Міжнародний науково-технічний та виробничий журнал

ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ТА НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ

Техническая диагностика и неразрушающий контроль ♦ Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing

№ 2 2020

Видається з 1989 року
Виходить 4 рази на рік
ISSN 0235–3474
Doi.org/10.37434/tdnk
Передплатний індекс 74475

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ:
Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),
А.Я. Недосєка (заст. гол. ред.),
В.О. Троїцький (заст. гол. ред.),
Є.О. Давидов, С.А. Недосєка

В.Л. Венгринович
Інститут прикладної фізики НАН Білорусі, Мінськ
К. Драган
Технологічний інститут повітряних сил, Варшава, Польща
М.Л. Казакевич
Інститут фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України, м. Київ
О.М. Карпаш
Івано-Франківський нац. техн. університет нафти і газу
Л.І. Муравський
ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів
З.Т. Назарчук
ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів
Г.І. Прокопенко
Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, м. Київ
А.Г. Протасов
НТУ України «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ
В.Р. Скальський
ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів
В.О. Стороженко
Харківський національний університет радіоелектроніки
В.О. Стрижало
Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, м. Київ
В.М. Учанін
ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів
С.К. Фомічов
НТУ України «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ
М.Г. Чаусов
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ

Засновники
Національна академія наук України,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,
Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса редакції
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
03150, Україна, м. Київ,
вул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: (044) 200-82-77, 205-23-90, 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk
Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ4787 від 09.01.2001

Журнал входить до переліку затверджених Міністерством освіти і науки України видань для публікації праць здобувачів наукових ступенів за спеціальностями 132, 151, 152
Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

НЕДОСЄКА С.А., НЕДОСЄКА А.Я., БОЙЧУК О.І., ЯРЕМЕНКО М.А., ОВСІЄНКО М.А. Особливості акустичної емісії при оцінці стану матеріалів 3

ГОПКАЛО О.П., БЕЗЛЮДЬКО Г.Я., КОТЛЯРЕНКО А.А., КУРАШ Ю.П., СОЛОМАХА Р.М. Діагностування пошкодженості феромагнітних сталей при механічному навантаженні по результатам вимірювання коерцитивної сили 13

РЕДЬКА М.О., КУЦ Ю.В., ЛЕВЧЕНКО О.Е., БЛИЗНЮК О.Д. Метод виявлення сигналів вихрострумової дефектоскопії малої обчислювальної ресурсоємності 22

ВИРОБНИЧИЙ ВІДДІЛ

НЕДОСЄКА С.А., НЕДОСЄКА А.Я., ЯРЕМЕНКО М.А., ОВСІЄНКО М.А. Службові властивості сталей 09Г2С, 14ХГС і сталі 20 після тривалого терміну експлуатації 26

ЮХИМЕЦЬ П.С., ЮРКО Л.Я., КОБЕЛЬСЬКИЙ С.В., КРАВЧЕНКО В.І. Аналіз напівемпіричних залежностей для визначення концентрації напружень в об'ємних пошкодженнях на поверхні трубопроводу 31

КУЛІШ В.А., КРИЛОВ Е.С. Контроль технічного стану несучих конструкцій металевих шахтних копрів в процесі їх експлуатації 37

ТРОЇЦЬКИЙ В.О., ЛИТВИНЕНКО В.А. Спрощений моніторинг металоконструкцій без зачистки їх поверхонь 43

БОНДАРЕНКО Ю.К., КОВАЛЬЧУК О.В. Дослідження впливу джерел ризиків на технічну безпеку зварних конструкцій при експлуатації з використанням неруйнівного контролю та технічної діагностики 49

РАЗЫГРАЕВ Н.П. Головные волны в ультразвуковой дефектоскопии металлов 58

ХРОНІКА

В.М. Учанін – Заслужений винахідник України! 71

С.І. Кучуку-Яценку – 90! 72

Видання журналу підтримують:
Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики,
Технічний комітет стандартизації «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» ТК-78

© НАН України, ІЕЗ Ім. Є.О. Патона НАН України, МА «Зварювання», 2020

International Scientific - Technical and Production Journal

TECHNICAL DIAGNOSTICS AND NON-DESTRUCTIVE TESTING

Tekhnichna Diahnostyka ta Neruinivnyi Kontrol ♦ Tekhnicheskaya Diagnostika i Nerazrushayushchiy Kontrol

№ 2 2020

Published since 1989
Quarterly issue
ISSN 0235–3474
Doi.org/10.37434/tdnk
Subscription index 70031

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU

L.M. Lobanov (Editor-in-Chief),
A.Ya. Nedoseka (Deputy Editor-in-Chief)
V.O. Troitskyi (Deputy Editor-in-Chief)
Ie.O. Davydov, **S.A. Nedoseka**

V.L. Vengrinovich
Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus, Minsk
K. Dragan
Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland
M.L. Kazakevich
L.V. Pisarzhevskii institute of physical chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv
O.M. Karpash
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
L.I. Muravsky
Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv
Z.Th. Nazarchuk
Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv
G.I. Prokopenko
G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv
A.G. Protasov
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
V.R. Skalskyi
Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv
V.O. Storozhenko
Kharkiv National University of Radio Electronics
V.O. Stryzhalo
G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Kyiv
V.M. Uchanin
Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv
S.K. Fomichov
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
M.G. Chausov
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv

Founders
National Academy of Sciences of Ukraine,
E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU,
International Association «Welding» (Publisher)

Address
E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU
03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kasymyr Malevych Str.
Tel./Fax: (044) 200-82-77, 205-23-90, 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk
The Journal is included in the list of publications approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine for the publication of works of applicants for academic degrees in specialties 132, 151, 152.
Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Certificate of state registration of KB 4787 dated 09.01.2001

CONTENT

SCIENTIFIC AND TECNICAL

NEDOSEKA S.A., NEDOSEKA A.Ya., BOICHUK O.I., YAREMENKO M.A., OVSIENKO M.A. Features of acoustic emission at evaluation of the state of materials 3

GOPKALO O.P., BEZLYUDKO G.Ya., KOTLIARENKO A.A., KURASH Yu.P., SOLOMACHA R.M. Diagnosis of damage to ferromagnetic steels during mechanical loading by results of measurements of coercive force 13

REDKA M.O., KUTS Yu.V., LEVCHENKO O.E., BLIZNYUK O.D. Method to detect signals of eddy current flaw detection with small computer resource capacity 22

INDUSTRIAL

NEDOSEKA S.A., NEDOSEKA A.Ya., YAREMENKO M.A., OVSIENKO M.A. Service properties of 09G2S, 14KHGS steels and Steel 20 after long-term operation 26

YUKHYMETS P.S., YURKO L.J., KOBELSKY S.V., KRAVCHENKO V.I. Analysis of semi-empirical equations for determination of stress concentration in volumetric damages on pipeline surface 31

KULISH V.A., KRYLOV E.S. Monitoring the technical state of load-carrying structures of metal shaft headgear in operation 37

TROITSKIY V.O., LITVINENKO V.A. Simplified monitoring of metal structures without cleaning their surfaces 43

BONDARENKO Yu.K., KOVALCHUK O.V. Investigation of the influence of risk sources on technical safety of welded structures in operation with application of nondestructive testing and technical diagnostics 49

RAZYGRAEV N.P. Head waves in ultrasonic metal flaw detection 58

INFORMATION

V.M. Uchanin – Honored Inventor of Ukraine! 71

S.I. Kuchuk-Yatsenko is 90! 72

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:
Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic,
Technical Committee on standartization «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» TC-78

© НАН України, ІЕЗ Ім. Є.О. Патона НАН України, МА «Зварювання», 2020

УДК 621.519

В порядке обсуждения

ГОЛОВНЫЕ ВОЛНЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ МЕТАЛЛОВ

Н.П. Разыграев

АО «НПО «ЦНИИТМАШ». 109088, РФ, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская 4. E-mail: NPRazygraev@cniitmash.com

Целью данной работы является исследование истории, физики и терминологии ультразвуковой дефектоскопии металлов головными волнами. Библиогр. 23, рис. 9.

Ключевые слова: акустическая волна, продольная волна, поперечная волна, головная волна, продольно-поверхностная волна, подповерхностная волна, боковая волна, ползучая волна, creeping wave, критический угол, ультразвуковой контроль металлов

В журнале «Техническая диагностика и неразрушающей контроль» опубликована статья [1], в которой авторы рассматривают имеющееся широкое многообразие терминов при отображении и применении головных волн (ГВ) в УЗ дефектоскопии металлов и в акустике двухслойных и многослойных сред. Эта публикация особенно интересна и важна в связи с тем, что в 2022 г. исполняется 50 лет со времени начала использования в ультразвуковой дефектоскопии металлов головных волн.

В 1972 г. в процессе экспериментальных исследований акустических характеристик сталей для оборудования и трубопроводов АЭС с ВВЭР-1000 впервые в ультразвуковой дефектоскопии металлов были зафиксированы на экране ультразвукового дефектоскопа USIP-10 фирмы «Крауткремер», имеющего динамический диапазон экрана 36 дБ, неизвестные ранее сигналы очень быстрой волны – они раньше всех других импульсов приходили на приёмник и были примерно на два порядка слабее объемных продольной и поперечной волн [2]. Научные исследования головных (и боковых) волн, разработки новых способов и технологий УЗК были представлены в [3]. Для того, чтобы предметно обсуждать терминологию, используемую при УЗК металлов ГВ, ниже представлены результаты исследований АО «НПО «ЦНИИТМАШ» и предложенные первичные термины.

Выполненные в АО «НПО «ЦНИИТМАШ» в 1973–1975 гг. [4] оригинальные исследования возбуждения, распространения и приема ГВ показали возможность использования их для обнаружения дефектов в при- и подповерхностном слое глубиной 1…15 мм. На основе использования ГВ были разработаны новые способы ультразвукового контроля качества материалов, защищенные авторскими свидетельствами [5–7].

В процессе экспериментально-теоретических исследований 1972–1979 гг. акустических волн головного типа было установлено, что:

– оптимальным углом возбуждения и приема ГВ является первый критический угол α_I (для границы оргстекло-сталь $\alpha_I \approx 27°30'$) [8];

– при использовании излучателей и приемников ГВ с пьезоэлементами диаметром 12 и 18 мм и частотой 1…5 МГц и промышленных дефектоскопов ГВ можно зарегистрировать на расстоянии 200…300 мм; ослабление амплитуды ГВ с расстоянием пропорционально квадрату расстояния при контроле в иммерсионном режиме ($A \sim r^{-2}$) и при контроле контактными искателями ($A \sim r^{-1,75}$) [9];

– акустическое поле ГВ в контролируемой среде характеризуется наличием минимума (нуля) напряжений на контактной поверхности. Максимум амплитуды поля находится на определенном луче. При использовании излучателей и приемников головных волн с пьезоэлементами диаметром 12 и 18 мм и частотой 1…5 МГц этот луч образует с контактной поверхностью угол, примерно равный 12° [10];

– установлено, что для возбуждения и регистрации ГВ наиболее удобны призматические искатели с обязательным разделением функций излучателя и приемника [11]. Разработаны конструкции двух типов искателей ИЦ-61 и ИЦ-70 для контроля приповерхностного слоя. Искатели типа ИЦ-61 осуществляют схему «тандем» (излучатель и приемник расположены один за другим по отношению к отражателю), позволяют проводить ультразвуковой контроль на расстоянии 5…70 мм от искателя и обеспечивают обнаружение дефектов с отношением сигнал–шум не менее 10 дБ. Искатели типа ИЦ-70 работают по схеме «дуэт» (излучатель и приемник расположены рядом на одном расстоянии от отражателя), обеспечивают обнаружение дефектов на расстоянии 5…20 мм с соотношением сигнал-шум не менее 14 дБ;

– исследование выявляемости подповерхностных дефектов головными волнами показало, что амплитуда эхо-сигнала от дефекта пропорциональна площади отражающей поверхности; зави-

© Н.П. Разыграев, 2020

симость амплитуды эхо-сигнала от расстояния изменяется по сложному закону [12].

На основании проведенных исследований возбуждения, распространения и приема ГВ в АО «НПО «ЦНИИТМАШ» было разработано следующее физическое представление о них.

При падении продольной волны на границу раздела сред под первым критическим углом α_I в нижней среде образуется неоднородная продольная волна (продольно-поверхностная), которая скользит вдоль поверхности (рис. 1). При распространении этой волны вдоль границы обеспечивается выполнение граничных условий. При контроле иммерсионным способом эти условия – равенство нулю касательных напряжений и равенство нормальных напряжений. При контроле контактным способом граничные условия более сложны и различны для участка, где расположена призма преобразователя, и для свободной поверхности, где нормальные и касательные напряжения равны нулю.

Это однако не означает отсутствия волны, поскольку деформации на поверхности существуют. Выполнение граничных условий при распространении неоднородной продольной (продольно-поверхностной) волны обеспечивается за счет боковых волн (продольных и поперечных), образующихся как в нижней, так и в верхней средах.

Для сравнения можно вспомнить, что при распространении поверхностной волны вдоль свободной границы условие равенства нулю нормальных и касательных напряжений выполняется благодаря одновременному присутствию неоднородных продольных и поперечных волн. В случае с неоднородной продольной (продольно-поверхностной) волной распространение волны вдоль границы, как в верхней, так и в нижней средах, происходит со скоростью продольной волны в нижней среде. Это означает, что в верхней среде фронты боковой продольной волны в случае с жидкостью, или боковых продольной и поперечной волн в случае с оргстеклом, и боковой поперечной волны в нижней среде (в стали), также распространяются со скоростью продольной волны в нижней среде.

Наличие продольной боковой волны в верхней среде позволяет фиксировать неоднородную продольно-поверхностную волну с помощью наклонного преобразователя – контактного или иммерсионного. В случае иммерсионного режима контроля боковая волна в жидкости возбуждается в каждой точке границы. При контроле контактным способом напряжения на границы воздух-сталь практически равны нулю. Когда же с этой границей соприкасается наклонный преобразователь через слой контактной жидкости, нормальные напряжения на границе уже не равны нулю, что приводит к образованию продольной боковой волны в призме приемника.

Оптимальным углом возбуждения и приема продольно-поверхностной волны является первый критический угол (рис. 2). Его значение определяется из закона Снеллиуса:

$$\sin \alpha_I = C_{lopr} / C_{lcm},$$

где C_{lopr} – скорость продольной волны в оргстекле; C_{lcm} – скорость продольной волны в стали.

Для границы оргстекло-сталь первый критический угол примерно равен 27°30′. Такой угол падения имеют призмы излучателя и приемника ГВ.

Кроме боковой продольной волны в верхней среде (если она твердая) образуется боковая поперечная волна. Угол между направлением боковой поперечной волны и нормалью к границе раздела определяется также законом Снеллиуса:

$$\sin \alpha_t = C_{topr} / C_{lcm},$$

где C_{topr} – скорость поперечной волны в оргстекле.

В нижней среде (в стали) в каждой точке на границе раздела сред генерируется боковая поперечная волна. Фронт этой волны распространяется также со скоростью продольной волны в нижней среде. Угол между направлением фронта волны и нормалью к границе раздела также определяется законом Снеллиуса и называется третьим критическим углом:

$$\sin \alpha_3 = C_{tcm} / C_{lcm},$$

где C_{tcm} – скорость поперечной волны в стали.

При падении поперечной волны на границу сталь-воздух под третьим критическим углом ($\alpha_3 \approx 33°$) (на противоположную (донную) поверхность) на ней в строгом соответствии с законом Снеллиуса образуется неоднородная продольно-поверхностная волна (рис. 3) и сопутствующие

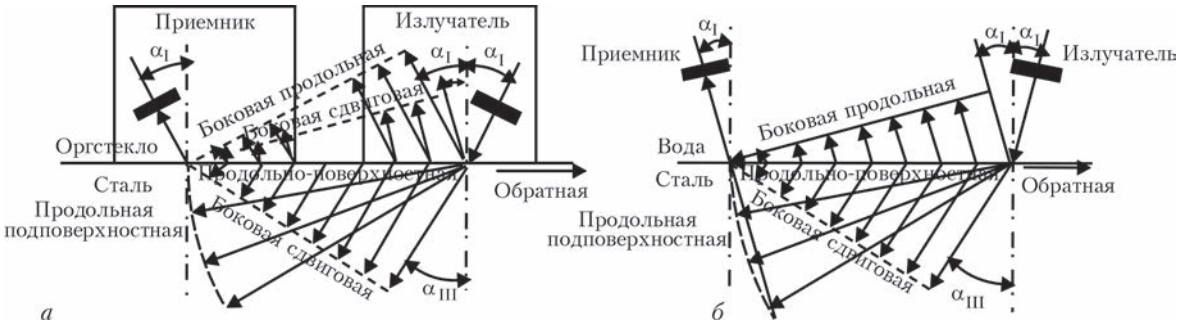

Рис. 1. Распространение головной волны вдоль границы раздела: *а* – оргстекло-сталь; *б* – вода-сталь

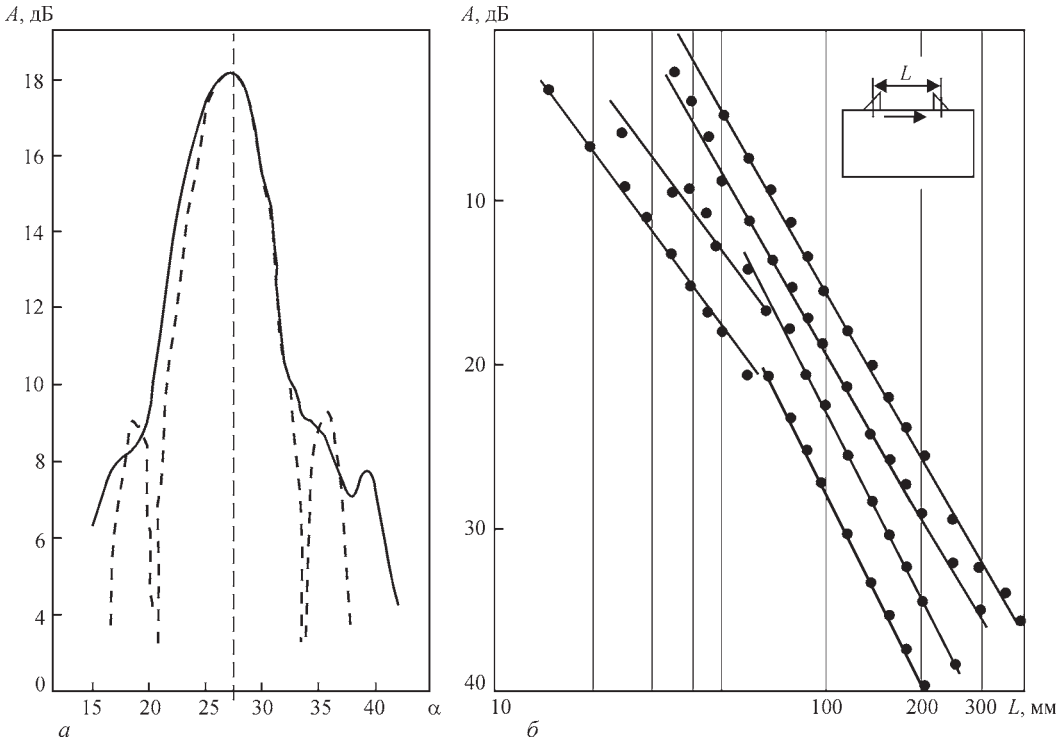

Рис. 2. Возбуждение (*а*) и распространение и ослабление (*б*) головной волны при различных углах падения *A*, дБ – амплитуда волны; α – угол падения волны

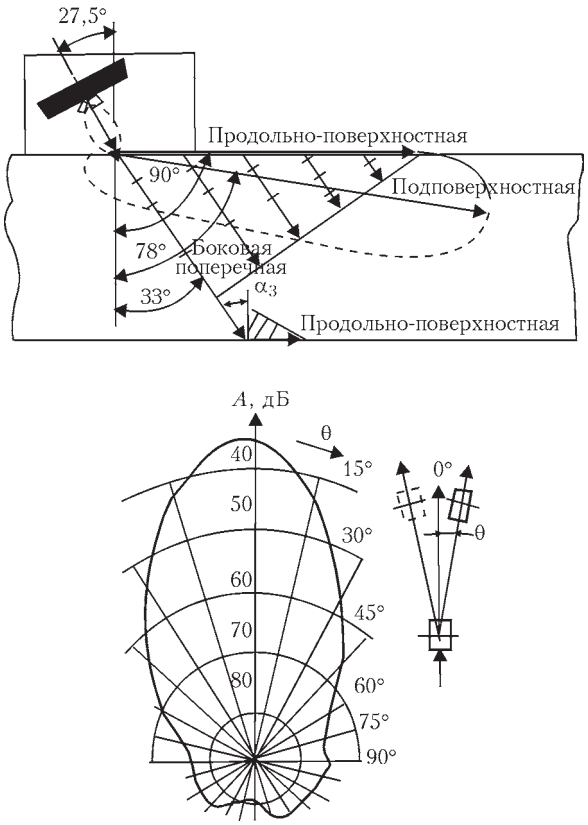

Рис. 3. Падение боковой поперечной волны на донную поверхность и образование волн на ней θ – угол расхождения

ей боковые (продольные и поперечные) волны по обеим сторонам от границы раздела сред.

Если контролю подвергается изделие с плоскопараллельными поверхностями, то на донную поверхность, благодаря образованию боковой поперечной волны в каждой точке контактной поверхности, начиная от точки выхода излучателя, под третьим критическим углом и ее распространению, падают поперечные волны (рис. 3). Т. е. на донную поверхность падает фронт боковых поперечных волн. В каждой из точек фронта на границе сталь-воздух возбуждается продольно-поверхностная волна и сопровождающая ее боковая волна. Этот процесс происходит как на нижней донной поверхности, так и на верхней контактной поверхности, но с запаздыванием во времени и с ослаблением волны. В сейсмоакустике каждому из импульсов, пришедших на приемник в результате образования этих или аналогичных вторичных продольно-поверхностных и боковых волн, присваивают наименование головной волны с очередным номером: головная волна 1, головная волна 2 и т. д. [13]. Параметры импульсов ГВ в сейсмоакустике используются для оценки состояния сред.

Одновременно с возбуждением продольно-поверхностной волны образуется и обратная продольно-поверхностная волна – распространение упругого возмущения в сторону, противоположную основному излучению. Оказалось, что обратную волну можно использовать в практике УЗК [3].

Образование боковых волн является причиной быстрого ослабления продольно-поверхностной волны. При распространении волны вдоль границы вода-сталь боковые волны образуются в обеих средах и ослабление амплитуды, как показали результаты исследований, пропорционально r^{-2}. В случае контактного способа контроля на свобод-

ной поверхности образуется лишь боковая поперечная волна в стали (боковая продольная волна в воздухе ничтожно мала), поэтому ослабление продольно-поверхностной волны пропорционально $r^{-1,75}$, то есть происходит медленнее, чем в иммерсионном режиме (рис. 2).

Рассмотренная на рис. 1 картина распространения ГВ дает лучевое представление обо всех видах волн, образующихся в этом процессе. Необходимо особо отметить, что фронты боковых волн являются плоскими, а данный способ возбуждения волн является единственным способом получения плоских волн.

В реальных условиях ультразвукового контроля наклонным преобразователем акустическое поле излучающего пьезоэлемента имеет не плоскую форму, а представляется в виде определенной диаграммы направленности. Это означает, что от излучателя, акустическая ось которого ориентирована под первым критическим углом к контактной поверхности, на границу также падают продольные волны с углами падения меньше и больше первого критического. Продольные волны с углами падения большими первого критического образуют в нижней среде неоднородные продольно-поверхностные волны. Энергия этих волн уменьшается с увеличением отклонения угла падения от первого критического угла.

Продольные волны, падающие под углами меньшими первого критического, преломляются на границе раздела и образуют в нижней среде

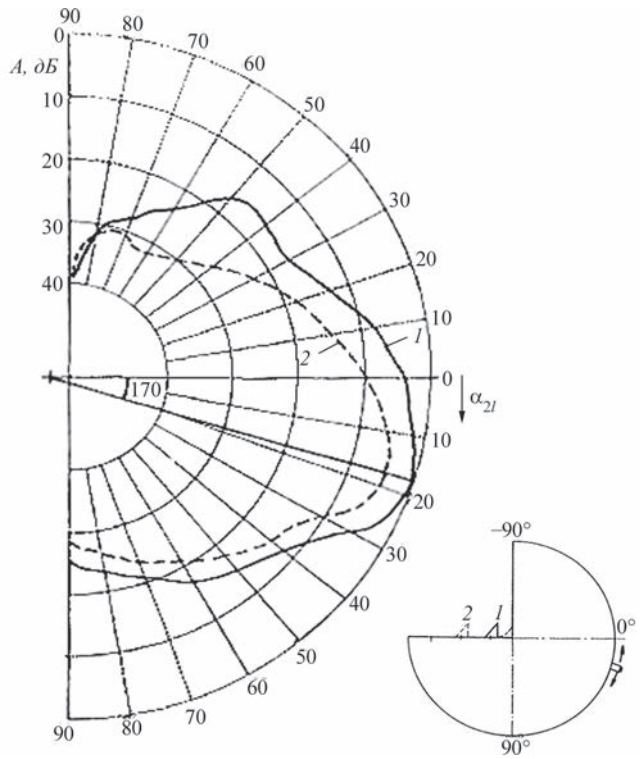

Рис. 4. Акустическое поле головной волны после прохождения зоны сопряжения R – радиус сопряжения; *1* – R = 7,5 мм; *2* – R = 0,02 мм; частота 1,8 МГц

поле продольной волны со сферическим фронтом, начало которого совпадает с фронтом продольно-поверхностной волны (рис. 3). Значения амплитуд по сферическому фронту продольной волны связаны с амплитудой волны в направлении преломленного луча, которая определяется произведением соответствующего значения из диаграммы направленности на коэффициент прохождения по амплитуде.

Исследования подтвердили, что нулевое значение напряжений продольной волны достигается на свободной поверхности, а максимальное значение находится под поверхностью и достигается вдоль луча, образующего с поверхностью угол примерно равный 12° (угол ввода 78°) (рис. 3). Эта волна не чувствительна к неровностям поверхности и реагирует лишь на дефекты, отходящие от поверхности внутрь изделия и подповерхностные дефекты. По этой причине эту волну называют подповерхностной волной.

Ослабление амплитуды продольной подповерхностной волны вдоль луча любого направления происходит как в обычной продольной волне, т.е. пропорционально r^{-1}.

При контроле изделий с сопряжениями (рис. 4) условия распространения ГВ несколько изменяются. Когда фронт продольно-поверхностной и продольной подповерхностной волн достигает сопряжения детали, продольно-поверхностная волна частично перерождается в объемную продольную волну. Продольная подповерхностная волна огибает сопряжение и распространяется вдоль воображаемой линии контактной поверхности.

Акустическое поле, образуемое за началом сопряжения, представляет собой объемную продольную волну, с помощью которой можно обнаруживать дефекты за сопряжением и под ним (рис. 4). Важно, что ослабление продольной волны за сопряжением в связи с отсутствием боковых волн происходит по закону r^{-1}. Это позволяет обнаруживать с помощью ГВ дефекты на бóльших расстояниях, чем при расположении их под гладкой поверхностью. В данном случае можно говорить об эффекте усиления ГВ.

Такой же эффект усиления ГВ имеет место при распространении продольной подповерхностной

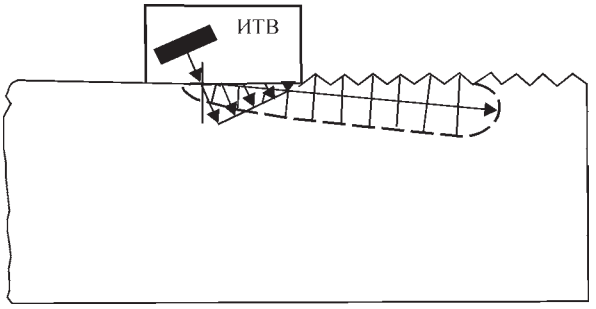

Рис. 5. Распространение головной волны под резьбой

волны под резьбой и или под поверхностью типа резьбы (рис. 5). Здесь на участке расположения периодических выступов и впадин (резьбы) нет продольно-поверхностной волны, не образуются боковые волны и не затрачивается энергия на их образование. В результате амплитуда эхо-сигналов от дефектов одних и тех же размеров, расположенных под резьбой, больше, чем от аналогичных отражателей (дефектов) под гладкой поверхностью.

Учитывая следующие особенности акустического поля излучателя с углом падения равным первому критическому углу:

– наличие неоднородной продольно-поверхностной и подповерхностной волн;

– образование боковых волн в контролируемой и прилегающей средах;

– быстрое ослабление неоднородной продольно-поверхностной волны с расстоянием;

– распространение продольных волн с максимальной скоростью звука и то, что они первыми приходят на приемник, всей совокупности этих волн присвоили специфический для ультразвуковой дефектоскопии материалов термин – головные волны, по аналогии с головными волнами в сейсмоакустике. Этот термин подчеркивает, что импульсы рассматриваемой ГВ распространяются с максимальной скоростью и первыми достигают приемника, что во многих случаях весьма благоприятно для интерпретации сигналов и расшифровки результатов контроля.

Применение физического представления о ГВ позволило найти объяснение, а затем и решение двум необъяснимым на начало 1970-х годов задачам акустического тракта.

Первая задача состояла в неоднозначной зависимости амплитуд эхо-сигналов от размеров (высоты и ширины) зарубок, сегментов и двугранных углов при контроле преобразователями с углом падения (призмы) 28…30° или углом ввода $\alpha \approx 57°$ (90...33°) (как правило, например, при угле падения 45°, амплитуда эхо-сигнала от углового отражателя увеличивается строго пропорционально размеру отражателя). Эту задачу мы называем задачей Райхмана А.З., который первым обнаружил и описал ее (рис. 6, *а*). Объяснение было найдено и предложено нами, когда во внимание было принято то, что амплитуда эхо-сигнала от зарубки складывается в результате интерференции (сложения в соответствующих фазах) импульсов от:

– лучей объемной поперечной волны с углами ввода от 33° и более;

– неоднородной продольно-поверхностной волны, образующейся при падении на донную поверхность части ультразвукового пучка под третьим критическим углом, равным 33°;

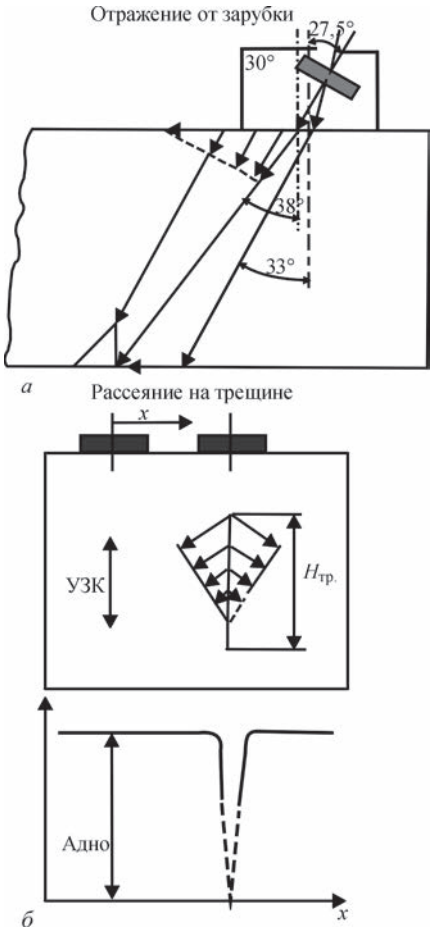

Рис. 6. Рассмотрение задач Райхмана и Гурвича с учетом физики головной волны: *а* – задача Райхмана; *б* – задача Гурвица; $H_{тр}$ – высота трещины; $A_{дно}$ – амплитуда донного сигнала

– боковой поперечной волны на донной поверхности и ее отражения от зарубки.

Математическое решение задачи выполнено Райхманом А.З. и его учеником Переваловым С.П.

Вторая задача акустического тракта, требовавшая решения, заключалась в уменьшении донного эхо-сигнала продольной волны при наличии на пути распространения ультразвука плоского, ориентированного вдоль направления распространения ультразвука, разрыва, несплавления, пропила, трещины (рис. 6, *б*). Эту задачу я назвал задачей Гурвича, так как впервые услышал ее от А.К. Гурвича в 1973 г. Объяснение и решение этой задачи было найдено, когда мы поняли, что при распространении продольной волны вдоль плоского разрыва сплошности на его берегах (двух плоских поверхностях) образуются неоднородные продольно-поверхностные волны и сопровождающие их боковые поперечные волны для одной поверхности, а здесь в зеркально-теневом способе сразу две поверхности-берега трещины), которые отводят в стороны значительное количество энергии волны и резко уменьшают амплитуду донного эхо-сигнала.

До наших исследований 1972-1976 гг. в ультразвуковой дефектоскопии металлов считалось, что при падении продольной волны под первым критическим углом волна полностью отражается от границы раздела. В нижней среде не образуется ни продольной, ни поперечной волн. Это называлось эффектом полного внутреннего отражения. Этот эффект четко просматривается на расчетной зависимости коэффициентов прохождения и отражения от угла падения на рис. 7 для границы оргстекло-сталь [14]. В точках первого критического угла коэффициенты отражения и прохождения продольной и поперечной волн равны нулю. Наши экспериментальные исследования показали, что при первом критическом угле в нижней среде образуются продольно-поверхностные волны и подповерхностные продольные волны, которые можно использовать в ультразвуковой дефектоскопии металлов.

Наши исследования в УЗД позволили понять процессы распространения продольных и поперечных волн вблизи первого и третьего критических углов. В связи с обнаружением новых закономерностей в образовании волн пришлось найти приемлемые для УЗД металлов названия и термины. В ультразвуковой дефектоскопии появились новые термины: головные, боковые, неоднородные продольно-поверхностные волны, подповерхностные волны. Все эти названия хорошо и в полной мере интерпретируют специфическую физическую картину возбуждения, распространения и приема ультразвуковых продольных, поперечных и неоднородных волн, имеющих место при падении продольной волны под первым критическим углом (и близких нему углах) и при третьем критическом угле падения. В этом на наш взгляд заключается «смысловое содержание терминов», о котором авторы анализируемой статьи высказываются в [1]. Именно такое изображение и представление о ГВ, как комплексе волн, и составляющих её волнах, позволило четко и однозначно рассмотреть и решить задачи Райхмана и Гурвича, объяснить численную и качественную разницу в ослаблении ГВ с расстоянием при распространении волны вдоль свободной границы (с воздухом) и в иммерсионном режиме, а также понять и уяснить усиление ГВ при распространении под поверхностью типа резьбы, на которой в УЗД не может распространяться продольно-поверхностная волна и не возбуждаются боковые (продольные и поперечные) волны.

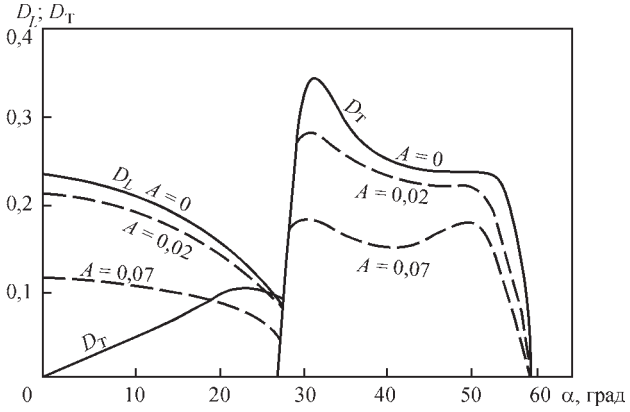

Рис. 7. Зависимость коэффициентов прохождения при падении продольной волны под углом на границу оргстекло–сталь α-угол падения; D_L – коэффициент прохождения продольной волны; D_T – коэффициент прохождения поперечной волны; A – толщина контактного слоя, отнесенного к длине волны

Не все коллеги поддержали нашу терминологию, при этом и мы, авторы предложенных терминов, и наши оппоненты из прикладной и теоретической акустики ссылались на книгу академика Бреховских Л.М. [13]. В ней он описывает распространение упругих (акустических) волн в слоистых средах в горных породах и воде. Как правило, это звуковые волны с частотой 20…20000 Гц, которые слышит человеческое ухо, и гиперзвуковые волны с частотой менее 20 Гц, которые человек уже ощущает всем телом.

В нормативной и технологической документации на УЗК основного и наплавленного металла сварных соединений в энергетическом и тяжелом машиностроении, в которой, как правило, выступал АО «НПО «ЦНИИТМАШ», а также в трудах и документах по УЗД в других областях промышленности использовались термины, предложенные нами. Предложенная терминология не вполне удовлетворила специалистов в области акустических исследований и сейсмоакустики. Так, для обозначения предложенной нами одной из составляющих ГВ – продольно-поверхностной волны в [15] используется термин «поверхностно-продольная волна». Специалисты, пришедшие в УЗД из технической акустики, участвовавшие в обсуждении новых терминов, в целом приняли нашу терминологию, тем более, что она в основном касалась и использовалась в ультразвуковой дефектоскопии металлов.

Вместе с тем, авторы новых книг, учебников, справочников, статей и стандартов по УЗД, как правило, в полной мере не владели описываемыми явлениями, закономерностями и терминами, иногда были не согласны с нашими терминами, но обойтись без описания способов и технологии УЗК ГВ уже не могли. Отсюда появились, в частности, в 2003 г. собственные описания физики и технологии УЗК ГВ у Ланге и Воронкова [16] и собственные термины, например, «скользящая волна» в 1991 г., взятая из «сейсмоакустики» [17].

Иностранные ученые и специалисты (немецкие, сотрудничающие с фирмой «Крауткремер») по следам наших работ опубликовали свои статьи и патенты [18, 19], в которых для обозначе-

ния продольно-поверхностной волны использовали термин «ползучая волна», который в данном случае исходит от эффекта ползучести металла: «kriechwellen» (немец.) и «creeping wave» (англ.). Головной же волной они называют боковую поперечную волну в металле. При этом они не ссылаются на наши исследования головных волн и на наши научные труды и технологии.

Но уже в 1986 г. в книге [20] авторы (в их числе соавторы указанного выше немецкого патента) приводят многочисленные ссылки на наши исследования и разработки в области УЗК металлов ГВ. На русском языке книга была издана под редакцией Волченко В.Н., «Металлургия», Москва, 1991 г. В этой книге наряду с термином «головная волна» в нашем понимании, как комплекса волн, используется термин «ползучая волна» для обозначения продольно-поверхностной волны. Дополнительно отметим, что термин «ползущая волна», на наш взгляд, неверно переведен и неправомерно используется во многих документах и трудах на русском языке, т. к. в данном случае волна не скользит (не ползет по поверхности) снаружи, а распространяется в нижней среде по поверхности контролируемого металла.

Некоторые соображения по «конкретным материалам из нормативно-технической и специальной литературы» из статьи по п. 1-11 (№ пунктов и литературные ссылки в статье [1]).

П.1. Я бы предложил разделить сейсмоакустику и ультразвуковую дефектоскопию металлов. Необходимо напомнить, что в УЗД применяются активные способы возбуждения и приема ультразвуковых волн с помощью направленных ультразвуковых пучков, а также то, что ультразвуковые волны с частотами 1…10 МГц не распространяются в воздухе. В сейсмоакустике, как правило, используются ненаправленные излучатели и приемники звуковых волн, которые превращаются в различные типы и виды волн при распространении в слоистых средах, и множество принятых сигналов идентифицируют и интерпретируют специальными сейсмоакустическими приборами, методами и приемниками. Также применительно к УЗД отметим, что в дифракционно-временном методе ультразвуковой дефектоскопии металлов (TOFD), который украинские авторы широко используют для отображения и интерпретации своих терминологических предложений, на рисунке из [1] на участке между излучающим и приемным искателями в воздушном пространстве не существует никакой боковой волны (Lateral wave). Боковая волна появляется только в призме приемного искателя на участке его соприкосновения с границей контролируемого объекта вследствие распространения продольно-поверхностной волны (creeping wave – ползучая волна).

П.2. Авторы статьи [16] не смогли правильно описать рассматриваемый процесс и волны. В п.1 они приравняли головную и ползучую волны. Указанные волны распространяются не только «вдоль свободной поверхности», но также вдоль границы с водой. В п. 2 они пишут, что «распространение ГВ не зависит от состояния поверхности», а в действительности зависят. В п. 3 у них «боковая волна» – это только поперечная волна в контролируемой среде, но это ещё и боковая продольная волна в сопредельной среде (призма искателя, или жидкость (вода)). Она позволяет принять ГВ в УЗД и используется в дифракционно-временном методе УЗД (TOFD), как часть ГВ.

П.3. ГОСТ Р ИСО 5577-2009. Термин (название) правильный, но не верно прописан. В настоящее время документ перерабатывается. Принимается новая редакция термина головная волна – комплекс волн.

П.4. Я не согласен с описанием ГВ в книге.

П.6. ГОСТ Р ИСО 5577-2017 (проект). Используется не правильный термин, не верно переведен и не верно прописан. В настоящее время проект документа перерабатывается.

П.7. ISO 22825:2012. В 2012 г. прошло сорок лет со времени обнаружения ГВ. У них в стандарте все по-своему и в данном случае с большими фактическими физическими и терминологическими ошибками. Авторы не учитывают следующих результатов исследований:

– представленное описание не соответствуют полученным нами закономерностям. Термин «ползущие» неверен; волны «распространяются на глубину, равную приблизительно одной длине волны от поверхности» – источники вывода не известны и голословны, противоречат нашим исследованиям ГВ – до 15 мм. Как известно, на глубину равную одной длине волны, распространяются поверхностные волны (волны Рэлея);

– у них в описании и «головная волна», и боковая сдвиговая (поперечная) волна – одно и то же. В нашей терминологии термин «боковая сдвиговая волна» и волны характеризует одну из составляющих ГВ. Отметим, что использование авторами собственной терминологии создает большие несоответствия в стандарте и тем более в описании свойств ГВ;

– наши исследования показали, что некоторая часть энергии ГВ распространяется по и за криволинейной поверхностью, в виде продольно-поверхностной волны, а за галтелью основной поток энергии волны превращается в объемные продольные волны;

– «ползущие волны непрерывно генерируют сдвиговые волны (также называемые ГВ), что является следствием взаимодействия с поверхно-

стью». Это высказывание не корректно, т. к. образование продольно-поверхностной (ползучей) волны и генерация боковых волн в нижней и верхней средах тесно связано с условиями существования неоднородной продольно-поверхностной волны, которая в зависимости от наличия или отсутствия звукопроводящей верхней среды по-разному ослабляется с расстоянием. Боковая волна в верхней среде позволяет в условиях одностороннего доступа к контролируемому объекту зафиксировать продольно-поверхностную волну.

Авторы в [1] попытались систематизировать термины в УЗД головными волнами в РФ, Украине, в западных и международных документах и книгах. При этом они взяли за «основу определения волн» из стандарта ISO 22825:2012. Существует документ 2012 г. О его научном и техническом качестве я написал выше в «Некоторых соображениях по «конкретным материалам из нормативно-технической и специальной литературы» из статьи по п.1–11 [1], где были даны пояснения и замечания по рассмотренным источникам. Слабые призваны источники для предполагаемой революции в терминологии по УЗД головными волнами. Но других авторы не нашли и поэтому в меру сил будем работать и анализировать их.

Рассмотрим предложенную таблицу 1 [1]. Здесь впервые для себя я обнаружил, что классические продольные волны могут быть двух типов – названия расположены в двух крайних разных столбцах. Поперечные волны – тоже самое, но в среднем столбце. Не понятно, как может продольная или поперечная волны физически характеризоваться в зависимости от угла падения (пятый раздел).

Известные мне зарубежные коллеги и специалисты понимают под термином «ползучая волна» (creeping wave) неоднородную продольно-поверхностную волну, распространяющуюся (скользящую) по границе раздела в нижней среде – они так ее и рисуют на границе раздела сред. А падающая продольная волна под критическим углом – это классическая однородная продольная волна. По предложениям украинских авторов мы обсуждаем терминологию с упором на физическое соответствие, а в то же время используем термины «скользящая волна», «ползущая волна», «боковая волна», которые трудно притянуть к физике (акустике) упругих волн.

ГВ по п.8 оказались задвинуты в неопознанное пространство. Они, рожденные в УЗД в 1972 г., оказались «синонимами ползущих иностранных волн», а из других источников, которые проанализированы выше, следует, что это не ползущие волны [1]. Конечно описание этой чехарды в терминах можно, но трудно назвать анализом терминологии.

Авторы отмечают, что «нестыковки не носят принципиального характера. Физические свойства акустических волн хорошо изучены и рассматриваются в учебниках по акустике». Может быть, авторам и стоило опираться на эти учебники. Но в каком учебнике описаны в полной мере исследования акустических характеристик металлов при падении продольных (в лучевом приближении и объемном) волн под и вблизи первого и третьего критического углов? Таких авторы не нашли и решили создать и представить свою новую теорию и терминологию по УЗК металлов ГВ, ограничившись и заменив их на одну-две боковые волны, входящих в комплекс «головная волна».

Относительно п.8 [1], чтобы исключить «смысловую путаницу» и «недостаточное понимание различий в природе волн», позволю коллегам напомнить, что термин «головная волна» в УЗД – это комплекс волн, распространяющихся от излучателя через контролируемый металл до приемника. В этот комплекс последовательно входят этапы излучения и возбуждения волн от падающей волны (рис. 8):

Этап излучения:

1. падающая классическая продольная (растяжения-сжатия) волна, исходящая от направленного под первым критическим углом к границе сред излучателя.

Этап возбуждения волн от падающей волны:

2. отраженная классическая продольная (растяжения-сжатия) волна, исходящая от границы раздела под первым критическим углом (в верхней среде);

3. отраженная трансформированная под четвертым критическим углом (новый термин) классическая поперечная волна (в верхней среде);

4. неоднородная продольно-поверхностная волна с углом ввода 90°, распространяющаяся в нижней среде по границе раздела со скоростью продольной волны;

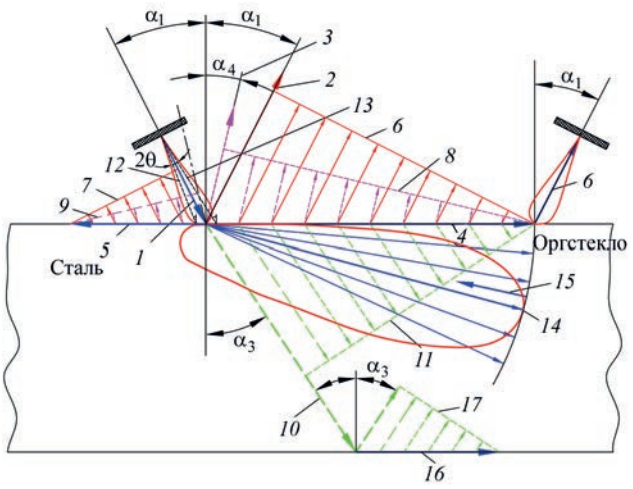

Рис. 8. Образование волн на границах раздела и вблизи них при критических и околокритических углах

5. обратная неоднородная продольно-поверхностная волна с углом ввода -90°, распространяющаяся в нижней среде по границе раздела со скоростью продольной волны;

6. боковая продольная волна, отходящая в верхней среде от границы под первым критическим углом, связанная с распространением волны 4 (фронт волны связан с фронтом волн 2 и 4);

7. обратная боковая продольная волна, отходящая в верхней среде от точки падения на границе под первым критическим углом, связанная с распространением волны 5;

8. боковая поперечная волна, отходящая в верхней среде от границы под четвертым критическим углом, связанная с распространением волны 4 (фронт волны связан с фронтом волн 3 и 4);

9. обратная трансформированная боковая поперечная волна, отходящая в верхней среде от точки падения на границе под четвертым критическим углом, связанная с распространением волны 5;

10. трансформированная поперечная волна в нижней среде с углом ввода, равным третьему критическому углу;

11. боковая поперечная волна, отходящая в нижней среде от границы под третьим критическим углом, связанная с распространением волны 4.

Выше описаны волны, изучаемые и возбуждаемые в лучевом приближении. В реальной УЗД используются искатели с пъезоэлементами, излучающими пучок продольных волн, акустическая ось которого ориентирована под первым критическим углом к границе раздела сред и имеет диаграмму направленности с углом раскрытия 2θ.

В связи с этим на этапе излучения на границу также падают:

12. продольные волны с углами падения меньше первого критического угла;

13. продольные волны с углами падения больше первого критического угла.

На этапе возбуждения:

– продольные волны 12 с углами падения меньше первого критического угла ($\alpha_1 - \theta$) образуют в нижней среде поле продольной подповерхностной волны 14 (в обратном направлении при эхо-методе волна 15);

– продольные волны 13 с углами падения больше первого критического угла до ($\alpha_1 + \theta$) образуют неоднородные продольно-поверхностные волны, с которыми связан эффект незеркального отражения.

Этап приема.

Изученный и прошедший через контролируемую зону импульс продольной волны 1, неоднородной продольно-поверхностной волны 4, приходит в виде боковой продольной волны 6 на пъезоэлемент приемника (в призме, в воде), расположенный под первым критическим углом к границе раздела (рис. 8), и фиксируется. Этот комплекс волн в лучевом приближении было предложено называть «головной волной». Если мы используем пучок ультразвуковых волн реального искателя, то головная волна складывается из волн (1+12) + (4+14) + (6+15) (рис. 8) соответственно на этапах излучения, возбуждения, прохождения и приема импульсов.

Эти ГВ используются в УЗД металлов эхо-, теневым, зеркально-теневым и дифракционно-временным (ДВМ) методами. Из [13] известно множество головных волн. Большинство их них на конечном этапе принимаются и фиксируются по боковой волне. Для УЗД металлов мы в 1970-е годы предложили использовать только ГВ, фиксируемые по боковой продольной волне в верхней среде. Понятно, что и в дефектоскопии возможна фиксация множества других ГВ, связанных с распространением других сопутствующих и распространяющихся в верхней и нижней среде волн. Методы их распознавания и идентификации разработаны в сейсмоакустике и используются в сейсморазведке. Описание некоторых из этих ГВ представлено в [13] и [3].

В УЗД металлов мы предложили и исследовали применение ГВ именно того типа, что описан выше. В том числе, он реализуется в ДВМ (TOFD). Его важнейшим физическим и технологическим фактором является минимальное время, затрачиваемое волной на прохождение от излучателя до приемника. Импульс приходит и фиксируется первым, является главным в технологии УЗД и его предложено, как и в другой близкой к нам науке – сейсмоакустике, называть головным, а волны – головными волнами.

В связи с изложенным, будет полезно рассмотреть несколько существенных физических моментов.

Выше показана исходящая от границы раздела боковая поперечная волна в верхней среде, также связанная с условием существования неоднородной продольно-поверхностной волны на границе раздела и распространяющаяся (и несущая упругое сдвиговое возмущение в верхней среде) под соответствующим (определяемым по уравнению Снеллиуса) углом. В связи с нашими нынешними научными изысканиями этот угол, по-видимому, следует назвать четвертым критическим углом. Все критические углы связаны с возбуждением и распространением неоднородных волн: 1-й, 3-й и 4-й – с продольно-поверхностной волной, 2-й – с неоднородной поперечной волной – поверхностной волной (волной Рэлея.)

Ещё раз обратим особое внимание на процессы возбуждения и распространения волн при кри-

тических углах (рис. 7). На графиках в первом критическом угле мы имели «полное внутренне отражение» и нулевой коэффициенты прохождения и отражения. Но падающая энергия не может исчезнуть. Эта энергия идет на образование продольно-поверхностной волны и боковых волн, которые излучаются в приграничные среды. Эксперименты показали малую интенсивность этих волн. Они распространяются вдоль границы двух сред на незначительные расстояния, но они существуют.

Через несколько углов имеет место мощнейший скачок в коэффициенте прохождения трансформированной поперечной волны на углах падения 29…30°. Особенно интересен этот феномен при ультразвуковом контроле пучком волн с диаграммой направленности, включающий эти углы и первый критический.

Несомненно, значения этих коэффициентов связаны с условиями трансформации продольных волн в поперечные. Решения и результаты на первом и втором критических углах качественно существенно разные. При первом критическом угле падения продольной волны (в лучевом приближении) в нижней среде исчезает продольная волна, но существует неоднородная продольно-поверхностная и подповерхностная волны. При этом вторая как бы подпитывает первую, которая быстрее ослабляется, вследствие возбуждения боковых волн в верхней и нижней средах. Продольно-поверхностная волна не демпфируется (не прощупываются пальцем) на границе раздела сред (на контактной поверхности). Но зато прекрасно прощупывается пальцем на торцевой поверхности, перпендикулярной к контактной и к направлению распространения ультразвука, на небольшом расстоянии (3…7 мм) от контактной поверхности. Этот эффект используется во всех методиках УЗК ГВ при обучении контролеров и для идентификации ГВ.

Волна растяжения-сжатия (колебания частиц металла в ней происходит вдоль контактной поверхности) входит в палец (как в воду), что приводит к уменьшению амплитуды сигнала. Прикосновение к контактной поверхности при распространении продольно-поверхностной волны, когда частицы металла колеблются вдоль границы, не приводит к изменению амплитуды эхо-сигнала. Это также подтверждает факт отсутствия нормальной составляющей колебаний к контактной поверхности в продольно-поверхностной волне.

При втором критическом угле падения продольной волны (в лучевом приближении) в нижней среде исчезает поперечная волна, но образуется неоднородная поперечная волна в виде поверхностной волны. Считается [20], что частицы в волне колеблются по эллипсу, а волна является суперпозицией продольной и поперечной волн. В поверхностной волне имеется мощная составляющая колебаний частиц металла, которые происходят также, как в поперечной волне – перпендикулярно направлению распространения волны. И они демпфируются при прикосновении пальцев к поверхности – амплитуда сигнала заметно уменьшается. Это эффект используется в УЗД поверхностными волнами для идентификации волны и для определения координат отражателей.

О волнах на донной поверхности. Исходящая от границы раздела боковая поперечная волна в нижней среде, связанная с неоднородной продольно-поверхностной волной на границе раздела сред, и распространяющаяся (и несущая сдвиговое упругое возмущение в нижней среде) под третьим критическим углом при падении на донную поверхность возбуждает (рис. 8):

16. неоднородную продольно-поверхностную волну на границе, аналогичную волне 4;

17. волна 16 в каждой точке границы возбуждает боковую поперечную волну, распространяющуюся в металле под третьим критическим углом к границе.

Именно волны 16 и 17 объясняют причины наличия несоответствия между амплитудами фиксируемых сигналов и размерами зарубок в задаче Райхмана. Они же являются причиной возникновения множества сопутствующих импульсов с бóльшим временем распространения, в сравнении с головной волной. Эти импульсы можно использовать для обеспечения более надежного обнаружения дефектов в сварных соединениях малых (до 6…8 мм) и средних толщин (8…20 мм). В сейсмоакустике они используются и называются головными волнами 2, 3 и т. д.

Все эти волны представлены на рис. 3. Соответственно, в воде отсутствует боковая поперечная волна, а в воздухе отсутствуют боковые продольная и поперечная волны. Считаю, что представленные здесь определения (названия) волн, составляющих понятие «головная волна», полностью соответствует физическим характеристикам волн: направления колебаний в волне, направления распространения волн и скорость распространения волн. На мой взгляд, если мы рассматриваем физические процессы распространения волн, в данном случае вблизи границы двух сред, то должны охарактеризовать каждую составляющую волну или волны в каждой среде. Это дает более полное понимание физики процесса и позволяет более точно интерпретиро-

вать имеющиеся первичные и вторичные принятые импульсы.

Смысловое содержание термина «головная волна» в ультразвуковой дефектоскопии металлов, в том числе в ДВМ, в наилучшей степени характеризует её, поскольку именно ГВ (комплекс волн) первой фиксируется приемником, а принятый импульс затрачивает минимальное время на прохождение от излучателя через изделие до приемника и поэтому его называют главным или головным. Из этого смыслового содержания и пошло название головной волны сначала в сейсмоакустике, а затем и в ультразвуковой дефектоскопии металлов.

Интерпретация импульсов ГВ в УЗД металла по минимальному времени распространения оказалась наиважнейшей технологической (методической) характеристикой, как при обнаружении и интерпретации ГВ в 1972 г. при исследовании акустических характеристик металлов для оборудования и трубопроводов первого контура АЭС с ВВЭР-1000 зеркально-теневым методом наклонными искателями, так и при контроле эхо-методом сварных соединений, аустенитных наплавок и основного металла.

Сейчас некоторые исследователи пытаются доказать, что какой-то западный разработчик ДВМ (TOFD) первым предложил использовать головную (боковую продольную волну) для слежения за акустическими характеристиками в процессе контроля. Посмотрим еще раз на способ УЗК по А.С. № 502311 [6]. Он состоит в том, что в призме искателя возбуждают УЗ колебания, вводят их в контролируемую зону, принимают прошедшие через неё колебания и по их параметрам, с учетом состояния акустического контакта искателя с материалом, определяют дефектность материала, отличающийся тем, что с целью повышения качества дефектоскопии об акустическом контакте судят по параметрам продольно-поверхностной волны возбужденной в материале искателем (рис. 9, *а*).

Здесь представлено описание и говорится об использовании нами продольно-поверхностных, объемных и боковых волн, возбуждаемых одним пъезоэлементом с широкой диаграммой направленности, при УЗК зеркально-теневым методом. Непредвзятый исследователь может убедиться в идентичности методов контроля и использовании в нем головных и/или боковых волн. В настоящее время технология ДВМ базируется на сигнале головной (боковой) волны – первом импульсе, пришедшем от излучателя к приемнику через контролируемый объект

Но все же, в п. 4 [1] авторы признают и указывают, что иностранные термины головной, ползучей и боковой волн не могут быть признаны соответствующими термину «головная волна» в УЗК металлов. Но также все эти термины не соответствуют стандарту на «Сейсморазведку», который они напрямую притягивают вновь и вновь к УЗД металлов.

Можно согласиться с ними, что при гармонизации международных стандартов с новыми украинскими, а в РФ с российскими, возникает много трудностей. Но посмотрим назад и увидим, как наши зарубежные коллеги, часто к сожалению низкой квалификации (что показано выше), вводили новую терминологию в свои стандарты по УЗД и не стеснялись в выборе своих терминов волн, без оглядки на наши исследования, прове-

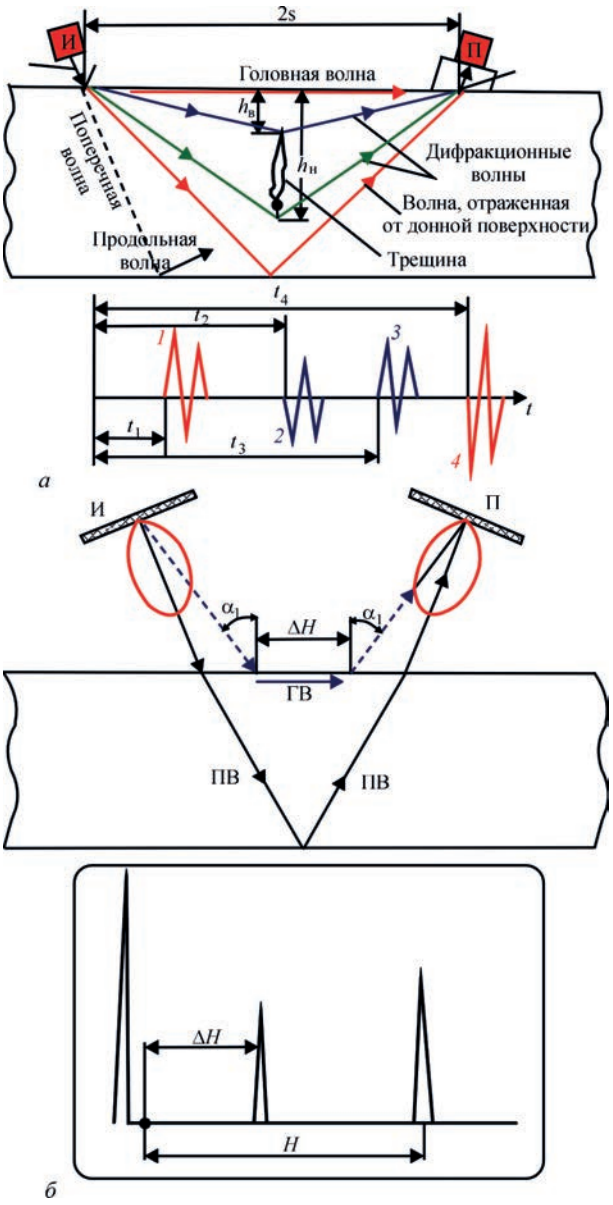

Рис. 9. Сравнение дифракционно-временного метода (ДВМ = TOFD) (*а*) и безэталонного способа (*б*) УЗ толщинометрии а: $h_в$ – глубина залегания верхней кромки трещины; $h_н$ – глубина залегания нижней кромки трещины; 2*S* – расстояние между излучателем и приемником; *A* – амплитуда волны; t_1 – время прихода ГВ; t_2 – время прихода волны, дифрагированной на верхней кромке трещины; t_3 – время прихода волны, дифрагированной на нижней кромке трещины; t_4 – время прихода волны, отраженной от внутренней поверхности *б*: ΔH – расстояние, проходимое ГВ в изделии; *H* – расстояние, проходимое продольной волной (ПВ) в изделии

денные раньше, на предложенную и используемую терминологию.

Сейчас идет гармонизация стандартов. В Украине и в РФ озаботились используемой терминологией, предлагаемой нам стандартами ISO и EN и вопросом, до какой степени мы должны или можем подняться или опуститься в уже разработанных стандартах.

О тексте и терминах стандартов на ультразвуковой контроль, где в методическом плане СССР был всегда на переднем плане, а в части ГВ в 1970–1980 гг. был далеко впереди, мы можем много дискутировать и спорить. Но пойти на упрощенное описание физических особенностей и закономерностей, когда исчезает полная картина используемых и рассматриваемых волн, в тесной связи с используемой и уже сложившейся терминологией в СССР, в РФ и в Украине, будет безусловно неправильно.

В разделе 5 [1] авторы при обсуждении характеристики головной волны – минимального времени распространения импульса, вновь предлагают использовать термин «боковая волна», а не «головная». При этом они весьма некорректно упоминают об ультразвуковой толщинометрии металлов прямыми преобразователями контактными искателями и сравнивают первый донный импульс («продольные волны… всегда вызывают первый сигнал на А-скане») на толщиномере и первый импульс ГВ при УЗД ГВ. Опыт УЗК и ультразвуковой толщинометрии на заводах и при эксплуатации различного оборудования, трубопроводов, элементов показал следующее.

Во-первых, первый импульс на толщиномере не обязательно бывает донным. В контролируемом изделии бывают расслоения и тогда отраженный от него импульс будет первым на А-скане или экране дефектоскопа (на толщиномере может не быть экрана). Но это не ГВ, и этот импульс с информацией о глубине залегания расслоения приходит на экран цифрового толщиномера, что может привести к неверным результатам контроля толщины и неправильной оценке качества.

Во-вторых, еще в 1970-е годы для проведения безэталонной ультразвуковой толщинометрии раздельно-совмещенными контактными преобразователями сначала в СССР в МНПО «Спектр» В. Королевым был разработан и запатентован специализированный толщиномер (рис. 9, *б*), который использовал дополнительную схему прозвучивания головной волной по [6] для эталонирования скорости распространения продольной волны непосредственно на контролируемом объекте. Затем патент у них приобрела фирма «Крауткремер», разработала и выпустила аналогичный толщиномер. Но приборы не нашли широкого применения. Практика показала, что стандартная технология толщинометрии с настройкой толщиномера на образце из того же материала, что и контролируемое изделие, более проста, надежна и дешевле.

У нас в УЗД металлов никакой путаницы на сегодняшний день не имеется. Пока путаница имеется только в наших статьях и в разрабатываемых или редактируемых стандартах, пришедших из ISO или EN. Есть предложение украинских коллег отодвинуть термин «головные волны» на задворки УЗД, так как им он не нравиться из-за наличия стандарта «Сейсморазведка» 1991 г., а также стандартов ISO или EN, в которых им нравятся слова «ползущие» («ползучие»), «скользящие» и «вытекающие» волны.

Я считаю, что позиция «нравиться – не нравиться» может иметь место, но так как мы работаем в УЗД металлов и в большинстве случаев, в отличии от сейсморазведки, на однородных по структуре металлах, нужно также иметь понятия и учитывать физические и технологические закономерности и особенности ультразвуковой дефектоскопии металлов. Для того, чтобы специалисты уверенно и грамотно могли использовать терминологию, представленную в статьях, в стандартах и книгах и одинаково трактовать ее, с полным пониманием физических процессов решать задачи подобные задачам Райхмана и Гурвича, а они систематически встречаются в практическом контроле объемными и головными волнами, поддерживаю предложение авторов статьи не искать «…легких путей и не ограничиваться примитивными моделями» в особенности «…при работе с методом головных волн».

Будет совсем неплохо, если мы и про приоритет не будем забывать. Ведь многие методики УЗК головными волнами я имел честь разрабатывать, испытывать и использовать вместе с моими украинскими коллегами: Запорожская АЭС – В.Л. Санжаровский и Е.Е. Гефсиманский, Южно-Украинская АЭС – И.В. Малахов и А.Н. Палий, Хмельницкая АЭС – Ю.М. Копылов и Н.П. Марокко, Чернобыльская АЭС – О.Я. Зинченко и В.Л. Зинченко, Ровенская АЭС – В.П. Кравец и Г.М. Ямпольский и другими уважаемыми коллегами, которых прошу не обижаться, если они здесь не упомянуты. Наш опыт и знания должны быть основой при использовании старых терминов, выработке и принятии новых терминов в ультразвуковой дефектоскопии металлов.

И это уже происходит. Достаточно посмотреть в труды ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ «Основные направления работ Отдела неразрушающих методов контроля качества сварных соединений» под редакцией проф. В.А. Троицкого, Киев, 2019 г. [22]. В них на стр. 19, а также на стр. 89-100 в [23]

используются предложенные АО «НПО «ЦНИИТМАШ» и ранее принятые к использованию в сообществе неразрушающего контроля в СССР, РФ, Украины, Болгарии и др. стран термины по УЗК металлов головными волнами.

Список литературы

1. Е.А. Давыдов, Дядин В.П., Шекеро А.Л. (2018) О терминологических особенностях в обозначении ультразвуковых волн, образующихся при первом критическом угле. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль,* **3**, 1–12.
2. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1974) О выявлении подповерхностных дефектов ультразвуковым методом. *Труды VII Всесоюзной конференции «Неразрушающий контроль материалов изделий…»*, Киев.
3. Разыграев Н.П. (1979) *Экспериментальные исследования продольных подповерхностных волн и применение их для обнаружения подповерхностных дефектов в деталях энергетических установок*. Дис. … канд. тех. наук. Москва, ЦНИИТМАШ.
4. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. (1975) *Отчет НИР «Исследование боковых ультразвуковых волн, с целью определения возможности контроля подповерхностного слоя деталей энергетических машин (поисковая)»* Т-76. Москва, ЦНИИТМАШ.
5. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1975) *Способ ультразвукового контроля качества материалов*. А. с. № 491092 от 01.06.73. Бюл. изобр. № 41.
6. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. (1976) *Способ ультразвуковой дефектоскопии материалов.* А. с. № 502311 от 28.12.73. Бюл. из. № 5.
7. Разыграев Н.П., Щербинский В.Г. (1977) *Способ ультразвукового контроля качества материалов*. А. с. № 565249 от 20.05.74. Бюл. из. № 26.
8. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1978) Использование волн головного типа для ультразвукового контроля. *Дефектоскопия. изд. АН СССР*, **1**.
9. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1979) Исследование ослабления ультразвуковых головных волн с расстоянием. *Там же*, **1**.
10. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н., Щербинский В.Г. (1978) Исследование процесса формирования акустического поля головной волны в контролируемой среде. *Там же,* 11.
11. Разыграев Н.П., Ермолов И.Н. (1981) Искатели для контроля приповерхностного слоя головными волнами. *Там же*, **1**, 53–62.
12. Разыграев Н.П. (1981) О выявлении подповерхностных дефектов искателями головных волн ИЦ-61, ИЦ-70. *Там же*, **3**, 97–105.
13. Бреховских Л.М. (1957) *Волны в слоистых средах.* Москва, Наука.
14. Ермолов И.Н. (1966) *Методы ультразвуковой дефектоскопии.* Курс лекций. Ч.1. Москва, Горный институт.
15. Юозонене Л.В. (1980) Упругие поверхностно-продольные волны и их применение для неразрушающего контроля. *Дефектоскопия*, **8**, 29–38.
16. Ланге Ю.В., Воронков В.А. (2003) *Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения*. Справочник. Москва.
17. ГОСТ 16821-91. *Сейсморазведка. Термины и определения.*
18. Вюстенберг Х., Эрхард А., Мёхрле В. (1981) *Способ и устройство для неразрушающего контроля приповерхностного слоя.* Патент ФРГ № 2802278 от 15.01.81.
19. Erhard, A., Kroning, V. (1984) *Erzengung, Ausbreitung und Anwendung von Ultraschall-Kriechwellen. Materialprufung 26/1984 № 9,* September. VDI-Verlag GmbH, 323–326.
20. (1986) Крауткремер *«Ультразвуковая дефектоскопия материалов»* Берлин, Хейдельберг, Нью-Йорк, Лондон, Париж, Токио (нем. и англ.).
21. Викторов И.А. (1966) *Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике.* Москва, Наука.
22. (2019) *«Основные направления работ Отдела неразрушающих методов контроля качества сварных соединений»* под ред. проф. В.А. Троицкого. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 19, 89–100.
23. Троицкий В.А., Шекеро А.Л., Давыдов Е. и др. (2019) *Технология оценки размеров несплошностей в сварных соединениях с применением дифрагированных волн.* Киев, ИЭС им. Патона НАНУ, 89–100.

Поступила в редакцию 24.03.2020

НОВАЯ КНИГА

Эпизоды жизни и творчества, перспективы развития сварочной техники и дефектоскопии: монография / *Троицкий В.А.*; Киев: Интерсервис, 2020 – 252 с.

Мемуарное произведение, посвященное становленню и развитию в Украине дефектоскопии, регулируемых источников питания для различных технологических процессов. Описаны креативные злектротехнические и дефектоскопические идеи, разработка и реализация которых повысит качество сварных соединений, обеспечит объективность мониторинга ответственных промышленных обьектов. Освещена деятельность Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики (УО НКТД), становление Международной Академии неразрушающего контроля (ANDTI), деятельность Европейской Федерации неразрушающего контроля (EFNDT), Международного комитета неразрушающего контроля (ICNDT) и Международного комитета по стандартизации (ISO TC-135), ответственных за развитие в области неразрушающего контроля и мониторинга технического состояния ответственных обьектов.

Показан приоритет Украины в решении многих проблем в дефектоскопии, в создании автоматизированных систем неразрушающего контроля качества в трубосварочном производстве, средств для мониторинга технического состояния различных металлоконструкций.

Книга будет интересна дефектоскопистам и электротехникам, занимающимся сварочной техникой, аспирантам и преподавателям, специалистам по историографии сварочной и дефектоскопической техники.

Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала.

Підписано до друку 14.07.2020. Формат 60×84/8.
Офсетний друк. Ум. друк. арк. 8.37.
Друк ТОВ «ДІА».
03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.

В.М. УЧАНІН – ЗАСЛУЖЕНИЙ ВИНАХІДНИК УКРАЇНИ!

Колектив Інституту електрозварювання ім. Е.О. Патона НАН України, редколегія та редакція журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» щиро вітають доктора технічних наук, завідувача лабораторії Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, Учаніна Валентина Миколайовича з присвоєнням почесного звання «Заслужений винахідник України» як визнання його заслуг перед українською та світовою наукою та бажають нових здобутків в його творчій діяльності.

З УКАЗУ ПРЕЗИДЕНТА УКРАЇНИ

«Про відзначення державними нагородами України з нагоди Дня науки»

Указом Президента України №186/2020 від 15 травня 2020 р. за вагомий особистий внесок у розвиток вітчизняної науки, зміцнення науково-технічного потенціалу України, багаторічну сумлінну працю та високий професіоналізм з нагоди Дня науки Учаніну Валентину Миколайовичу, завідувачу лабораторії Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, доктору технічних наук, було присвоєно почесне звання «Заслужений винахідник України».

В.М. Учанін – відомий науковець і експерт в галузі неруйнівного контролю і діагностики матеріалів електромагнітними методами. У Фізико-механічному інституті працює з 1971 р. по даний час, де пройшов шлях від інженера до завідувача лабораторії. У 1992-2000 рр. працював начальником відділу у науково-дослідному і проектному інституті приладів автоматичного регулювання і систем управління «Промприлад». У 1983 р. успішно захистив кандидатську, у 2017 р. – докторську дисертації. У 1992 р. йому було присвоєно вчене звання старшого наукового співробітника.

В.М. Учаніним розроблено наукові основи створення нових засобів і технологій вихрострумової дефектоскопії і структуроскопії матеріалів і об’єктів, що характеризуються високим рівнем завад. Ним запропоновано принципи побудови вихрострумових перетворювачів подвійного диференціювання, вихрострумових дефектоскопів та структуроскопів для контролю відповідальних конструкцій в умовах виробництва та експлуатації, які також стали основою низки автоматизованих систем контролю деталей залізничного транспорту (НВФ «Ультракон-сервіс», НВФ «Промприлад»). Нові технічні рішення використано для створення дефектоскопів типу ДУЕТ, ПОЛІТ, ЛЕОТЕСТ (ВД 3.01, ВД 3.02, ВД 3.03, ВД 4.01), ОКО-01, ВД3-71, ВД3-81 і ЕДДІКОН. Прилади впроваджено в космічній та авіаційній галузі (КБ «Туполєв», ДП «Антонов», ПАТ «Мотор-Січ», ДП «Івченко-Прогрес», ДКБ «Південне», Авіакомпанія «МАУ», Миколаївський, Конотопський, Львівський, Одеський і Севастопольський авіаремонтні заводи) та інших галузях (завод ім. В. Малишева, ПАТ ДТЕК «Західенерго», ГПУ «Львівгазвидобування», НВФ «Зонд», Карпатському та Полтавському експертно-технічних центрах, Нововолинському ливарному заводі тощо). Створено структуроскопи типу Альфа та Дельта для виявлення газонасичених шарів титанових сплавів в інтересах авіаційного двигунобудування. Запропоновано принципи побудови приладів для безконтактного вимірювання електропровідності алюмінієвих сплавів, на базі яких створено нову методологію визначення технічного стану об’єктів довготривалої експлуатації за параметрами циклічної тріщиностійкості. Це використано для оцінювання деградації алюмінієвих сплавів літаків довготривалої експлуатації та оптимізації режимів зварювання конструкцій із алюмінієвих сплавів (ДП «Антонов»). Запропоновано нові способи і засоби для визначення напруженого стану конструкцій із феромагнітних сталей за змінами магнітної анізотропії (НВФ «Спеціальні наукові розробки»).

В.М. Учанін є автором 119 патентів і авторських свідоцтв, понад 320 публікацій і 5 монографій. Він є членом Міжнародної Академії неруйнівного контролю (Брешія, Італія), членом Правління Українського Товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики, членом редакційних колегій журналів «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» та «Відбір і обробка інформації», членом Ради по присудженню вчених ступенів в Івано-Франківському університеті нафти і газу. За роботи, пов’язані з розв’язанням проблем діагностики авіаційної техніки, у 2017 р. йому присуджено Державну Премію України в галузі науки і техніки.

С.І. КУЧУКУ-ЯЦЕНКУ – 90

2 серпня 2020 р. виповниться 90 років з дня народження першого заступника директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, академіка НАН України Сергія Івановича Кучука-Яценка.

Сергій Іванович після закінчення Київського політехнічного інституту за розподілом був направлений на роботу в Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, де пройшов славний трудовий шлях від молодого фахівця-інженера до професора, доктора технічних наук, завідувача одного з провідних відділів, першого заступника директора Інституту з наукової роботи, академіка Національної академії наук України. У 1960 р. С.І. Кучук-Яценко захистив кандидатську, а у 1972 р. – докторську дисертації. У 1978 р. він був обраний членом-кореспондентом, а у 1987 р. – дійсним членом Національної академії наук України.

Понад п'ятдесят років С.І. Кучук-Яценко займається роботами по зварюванню рейок. Розроблені за його активної участі і керівництві технології та обладнання для зварювання рейок дозволили вперше в світовій практиці застосувати високопродуктивне контактне зварювання в польових умовах, що значною мірою сприяло переходу залізниць на безстикові шляхи. За активної участі С.І. Кучука-Яценка серійний випуск такого устаткування по документації ІЕЗ був організований на Каховському заводі електрозварювального обладнання, який з 1970-х років став світовим експортером такого обладнання.

Розробки С.І. Кучука-Яценка та його співробітників успішно використані також на машинобудівних заводах при виготовленні кільцевих заготовок, валів і заготовок з різнорідних матеріалів. Особливо ефективним виявилося застосування багатопозиційного контактного зварювання, що дозволяє зварювати великогабаритні деталі одночасно в декількох місцях (корпуси двигунів, радіатори потужних трансформаторів).

Значний внесок С.І. Кучук-Яценко вніс у створення технології та обладнання для контактного стикового зварювання трубопроводів різного призначення. За його активної участі розроблені технології, системи керування й устаткування для контактного стикового зварювання труб діаметром від 60 до 1400 мм і виконано його широкомасштабне впровадження при будівництві трубопроводів на території колишнього СРСР. З використанням КСЗ зварено понад 70 тис. км різних трубопроводів, в тому числі 4 тис. км найпотужніших трубопроводів в районах Крайньої Півночі. Застосування КСЗ дозволило підвищити продуктивність праці і забезпечити надійність трубопроводів. Ця робота була також відзначена Ленінською премією у 1989 р.

Під керівництвом С.І. Кучука-Яценка та за його безпосередньої участі безперервно тривають роботи зі створення технологій зварювання тиском неповоротних стиків труб різного призначення. Вперше у світовій практиці розроблені технології та обладнання для пресового зварювання з нагрівом дугою, керованою магнітним полем, труб діаметром до 300 мм з товщиною стінки 5...15 мм, що відрізняються високою продуктивністю при мінімальній енергоємності процесу.

С.І. Кучук-Яценко бере активну участь на всіх етапах виконання перерахованих робіт. У 1998 р. йому присвоєно звання «Заслужений діяч науки і техніки України», у 2000 р. – Премія ім. Є.О. Патона за наукову роботу «Зварювання в твердій фазі».

С.І. Кучук-Яценко автор більше 700 наукових публікацій, в тому числі 10 монографій, 350 авторських свідоцтв. Їм отримано понад 300 українських і зарубіжних патентів, багато з яких придбані за ліцензійними угодами зарубіжними фірмами.

В даний час академік С.І. Кучук-Яценко продовжує займатися актуальними проблемами в галузі зварювання, створенням прогресивних технологій з'єднання важкозварювальних матеріалів. Він очолює один з провідних наукових відділів Інституту електрозварювання. С.І. Кучук-Яценко тривалий час плідно співпрацює з Каховським заводом електрозварювального устаткування – одним з провідних підприємств-виробників зварювального обладнання в Україні. Він бере активну участь в організації серійного виробництва контактних стикових машин для зварювання залізничних рейок і труб.

С.І. Кучук-Яценко є заступником голови Вченої ради ІЕЗ, заступником головного редактора журналу «Автоматичне зварювання». Ним підготовлено більше десяти кандидатів і докторів технічних наук. Він був обраний першим президентом Товариства зварників України, входить до складу його правління, є членом Товариства зварників США та Великобританії.

Заслуги вченого відзначені двома орденами Трудового Червоного Прапора, орденом Знак Пошани, орденами Князя Ярослава Мудрого, медалями.

Колектив Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона, редколегія та редакція журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль»