $f \sim 1\text{кГц}$; 1-нагрев, 2-охлаждение) [23]

А. Н. Чуканов предложил использовать его параметры в качестве инструмента, фиксирующего самые ранние этапы зарождения, эволюции несплошностей. От субструктурных размеров до микроструктурных и далее, к переходу в состояние, названное «локальным предельным». После него материал переходит к необратимой поврежденности и далее – макроскопическому разрушению. Выяснилось, что описываемый ЭН по-разному реагирует на появление и развитие трещин, образующихся при силовом воздействии и коррозии в водородсодержащих средах. Это позволяло выделять вклады в трещинообразование различных по природе физических процессов. Кроме этого, были созданы статистические прогнозные модели, позволявшие по результатам измерения ВТ прогнозировать переход материалов промышленных объектов (трубные стали, тяжело нагруженные стальные конструкции) в состояние предразрушения. Безымянный до тех пор ЭН получил название «деструкционного» эффекта неупругости [23–26].

Авторами были рассчитаны характеристики (время релаксации, энергия активации, температурный диапазон его развития при различных частотах нагружения и др.) релаксационного эффекта (деструкционный максимум), образованного в ходе обратимого скольжения дислокаций только у концентраторов внутренних напряжений (трещин), которые суммируясь с циклическими внешними напряжениями вызывают развитие дислокационных реакций (термофлуктуационного образования и взаимодействия двойных дислокационных перегибов s- и e- типов) [23–26]. Поскольку образование микротрещин обусловлено деструкционными процессами, то изучение деструкционного максимума стало инструментом для установления закономерностей перехода материала в предельное состояние.

Полученными результатами сразу активно заинтересовались практики. Это были эксплуатационники транспортных систем нефте- и газопроводов России. Они хотели иметь метод мониторинга состояния трубопроводов для предотвращения их преждевременного выхода из строя и недопущения катастрофических разрушений. Решения, полученные А. Н. Чукановым и Д. М. Левиным были поддержаны документами Росстандарта и грантами РФФИ [27–30].

А. Н. Чукановым была разработана методика, основанная на анализе ТЗВТ и установлении параметров целого комплекса неупругих эффектов, отражающих концентрацию атомарного (H^-) и молизованного (H_2) водорода (пик Каннели-Вердини, водородный максимум Снука-Кёстера), примесей внедрения N, C в феррите (максимум Снука), интенсивность дислокационно-примесного взаимодействия, блокировку дислокаций (максимум Снука-Кёстера), а также трещинообразование («деструкционный» максимум) и уровень микроискажений в объеме (фон ВТ) [23–26]. Совместный анализ параметров перечисленных эффектов неупругости позволял детально описать изменения субструктуры, приводящие материал

в предельное состояние, близкое к началу локального разрушения.

3. О пророках в своём отечестве

Однако даже после такого информативного подтверждения жизнеспособности описания «деструкционного» ЭН и его производственного использования ряд коллег-металлофизиков продолжал сомневаться в реальном существовании успешно фиксируемого авторами ЭН и первенстве коллектива А. Н. Чуканова в его исследованиях.

Аргументы скептиков сводились в основном к двум замечаниям. Первое, обнаруженный ЭН с их точки зрения мог быть одним из ранее известных, но видоизменённых ЭН. Вторым был вопрос: как возможно, что столько лет активного исследования в области МС не выявили наличия «деструкционного» эффекта?

На первое замечание ответ был дан очень быстро. С ним согласились даже скептики. Дело в том, что в исследованных материалах, с их концентрациями основных элементов и структурным составом отсутствовали другие эффекты неупругости. Это не могли быть ЭН дислокационной природы (например, «усиленный дислокациями» ЭН, описанный Л. Магала-сом). Его фиксация была возможна только в очень чистых сплавах с концентрацией углерода не более 0,003%. В исследованных же сталях и сплавах содержание углерода составляло в сто и даже тысячу раз большую величину.

Другой особенностью «деструкционного» НЭ было то, что в условиях, наиболее часто применявшихся для измерения ТЗВТ (частота колебаний порядка 1000 Гц), его температурное положение было близко к положению известного максимума Снука. Последний часто маскировал «деструкционный» максимум. Однако, если использовать методику подавления «снукоского» пика (например, последовательно деформировать с нарастающей нагрузкой), то максимум Снука резко снижался, а из-за его «спиной» появлялся «деструкционный» пик. Кроме того, успешно разделить оба максимума можно было, проведя измерения ТЗВТ при низких (1–2 Гц) частотах колебаний. В этом случае, температурные положения обоих максимумов резко отличались: плюс 30 . . . 40⁰С у пика Снука и минус 40 . . . 20⁰С у «деструкционного» максимума. Однако, проведение низкотемпературных испытаний требовало наличия криокамеры, охладителя, специальных методик, что могли себе позволить не все исследовательские коллективы.

Второе замечание заставило авторов исследований «деструкционного» эффекта задуматься. Однако, и здесь ответ был найден. Он лежал буквально на поверхности и был перед глазами. Однако «. . . лицом к лицу лица не рассмотреть. . .».

Почему же «деструкционный» эффект ВТ не был обнаружен и подробно исследован ранее? Да, Н. Н. Сергеев и В. С. Агеев обнаружили его. Но натолкнулись, если так можно сказать, на него почти случайно. Что же мешало обнаружить его? Ответ прост: отсутствие целенаправленных поисков.

Оказывается, что до 1997 года и начала исследований А. Н. Чуканова никто из специалистов в области МС системно не применял метод измерения ТЗВТ для анализа повреждаемости сталей и сплавов.

Те, кто проводил практические исследования, согласятся со следующими утверждениями. Перед экспериментами подготавливается комплект(ы) образцов идентичного состава, одного структурного состояния и физико-механических свойств. В последствии их подвергают базовой (исходной) обработке (зачастую высокотемпературному гомогенизирующему отжигу в вакууме), нивелирующей оставшиеся различия. После этого образцы делят на партии для различных видов воздействий и последующих испытаний.

Так вот, на этапе комплектования не допустимо различие в свойствах исходных образцов. Для специалистов в области ВТ одним из главных требований к образцам являлось и явля-

ется одинаковое рассеивание ими механической энергии или их добротность. Это проверяют, измеряя фон ВТ. Если он резко отличался в каких-либо образцах, то эти образцы удаляли из комплекта.

Причина более высокого рассеивания – наличие внутренних дефектов в виде различного рода несплошностей: трещин, расслоений, волосовин, раковин. Сходным образом хозяйки проверяют при покупке керамическую и хрустальную посуду. То есть, образцы с трещинами, которые необходимо было бы исследовать для фиксации «деструкционного» эффекта, просто выбрасывали! Вот и ответ на второе замечание скептиков.

Альтернативой могло быть только скрупулёзное исследование образцов, подвергнутых деструкционным воздействиям разной природы и степени интенсивности, позволявшее контролировать появление, размер и количество несплошностей (микротрещин, пор) в них. Параллельно было необходимо микроскопически и по физическим свойствам (плотность) подтвердить изменявшееся количество и геометрию трещин. Измерения ВТ должны были идти в купе с перечисленными исследованиями, взаимно дополняя друг друга. Именно таким образом А. Н. Чуканов провёл исследования параметров «деструкционного» ЭН в сталях и чугунах после различных видов внешних воздействий.

4. Выводы

Сейчас «деструкционный» эффект в комплексе с другими ЭН успешно применяется авторами статьи и их коллегами для анализа состояния слитковых сталей и сплавов после различных обработок, для изучения экстремальных эффектов и причин изменения прочности и пластичности в гетерофазных металлических системах при термомеханических воздействиях и в предпереходных состояниях для оптимизации режимов ресурсосберегающих способов их обработки. К областям использования деструкционного эффекта можно отнести следующие: изучение стадийности деградации и разрушения сталей, оценку роли водорода в этих процессах (с 2013 года проводилась совместно с Н. Н. Сергеевым), использование этого эффекта как основы структурного моделирования поврежденности гетерогенных материалов, изучение поверхностной активности углерода и развития локального обезуглероживания в сталях при деструктивных воздействиях [31–36].

В качестве совсем нового направления можно указать исследования с помощью описанного эффекта механизмов упругости и порообразования при производстве изделий из порошковых материалов в рамках аддитивных технологий 3d печати.

5. Заключение

Применение механической спектроскопии в анализе спектров внутреннего трения (демпфирующей способности) и модулей упругости твёрдых тел представляет собой перспективную и продолжающуюся развиваться область физики твёрдого тела и является источником уникальных сведений о процессах, происходящих в субструктуре твёрдых тел на их атомарном уровне. Полученная с помощью механической спектроскопии информация позволяет физически обоснованно анализировать состояние материала, а также разрабатывать методики получения сталей и сплавов с особыми свойствами.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метод внутреннего трения в металлургических исследованиях / Под ред. М. С. Блантера, Ю. В. Пигузова. М: Металлургия, 1991. 248 с.

2. Физика конденсированного состояния. Точечные дефекты кристаллического строения в формировании свойств материалов: учеб. пособие / А.Н. Чуканов, Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, П.Н. Медведев, Ю.С. Дорохин, С.Н. Кутепов, А.А. Яковенко, Д.В. Малий. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 104 с.
3. Физика конденсированного состояния. Линейные дефекты кристаллического строения в формировании свойств материалов: учеб. пособие / А.Н. Чуканов, Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, П.Н. Медведев, Ю.С. Дорохин, С.Н. Кутепов, А.А. Яковенко, Д.В. Малий. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 154 с.
4. Физика конденсированного состояния. Поверхностные и объёмные дефекты кристаллического строения в формировании свойств материалов: учеб. пособие / А.Н. Чуканов, Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, П.Н. Медведев, Ю.С. Дорохин, С.Н. Кутепов, А.А. Яковенко, Д.В. Малий. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 156 с.
5. Физика конденсированного состояния. Дефекты строения и создание теорий упрочнения материалов: учеб. пособие / А.Н. Чуканов, Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, П.Н. Медведев, Ю.С. Дорохин, С.Н. Кутепов, А.А. Яковенко, Д.В. Малий. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 298 с.
6. Агеев В.С., Постников В.А., Сергеев Н.Н. Внутреннее трение в высокопрочных арматурных сталях, подвергнутых испытаниям на релаксационную стойкость и длительную прочность в коррозионных средах // Вопросы металловедения и физики металлов. – Тула: ТПИ, 1974. Вып. 3. С. 73-80.
7. Сергеев Н.Н., Извольский В.В., Агеев В.С. Влияние температуры отпуска на механические свойства и стойкость против растрескивания в агрессивных средах арматурной стали 20ГС2 // Вопросы металловедения и физики металлов. - Тула. -ТПИ. - 1974. Вып. 3. С. 103-107.
8. Агеев В.С., Сергеев Н.Н., Петрушин Г.Д. Механизм рассеяния энергии колебаний, обусловленный подвижностью микротрещин в твердых телах // Внутреннее трение в металлах, полупроводниках, диэлектриках и ферромагнетиках. – М.: Наука, 1978. С. 97-102.
9. Чуканов А.Н. Точность определения модуля нормальной упругости // Проблемы качества и эффективности использования металла в машиностроении ТПИ- Тула 1982. С.169 – 172.
10. Чуканов А.Н. Комплексное исследование характеристик микродеформации, внутреннего трения и модуля сдвига при кручении // Взаимодействие дефектов кристаллической решетки и свойства металлов Тула. -ТПИ. - 1983. С.132-135.
11. Чуканов А.Н. Совершенствование аппаратуры для измерения низкочастотного внутреннего трения//Дефекты кристаллической решетки и сплавы с особыми свойствами -Тула, - ТулПИ, -1994. С.177-182.
12. Патент РФ. № 1067406. Крутильный маятник для определения механических свойств материалов/ Чуканов А.Н., Головин С.А., Левин Д.М., Юркин И.Н. // Бюл. изобр., 1993. № 7.
13. Патент РФ. № 1756803. Способ определения верхней границы упругого гистерезиса материала/ Левин Д.М., Чуканов А.Н., Головин С.А., Чуканов И.В.// Бюл. изобр., 1993. № 3.

14. Чуканов А.Н., Яковенко А.А., Хонелидзе Д.М. Упрочняющая восстановительная обработка сортового проката углеродистых сталей // Известия ТулГУ. Серия: Технические науки. - 2015. - Вып. 5-2. С. 240 - 251.
15. Патент РФ. № 1794096. Способ упрочнения металлических изделий /Чуканов А.Н., Левин Д.М. //Бюл.изобр., 1993. № 5.
16. Чуканов А.Н., Головин С.А., Левин Д.М. Анализ кривых микропластичности в медно-алюминиевых сплавах // Термическая обработка и свойства металлов - Свердловск. - УПИ. - 1985. С.93-98.
17. Чуканов А.Н., Левин Д.М., Канунникова И.Ю. Развитие микропластичности в медно-алюминиевых сплавах // Диффузионные процессы в металлах Тула - ТулПИ.- 1986. С.139-145.
18. Чуканов А.Н., Левин Д.М., Канунникова И.Ю. Особенности процесса микропластической деформации в твердых растворах замещения // Взаимодействие дефектов кристаллической решетки и свойства металлов и сплавов – Тула: ТулПИ, 1986. С.21-27.
19. Чуканов А.Н., Ганопольская Н.Е. Особенности микродеформационной кривой однофазных сплавов замещения // Дислокационная структура в металлах и сплавах и методы ее исследования/Тула-ТулПИ. -1987. С.104-107.
20. Левин Д.М., Чуканов А.Н. Дефект упаковки и твердорастворное упрочнение в однофазных сплавах меди и никеля // Роль дефектов кристаллической решетки в структурообразовании сплавов Тула, -ТулПИ. - 1989. С. 69-73.
21. Чуканов А.Н., Левин Д.М. О концентрационной зависимости микродеформационных характеристик твердых растворов Cu - Al и Ni - Al // Внутреннее трение и дислокационная структура металлов - Тула, - ТулПИ, 1990. С.88-93.
22. Чуканов А.Н. Анализ механизмов твердорастворного упрочнения в однофазных сплавах систем медь-алюминий и никель-алюминий // Влияние дислокационной структуры на свойства металлов и сплавов. -Тула. - ТулПИ, 1991. С.35-40.
23. Чуканов А.Н. Подвижность дислокаций в однофазных сплавах системы алюминий-магний//Дефекты кристаллической решетки и свойства металлов и сплавов -Тула, - ТулПИ, 1992. С.99-104.
24. Чуканов А.Н. Физико-механические закономерности формирования предельного состояния и развития локального разрушения в металлических материалах // Дисс. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. - Тула: ТулГУ, 2001. 387 с.
25. Чуканов А.Н. Низкотемпературное внутреннее трение в микролегированном алюминии // Известия Российской АН. Серия физическая. -1993. -Т. 57-№ 11. С.90-93
26. Chukanov A.N., Levin D.M., Muravleva L.V. Internal friction as a measure of local damage of metallic materials // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2000. Vol. 64. № 9. P. 1714 - 1717.
27. Levin D.M., Chukanov A.N. Effect of local stresses induced by structural defects of dislocation cluster dynamics //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2005. Т. 69. № 8. С. 1345-1350.

28. Чуканов А.Н., Головин С.А., Левин Д.М., Петрушин Г.Д. Таблицы стандартных справочных данных СЭВ 21-88. - М.: Изд. Стандартов, 1989. 12 с.
29. Чуканов А.Н., Головин С.А., Левин Д.М., Петрушин Г.Д. ГСССД 58-83. Строительные стали. Модуль упругости при температурах от -70 до 700⁰С - М.: Изд-во Стандартов, 1984. - 4С.
30. Чуканов А.Н., Головин С.А., Левин Д.М., Петрушин Г.Д. Таблицы стандартных справочных данных СЭВ 21-88 М.: Изд. стандартов. -1989. 12 С.
31. Чуканов А.Н., Яковенко А.А., Хонелидзе Д.М. Упрочняющая восстановительная обработка сортового проката углеродистых сталей // Известия ТулГУ. Серия: Технические науки. - 2015. Вып. 5-2. С. 240 - 251.
32. Chukanov A.N., Levin D.M., Yakovenko A.A. Use and Prospects for the Internal Friction Method in Assessing the Degradation and Destruction of Iron-Carbon Alloys // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. - 2011. Vol. 75. № 10. pp. 1340-1344.
33. Чуканов А.Н., Гвоздев А.Е., Сергеев А.Н., Яковенко А.А., Хонелидзе Д.М. Применение метода механической спектроскопии для изучения субструктурной деградации и начальных этапов разрушения сталей // «XV Междунар. Конгресс сталеплавыльщиков и производителей металла (ISCON-2018)», 15-19.10.18 г., Москва-Тула, Сб. матер. С. 606 -612.
34. Sergeyev N.N., Tereshin V.A., Chukanov A.N., Kolmakov A.G., Yakovenko A.A., Sergeyev A.N., Leontyev I.M., Khonelidze D.M., and Gvozdev A.E. Formation of Plastic Zones near Spherical Cavity in Hardened Low-Carbon Steels under Conditions of Hydrogen Stress Corrosion // Inorganic Materials: Applied Research, 2018, Vol. 9, No. 4, pp. 663–669.
35. Чуканов А.Н., Яковенко А.А., Леонтьев И.М., Широкий И.Ф. Механическая спектроскопия металлов. История зарождения, развитие и перспективы // «Алгебра, теория чисел и дискретная геометрия: современные проблемы и приложения». Матер. XV межд. конф. посвящ. столетию со дня рожд. проф. Н.М. Коробова. - Тула: ТГПУ им. Л.Н. Толстого, 2018. С. 364-366.
36. Чуканов А.Н., Гвоздев А.Е., Сергеев А.Н., Широкий И.Ф., Яковенко А.А., Леонтьев И.М. Ультразвуковая диагностика литых и порошковых сталей // «Прочность неоднородных структур» (ПРОСТ-2018): IX Евразийская научно-практическая конф. (Москва, НИТУ МИСиС, 24–26.04.18): Сб. тр.– НИТУ МИСиС, 2018. С. 151.
37. Sergeev N.N., Chukanov A.N., Baranov V.P., Yakovenko A.A. Development of Damage and Decarburization of High-Strength Low-Alloy Steels Under Hydrogen Embrittlement // Metal Science and Heat Treatment. 2015. vol. 57. № 1-2. P. 63-68.

REFERENCES

1. The method of internal friction in physical metallurgy research, ed. by M.S. Blanter, Y.V. Piguzov.- M: Metallurgy, 1991. 248 p.
2. Chukanov A.N. Condensed matter physics. Point defects of crystal structure in the formation of material properties: studies. manual // A.N. Chukanov, N. N. Sergeev, A. E. Gvozdev, A. N. Sergeev, P. N. Medvedev, Y. S. Dorokhin, S. N. Kutepov, A. A. Yakovenko, D. V. Mali. - Tula: Publishing House of TulGU, 2017. 104 p.

3. Chukanov A.N. Condensed matter physics. Linear defects of crystal structure in the formation of material properties: studies. manual / A.N. Chukanov, N.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, A.N. Sergeev, P.N. Medvedev, Y.S. Dorokhin, S.N. Kutepov, A.A. Yakovenko, D.V. Mali. - Tula: Publishing House of TulGU, 2017. 154 p.
4. Chukanov A.N. Condensed matter physics. Surface and volume defects of the crystal structure in the formation of material properties: studies. manual // A.N. Chukanov, N.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, A.N. Sergeev, P.N. Medvedev, Y.S. Dorokhin, S.N. Kutepov, A.A. Yakovenko, D.V. Mali. - Tula: Publishing House of TulGU, 2017. 156 p.
5. Chukanov A.N. Condensed matter physics. Defects of structure and creation of theories of hardening of materials: studies. manual // A.N. Chukanov, N.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, A.N. Sergeev, P.N. Medvedev, Y.S. Dorokhin, S.N. Kutepov, A. A. Yakovenko, D. V. Mali. - Tula: Publishing House of TulGU, 2017. 298 p.
6. Ageev V.S., Postnikov V.A., Sergeev N.N. Internal friction in high-strength reinforcing steels subjected to tests for relaxation resistance and long-term strength in corrosive environments // Problems of metallurgy and physics of metals. – Tula: TPI, 1974. Issue. 3. Pp. 73-80.
7. Sergeev N.N., Izvol'skiy V.V., Ageev V.S. the Influence of the tempering temperature of the mechanical properties and resistance to cracking in aggressive environments of reinforcing steel 20GS2 // Problems of metallurgy and physics of metals. - Tula. TPI. 1974. Issue. 3. Pp. 103-107.
8. Ageev V.S., Sergeev N.N., Petrushin G.D. the Mechanism of vibration energy scattering due to the mobility of microcracks in solids // Internal friction in metals, semiconductors, dielectrics and ferromagnets. – M.: Science, 1978. Pp. 97-102.
9. Chukanov A.N. Accuracy of determination of the module of normal elasticity // Problems of quality and efficiency of use of metal in mechanical engineering TPI-Tula. 1982. P. 169 – 172.
10. Chukanov A. N. Complex study of micro-deformation characteristics, internal friction and shear modulus at torsion // Interaction of crystal lattice defects and properties of Tula metals. -TPI. 1983. P. 132-135.
11. Chukanov A.N. Improvement of equipment for measuring low-frequency internal friction lattice Defects and alloys with specific properties. - Tula, TPI. 1994. P. 177-182.
12. The patent of the Russian Federation. № 1067406. Torsional pendulum for determination of mechanical properties of materials // Chukanov A.N., Golovin S.A., Levin D.M., Yurkin I.N. // Byul. Fig., 1993. № 7.
13. The patent of the Russian Federation. № 1756803. Method for determining the upper limit of the elastic hysteresis of the material // Chukanov A.N., Levin D.M., Golovin S.A., Chukanov I.V. // Byul. Fig., 1993. № 3.
14. Chukanov A.N., Yakovenko A.A., Honelidze D.M. Hardening reduction treatment rolled carbon steels // Izvestiya TulGU. Series: Technical Sciences. 2015. Issue. 5-2. P. 240 - 251.
15. The patent of the Russian Federation. № 1794096. The method of hardening metal products // Chukanov A.N., Levin D.M. // Bulletin SB Rams. Fig., 1993. № 5.
16. Chukanov A.N., Golovin S.A., Levin D.M. Analysis of microplasticity curves in copper-aluminum alloys // Heat treatment and properties of metals - Sverdlovsk. -UPI. - 1985. P. 93-98.

17. Chukanov A.N., Levin D.M., Kanunnikova I.Y. Development of microplasticity in copper-aluminum alloys // Diffusion processes in metals Tula - TPI. 1986. P. 139-145.
18. Chukanov A. N., Levin D. M., Kanunnikova I.Yu. Features of the process of microplastic deformation in solid solutions of substitution // Interaction of lattice defects and properties of metals and alloys – Tula: TPI, 1986. Pp. 21 - 27.
19. Chukanov A.N., Ganopolskaiy N.E. Features microdeformations curve of single-phase alloys of substitution // Dislocation structure in metals and alloys and methods of its study / Tula. -TPI. 1987. Pp. 104-107.
20. Levin D.M., Chukanov A.N. Defect packaging and solid solution hardening in single-phase alloys of copper and Nickel // The Role of lattice defects in the structure formation of alloys of Tula, -TPI. 1989. P. 69-73.
21. Chukanov A.N., Levin D.M. On concentration dependence of microdeformation characteristics of solid solutions of Cu - Al and Ni - Al // Internal friction and dislocation structure of metals - Tula, - TPI. 1990. P. 88-93.
22. Chukanov A.N. Analysis of the mechanisms of solid-solution hardening in single-phase alloys of copper-aluminum and Nickel-aluminum // Influence of dislocation structure on the properties of metals and alloys. -Tula. – TPI. 1991. P. 35-40.
23. Chukanov A.N. Mobility of dislocations in single-phase alloys of aluminum-magnesium system // Defects of crystal lattice and properties of metals and alloys -Tula, - TPI, 1992. P. 99-104.
24. Chukanov A.N. Physical and mechanical regularities of formation of limit state and development of local fracture in metal materials // Diss. on competition of a scientific degree. academic step. doctor. Techn. sciences. - Tula: TulGU, 2001. 387 p.
25. Chukanov A.N. Low-temperature internal friction in micro-alloyed aluminium // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series physical. 1993. Vol. 57. № 11. P. 90-93.
26. Chukanov A.N., Levin D.M., Muravleva L.V. Internal friction as a measure of local damage of metallic materials // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2000. Vol. 64. № 9. P. 1714 - 1717.
27. Levin D.M., Chukanov A.N. Effect of local stresses induced by structural defects of dislocation cluster dynamics // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2005. Vol. 69. № 8. P. 1345-1350.
28. Chukanov A.N., Golovin S.A., Levin D.M., Petrushin G.D. Tables of standard reference data of the CMEA 21-88. - M.: Ed. Standards, 1989. 12 p.
29. Chukanov A.N., Golovin S.A., Levin D.M., Petrushin G.D. GSSSD 58-83. The construction began. Modulus of elasticity at temperatures from -70 to 700 0C - M.: Publishing house of Standards, 1984. 4 P.
30. Chukanov A.N., Golovin S.A., Levin D.M., Petrushin G.D. Tables of standard reference data of the CMEA 21-88 M. Ed. standards. 1989. 12 P.
31. Chukanov A.N., Yakovenko A.A., Honelidze D.M. Hardening reduction treatment rolled carbon steels // Izvestiya TulGU. Series: Technical Sciences. 2015. Issue. 5-2. P. 240 - 251.

32. Chukanov A.N., Levin D.M., Yakovenko A.A. Use and Prospects for the Internal Friction Method in Assessing the Degradation and Destruction of Iron-Carbon Alloys // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2011. Vol. 75. № 10. pp. 1340-1344.
33. Chukanov A.N., Gvozdev A.E., Sergeev A.N., Yakovenko A.A., Honelidze D.M. Application of the method of mechanical spectroscopy to study substructures degradation and the initial stages of the destruction of steel // "The XV Intern. Congress of steelmakers and metal producers (ISCON-2018) 15-19.10.18 G., Moscow-Tula, Sat. mater., P. 606 -612.
34. Sergeyev N.N., Tereshin V.A., Chukanov A.N., Kolmakov A.G., Yakovenko A. A., Sergeyev A. N., Leontyev I. M., Khonelidze D. M., Gvozdev A.E. Formation of Plastic Zones near Spherical Cavity in Hardened Low-Carbon Steels under Conditions of Hydrogen Stress Corrosion // Inorganic Materials: Applied Research, 2018 vol. 9, No. 4, pp. 663-669.
35. Chukanov A.N., Yakovenko A.A., Leontiev I.M., Shirokiy I.F. Mechanical spectroscopy of metals. History of origin, development and prospects // "Algebra, number theory and discrete geometry: modern problems and applications". Matera. XV inter. Conf. dedicated. the centenary of the birth. prof.M. Korobov. - Tula: TSPU them. L. N. Tolstoy, 2018. P. 364-366.
36. Chukanov A.N., Gvozdev A.E., Sergeev A.N., Shirokiy I.F., Yakovenko A.A., Leontiev I.M. Ultrasonic diagnostics of cast and powder steels // "Strength of heterogeneous structures" (PROST-2018): IX Eurasian scientific and practical Conf. (Moscow, NUST MISIS, 24-26.04.18): Sat. Tr.– NUST MISIS, 2018. P. 151.
37. Sergeev N.N., Chukanov A.N., Baranov V.P., Yakovenko A.A. Development of Damage and Decarburization of High-Strength Low-Alloy Steels Under Hydrogen Embrittlement // Metal Science and Heat Treatment. 2015. vol. 57. № 1-2. P. 63-68.

Получено 30.09.2019 г.

Принято в печать 12.11.2019 г.