



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

Дефектоскопия



Неразрушающий контроль

Техническая диагностика

Анализ материалов

№ 1

2023



ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
Основан в феврале 1965 года
Екатеринбург

№ 1
2023

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

- В.К. Качанов, И.В. Соколов, М.А. Караваев, Д.В. Минаев.** Разработка методов и устройств ультразвукового бесконтактного теневого контроля крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов 3
- А.В. Васильев, Д.Ю. Бирюков, А.Ф. Зацепин.** Ультразвуковой контроль стыковых соединений в пластинах электротехнической стали с использованием волн Лэмба 14
- А.А. Хлыбов, А.Л. Углов.** Об акустическом методе контроля пространственной неоднородности пластической деформации слабо анизотропных ортотропных материалов 25
- А.А. Вьюгинова, А.В. Теплякова, Е.С. Попкова.** Акустические свойства древесины осины (*Populus tremula*), модифицированной ультразвуковым методом 37

Электромагнитные методы

- А.Н. Сташков, А.П. Ничипурок, Е.А. Шапова, Н.В. Гордеев, И.В. Вшивцев, Н.В. Казанцева.** Магнитные свойства циклически деформированной растяжением стали 09Г2С, изготовленной с помощью селективного лазерного сплавления 44

Радиационные методы

- Н.С. Шилкин, В.Б. Минцев, Д.С. Юрьев, А.В. Канцырев, А.В. Богданов, Д.С. Колесников, А.А. Голубев.** Нормализация протонно-радиографических изображений объектов с квазиоднородной массовой толщиной 53

Общие вопросы дефектоскопии

- Чжэн Юа, Му Лунтао, Чжао Цзюньхао.** Методика выявления вмятин на дорожках подшипников качения на основе сверточной нейронной сети с двумерным отображением 63

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО БЕСКОНТАКТНОГО ТЕНЕВОГО КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2023 г. В.К. Качанов^{1,*}, И.В. Соколов¹, М.А. Караваев¹, Д.В. Минаев²

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14

²ФГУП «ФЦДТ «Союз», Россия 140090 Московская область, г. Дзержинский,
ул. Академика Жукова, 42
E-mail: *kachanovvk@mail.ru

Поступила в редакцию 12.08.2022; после доработки 22.10.2022
Принята к публикации 28.10.2022

Показано, что для повышения чувствительности ультразвукового (УЗ) бесконтактного теневого контроля изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) необходимо разрабатывать высокочувствительные низкочастотные широкополосные бесконтактные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП). Рассмотрены способы обеспечения одновременно высокой чувствительности и широкой полосы УЗ бесконтактных ПЭП. Предложены и разработаны УЗ бесконтактные высокочувствительные широкополосные ПЭП, основанные на использовании технологии мозаичных контактных ПЭП, выборе оптимальных согласующих слоев и использования различных вариантов возбуждения излучающих ПЭП. Показано, что с помощью мозаичных низкочастотных широкополосных бесконтактных ПЭП можно обеспечить высокую чувствительность контроля и обеспечить точность измерения акустических характеристик (скорости ультразвука, плотности и пр.) при УЗ низкочастотном теневом бесконтактном контроле крупногабаритных изделий из ПКМ.

Ключевые слова: ультразвуковые низкочастотные широкополосные мозаичные преобразователи, бесконтактный контроль изделий из полимерных материалов.

DOI: 10.31857/S0130308223010013, EDN: BVDIYJ

ВВЕДЕНИЕ

Среди проблем, возникающих при ультразвуковом бесконтактном неразрушающем контроле изделий из полимерных композиционных материалов, основной проблемой является низкая чувствительность контроля, обусловленная высоким частотно-зависимым затуханием ультразвука в полимере, а также ослаблением сигнала как в самих воздушных промежутках, так и при прохождении границы раздела разнородных сред «ПЭП — воздух» и «воздух — изделие» [1]. Особенно сильно эта проблема проявляется при контроле изделий, толщина которых превышает 4–5 см. Поэтому для увеличения чувствительности контроля таких крупногабаритных изделий из ПКМ снижают частоту зондирующего сигнала до $f_0 = 50\text{—}100$ кГц, увеличивают амплитуду зондирующего сигнала до нескольких сотен вольт, используют сложно-модулированные сигналы с последующей фильтрацией принятых сигналов в оптимальном для них фильтре [2—4], а также применяют теневой метод контроля, при котором интегральное ослабление УЗ сигнала существенно меньше, чем при УЗ эхо-импульсном методе. Однако при УЗ бесконтактном теневом контроле возникают дополнительные проблемы, в том числе появляется проблема точного определения времени прохождения сигнала через изделие, по которому возможно определить скорость ультразвука в материале при известной толщине изделия. Проблема определения времени прохождения сигнала возникает из-за того, что в воздушных промежутках происходят многочисленные переотражения УЗ сигнала, маскирующие сквозной информационный сигнал [5]. Для решения этой проблемы следует использовать короткие (широкополосные) зондирующие сигналы. Это означает, что разрабатываемые для УЗ бесконтактного теневого контроля преобразователи должны иметь одновременно как большой коэффициент электроакустического преобразования (ЭАП), так и широкую полосу пропускания.

Разработка таких высокоэффективных и одновременно широкополосных УЗ бесконтактных преобразователей представляет собой достаточно сложную проблему, поэтому за рубежом ее решением занимаются многие исследователи, предлагающие разнообразные способы создания таких ПЭП [6—14]. В данной статье предлагается решение этой проблемы для низкочастотных (НЧ) бесконтактных преобразователей, основанное на использовании составных мозаичных датчиков [15], а также за счет использования преобразователей с различными способами возбуждения УЗ сигнала.

ТРЕБОВАНИЕ К ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫМ ШИРОКОПОЛОСНЫМ БЕСКОНТАКТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМ

При создании УЗ бесконтактных ПЭП возникают проблемы, нехарактерные для контактных датчиков, так как при контроле через воздушный промежуток УЗ сигнал сильно ослабевает из-за большой разницы в значениях акустических сопротивлений воздуха ($Z_{\text{возд}} = 420 \text{ кг/м}^2\text{с}$), пьезокерамики (для PZT-5 $Z_{\text{ПЭП}} = 34 \times 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$) и контролируемого изделия (например, для изделий из оргстекла $Z_{\text{орг}} = 3,1 \times 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$). При таких соотношениях импедансов из излучающего преобразователя (ИП) в воздух поступает лишь 0,01 % энергии, так как коэффициент прохождения ультразвука $T_{\text{ПЭП—возд}}$ через границу сред «ПЭП — воздух» составляет:

$$T_{\text{ПЭП—возд}} = \frac{4Z_{\text{возд}}Z_{\text{ПЭП}}}{(Z_{\text{ПЭП}} + Z_{\text{возд}})^2} \approx \frac{4Z_{\text{возд}}}{Z_{\text{ПЭП}}} = 4,9 \times 10^{-5}. \quad (1)$$

Аналогичное ослабление УЗ сигнала происходит и в приемной части при прохождении ультразвука из изделия в воздух и из воздуха в приемный преобразователь (ПП).

Из (1) очевидно, что для увеличения коэффициента прохождения ультразвука $T_{\text{ПЭП—возд}}$ следует снижать акустическое сопротивление $Z_{\text{ПЭП}}$. С этой целью при изготовлении бесконтактных ПЭП используют пьезокерамику с низким акустическим сопротивлением (например, PMN-РТ керамику [10, 11]). Другой путь — использование ПЭП с изгибными колебаниями [1]. Такие ПЭП имеют низкое акустическое сопротивление, что обеспечивает хорошее согласование ПЭП с воздушной средой. Однако ПЭП с изгибными колебаниями являются узкополосными и не годятся для контроля изделий с помощью широкополосных сигналов.

Еще один способ повышения коэффициента прохождения ультразвука $T_{\text{ПЭП—возд}}$ заключается в использовании так называемых композитных (матричных или составных) преобразователей (рис. 1), изначально обладающих малым импедансом $Z_{\text{ПЭП}}$ [16]. Композитные ПЭП состоят из набора N одинаковых пьезоэлементов (ПЭ) с высотой h_1 и сечением $h_2 \times h_3$, которые в совокупности формируют составной датчик с площадью $H_2 \times H_3$ (рис. 1а). Такие составные ПЭП называ-

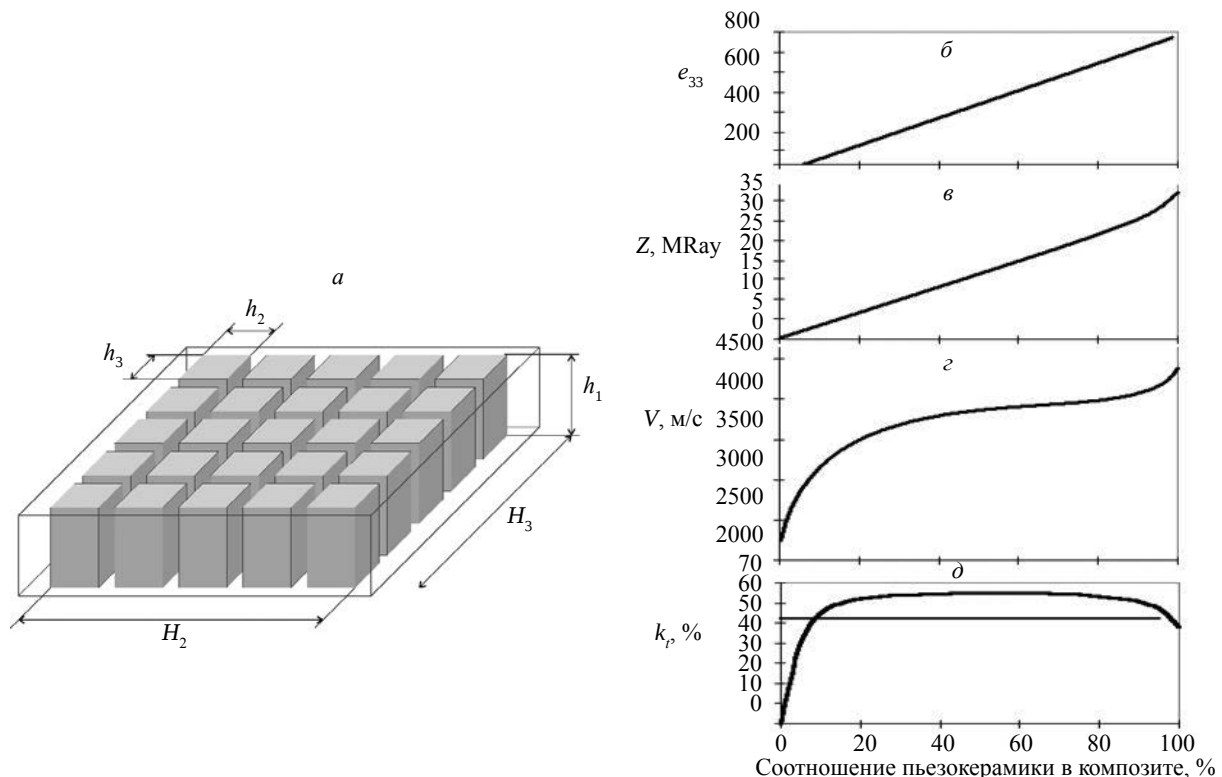


Рис. 1. Композитный ПЭП: общий вид ПЭП (а); акустические характеристики ПЭП в зависимости от процентного содержания пьезокерамики в композитном ПЭП (б, в, з, д).

ют матричными потому, что пространство между ПЭ заполняется связующим полимером (матрицей), роль которой чаще всего играет эпоксидная смола. Композитными их называют по аналогии с конструкционными композиционными материалами, представляющими композицию двух или более ярко выраженных составляющих. При этом каждая часть композиции сохраняет свои индивидуальные качества и привносит их в результирующий композитный материал.

В композитных ПЭП при уменьшении процентного соотношения пьезокерамики и эпоксидной смолы изменяются акустические характеристики: уменьшается диэлектрическая постоянная ϵ_{33} (рис. 1б); уменьшается акустическое сопротивление Z (рис. 1в); уменьшается скорость акустических колебаний (рис. 1г); увеличивается коэффициент электроакустического преобразования k_t (рис. 1д). В результате в композитных ПЭП на 30—40 % увеличивается полоса пропускания без потери в чувствительности датчика, а акустическое сопротивление значительно лучше соответствует акустическому сопротивлению воздуха по сравнению с традиционными преобразователями, в которых используются монолитные ПЭ. Именно по этой причине в основе современных бесконтактных датчиков используют композитные ПЭП [4].

Однако существенно увеличить коэффициент прохождения ультразвука $T_{\text{ПЭП—возд}}$ только за счет снижения акустического сопротивления преобразователя $Z_{\text{ПЭП}}$ не удастся. Поэтому для согласования высокого сопротивления пьезокерамики $Z_{\text{ПЭП}}$ и низкого сопротивления воздуха $Z_{\text{в}}$ используют согласующие слои, располагающиеся между ПЭП и воздушной средой и позволяющие снизить знаменатель в формуле (1). Значение акустического сопротивления слоя $Z_{\text{согл.сл}}$ находится между значениями сопротивлений двух согласуемых сред, а коэффициент пропускания согласующего слоя $T_{\text{ПЭП—возд}}$ зависит как от импедансов $Z_{\text{ПЭП}}$, $Z_{\text{согл.сл}}$, $Z_{\text{возд}}$, так и от длины волны УЗ волны в материале слоя $\lambda_{\text{сл}}$ и толщины согласующего слоя $d_{\text{сл}}$. Величина $T_{\text{ПЭП—возд}}$ достигает своего максимума при толщине слоя в четверть длины УЗ волны ($d_{\text{сл}} = \lambda_{\text{сл}}/4$), распространяющейся в материале слоя, поэтому использование четвертьволнового слоя для увеличения чувствительности эффективно только для узкополосных бесконтактных ПЭП.

В [13, 14] увеличивают количество согласующих слоев таким образом, чтобы обеспечить плавный переход от высокого значения импеданса пьезокерамики к низкому значению импеданса воздуха. При этом толщина суммарного согласующего слоя соответствует четверти длины усредненной УЗ волны в суммарном слое. В этом случае можно увеличить относительную полосу пропускания до $\Delta f_{\text{ПЭП}}/f_0 \approx 50\%$, однако реализовать такой способ удастся только в ПЭП, работающих в области высоких частот.

Нами предложен вариант использования нескольких согласующих слоев в НЧ бесконтактных ПЭП, заключающийся в том, что толщина каждого слоя выбирается не из условия неискаженного

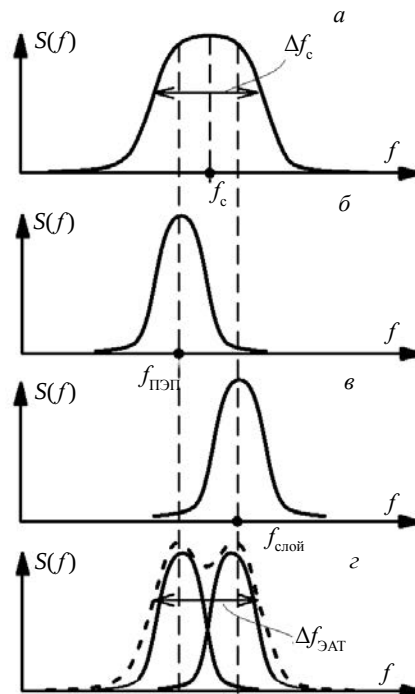


Рис. 2. Увеличение полосы пропускания $\Delta f_{\text{ПЭП—слой}}$ за счет выбора оптимальной толщины слоя.

прохождения сигнала через слой, а из желания расширить полосу пропускания для неискажающего преобразования УЗ широкополосного сигнала с полосой Δf_c . Идея такого расширения полосы пропускания ПЭП до величины $\Delta f_{\text{ПЭП}} = \Delta f_c \sim 1/T_c$ поясняется на рис. 2, где толщина согласующего слоя $d_{\text{слой}}$ выбирается так, чтобы резонансная частота ПЭ $f_{\text{ПЭП}}$ (рис. 2б) и собственная резонансная частота слоя $f_{\text{слой}} \sim 1/d_{\text{слой}}$ (рис. 2в) обеспечивали совместно расширение полосы датчика до значения $\Delta f_{\text{ПЭП}} = \Delta f_{\text{ЭАП}} \sim \Delta f_c$ (рис. 2г).

БЕСКОНТАКТНЫЕ ИЗЛУЧАЮЩИЕ ПЭП С РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЭ

Однако с помощью описанных выше приемов, используемых в современных УЗ бесконтактных ПЭП, не всегда удастся решить проблемы УЗ бесконтактного НЧ контроля крупногабаритных изделий из ПКМ. Поэтому мы использовали для расширения полосы пропускания бесконтактных ПЭП разработанную в МЭИ технологию мозаичных преобразователей, а с целью увеличения чувствительности бесконтактного контроля применяем бесконтактные излучающие преобразователи с разными способами возбуждения УЗ сигнала. В частности, мы предлагаем использовать в качестве излучающего преобразователя ПЭП с повышенной эффективностью ЭАП, основанный на использовании поперечного возбуждения пьезоэлемента.

На рис. 3 показаны два ПЭ, у которых УЗ колебания в направлении оси Z возбуждаются различным образом. На рис. 3а возбуждающее напряжение приложено к верхней и нижней грани ПЭ так, чтобы вектор напряженности электрического поля E , вектор поляризации пьезокерамики и вектор деформации ПЭ на основной моде колебаний были коллинеарны. При таком варианте возбуждения ПЭ возникает продольная акустическая волна с резонансной частотой f_p , обратно пропорциональной «резонансному» размеру $h_p = h_{\text{в1}}$. Величина напряженности электрического поля E также обратно пропорциональна размеру: $E \sim 1/h_{\text{в1}}$.

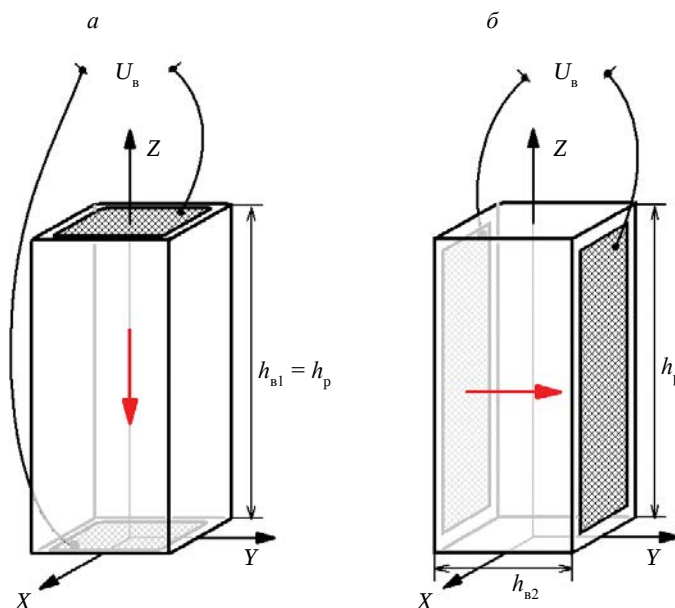


Рис. 3. ПЭ с продольным (а) и поперечным (б) возбуждениями резонансных колебаний.

Другой способ возбуждения колебаний ПЭ в направлении оси Z предполагает, что коллинеарные вектор напряженности электрического поля и вектор поляризации пьезокерамики (рис. 3б) ортогональны вектору деформации ПЭ (направлению излучения УЗ колебания). При таком варианте возбуждения возникает поперечное колебание, при котором резонансная частота f_p также обратно пропорциональна резонансному размеру h_p , а величина напряженности электрического поля E обратно пропорциональна размеру $h_{\text{в2}}$, который меньше величины h_p . Таким образом, при одинаковой амплитуде электрического напряжения напряженность электрического поля E , опреде-

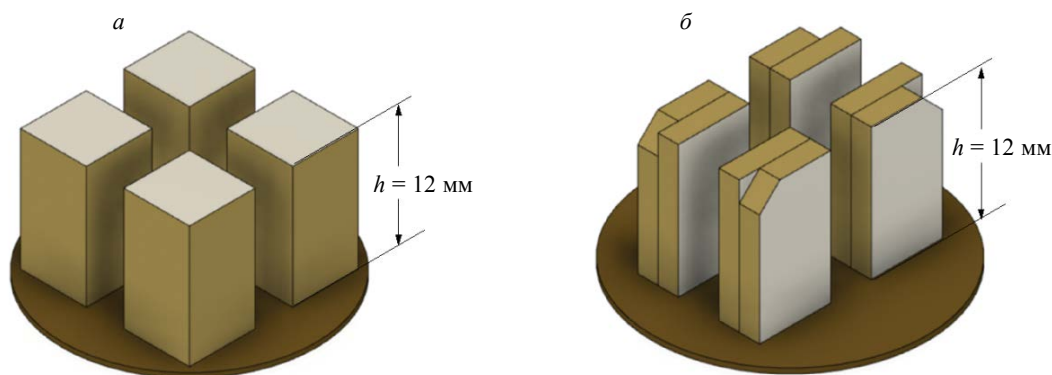


Рис. 4. Составные ПЭП одинаковой высоты $h = 12$ мм: с продольным (а) и с поперечным (б) возбуждениями ПЭ.

ляющая амплитуду акустического сигнала, оказывается значительно больше для ПЭ с поперечным возбуждением УЗ сигнала.

Для сравнения эффективности продольного и поперечного возбуждений излучающего ПЭ были изготовлены из керамики ЦТС-19 две пары составных датчиков (рис. 4). Одна пара (рис. 4а) представляет собой четыре продольно возбуждаемых ПЭ одинакового размера $7 \times 7 \times 12$ мм. Во второй паре (рис. 4б) используются не стержневые продольно возбуждаемые ПЭ, а установленные на ребро пьезопластины с поперечным возбуждением сигнала.

При этом для того, чтобы поперечный размер пластины был сопоставим с размером стержневого ПЭ, используются биморфные пластины (представляющие собой соединение из двух одинаковых ПЭ толщиной 2 мм) с одинаковой высотой 12 мм и с поперечным размером 4×7 мм. В обоих датчиках все четыре составных элемента закреплены на общем основании, а пространство между ними заполнено воздухом.

Эксперимент по сравнению эффективности датчиков проводился для трех комбинаций включения датчиков с помощью схемы, в которой контактные ИП и ПП располагались на противоположных гранях ОК из оргстекла (рис. 5).

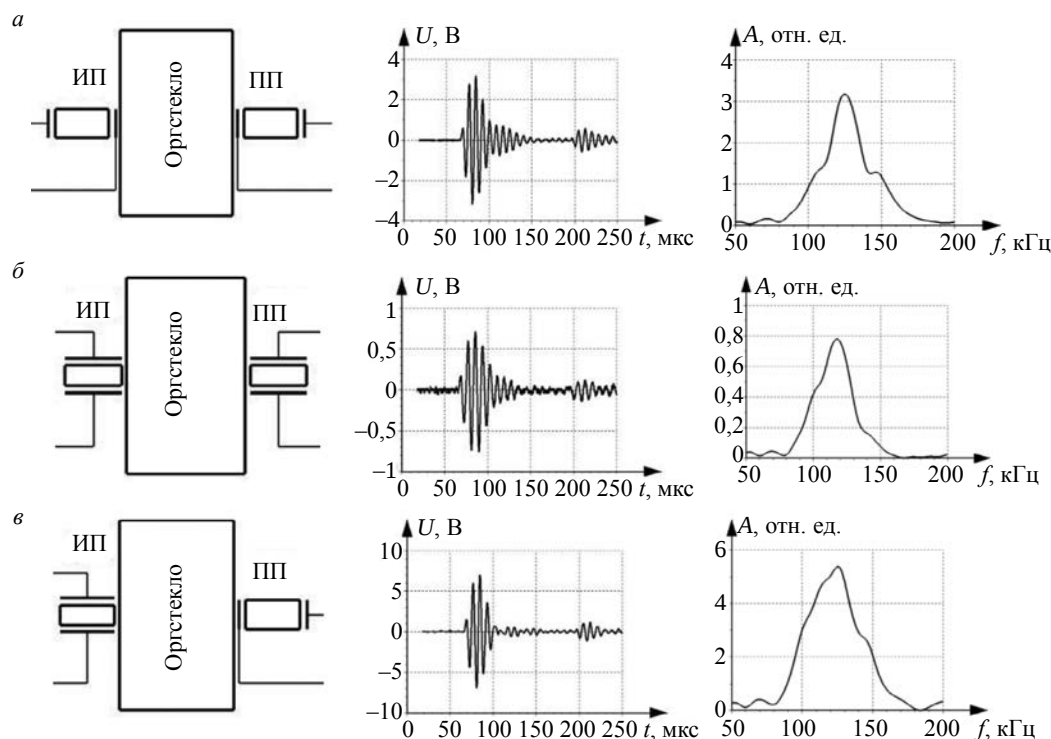


Рис. 5. Импульсные и частотные характеристики для трех схем: ИП и ПП с продольным пьезоэффектом (а); ИП и ПП с поперечным пьезоэффектом (б); ИП с поперечным пьезоэффектом, ПП с продольным пьезоэффектом (в).

Результаты измерения коэффициентов электроакустического преобразования всего электроакустического тракта (ЭАТ) показывают, что для схемы, в которой для излучения и для приема использовались ПЭП с поперечным возбуждением (см. рис. 5б), коэффициент ЭАП в несколько раз меньше, чем для схемы, в которой для излучения и для приема использовались составные ПЭП с продольным возбуждением (см. рис. 5а). Наилучший же результат достигается в схеме, в которой на излучении используется составной ПЭП с поперечным возбуждением, а на приеме используется составной ПЭП с продольным возбуждением (см. рис. 5в).

Рассмотренный выше способ увеличения коэффициента ЭАП при УЗ теновом иммерсионном контроле наблюдается и при УЗ бесконтактном контроле. В случае бесконтактного контроля к ИП на основе ПЭ с поперечным возбуждением и к ПП на основе ПЭ с продольным возбуждением были приклеены по два согласующих слоя, резонансные частоты которых позволили расширить полосу пропускания ЭАТ. При этом ширина полосы пропускания ПЭП определялась как шириной полосы пропускания согласующих слоев, так и полосой пропускания собственно композитного преобразователя, состоящего из ПЭ одинаковой высоты (см. рис. 4).

УЗ БЕСКОНТАКТНЫЕ МОЗАИЧНЫЕ ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ПЭП

Для дальнейшего увеличения полосы пропускания НЧ бесконтактных ПЭП мы использовали составные мозаичные преобразователи, в которых используются разновысокие пьезоэлементы. Высокочувствительные и одновременно широкополосные мозаичные преобразователи были разработаны в МЭИ в 1970-е годы для УЗ НЧ контактного контроля изделий из ПКМ [15]. Такие ПЭП были названы мозаичными потому, что с их помощью можно синтезировать датчики для различных задач УЗ НК любой конфигурации подобно тому, как с помощью мозаичной смальты художник формирует желаемое мозаичное изображение. В отличие от композитного ПЭП, у которого расширение полосы происходит за счет выбора оптимального сочетания материалов пьезокерамики и полимерной матрицы, в мозаичных ПЭП расширение полосы пропускания происходит за счет набора парциальных АЧХ высокодобротных недемпфированных разновысоких ПЭ с частотами $f_1, f_2, f_3 \dots$.

Использование технологии мозаики при изготовлении бесконтактных ПЭП позволяет существенно расширить полосу пропускания датчика без снижения его чувствительности. Однако полностью использовать все возможности мозаики для расширения полосы пропускания не удается из-за того, что бесконтактные ПЭП представляют собой сочетание собственно ПЭП и набора согласующих слоев, полоса пропускания которых ограничена. Вместе с тем, в [10] была разработана технология изготовления составных ПЭП, при которой на каждый ПЭ наклеивается четвертьволновой согласующий слой. С использованием этой технологии нами был изготовлен УЗ широкополосный бесконтактный мозаичный ПЭП, в котором на каждый элемент мозаики был наклеен свой собственный четвертьволновой слой из твердого пенопласта, толщина которого рассчитывалась для каждого ПЭ индивидуально. Относительная полоса пропускания такого бесконтактного мозаичного ПЭП с рабочей частотой $f_0 \sim 100$ кГц, состоящего из шести частотных групп (шести различных по высоте ПЭ с соответствующими толщинами согласующих слоев), достигала $\Delta f_{\text{ПЭП}}/f_0 \approx 40$ %. Однако изготовление таких многоэлементных мозаичных бесконтактных ПЭП достаточно трудоемко, поэтому оказалось, что более целесообразно изготавливать мозаичные ПЭП с ограниченным числом разновысоких ПЭ. При этом использовать единые (цельные) согласующие слои, охватывающие рабочие поверхности всех ПЭ, благодаря чему увеличивается площадь суммарного слоя.

Еще одно достоинство мозаичных ПЭП заключается в возможности синтезировать среднюю частоту $f_{\text{ср}}$ и оптимальную полосу пропускания преобразователя, что иллюстрируется на примере трех бесконтактных ПЭП с апертурой 30 мм, состоящих из двух частотных групп разновысоких ПЭ (рис. 6). Все три ПЭП состоят из девяти стержневых ПЭ с квадратным сечением 6×6 мм. Для согласования ПЭ с воздушной средой используются два слоя. Первый выполнен из эпоксидной смолы с микросферами, а второй слой — из пенопласта ПС-1-100. Широкая полоса датчиков обеспечивается за счет использования ПЭ двух разных высот, имеющих разные резонансные частоты, а также за счет согласующих слоев, резонансные частоты которых отличны от резонансных частот ПЭ. На рис. 6а, в, д показаны топологии расположения девяти ПЭ, состоящих из ПЭ высотой 14 и 11 мм (а), 13 и 12 мм (в) и 12 и 11 мм (д). Соответствующие АЧХ датчиков показаны на рис. 6б, г, е. Средняя частота датчика, состоящего из ПЭ высотой 14 и 11 мм, равна $f_{\text{ср}} = 105$ кГц. Полоса пропускания $\Delta f \approx 25$ кГц; $K_{\text{УУ}} = -54$ дБ. Средняя частота датчика, состоящего из ПЭ высотой 13 и 12 мм, равна $f_{\text{ср}} = 115$ кГц; $\Delta f \approx 35$ кГц; $K_{\text{УУ}} = -40$ дБ. Средняя частота датчика, состоящего из ПЭ высотой 11 и 12 мм, равна $f_{\text{ср}} = 120$ кГц; $\Delta f \approx 35$ кГц; $K_{\text{УУ}} = -52$ дБ.

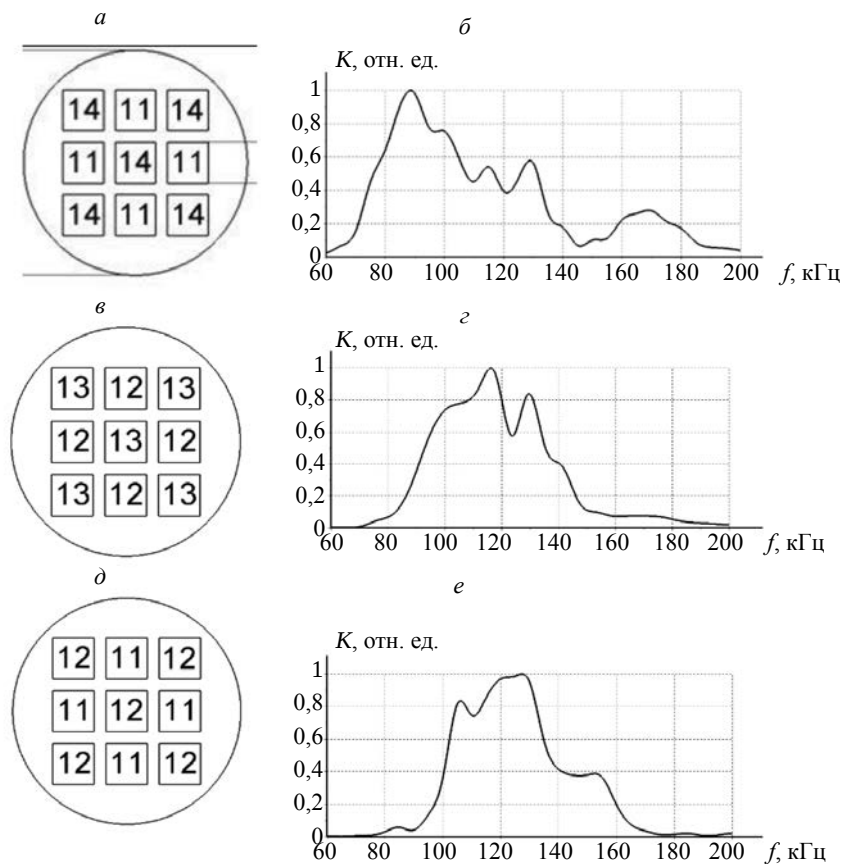


Рис. 6. Топология (а, в, д) и АЧХ (б, з, е) бесконтактных ПЭП, состоящих из 9 ПЭ с различными высотами ПЭ: 11 и 14 мм; 12 и 13 мм; 11 и 12 мм.

Из рис. 6 видно, что с помощью технологии мозаики возможно синтезировать оптимальную АЧХ и удастся подбирать среднюю частоту (в данном примере средняя частота находится в диапазоне от 105 до 120 кГц).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО КОНТРОЛЮ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ С ПОМОЩЬЮ УЗ БЕСКОНТАКТНЫХ МОЗАИЧНЫХ ПЭП

Разработанные УЗ НЧ мозаичные бесконтактные широкополосные ПЭП использовались в экспериментах по УЗ теневого бесконтактному контролю изделий, выполненных из полимерного материала со следующими характеристиками: скорость звука $C \approx 1380$ м/с; плотность $\rho \approx 1300$ кг/м³; акустическое сопротивление $Z \approx 1,8 \cdot 10^6$ кг/(м²с). Такие изделия в производственных условиях контролируются с помощью непрерывного (узкополосного) гармонического сигнала с частотой $f_0 \approx 80$ кГц, при использовании которого наличие дефекта устанавливается по изменению амплитуды прошедшего через изделие сигнала, а возможное изменение акустических характеристик (скорости ультразвука, плотности материала и др.) при этом не определяется. В наших экспериментах выявлялась возможность измерения акустических характеристик полимера по скорости звука в ПКМ, которая определялась по времени прихода на приемный преобразователь прошедшего через изделие короткого зондирующего импульса в тестовом изделии с заранее известной толщиной.

С этой целью было изготовлено тестовое изделие из ПКМ размером 500×250×40 мм, в котором был заложен искусственный дефект — на поверхности ОК было сделано углубление на 1 мм в виде прямоугольника с габаритами 50×100 мм. В процессе контроля определялась возможность выявления разницы во времени прихода прошедшего через тестовое изделие УЗ сигнала в дефектном месте (в котором толщина составляла 39 мм) и в бездефектном месте (где толщина составляла 40 мм).

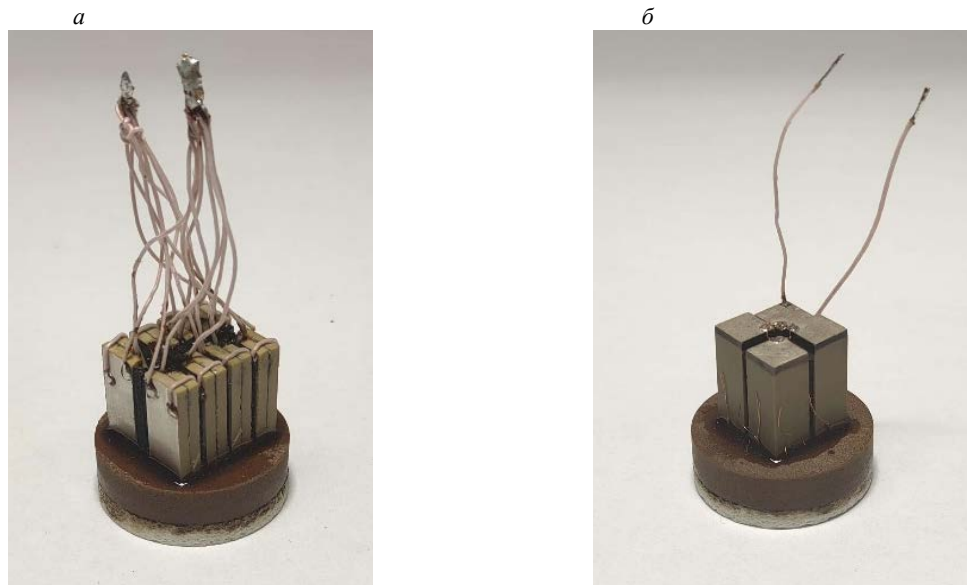


Рис. 7. Бесконтактные мозаичные НЧ ПЭП без корпуса с едиными согласующими слоями:
а — ИП; б — ПП.

Для того, чтобы бесконтактным теневым способом определить столь малую разницу во времени прихода сигнала при такой низкой частоте, следует использовать короткие сигналы. С этой целью были изготовлены УЗ низкочастотные бесконтактные мозаичные ПЭП с поперечным возбуждением и с продольным возбуждением УЗ сигнала (рис. 7) с одинаковыми частотными характеристиками ($f_0 \approx 80$ кГц, $\Delta f_{\text{ПЭП}}/f_0 \approx 25\%$), позволяющие осуществлять неискажающее преобразование сигнала длительностью 3 периода несущей частоты ($T_c = 3T_0$). Апертура обоих датчиков составляла 30 мм. Бесконтактный ПЭП с поперечным возбуждением (рис. 7а) использовался в экспериментах в качестве излучающего преобразователя, а ПЭП с продольным возбуждением (рис. 7б) применялся и как приемный, и как излучающий преобразователь.

В обоих датчиках использовались две группы разноразмерных ПЭ из керамики ЦТС-19. В ПЭП с продольным возбуждением применяли 4 пьезостолбика квадратного сечения 7×7 мм — два ПЭ высотой 17 мм и два ПЭ высотой 18 мм. Резонансная частота, соответствующая размеру 7 мм, находится выше 150 кГц и поэтому не оказывает влияния на частотную характеристику ПЭП, формируемую совокупностью резонансных частот, обусловленных размерами 17 и 18 мм. Для ПЭП с поперечным возбуждением применялись биморфные пьезопластины из керамики ЦТС-19 толщиной 2×2 мм и шириной 7 мм. Высота пьезопластин, определяющая основной резонанс, составляла 16 и 17 мм. Относительно небольшая толщина биморфного ПЭ (2×2 мм) выбрана, исходя из желания повысить величину напряженности электрического поля: при использовании ПЭ с большей толщиной напряженность поля будет уменьшаться и поэтому будет снижаться коэффициент ЭАП. Первый согласующий слой изготовлен из низковязкой эпоксидной смолы с микро-сферами. Второй согласующий слой изготовлен из плотного пенопласта. Склеивание согласующих слоев между собой осуществлялось с помощью высоковязкой эпоксидной смолы.

В [5] было показано, что использовать короткие зондирующие импульсы при УЗ теневом бесконтактном режиме следует в том числе и для того, чтобы можно было однозначно определить прошедший через изделие сигнал на фоне многочисленных переотражений в воздушных промежутках. Однако и при столь коротком импульсе длительностью $T_c = 3T_0$ на ПП кроме первого сквозного сигнала приходят многочисленные сигналы, переотраженные в промежутках между датчиками и ОК, а также сигналы, огибающие ОК по воздуху. На рис. 8 показан А-скан, полученный при УЗ бесконтактном контроле тестового изделия из ПКМ толщиной 40 мм. Протяженность воздушных промежутков между ИП и ОК, а также между ОК и ПП, составляла 40 мм. Первым в момент времени ≈ 240 мкс на ПП приходит сквозной сигнал, не испытывающий переотражений в воздушных промежутках. Затем в момент времени ≈ 410 мкс приходят сигналы, переотраженные в воздушных промежутках. Далее (≈ 1100 мкс) приходят многочисленные сигналы большой амплитуды, огибающие ОК по воздуху. В [5] было показано, что информативным сигналом явля-

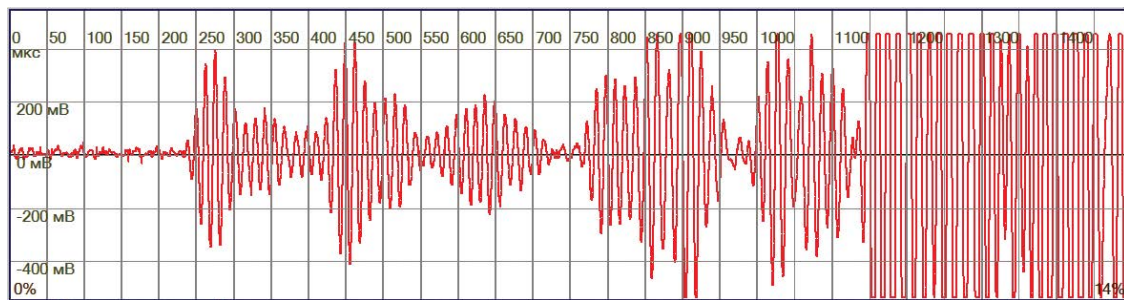


Рис. 8. А-скан, полученный на исследуемом тестовом изделии из ПКМ толщиной 40 мм.

ется только сквозной сигнал, поэтому в последующих экспериментах для его выделения использовалось стробирование.

В результате эксперимента по контролю тестового изделия из ПКМ при использовании короткого зондирующего импульса $T_c = 3T_0$ с частотой 80 кГц и с амплитудой 300 В в дефектном месте (углублении на 1 мм) происходит смещение сигнала на 2 мкс. При длительности одного периода 12,5 мкс достаточно сложно определить по А-скану такую небольшую разницу во времени прихода на ПП прошедшего через ЭАТ УЗ импульса. Поэтому на следующем этапе различие в толщине 1 мм определялось с помощью двумерных томограмм изделия (В-сканов), которые были получены посредством сканирования ИП и ПП вдоль изделия с помощью установки автоматизированного контроля, созданной на базе стенда TRITON 1000 фирмы TechTest (Испания).

На рис. 9а показана томограмма, полученная в результате сканирования тестового изделия при использовании короткого импульса ($T_c = 3T_0$) с частотой 80 кГц и с амплитудой 300 В при использовании в качестве излучающего преобразователя бесконтактного ПЭП с поперечным возбуждением сигнала. Если по А-скану достаточно сложно определить время прихода импульса, то на В-скане наблюдается четкое различие во времени прихода УЗ сигналов, прошедших через бездефектные и дефектные места. В дефектной области толщина изделия уменьшается на 1 мм, однако из-за того, что скорость звука в воздухе ($C \approx 300$ м/с) существенно ниже скорости звука в полимере, сквозной сигнал, прошедший через дефектное место, приходит позже, несмотря на уменьшенную толщину ОК. Поэтому на участках В-скана, соответствующим дефектному месту, происходит смещение линий на более поздние временные значения по сравнению с участками, соответствующими бездефектным местам.

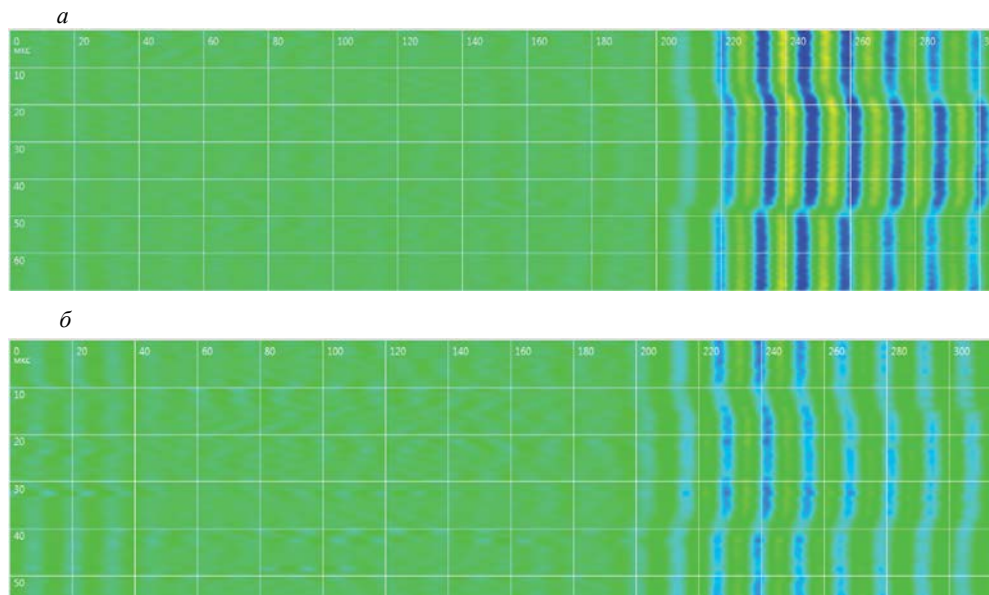


Рис. 9. Результаты УЗ бесконтактного контроля тестового изделия коротким импульсом с амплитудой 300 В: В-скан при использовании ИП с поперечным возбуждением сигнала (а); В-скан при использовании ИП с продольным возбуждением сигнала (б). В обоих случаях в качестве ПП использовался ПЭП с продольным возбуждением сигнала.

Таким образом, результаты эксперимента показали, что при бесконтактном теневом контроле ОК протяженностью ~ 40 мм возможно зафиксировать различие в толщине изделия в 1 мм при использовании короткого УЗ зондирующего сигнала с относительно низкой рабочей частотой $f_0 \approx 80$ кГц. Такая точность измерения толщины позволяет определять различие в скорости ультразвука в данном изделии из ПКМ с точностью до $\Delta C = 100$ м/с.

На рис. 9б приведен В-скан, полученный при контроле тестового ОК при использовании в качестве излучающего преобразователя ПЭП с продольным возбуждением сигнала, откуда видно, что изображение изделия на томограмме недостаточно четкое (см. рис. 9б). В результате, сравнительные результаты экспериментов, полученные с помощью различных излучающих преобразователей (см. рис. 9а и б), показывают, что мозаичный ПЭП, состоящий из набора разновысоких ПЭ с поперечным возбуждением сигнала, обладает большей чувствительностью в режиме излучения по сравнению с ПЭП с продольным возбуждением сигнала.

ВЫВОДЫ

Анализ проблем УЗ бесконтактного теневого контроля крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов показал, что для повышения одновременно чувствительности бесконтактного контроля и точности измерений акустических характеристик изделий необходимо использовать высокочувствительные широкополосные бесконтактные преобразователи. Показано, что повысить чувствительность и одновременно расширить полосу пропускания УЗ бесконтактных НЧ ПЭП возможно за счет использования мозаичных преобразователей с едиными (цельными) согласующими слоями. Для повышения коэффициента электроакустического преобразования излучающего бесконтактного преобразователя следует использовать мозаичные ПЭП с поперечным возбуждением УЗ сигнала.

Приведены результаты УЗ бесконтактного теневого контроля тестового изделия из ПКМ короткими зондирующими сигналами. Показано, что мозаичный ПЭП, состоящий из набора разновысоких ПЭ с поперечным возбуждением сигнала, обладает большей чувствительностью в режиме излучения по сравнению с мозаичным ПЭП с продольным возбуждением сигнала.

Показано, что при УЗ бесконтактном теневом контроле крупногабаритных изделий из ПКМ возможно установить различие во времени прихода УЗ низкочастотного сигнала на участках изделия, толщина которых различается на 1 мм, что позволяет обеспечить высокую точность измерения толщины и иных акустических характеристик крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль / Справочник. В 7 т. Под общей ред. В.В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
2. Li H., Zhou Z. Air-Coupled Ultrasonic Signal Processing Method for Detection of Lamination Defects in Molded Composites // Journal of Nondestructive Evaluation. 2017. V. 36, 45. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0425-5>
3. Tang J., Zhu W., Qiu X., Song A., Xiang Y., Xuan F. Non-contact phase coded excitation of ultrasonic Lamb wave for blind hole inspection // Ultrasonics. 2021. V. 119.
4. Hutchins D., Watson R., Davis L., Akanji L., Billson D., Burrascano P., Laureti S., Ricci M. Ultrasonic Propagation in Highly Attenuating Insulation Materials // Sensors. 2020. V. 20.
5. Kachanov V.K., Sokolov I.V., Karavaev M.A., Kontsov R.V. Selecting Optimum Parameters of Ultrasonic Noncontact Shadow Method for Testing Products Made of Polymer Composite Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 10. P. 831—842. [Качанов В.К., Соколов И.В., Караваев М.А., Концов Р.В. Выбор оптимальных параметров ультразвукового теневого бесконтактного способа контроля изделий из полимерных композитных материалов // Дефектоскопия. 2020. № 10. С. 60—70.]
6. Wang X., Wu H., Zhang X., Zhang D., Gong X., Zhang D. Investigation of a multi-element focused air-coupled transducer // AIP Advances 8. 2018. V. 8. Is. 9.
7. Asokkumar A., Jasuniene E., Raišutis R., Kažys R. Comparison of ultrasonic non-contact air-coupled techniques for characterization of impact-type defects in pultruded GFRP composites // Materials. 2021. V. 14. Is. 5.
8. Patankar V.H., Chaurasia R., Nair P. Design and Development of Instrumentation for Air-Coupled Ultrasonics / Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation // NDE. 2009. P. 185—189.
9. Alvarez-Arenas T., Shrout T., Zhang S., Lee H. J. Air-coupled transducers based on 1-3 connectivity single crystal piezocomposites / 2012 International Ultrasonics Symposium. USA, 2012. P. 2230—2233.

10. *Kažys R., Šliteris R., Šeštokė J., Vladiškauskas A.* Air-coupled ultrasonic transducers based on an application of the PMN32%PT single crystals // *Ferroelectrics*. 2015. V. 480. Is. 1. P. 85—91.
 11. *Kažys R.J., Šliteris R., Šeštokė J.* Application of PMN-32PT piezoelectric crystals for novel air-coupled ultrasonic transducers // *Physics Procedia*. 2015. V. 70. P. 896—900.
 12. *Eschler E.* Air-coupled Ultrasound Transducers. Wiki of the Chair of Non-destructive Testing. 2016. <https://wiki.tum.de/display/zfp/Air-coupled+Ultrasound+Transducers>.
 13. *Bhardwaj A.M.* Application of Non-Contact Ultrasound for In-Line Inspection and Material Qualification / *Manufacturing 4 the Future conference*, 2014, Hartford, CT.
 14. *Bhardwaj A., Patel K., Bhardwaj M., Fetfatsidis K.* Application of advanced non-contact ultrasound for composite material qualification // *Materials Science*. 2014. URL: http://ultrangroup.com/wp-content/uploads/CAMX_SAMPE-Paper-The-Ultran-Group-Submitted.pdf
 15. *Качанов В.К., Соколов И.В., Конов М.М., Сеницын А.А.* Сравнение свойств композитных и мозаичных пьезопреобразователей для УЗ контроля изделий с большим уровнем затухания УЗ сигналов // *Дефектоскопия*. 2011. № 8. С. 39—53.
 16. *Splitt G.* Pesocomposite Transducers — a Milestone for Ultrasonic Testing / *7-th European conference on NDT*. Copenhagen, 1998. V. 3. P. 2965—2970.
-

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПЛАСТИНАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛН ЛЭМБА

© 2023 г. А.В. Васильев¹, Д.Ю. Бирюков^{1,2,*}, А.Ф. Зацепин^{1,2}

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

²Уральский государственный университет путей сообщения,
Россия 620034 Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

*E-mail: bir-70@list.ru

Поступила в редакцию 01.11.2022; после доработки 30.11.2022

Принята к публикации 02.12.2022

С использованием волн Лэмба изучено влияние качества сварки тонких стальных листов на физико-механические свойства электротехнической стали. Показано, что волны Лэмба, возбужденные в нулевой симметричной моде, являются эффективным источником информации о состоянии материала как в сварном соединении пластин, так и в области основного металла, не затронутого термическими воздействиями. Определены маркеры качества сварных соединений. Установлено, что наиболее информативными параметрами являются фазовая скорость волны Лэмба и ее амплитуда. На основе измерений скоростей обнаружена макроскопическая анизотропия акустических свойств материала. Предполагается, что происхождение указанной анизотропии обусловлено остаточными напряжениями, возникающими в технологическом процессе обработки стальных листов. Полученные результаты представляют интерес для специализированного контроля качества стыковых швов в тонких стальных листах.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, электротехническая сталь, тонкие листы, сварные соединения, волны Лэмба, амплитуда эхосигналов, скорость ультразвука, акустическая анизотропия.

DOI: 10.31857/S0130308223010025, **EDN:** BVDTLA

ВВЕДЕНИЕ

Электротехническая или трансформаторная сталь является одним из важнейших материалов для производства частей трансформаторов, реле, электродвигателей, звонков. Основной ее особенностью являются сниженные потери тока на перемагничивание, которые достигаются высокой магнитной проводимостью. Указанное свойство обеспечивается повышенным содержанием кремния в трансформаторных сплавах, которое может достигать нескольких процентов от общей массы изделия [1, 2].

Особенность применения электротехнической стали в виде тонких пластин определяет способ ее производства и хранения. На предприятиях Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК) изготавливаются листы электротехнической стали толщиной 0,7 мм и шириной 1,5 м, которые свариваются между собой в длинную ленту. При этом технологические процессы сварки во многом влияют на качество и состояние сварных швов [3].

При изготовлении сварного соединения образуются зоны термических изменений (ЗТИ), структура которых существенно отличается от структуры основного материала. В ЗТИ наблюдается неоднородность фазового состава, градиент физических и механических свойств, реализуется сложное напряженно-деформированное состояние [3, 4]. Отметим также, что сварное соединение из электротехнической стали, в отличие от низкоуглеродистых сталей, может менять магнитные свойства в процессе как силового [5, 6], так и теплового воздействия [7, 8].

Как правило, ЗТИ является наиболее слабой зоной в сварном соединении, где зачастую и происходит разрушение конструкции. В частности, наблюдались случаи разрыва сварного шва под действием веса стальной ленты. В этой связи на предприятиях НЛМК достаточно актуально стоит вопрос контроля качества сварных соединений в тонких листах электротехнической стали. Разработка эффективного метода контроля позволит также собрать информацию о состоянии сварных швов при разных условиях сварки и в будущем решить вопрос оптимизации данного процесса, что является непростой комплексной задачей [9].

Оценку изменения магнитных свойств, связанного с фазовыми превращениями в электротехнических сталях, как правило, проводят с использованием вихретокового неразрушающего контроля [10, 11]. Следует отметить, что на результаты вихретокового контроля могут оказать влияние различные внешние факторы. Более того, на реальном объекте структура ЗТИ будет зависеть от специфики изготовления сварного шва (скорость сварки, температура, используемые электроды,

скорость остывания, толщина пластин и др.) [3, 9]. Учет влияния этих факторов особенно актуален для электротехнических сталей. Из-за влияния внешних факторов при изготовлении сварного шва в ЗТИ указанных материалов может содержаться различное количество кремниевой фазы. Объемная доля этой фазы влияет на магнитные и электрические свойства электротехнической стали [1, 2] и, как следствие, на показания вихретокового прибора.

В этой связи для анализа состояния материала более удобными и эффективными являются акустические методы благодаря их большой проникающей способности, безопасности, возможности измерений при одностороннем доступе к изделию и высокой информативности, позволяющей выявлять не только несплошности, но и любые искажения материала, приводящие к изменениям его упругих, прочностных и структурных свойств [12—18]. Упругие и прочностные свойства легко контролировать по скорости звуковых волн, распространяющихся в материале [14—18]. А контроль структуры металла: изменение размера зерен, возникновение микропор и микродефектов, как правило, сказывается на изменении амплитуды звуковых сигналов и их спектра [12—14]. Таким образом, акустический контроль наилучшим образом подходит для анализа как дефектности сварного шва, так и физико-механических характеристик основного металла.

Вместе с тем при контроле листов акустическими методами возникают свои сложности, связанные с возбуждением и приемом продольных и поперечных объемных волн в образцах малой толщины. Тем не менее для прозвучивания тонких пластин могут достаточно эффективно применяться головные волны, распространяющиеся в приповерхностных слоях материалов [19], рэлеевские волны, охватывающие тонкий поверхностный слой [17, 20], и волны Лэмба [21—24]. Волны Лэмба в отличие от головных и рэлеевских, распространяясь через всю толщину листа, более чувствительны к искажениям в его объеме и способны преодолевать большие расстояния благодаря волноводному эффекту [25—27].

Поэтому целью настоящей работы является контроль волнами Лэмба качества материала тонких стальных пластин, их дефектности, упругих и структурных свойств как в ЗТИ стыковых сварных швов, так и за ее пределами. Для достижения указанной цели необходимо определить оптимальные параметры возбуждения волн Лэмба и реализовать методику оценки качества сварных соединений электротехнической стали.

МЕТОДИКА И ОБРАЗЦЫ

Характеристика образцов. В настоящей работе исследовали образцы тонких стальных пластин электротехнической стали с различным качеством сварных соединений (рис. 1), предоставленные службой контроля НЛМК. Изделия представляли собой пластины толщиной 0,7 мм и размерами: 93×99 мм для образца А и 93×104 мм для образца Б. Как видно из рис. 1, образец Б отличается широкой зоной термических изменений и деформации пластины. Данное соединение было классифицировано производителем как некачественное, не удовлетворяющее нормам технической документации. При этом образец А рассматривался как эталонный образец приемлемого качества.

Возбуждение волн Лэмба. Для определения угла призмы и рабочей частоты преобразователя была рассчитана фазовая скорость симметричной волны Лэмба S_0 в стали по формуле [25, 26]:

$$C_{ph} = C_l \sqrt{\frac{1-2\mu}{(1-\mu)^2}}, \quad (1)$$

где C_l — скорость продольной волны в стали; μ — коэффициент Пуассона для стали.

Выражение (1) определяет величину фазовой скорости моды s_0 волны Лэмба при малых толщинах пластин и частотах ультразвука в диапазоне $f \cdot h < 1$. На рис. 2 приведены дисперсионные зависимости нулевых мод волн Лэмба в листе электротехнической стали толщиной 0,7 мм, рассчитанные с использованием уравнений Рэлея—Лэмба [25, 26].

Как видно из рис. 2, диапазону $f \cdot h < 1$ соответствует участок дисперсионной кривой, на котором величина фазовой скорости моды s_0 сохраняет постоянные значения. В этом случае в тонких пластинах возбуждаются только две моды волн Лэмба нулевого порядка s_0 и a_0 , которые представляют собой продольную и изгибную волны соответственно в пластине [21—27]. Зная скорость продольной волны в стали $C_l = 5940$ м/с и коэффициент Пуассона $\mu = 0,29$ [27], получаем значение фазовой скорости моды s_0 волны Лэмба $C_{ph} = 5420$ м/с.

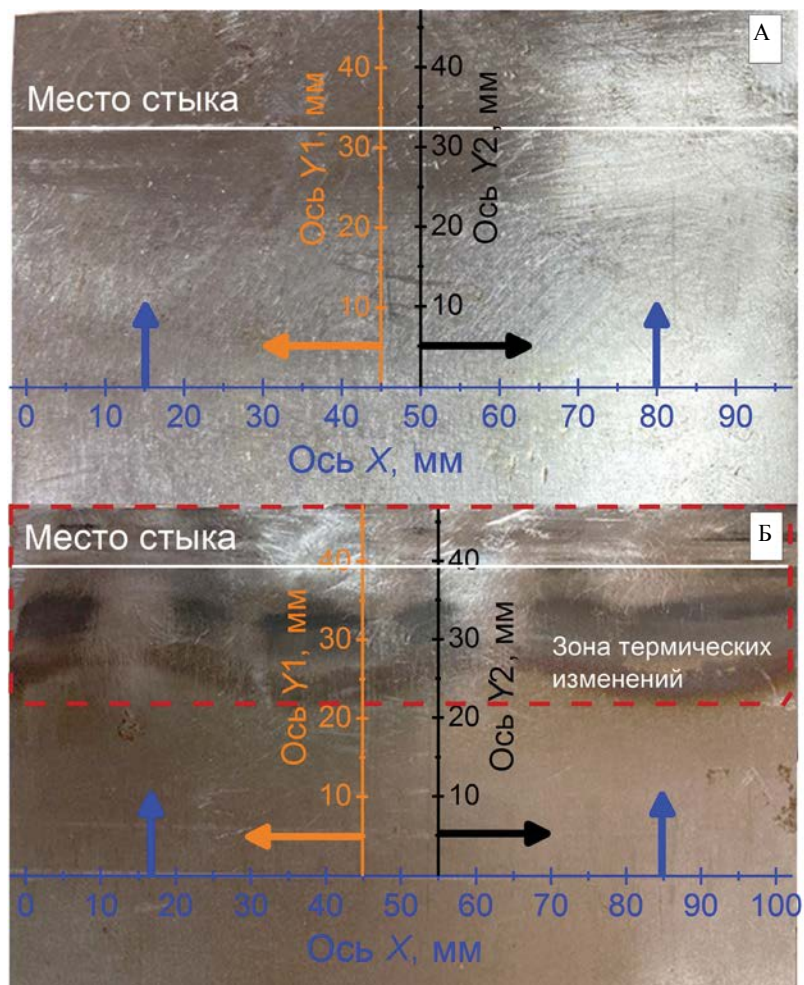


Рис. 1. Образцы тонких пластин электротехнической стали: образец А (сверху) с качественным и Б (снизу) с дефектным сварным соединением. Стрелками указано направление распространения волн Лэмба, штриховой линией — зона термических изменений, белой сплошной линией — положение стыка сварного шва.

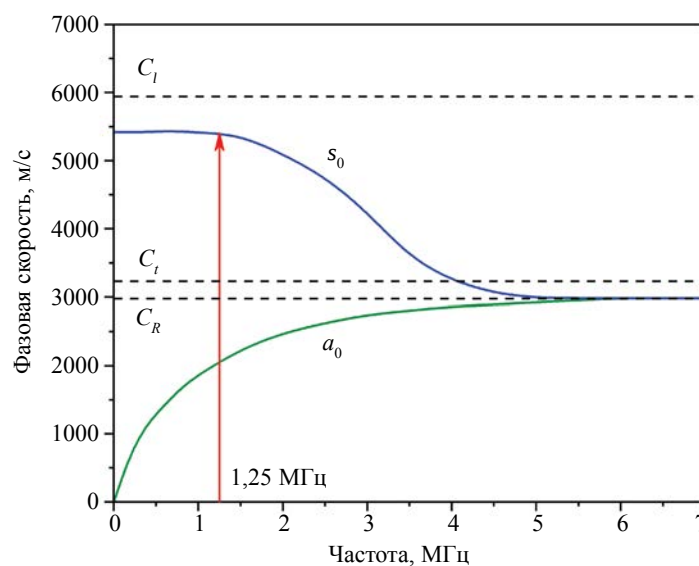


Рис. 2. Дисперсионные кривые нулевых мод симметричной s_0 и асимметричной a_0 волн Лэмба, рассчитанные для пластины электротехнической стали толщиной 0,7 мм. Штриховыми линиями показаны значения скоростей продольной C_p , поперечной C_t и рэлеевской волн C_R .

Рабочая частота $f = 1,25$ МГц была выбрана из ряда рекомендованных значений ГОСТ Р 55725—2013. Произведение рабочей частоты f на толщину пластины h не превышает 1 МГц·мм (см. рис. 2), что удовлетворяет условию возбуждения нулевой моды s_0 волны Лэмба, скорость которой определяется выражением (1).

Угол призмы наклонного преобразователя для возбуждения волны Лэмба определяется по закону Снеллиуса [26, 27]:

$$\frac{1}{C_{ph}} = \frac{\sin \beta}{C_{np}}, \quad (2)$$

где C_{ph} — фазовая скорость волны Лэмба; C_{np} — скорость продольной волны в призме; β — угол призмы преобразователя.

Подставляя в выражение (2) скорость продольной волны в призме из оргстекла $C_{np} = 2700$ м/с и величину фазовой скорости, определяем угол призмы $\beta = 30^\circ$. Поскольку угол призмы β больше первого критического угла в стали (27° [27]), можно заключить, что в объем пластины проходят сдвиговые волны с углом ввода $\gamma = 37^\circ$, которые тем не менее создают симметричную моду s_0 волны Лэмба. Величина фазовой скорости данной волны определяется выражением [26, 27]:

$$C_{ph} = \frac{C_t}{\sin \gamma} \quad (3)$$

и совпадает со значениями, полученными из выражения (1). Таким образом, оптимальным преобразователем для возбуждения нулевой симметричной моды волны Лэмба в стальных пластинах толщиной 0,7 мм по данным расчетов является наклонный ПЭП с рабочей частотой $f = 1,25$ МГц, углом призмы $\beta = 30^\circ$, стрелой преобразователя 13 мм и временем задержки волны в призме 10,2 мкс.

Акустические измерения. Для возбуждения волн Лэмба был использован ультразвуковой дефектоскоп Olympus EPOCH 1000 и эхометод акустических измерений. Перед проведением контроля было установлено соответствие условий контроля нормативно-техническим требованиям РД РОСЭК-001-96:

температура окружающей среды не выходит за рамки диапазона $(-10) \dots (+50)$ °С;

зоны перемещения преобразователя должны быть очищены от брызг металла, крупных неровностей и грязи по всей длине контролируемого участка;

после подготовки зоны контроля с помощью механической обработки шероховатость поверхности не превышает $R_z = 40$ мкм.

Контролируемые образцы размечались на одинаковом расстоянии от края пластины вдоль и поперек сварного шва с шагом в 5 мм для последующего сканирования, как показано на рис. 1.

Сканирование осуществляли в двух направлениях:

1) вдоль сварного шва, при распространении волн Лэмба перпендикулярно сварному соединению (направление сканирования X);

2) поперек сварного шва, при распространении волн Лэмба параллельно сварному соединению (направление сканирования Y).

В качестве контактной жидкости использовали масло типа «автол». В каждой точке сканирования измеряли время прохождения волны Лэмба и амплитуду принятого эхосигнала. При измерении амплитуд величина усиления составляла 35,7 дБ (рис. 3).

Датчик располагался на расстоянии 47 мм от края образца, поэтому с учетом стрелы преобразователя (13 мм) путь прозвучивания в каждой точке составлял 120 мм. Значение групповой скорости рассчитывалось через отношение пути, пройденного волной Лэмба, ко времени ее прохождения в образце. В связи с отсутствием дисперсии скорости звука в используемом частотном диапазоне величина фазовой скорости волны Лэмба принималась равной групповой скорости.

Полученные результаты обрабатывали в приложении OriginPro 2018 (64-bit) SR1 b9.5.1.195. Погрешность измерения скоростей волн Лэмба составила 1 % от средней величины скорости или порядка 50—55 м/с. Погрешность измерения амплитуды — 5 %, но не менее $\pm 1,5$ отн. ед. при малых значениях.

На рис. 3 продемонстрировано по одной точке измерения в направлении сканирования оси X при прохождении волн Лэмба сквозь сварные швы в образцах: А — нижняя панель; Б — верхняя панель. На экране дефектоскопа наблюдается только эхосигнал от края образца. Примечательно, что во всей зоне контроля не было выявлено сигналов от дефектов, которые могли бы стать отражателями волн Лэмба. Из этого следует, что в сварных соединениях исследуемых образцов А и Б

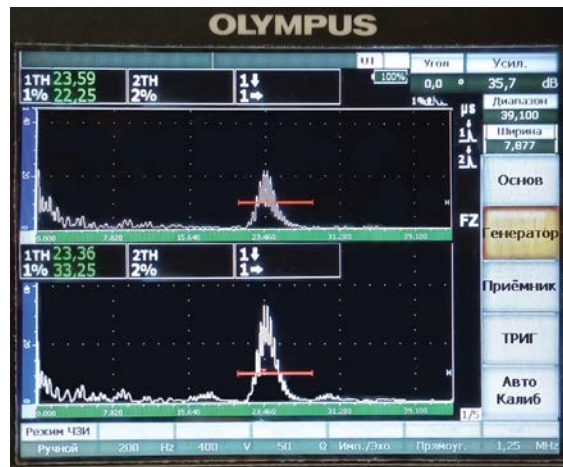


Рис. 3. Точка измерения эхосигналов волн Лэмба на дефектоскопе Olympus EPOCH 1000 для образца А (нижняя панель) и образца Б (верхняя панель). Параметр «1ТН» — время пробега волны Лэмба в микросекундах, «1 %» — амплитуда эхосигнала в условных единицах.

отсутствуют дефекты типа несплошностей. Поэтому состояние контролируемых зон можно определить только по характеристикам волн Лэмба, проходящих непосредственно через сварной шов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эталонный образец. Измерения фазовой скорости волн Лэмба в эталонном образце проводили при сканировании вдоль оси X и осей $Y1$ и $Y2$ пластины (см. рис. 1). Результаты измерения представлены на рис. 4. В первом случае (кривая 1) волны Лэмба распространялись перпендикулярно сварному шву, а величина скорости слабо отклонялась от среднего значения 5118 м/с, указанного на рисунке синей штриховой линией. Экспериментальные точки полученной зависимости имеют близкие по значениям скорости, которые во всем диапазоне варьируются на величину, не превышающую погрешность измерения.

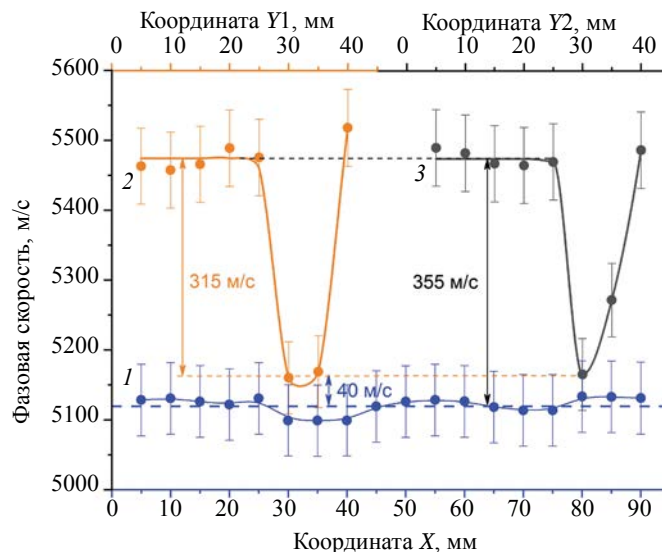


Рис. 4. Результаты измерения фазовых скоростей волн Лэмба в эталонном образце при сканировании в направлении оси X — кривая (1) и в направлении осей $Y1$ и $Y2$ — кривые (2) и (3) соответственно. Стрелками показана разница между средними значениями скоростей волн Лэмба: в основном металле и в области стыка сварного шва в направлении осей Y ; в основном металле в направлениях осей X и Y .

Для проверки влияния сварного шва на значение скорости распространения волн Лэмба вдоль оси Y были выполнены измерения скорости в обратном направлении не через шов. Среднее значение скорости составляло 5119 м/с, что практически совпадает со скоростью распространения волны в параллельном направлении через шов.

При сканировании образца в направлении осей $Y1$ и $Y2$ выполнены измерения с левой и правой стороны пластины от ее центра к краям (см. рис. 4, кривые 2 и 3). В этом случае волны Лэмба распространялись параллельно сварному шву, а зависимости распределения их скоростей по координатам имеют схожую форму. За пределами шва скорость волн Лэмба составляет в среднем 5475 м/с, однако в области шва опускается до значений 5160 м/с. Минимум зависимостей 2 и 3 приходится на диапазон координат 30—35 мм, которые располагаются вблизи стыка сварного шва. Ширина провала значений скорости волн в диапазоне координат 25—40 мм соответствует области термических изменений материала в сварном шве.

Следует отметить, что скорость распространения волн Лэмба в основном металле параллельно сварному шву существенно выше скорости в перпендикулярном направлении (см. рис. 4). Различие указанных величин в среднем составляет 355 м/с. Вместе с тем при прозвучивании в зоне термических изменений вблизи сварного шва скорости волн Лэмба в указанных направлениях отличаются в среднем на 40 м/с, что соизмеримо с приборной погрешностью.

На рис. 5 представлены зависимости амплитуды волн Лэмба, определенные в направлении осей X , $Y1$ и $Y2$. Изменение амплитуды при неизменном пути пробега волны характеризует изменение коэффициента затухания материала. В частности, кривая 1 отражает зависимость коэффициента затухания вдоль сварного шва. В диапазоне координат 5—15 мм наблюдается область повышенного коэффициента затухания. В области 15—40 мм, напротив, наблюдается затухание ниже среднего по величине. В остальном диапазоне точки кривой 1 с точностью до погрешности в основном лежат в диапазоне среднего значения, которое определялось без первой точки зависимости ($X = 5$ мм). Этим, в частности, объясняется разница минимальных амплитуд в случае кривых 2 и 3, измеренных в направлении осей $Y1$ и $Y2$ соответственно. График 2 характеризует участок сварного шва с повышенным коэффициентом затухания, а 3 — со средним.

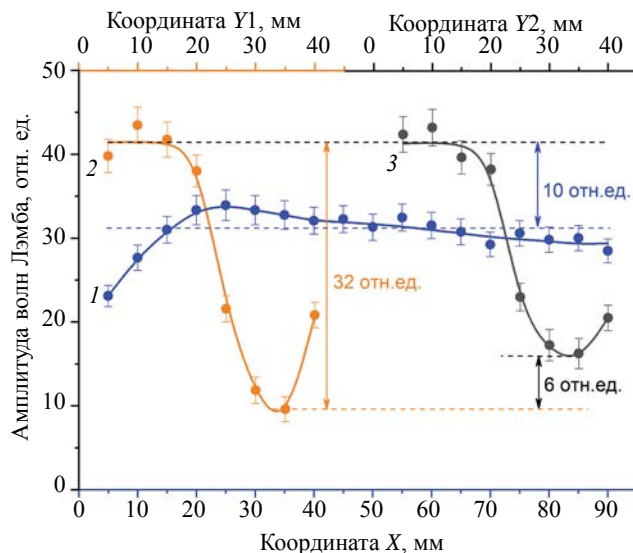


Рис. 5. Результаты измерения амплитуд волн Лэмба в эталонном образце при сканировании в направлении оси X — кривая (1) и в направлении осей $Y1$ и $Y2$ — кривые (2) и (3) соответственно. Стрелками показана разница между средними значениями амплитуд волн Лэмба: в основном металле и в области стыка сварного шва в направлении оси $Y1$; в основном металле в направлении осей Y и через шов в направлении оси X ; в области стыка сварного шва в направлении осей $Y1$ и $Y2$.

Участок падения амплитуды в указанных зависимостях приходится на диапазон координат 20—40 мм, что несколько шире области, определенной по данным измерения скоростей волн Лэмба (см. рис. 4). Если считать графики симметричными относительно стыка шва, область повы-

шенных коэффициентов затухания составляет около 25 мм, а область пониженных скоростей волн — около 15 мм.

Область за пределами сварного шва 5—15 мм по осям Y отличается минимальным коэффициентом затухания и повышенной амплитудой эхосигнала соответственно, которая не зависит от направления прозвучивания. При перемещении датчика вдоль оси X и прозвучивании в направлении, перпендикулярном сварному шву, с точностью до погрешности регистрируются такие же значения амплитуд при одинаковом пути пробега волны. Шов при поперечном прозвучивании понижает амплитуду в среднем на 10 отн. ед., а при продольном — на 32 отн. ед., что связано с большей протяженностью пути в термически измененной области вдоль оси X .

Образец с дефектным сварным швом. Измерения фазовой скорости волн Лэмба в образце Б представлены на рис. 6. При сканировании вдоль оси X наблюдаются результаты, в целом схожие с эталонным образцом. Средняя скорость волн Лэмба составляет 5082 м/с, что отличается от средней скорости в эталонном образце на величину, не превышающую погрешность измерения.

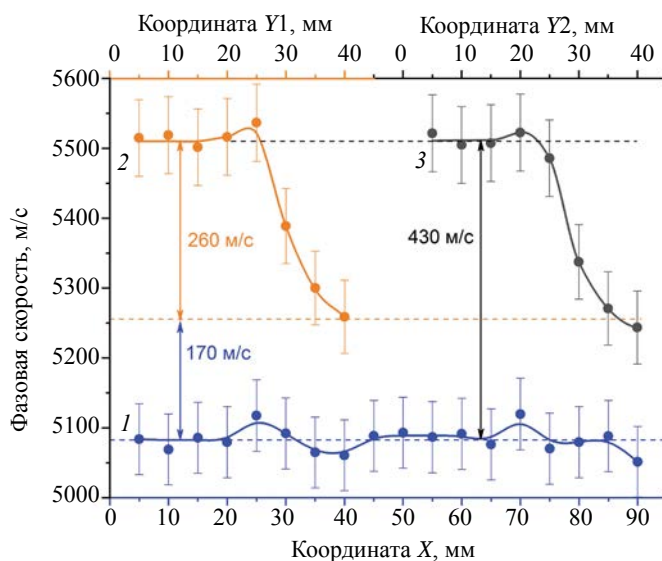


Рис. 6. Результаты измерения фазовых скоростей волн Лэмба в образце Б при сканировании в направлении оси X — кривая 1 и в направлении осей $Y1$ и $Y2$ — кривые 2 и 3 соответственно. Стрелками показана разница между средними значениями скоростей волн Лэмба: в основном металле и в области стыка сварного шва в направлении осей Y ; в основном металле и в области стыка сварного шва в направлениях осей X и Y .

Как и в случае эталонного образца, была выполнена проверка влияния процесса сварки на упругие свойства материала в направлении, перпендикулярном стыковому соединению. Скорость распространения волн Лэмба вдоль оси Y в обратном направлении не через шов в среднем составляет 5128 м/с, что превышает скорость через шов, но на величину, существенно меньшую погрешности измерений.

Аналогично с эталонным образцом обстоит ситуация и за пределами сварного шва при прозвучивании вдоль осей $Y1$ и $Y2$. Величина скорости волн Лэмба имеет значительно большее значение, чем в сварном шве образца пластины, однако ее значение 5510 м/с совпадает с аналогичным значением в эталонном образце с точностью до погрешности измерения (см. рис. 6 и 4).

Область упругих изменений материала, как и в эталонном образце, обнаруживается в диапазоне значений координат $Y1$ и $Y2$ выше 25 мм. Однако с учетом того, что стык в образце Б проходит вблизи координаты $Y \sim 40$ мм, ширина области термических изменений заметно шире, чем в эталонном образце (см. рис. 1). Если считать, что упругие свойства по обе стороны от стыка сварного шва изменяются симметрично, ширина области упругих изменений материала составляет порядка 30 мм, тогда как в эталонном образце — 25 мм. Кроме того, снижение скорости волны Лэмба в зоне сварного шва при сканировании по осям Y заметно меньше, чем в эталонном образце. Она понижается на 260 м/с и отличается от скорости при сканировании вдоль оси X на 170 м/с, что заметно больше погрешности измерения. Иными словами, в образце Б скорости волн Лэмба при их распространении вдоль и поперек сварного шва отличаются, в то время как в эталонном образце они были близки по значениям.

На рис. 7 представлены зависимости амплитуд волн Лэмба для образца Б, определенные в направлении осей X , $Y1$ и $Y2$. Область за пределами сварного шва (5—10 мм по осям $Y1$ и $Y2$) отличается минимальным коэффициентом затухания и повышенной амплитудой эхосигнала соответственно.

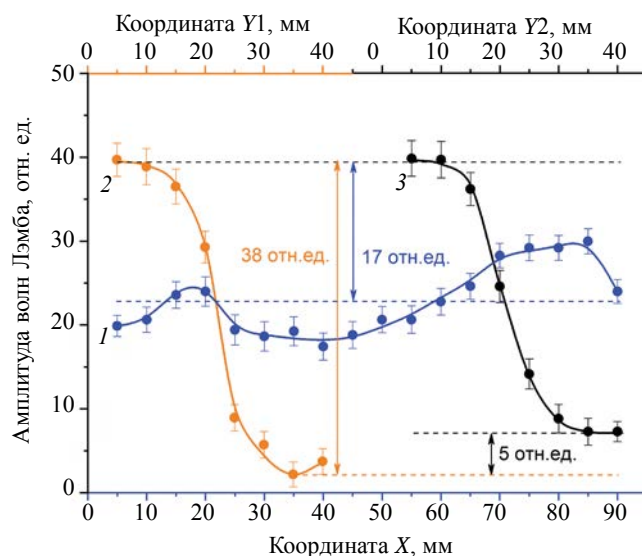


Рис. 7. Результаты измерения амплитуд волн Лэмба в образце Б при сканировании в направлении оси X — кривая 1 и в направлении осей $Y1$ и $Y2$ — кривые 2 и 3 соответственно. Стрелками показана разница между средними значениями амплитуд волн Лэмба: в основном металле и в области стыка сварного шва в направлении оси $Y1$; в основном металле в направлении осей Y и через шов в направлении оси X ; в области стыка сварного шва в направлении осей $Y1$ и $Y2$.

Как и при измерении скоростей волн Лэмба, амплитуда эхосигнала на данных участках образца в пределах погрешности соответствует эталонным значениям. Кроме того, как и в эталонном образце, амплитуды эхосигналов в области основного металла не зависят от направления прозвучивания и по средним значениям совпадают при одинаковом пути пробега волн. Вместе с тем область термических изменений в образце Б отличается заметно большим затуханием, чем в образце А. Это проявляется в более низких амплитудах эхосигнала при распространении волн Лэмба как поперек сварного шва (см. рис. 1, а также рис. 5 и 7, кривые 1), так и вдоль (см. рис. 5 и 7, кривые 2 и 3). При поперечном прозвучивании шов в среднем понижает амплитуду на 17 отн. ед., а при продольном — на 38 отн. ед.

При сканировании вдоль оси X в диапазонах координат 5—10 и 25—55 мм выявляется участок повышенного коэффициента затухания, а область координат 65—90 мм характеризуется затуханием ниже средних значений (см. рис. 7, кривая 1). Соответственно, и при сканировании вдоль осей Y кривая 3 характеризуется в минимуме более высокой амплитудой эхосигнала, чем кривая 2, поскольку охватывает область сварного шва с меньшим коэффициентом затухания.

Участок падения амплитуды на кривых 2 и 3 (см. рис. 7) соответствуют диапазону координат Y 15—40 мм, что заметно шире области, определенной по данным измерения скоростей волн Лэмба (см. рис. 6). Если считать графики симметричными относительно стыка шва, размер области повышенных коэффициентов затухания составляет около 45—50 мм, что на 15—20 мм шире области пониженных скоростей волн. В сравнении с эталонным образцом указанные диапазоны в два раза шире, что согласуется с визуальной оценкой зоны термических изменений (см. рис. 1).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Важным результатом УЗ измерений скоростей волн Лэмба в различных направлениях является их существенное различие. В направлении, перпендикулярном сварному соединению, скорость значительно меньше, чем в параллельном направлении. Разница составляет 355—430 м/с, в том

числе и за пределами сварного шва. В связи с этим данную закономерность нельзя объяснить только термическими изменениями упругих свойств материала. Судя по всему, мы имеем дело с макроскопической анизотропией акустических свойств материала в тонких стальных листах электротехнической стали. Такая анизотропия может быть связана, в частности, с внутренними напряжениями [3, 4], возникающими в технологическом процессе изготовления и обработки стальной ленты. Листы металла деформируются под действием своего веса в процессе вертикальной прокатки сваренных частей и упаковки ленты в рулоны.

Растяжение металла приводит к снижению скорости волн Лэмба в направлении, перпендикулярном сварному шву. При этом термическое изменение упругих свойств в области сварки, вероятно, также приводит к уменьшению скорости волн Лэмба. В эталонном сварном соединении в области термических изменений шва анизотропия акустических свойств материала практически отсутствует, в то время как в некачественном образце частично сохраняется.

Выяснение причин данных изменений требует отдельных исследований. В частности, согласно формуле (1), уменьшение скорости моды s_0 волны Лэмба может быть обусловлено уменьшением скорости объемной продольной волны на 340 м/с при сохранении коэффициента Пуассона. Для этого скорость поперечной волны должна уменьшиться на 200 м/с. С другой стороны, такое изменение скорости может быть связано с ростом коэффициента Пуассона при постоянстве скорости продольной волны. В этом случае в электротехнической стали понижение скорости поперечной волны на 320—360 м/с приводит к возрастанию коэффициента Пуассона до 0,33—0,34 и уменьшению скорости волн Лэмба до значений, наблюдаемых в настоящей работе (см. рис. 4). При этом коэффициент Пуассона в некачественном сварном шве равен 0,32, что соответствует уменьшению скорости поперечной волны на 190 м/с по сравнению со справочными значениями [27].

Анализ зависимостей амплитуды волн Лэмба в различных направлениях прозвучивания и при различном качестве сварных соединений дает более однозначные результаты. На основании рис. 5 и 7 можно заключить, что коэффициент затухания материала в процессе вытягивания образцов не изменяется, однако он повышается в процессе сварки и наибольшее затухание наблюдается вблизи стыка пластин. При этом величина коэффициента затухания отражает качество сварного соединения. В эталонном образце в среднем затухание через сварной шов заметно меньше, чем в некачественном. Это может быть связано с усилением процесса рассеяния волн как за счет появления микропор и микродефектов (в особенности в области стыка), так и при укрупнении зерен металла при его нагревании в процессе сварки.

Также следует отметить, что при контроле волнами Лэмба качества сварных соединений в сплошных тонких листах без их разрезания в большей степени подойдет комбинированный эхотеневой метод. В этом случае следует использовать два наклонных преобразователя (совмещенный и приемный) с углами призмы 30° и рабочей частотой 1,25 МГц. Датчики следует располагать по разные стороны от сварного шва, в направлении друг к другу, сканирование осуществлять параллельно сварному шву, сохраняя расстояние между преобразователями фиксированным. В такой функциональной схеме контроля совмещенным преобразователем следует регистрировать амплитуду и время эхосигналов с целью выявления несплошностей, попадающих на пути волн Лэмба. Приемником можно фиксировать как время прохождения волн от излучателя до приемника, так и амплитуду прошедшей волны. При отсутствии несплошностей качество сварного соединения можно контролировать как по амплитуде прошедшей волны, так и по ее скорости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение стыковых сварных соединений в тонких пластинах электротехнической стали показало, что волны Лэмба нулевой симметричной моды демонстрируют высокую информативность как при измерении упругих и структурных свойств вещества, так и при контроле качества сварки. Были получены следующие основные результаты:

1. Измерение скорости волн Лэмба позволило установить наличие анизотропии акустических свойств материала в образцах, которая может быть связана с растяжением листов стали под собственным весом в технологическом процессе их упаковки.

2. Термические изменения упругих свойств материала в процессе сварки также наблюдаются и приводят в целом к снижению скорости волн Лэмба, причем в качественном сварном соединении этот эффект проявляется более явно, чем в некачественном.

3. Высокоинформативным параметром, отражающим качество сварного соединения, оказалась амплитуда волны Лэмба, измеренная при одинаковом пути пробега волны. Эталонный образец

отличается заметно более низким затуханием в области сварного шва, чем дефектный, т.е. при ухудшении качества сварного шва будет наблюдаться снижение амплитуды волны Лэмба, прошедшей через шов.

В настоящей работе продемонстрирована эффективность волн Лэмба при оценке состояния сварных соединений электротехнической стали. Для контроля качества сварных соединений в сплошных листах стали рекомендована функциональная схема эхо-теневого метода с двумя наклонными преобразователями. Достаточно информативными представляются также варианты методов прохождения без регистрации эхосигналов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FEUZ-2023-0014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларин Ю.И., Поляков М.Ю., Цейтлин Г.А. Способ производства анизотропной электротехнической стали с высокими магнитными свойствами / Патент на изобретение RU 2407809 C1. 27.12.2010. Заявка № 2009129885/02 от 03.08.2009.
2. Пименов В.А., Бабушко Ю.Ю., Бахтин С.В., Мирошников Ю.В., Ивлиев С.Н., Федюкин О.П. Способ производства электротехнической анизотропной стали с высоким комплексом магнитных свойств / Патент на изобретение RU 2574613 C1. 10.02.2016. Заявка № 2014140556/02 от 07.10.2014.
3. Смирнов А.Н., Данилов В.И., Ожиганов Е.А., Горбатенко В.В., Муравьев В.В. Зависимость локальных деформаций и полей внутренних напряжений от способа сварки конструкционной стали ВСтЗсп. 1. Влияние способа сварки на механические характеристики и параметры акустической эмиссии стали ВСтЗсп // Дефектоскопия. 2015. № 11. С. 59—67. <https://doi.org/10.1134/S1061830915110066>
4. Kurashkin K.V., Mishakin V.V. Ultrasonic Estimation of the Residual Stresses // Inorganic Materials. 2014. V. 50. No. 15. P. 1506—1510. <https://doi.org/10.1134/S0020168514150060>
5. Rosen A., Jago R., Kjer T. Tensile properties of metastable stainless steels // J. Mater. Sci. 1972. V. 7. P. 870—876. <https://doi.org/10.1007/BF00550434>
6. Hecker S., Stout M., Staudhammer K., Smith J. Effects of strain state and strain rate on deformation induced transformation in 304 stainless steel: Part I. Magnetic measurements and mechanical behavior // Metall. Trans. A. 1982. V. 13. P. 619—626. <https://doi.org/10.1007/BF02644427>
7. Gonchar A.V., Klyushnikov V. A., Mishakin V. V. Effect of plastic deformation and subsequent heat treatment on the acoustic and magnetic properties of 12Kh18N10T steel // Inorganic Materials. 2020. V. 56. No. 15. P. 1—5. <https://doi.org/10.1134/S0020168520150066>
8. Gauzzi F., Montanari R., Principi G., Tata M. E. AISI 304 steel: anomalous evolution of martensitic phase following heat treatments at 400 °C // Materials Science and Engineering: A. 2006. V. 438—440. P. 202—206. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.02.116>
9. Sholokhov M.A., Smorodinsky Ya.G., Melnikov A.Yu., Buzorina D.S. Development of an Approach to Forecast the Defect Formation in the End of a Weld Joint Based on the Modeling of Heat Processes // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 5. P. 460. [Шолохов М.А., Смородинский Я.Г., Мельников А.Ю., Бузорина Д.С. Разработка методики прогнозирования образования дефектов в концевой части сварного соединения на основе моделирования тепловых процессов // Дефектоскопия. 2020. № 5. С. 65—67. <https://doi.org/10.31857/S0130308220050085>, <https://doi.org/10.1134/S1061830920050095>]
10. Khan S.H., Farhad A., Khan A. N., Iqbal M.A. Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reduction // Computational Materials Science. 2008. V. 43. P. 623—628. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.01.034>
11. Shaira M., Guy P., Courbon J., Godin N. Monitoring of martensitic transformation in austenitic stainless steel 304L by eddy currents // Research in Nondestructive Evaluation. 2010. V. 21: 2. P. 112—126. <https://doi.org/10.1080/09349840903427854>
12. Щербинский В.Г., Артемьев С.А., Антонова Н.М., Панферов К.В., Грачев А.Ю., Копылов А.П., Захаров А.Ф., Мирошин С.А. Мобильная многоканальная установка «Лист-4» для ультразвукового контроля листа // Дефектоскопия. 2014. № 5. С. 3—8. <https://doi.org/10.1134/S1061830914050076>
13. Danilov V.N., Ushakov V.M., Rymkevich A.I. Investigating the Possibilities of Assessing the State of the Metal Structure of Pipelines in Service by Ultrasonic Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 8. P. 635—646. [Данилов В.Н., Ушаков В.М., Рымкевич А.И. Исследование возможностей оценки состояния структуры металла трубопроводов, находившихся в эксплуатации, ультразвуковым методом // Дефектоскопия. 2021. № 8. С. 3—13. <https://doi.org/10.31857/S0130308221080017>, <https://doi.org/10.1134/S1061830921080052>]
14. Ерофеев В.И., Иляхинский А.В., Никитина Е.А., Родюшкин В.М. Пути повышения чувствительности метода акустического зондирования при исследовании структуры металлов // Дефектоскопия. 2018. № 2. С. 11—14. <https://doi.org/10.1134/S106183091802002X>
15. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Петров К.В. Связь механических свойств пруткового проката из стали 40х со скоростью объемных и Рэлеевских волн // Дефектоскопия. 2017. № 8. С. 20—28. <https://doi.org/10.1134/S1061830917080046>

16. Смирнов А.Н., Князьков В.Л., Абабков Н.В., Ожиганов Е.А., Конева Н.А., Попова Н.А. Оценка напряженно-деформированного состояния сварных соединений углеродистых сталей после различных режимов тепловложения акустическим методом // Дефектоскопия. 2018. № 1. С. 40—46. <https://doi.org/10.1134/S1061830918010072>
17. Хлыбов А.А. Исследование влияния микронеоднородности среды на распространение поверхностных волн // Дефектоскопия. 2018. № 6. С. 3—10. <https://doi.org/10.1134/S1061830918060049>
18. Pasmanic L.A., Kamyshev A.V., Radostin A.V., Zaitsev V.Yu. Parameters of Acoustic Inhomogeneity for Nondestructive Estimation of the Influence of Manufacturing Technology and Operational Damage on the Structure of Metal // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 12. P. 971—983. [Пасманик Л.А., Камышев А.В., Радостин А.В., Зайцев В.Ю. Параметры акустической неоднородности для неразрушающей оценки влияния технологии изготовления и эксплуатационной поврежденности на структуру металла // Дефектоскопия. 2020. № 12. С. 24—36. <https://doi.org/10.31857/S0130308220120039>, <https://doi.org/10.1134/S1061830920120062>]
19. Разыграев Н.П. Физика, терминология и технология в ультразвуковой дефектоскопии головными волнами // Дефектоскопия. 2020. № 9. С. 3—19. <https://doi.org/10.31857/S0130308220090018>
20. Aleshin N.P., Krysko N.V., Kusyy A.G., Skrynnikov S.V., Mogilner L.Yu. Investigating the Detectability of Surface Volumetric Defects in Ultrasonic Testing with the Use of Rayleigh Waves Generated by an Electromagnetic-Acoustic Transducer // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 5. P. 361—368. [Алешин Н.П., Крысько Н.В., Кусый А.Г., Скрынников С.В., Могильнер Л.Ю. Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 22—30. <https://doi.org/10.31857/S0130308221050031>, <https://doi.org/10.1134/S1061830921050028>]
21. Муравьева О.В., Муравьев В.В. Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 3—11. <https://doi.org/10.1134/S1061830916070056>
22. Перов Д.В., Ринкевич А.Б. Локализация отражателей в пластинах при ультразвуковом контроле волнами Лэмба // Дефектоскопия. 2017. № 4. С. 27—41. <https://doi.org/10.1134/S1061830917040064>
23. Бурков М.В., Еремин А.В., Любутин П.С., Бяков А.В., Панин С.В. Применение ультразвуковой методики с использованием волн Лэмба для контроля состояния образцов алюминиевого сплава В96цТ12 // Дефектоскопия. 2017. № 12. С. 3—15. <https://doi.org/10.1134/S1061830917120038>
24. Iskhuzhin R.R., Borisov V.N., Atavin V.G., Uzkiikh A.A., Khafizova K.K. Ultrasonic Testing of Welds in Thin-Walled Titanium Shells Using an Incomplete Penetration Indicator // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 2. P. 105—113. [Исхужин Р.Р., Борисов В.Н., Атавин В.Г., Узких А.А., Хафизова К.К. Ультразвуковой контроль сварного шва тонкостенной титановой оболочки с индикатором непровара // Дефектоскопия. 2021. № 2. С. 24—32. <https://doi.org/10.31857/S0130308221020032>, <https://doi.org/10.1134/S1061830921020054>]
25. Su Z.Q., Ye L. Identification of damage using Lamb waves: from fundamentals to applications. Verlag Berlin Heidelberg: Springer Press, 2009. 346 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-784-4>
26. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 68 с.
27. Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потапов А.И. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля / Практик. пособие. Под ред. Сухорукова В.В. М.: Высшая школа, 1991. 283 с.

ОБ АКУСТИЧЕСКОМ МЕТОДЕ КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СЛАБО АНИЗОТРОПНЫХ ОРТОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2023 г. А.А. Хлыбов^{1,*}, А.Л. Углов

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Россия 603155 Нижний Новгород, ул. Минина, 24

*E-mail: hlybov_52@mail.ru

Поступила в редакцию 30.10.2022; после доработки 26.11.2022

Принята к публикации 02.12.2022

Исследовали возможности использования неразрушающего акустического контроля для определения особенностей пространственного распределения локальных пластических деформаций при деформировании плоских образцов из сплава АМг61. Проанализированы методические особенности использования параметра акустической анизотропии для исследования закономерностей изменения пространственных неоднородностей поля локальных пластических деформаций. Представлена расчетно-экспериментальная методика определения параметра акустической анизотропии, позволяющая корректно определять не только ее величину, но и направления локальных осей акустической анизотропии. Рассмотрены источники погрешностей предлагаемой методики, границы ее применимости, а также требования к аппаратно-программным средствам ее реализации. Результаты экспериментальных исследований, проведенные на образцах из слабо анизотропного алюминиевого сплава АМг61, сопоставлены с представлениями автоволновой механики пластичности металлов. Предложен инженерный алгоритм определения ранней локализации зон потери устойчивости при пластическом деформировании образцов. Показана возможность создания методики оценки ресурса пластичности материала при его пластическом формоизменении.

Ключевые слова: ультразвук, упругие волны, анизотропные материалы, акустическая анизотропия, упругопластическое деформирование.

DOI: 10.31857/S0130308223010037, EDN: BVEMFR

ВВЕДЕНИЕ

Специалисты, занимающиеся вопросами пластической обработки металлов (прокат, штамповка и т.д.), проявляют интерес к особенностям формоизменения материала с точки зрения пространственной однородности этого процесса. Особенно это касается изготовления высоконагруженных элементов конструкций. Дело в том, что материал детали со сложной геометрией в процессе ее изготовления, например, при штамповке, испытывает существенно неоднородную пластическую деформацию с присущими ей значительными локальными градиентами. В этой связи все более актуальными становятся как необходимость понимания закономерностей пластической деформации, так и возможность ее оперативной оценки.

Анализ результатов исследований природы пластической деформации твердых тел показывает, что наблюдаемая пространственно-временная неоднородность пластического течения наблюдается на любом ее этапе и является наиболее важным атрибутом деформационного процесса [1]. Справедливость этого заключения отчетливо прослеживается на всех масштабных уровнях деформационного процесса [2—8], начиная с дислокационного и заканчивая макроскопическим. В работах, результаты которых обобщены в монографиях [4, 9], макромасштабные аспекты пластического течения изучались в моно- и поликристаллах чистых металлов и сплавов разного химического и структурного состава. Было экспериментально показано, что пластическая деформация твердых тел имеет макроскопически локализованный характер на протяжении всего процесса пластического течения: от предела текучести до разрушения. Возникающие при этом в образцах пространственно-временные структуры локализации макроскопического масштаба спонтанно генерируются при деформации с постоянной скоростью. Деформируемая среда в ходе процесса пластического течения самопроизвольно расслаивается на чередующиеся, друг с другом деформирующиеся и недеформирующиеся в данный момент времени объемы.

При этом на наблюдаемой поверхности образца деформирующиеся и недеформирующиеся объемы образуют специфическую картину распределения очагов локализованной пластичности.

Полученные результаты, кроме научной значимости, представляет практическую значимость в плане возможности построения инженерных алгоритмов оценки ресурса пластичности конструкционных материалов и раннего прогнозирования координат зон будущей потери устойчи-

ности процесса деформирования и разрушения материала в составе деталей машин и конструктивных элементов. Это представляет интерес как в процессе изготовления деталей, так и при их эксплуатации в условиях, допускающих развитие пластических деформаций (например, при малоцикловом нагружении). Однако для реализации названных алгоритмов необходим мониторинг текущего пространственного распределения поля пластических деформаций с использованием соответствующих аппаратно-программных средств. Существующие методы контроля, такие как метод скоростной фотографии, тепловой метод и подобные им, дающие интересные с научной точки зрения результаты, мало подходят для их использования на реальных технических объектах. Нужна их разумная альтернатива в виде удобного для практического использования неразрушающего инженерного метода.

Среди используемых методов неразрушающего контроля, отвечающим требованиям обеспечения контроля неоднородности пластической деформации на мезоуровне, — это ультразвуковой метод, основанный на анализе параметров упругих импульсов в ультразвуковом диапазоне частот. Соответствующие длины волн (сотни мкм — десятки мм) вполне соответствуют мезоуровню, на масштабах которого работает автоволновая теория пластической деформации.

Одним из информативных параметров, широко применяемым при контроле структурных особенностей, физико-механических характеристик, напряженно-деформированного состояния, усталостной поврежденности конструкционных материалов и др., является акустическая анизотропия [10—21].

В настоящей работе рассматривается возможность анализа закономерностей пластической деформации образцов из горячекатаного листа сплава АМгб1 с использованием уточненного алгоритма определения параметра акустической анизотропии. Прокат из сплава АМгб1 используется для изготовления изделий авиа- и судостроения, также в строительных конструкциях.

Широкий температурный диапазон возможного использования деталей из сплава АМгб1 (от $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$) делает его одним из наиболее распространенных конструкционных материалов, используемых в жестких климатических условиях, включая условия Крайнего Севера.

Имеющиеся результаты исследований закономерностей упругопластического деформирования сплава АМгб1 с использованием акустических методов позволяют прогнозировать поведение ответственных конструктивных элементов, но при существенных ограничениях:

- 1) известна история упругопластического деформирования;
- 2) процесс накопления необратимых деформаций для рассматриваемого элемента имеет пространственно однородный характер.

В условиях реальной эксплуатации высоконагруженных конструкций ни одно из этих условий, как правило в необходимом объеме информации для задач прогнозирования, не выполняется. При отсутствии подробного (с малой пространственной дискретностью) мониторинга закономерностей деформирования конструктивного элемента возможность прогнозирования его ресурса и локализации зоны предполагаемого разрушения на достаточно ранней стадии эксплуатации практически отсутствует. Подобный мониторинг с использованием метода сеток и т.п. является весьма дорогостоящим. В связи с этим создание расчетных методик оценки ресурса при неполном объеме информации об истории нагружения дает весьма приблизительный результат.

Названные факторы могут привести или к излишней консервативности оценки ресурса и необоснованно раннем выводе конструкции из эксплуатации или же, наоборот, к внезапному разрушению в зоне с повышенной интенсивностью накопления деформаций.

Целью данной работы является разработка и экспериментальная проверка расчетно-экспериментальной методики определения акустической анизотропии слабо анизотропного ортотропного материала, позволяющей определить не только степень локальной акустической анизотропии, но и ее направление.

Для достижения поставленной цели решается ряд задач:

анализ источников погрешностей предлагаемой методики и границ ее применимости в инженерной практике;

исследование влияния пластической деформации на закономерности изменения пространственного распределения акустической анизотропии образцов из горячекатаного листа сплава АМгб1;

оценка возможности использования полученных результатов для разработки инженерной методики неразрушающей оценки ресурса пластичности и раннего обнаружения зон разрушения материала в составе высоконагруженных ответственных конструктивных элементов.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСЧЕТНЫХ АЛГОРИТМОВ

Металлопрокату свойственна текстурная анизотропия, существенно влияющая на его прочностные и эксплуатационные свойства. Изделия сложной формы, изготовленные из проката с использованием технологий, предполагающих значительную пластическую деформацию материала, естественно, обладают существенной пространственной неоднородностью деформационной текстуры.

Текстура материала при пластической деформации оказывает решающее влияние на величину акустической анизотропии [17—21], что определяет важность задачи корректного определения последней.

Изменения анизотропии при наличии пластических деформаций достаточно малы (десятые доли — единицы процентов) и некорректность ее измерения может привести не только к большим погрешностям, но, более того, к неправильному пониманию закономерностей процессов пластической деформации, о которых судят по изменению анизотропии.

При исследовании свойств образцов и конструктивных элементов, изготовленных из проката, обычно используют ортогональную систему координат. Координатные оси выбирают следующим образом: ось OX_1 — нормально к поверхности материала, ось OX_2 — в плоскости поверхности проката вдоль направления проката (НП), ось OX_3 — перпендикулярно НП (рис. 1).

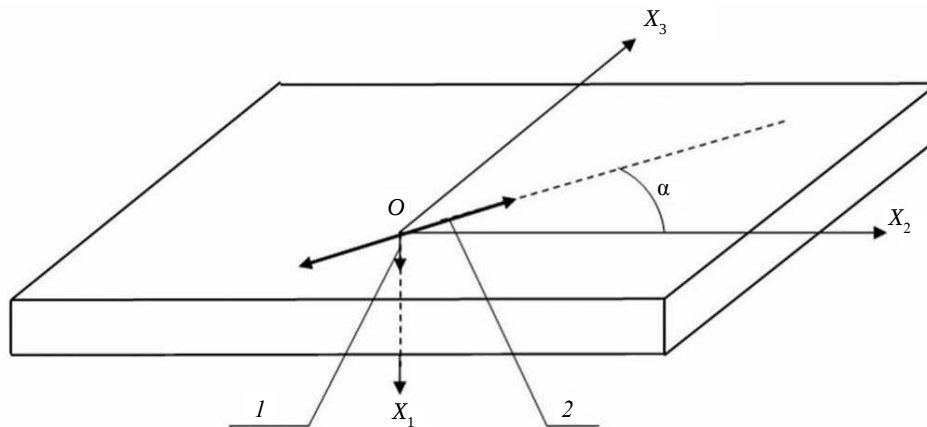


Рис. 1. Выбор осей координат.

С точки зрения характеристик анизотропии прокат относится к ортотропным материалам, имеющим три взаимно ортогональные плоскости симметрии, нормальные к осям OX_1 , OX_2 , OX_3 .

В работе рассматриваются плоские упругие поперечные горизонтально поляризованные волны с волновым вектором, параллельным оси OX_1 . Волна распространяется вдоль толщины образца проката и ее фронт параллелен плоскости X_2OX_3 .

Рассмотрим распространение импульса поперечной волны, излучаемого пьезопреобразователем, установленным на плоскости проката (плоскость X_2OX_3 в выбранной нами системе координат). Направление поляризации пьезопреобразователя с направлением проката составляет угол α (ось OX_2) (см. рис. 1).

Сигнал на излучающем преобразователе имеет вид:

$$u(t) = U_0(t)pe^{j\omega t} \text{ с амплитудой } U_0.$$

В анизотропном материале в силу эффекта двулучепреломления исходная волна с амплитудой U_0 расщепляется на две с амплитудами:

$$U_2^0 = U_0 \cos \alpha, \quad U_3^0 = U_0 \sin \alpha. \quad (1)$$

Суммарный импульс для произвольного угла в соответствии с [22]:

$$u(t) = u_2(t) + u_3(t - \Delta t), \quad (2)$$

где

$$u_2(t) = U_0(t) \cos^2 \alpha \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$$u_3(t - \Delta t) = U_0(t - \Delta t) \sin^2 \alpha \cos[(\omega_0(t - \Delta t) + \varphi_0)].$$

Временной сдвиг между импульсами, на который расщепляется исходный:

$$\Delta t = L \left(\frac{1}{V_3} - \frac{1}{V_2} \right) = t_3 - t_2, \quad (3)$$

где L — акустический путь; t_2 , t_3 — задержки импульсов поперечных волн с поляризацией, параллельной оси OX_2 ($\alpha = 0$) и OX_3 ($\alpha = \frac{\pi}{2}$) соответственно.

В качестве характеристики акустической анизотропии авторы обычно используют безразмерный параметр:

$$A = \frac{V_2 - V_3}{V_{\text{cp}}} = 2 \frac{V_2 - V_3}{V_2 + V_3} = \frac{\Delta t}{t_{\text{cp}}} = 2 \frac{t_3 - t_2}{t_3 + t_2}. \quad (4)$$

Выражение для временного сдвига (3) можно записать в виде:

$$\Delta t = A \frac{L}{V_{\text{cp}}}. \quad (5)$$

Для полного расщепления импульса необходимо, чтобы временной сдвиг Δt превышал длину импульса $t_{\text{и}}$, т.е. для величины анизотропии должно выполняться соотношение:

$$A > \frac{V_{\text{cp}} t_{\text{и}}}{L}. \quad (6)$$

Для исследуемого сплава скорость поперечной волны порядка $V_{\text{cp}} \approx 3000$ м/с. Длительность импульса для частоты порядка 5 МГц составляет 1—1,5 мкс. Отсюда следует, что при толщине материала порядка 10 мм для выполнения соотношения (6) в случае измерения задержек t_2 и t_3 по двум отраженным сигналам в совмещенном режиме величина анизотропии должна превышать 20 %, однако обычно диапазон ее изменения для данного материала не превышает ± 1 % [23]. Понятно, что никакое реально возможное увеличение акустического пути за счет использования большого количества отраженных донных импульсов не может обеспечить выполнение неравенства (6). В этой связи простые методы оценки анизотропии по расщепленным импульсам в нашем случае неприменимы.

Кроме того, для исследуемого слабо анизотропного материала следует учитывать следующее обстоятельство: в соответствии с современными представлениями автоволновых подходов к процессам пластического деформирования при одноосном деформировании локальные деформации мезообъемов характеризуются пространственной неоднородностью не только по величине, но и направлению [24]. В процессе пластического деформирования ортотропного поликристаллического материала происходит поворот локальных осей анизотропии OX'_2 и OX'_3 на некоторый угол между локальной осью OX'_2 и направлением проката.

Поэтому для исследования закономерностей развития пространственно неоднородных пластических деформаций необходим алгоритм прецизионного измерения локальных значений акустической анизотропии с учетом пространственного разброса направлений локальных осей анизотропии материала. При этом размеры зон для акустических измерений должны соответствовать масштабу пространственной неоднородности («пространственному периоду») пластической деформации, который, как следует из результатов исследований [1, 4, 9], составляет 3—5 мм.

Типичные радиоимпульсы, используемые в ультразвуковой дефектоскопии, хорошо аппроксимируются следующим выражением:

$$u(t) = U_0 e^{-a_2 t} (1 - e^{-a_1 t}) \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (7)$$

где U_0 — амплитуда; a_1 , a_2 — постоянные времени нарастания и спада сигнала соответственно.

Численный анализ для импульса вида (7) показывает, что при повороте преобразователя в плоскости X_2OX_3 вокруг оси OX_1 на угол α суммарный импульс (2) смещается на величину $\Delta t'$, связанную с углом поворота соотношением:

$$\Delta t' = \Delta t \sin^2 \alpha. \quad (8)$$

Из соотношения (8) следует, что в системе координат $X'_2OX'_3$, повернутой относительно начальной на угол α , для задержек t'_2 и t'_3 , соответствующих направлениям вектора поляризации вдоль осей OX'_2 и OX'_3 , можно записать выражения:

$$t'_2 - t_2 = \Delta t \sin^2 \alpha, \quad (9)$$

$$t'_3 - t_3 = -\Delta t \sin^2 \alpha, \quad (10)$$

откуда получаем выражение для «кажущейся» анизотропии:

$$A' = A \cos 2\alpha. \quad (11)$$

На рис. 2 приведен график зависимости «кажущейся» анизотропии от угла поворота преобразователя с шагом 5° .

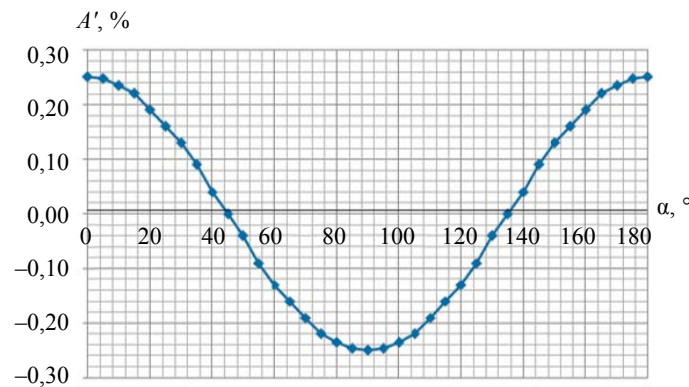


Рис. 2. Зависимость «кажущейся» анизотропии от угла поворота преобразователя.

Из рис. 2 видно, что «кажущаяся» анизотропия A' , как сказано выше, изменяется от величины A до $-A$. Следует также отметить, что максимально точно «кажущуюся» анизотропию можно измерить вблизи углов, кратных 90° , где производная $\frac{\partial A'}{\partial \alpha}$ близка к нулю. При этих углах «кажущаяся» и истинная анизотропии равны по модулю.

Ниже на рис. 3а—г условно показано пространственное распределение истинной анизотропии для ряда случаев:

рис. 3а — случай «идеального проката», когда в каждом выделенном макрообъеме материала истинная анизотропия одинакова по величине и направлению (угол поворота оси OX_2 в локальной зоне) и равна некоторому среднему значению $A_{\text{ср}}$;

рис. 3б — истинная анизотропия неодинакова по величине, но одинакова по направлению;

рис. 3в — истинная анизотропия одинакова по величине, но неодинакова по направлению;

рис. 3г — истинная анизотропия неодинакова как по величине, так и по направлению.

На соответствующих графиках приведены условные распределения величин «кажущейся анизотропии».

Рис. 3в, г позволяют сделать важный вывод: при игнорировании возможного поворота локальных осей анизотропии и ошибочной замене истинной анизотропии на «кажущуюся» вносится ошибка оценки анизотропии в сторону ее уменьшения, что может привести к нежелательным погрешностям расчетов характеристик конструкционных материалов, коррелирующих с величиной их акустической анизотропии.

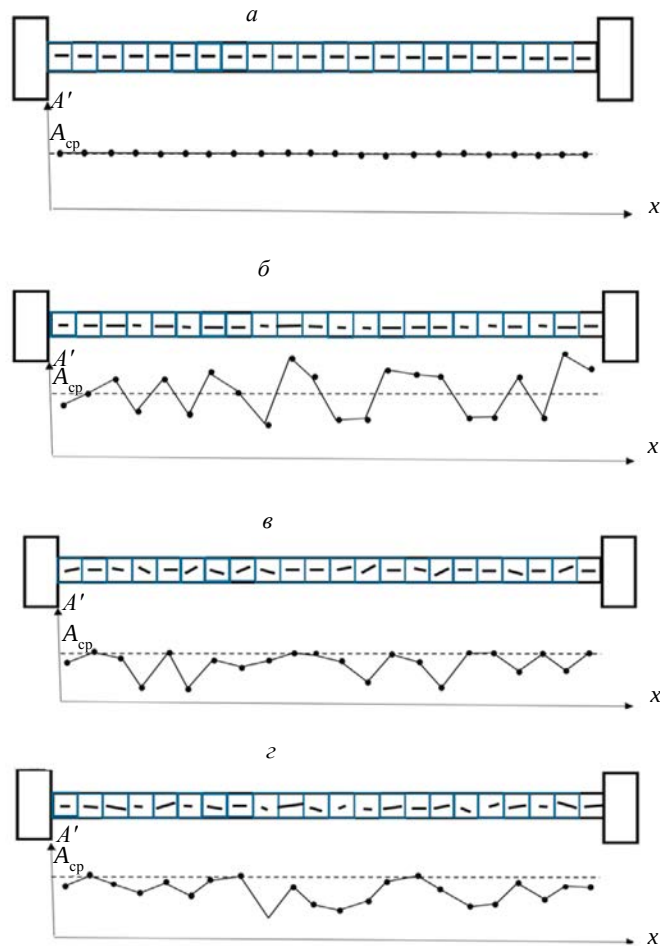


Рис. 3. Распределение истинной анизотропии в образцах: *a* — $A = \text{const} = A_{\text{ср}}$, $\gamma = \text{const} = 0$, $A'(x) = A(x)$; *б* — $A \neq \text{const}$, $\gamma = \text{const} = 0$, $A'(x) = A(x)$; *в* — $A = \text{const}$, $\gamma \neq \text{const}$, $A'(x) = A(x)\cos 2\gamma \leq A(x)$; *г* — $A \neq \text{const}$, $\gamma \neq \text{const}$, $A'(x) = A(x)\cos 2\gamma \leq A(x)$.

Некоторые авторы используют параметр A' для построения «угловых диаграмм анизотропии», однако, несмотря на измеримость, физического смысла «кажущаяся» анизотропия не имеет. Тем не менее ее можно использовать для определения локальных углов поворота осей анизотропии, являющихся важными характеристиками поля пластической деформации.

Действительно, при возможности определения параметра A' для достаточного массива значений углов α легко определить положение преобразователя, соответствующее некоторому углу α_0 , при котором $A' = 0$. При этом точность этого определения будет максимальной, поскольку, как следует из (11), в этой точке значение производной имеет локальный экстремум и искомая точка является точкой перегиба кривой (11), что существенно облегчает ее поиск средствами программного обеспечения используемых аппаратно-программных средств измерений.

Угол поворота локальных осей анизотропии записывается следующим образом:

$$\gamma = \alpha_0 - \frac{\pi}{4}, \quad (12)$$

где α_0 — угол поворота преобразователя α , при котором «кажущаяся» анизотропия становится равной 0.

Описанная процедура иллюстрируется рис. 4.

Следует сделать важное замечание относительно погрешности определения угла поворота локальных осей анизотропии.

Если в точке измерений локальные оси анизотропии повернуты на угол γ по отношению к НП, то формула (11) приобретает вид:

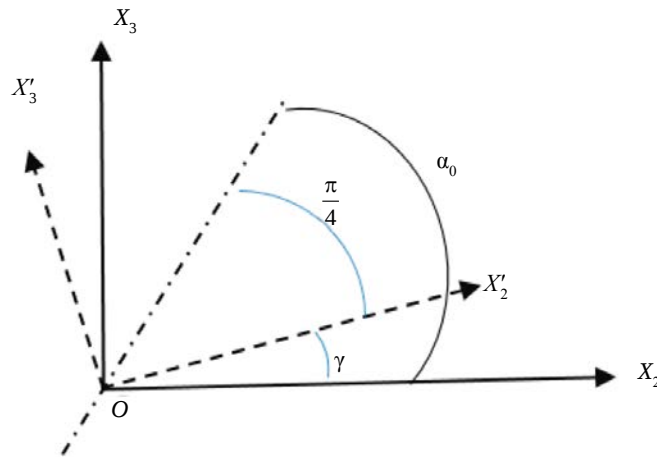


Рис. 4. Определение локальных осей анизотропии.

$$A' = A \cos 2(\alpha - \gamma). \quad (13)$$

Из (13) легко получить величину ожидаемой абсолютной погрешности определения угла поворота локальных осей $\Delta\gamma$:

$$\Delta\gamma = \sqrt{(\Delta\alpha)^2 + \frac{(\Delta A)^2 \left[1 + \left(\frac{A'}{A} \right)^2 \right]}{4A^2 \left[1 - \left(\frac{A'}{A} \right)^2 \right]}}, \quad (14)$$

где $\Delta\alpha$ — абсолютная погрешность установки угла поворота преобразователя; ΔA — абсолютная погрешность определения акустической анизотропии, которая, как следует из формулы (5), связана с абсолютной погрешностью определения временного интервала для используемых средств измерений простой формулой:

$$\Delta A = \sqrt{2} \frac{\Delta t}{t_{\text{ср}}}. \quad (15)$$

При углах поворота преобразователя, в локальных осях, близких к $\frac{\pi}{4}$, где «кажушаяся» анизотропия стремится к нулю (а именно эти углы нас интересуют для поиска величины γ), формула (15) упрощается:

$$\Delta\gamma = \sqrt{(\Delta\alpha)^2 + \frac{(\Delta A)^2}{4A^2}}. \quad (16)$$

Из формулы (16) следует, что чем меньше абсолютная величина истинной анизотропии, тем с большей погрешностью определяется угол γ . Этот вывод иллюстрируется нижеприведенным графиками на рис. 5, где представлены зависимости погрешности определения угла поворота локальных осей анизотропии $\Delta\gamma$ от величины истинной анизотропии для различных погрешностей установки угла поворота преобразователя $\Delta\alpha$ в диапазон от 1 до 10 град. Погрешности определения анизотропии (как истинной, так и «кажушейся»), обычно находятся в диапазоне 0,005—0,1 % в зависимости от используемых средств измерений и особенностей исследуемого материала, определяющих возможность прецизионного измерения задержек ультразвуковых импульсов. Для рис. 5 использовано значение погрешности $\Delta A = 0,05$ %, которая, как пояснено ниже, метрологически обеспечена используемыми средствами измерений.

Оценим минимальное значение истинной анизотропии, начиная с которого возможно определение угла поворота γ с допустимой погрешностью. Считаем, что допустимая погрешность связана с погрешностью установки преобразователя соотношением:

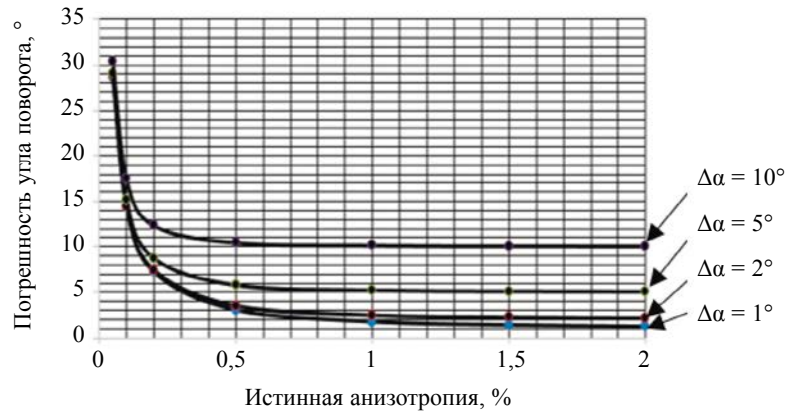


Рис. 5. Влияние величины истинной анизотропии на погрешность определения угла поворота локальных осей анизотропии.

$$k = \frac{\Delta\gamma}{\Delta\alpha}, \quad (17)$$

где $k > 1$ — некоторая постоянная, величина которой зависит от требуемой погрешности определения угла γ . Тогда для значения анизотропии, при которой гарантирована погрешность $\Delta\gamma$, получим соотношение:

$$A \geq \frac{k}{2\sqrt{k^2 - 1}} \frac{\Delta A}{\Delta\gamma}. \quad (18)$$

Реальная погрешность установки преобразователя имеет порядок $\pm 5^\circ$. Если необходимо обеспечить величину погрешности $\Delta\gamma$ не более $\pm 6^\circ$ (т.е. $k = 1,2$), то соотношение (18) конкретизируется следующим образом: $A \geq 0,7\%$. Таким образом, при данных значениях погрешностей $\Delta\alpha$ и $\Delta\gamma$ результаты определения углов поворота локальных осей анизотропии нельзя считать достоверными, если акустическая анизотропия материала менее $0,7\%$.

Для реализации описанной процедуры использовали устройство [25], содержащее две рядом расположенные пьезопластинки горизонтальных поперечных волн в форме равнобедренных прямоугольных треугольников с катетами 5 мм и общей гипотенузой. Пьезопластины поляризованы в ортогональных направлениях [26]. При повороте такого совмещенного преобразователя вокруг оси OX_1 и непрерывной фиксации величины «кажущейся» анизотропии можно достаточно точно определить величину угла γ , если выполнено условие (18).

После определения угла поворота локальных осей анизотропии γ само значение истинной анизотропии A может быть определено двумя способами:

обычным способом по формуле (4), в которой задержки t_2, t_3 аналогичны поляризациям пьезопластинок вдоль локальных осей анизотропии OX'_2 и OX'_3 соответственно;

уточненным способом в соответствии с процедурой, аналогичной предложенной в [25], с учетом того, что поляризация одной из пьезопластинок совершает поворот от направления, соответствующего углу γ до направления $\gamma + \frac{\pi}{2}$, поляризация второй пьезопластинки вращается в диапазоне углов от $\gamma + \frac{\pi}{2}$ до $\gamma + \pi$.

На рис. 6а—в приведены осциллограммы импульсов горизонтально поляризованных волн для различных ситуаций. Для приведенных осциллограмм амплитуда первого импульса для всех случаев измерений принята за 100 %.

Сравнение осциллограмм на рис. 6а—в показывает заметное увеличение затухания при значительной пластической деформации: от 0,10 до 0,16 Нп/мкс.

Рис. 6в показывает, что расщепления импульсов, поляризованных под углом 45° к осям анизотропии, не происходит для донных сигналов с приемлемым соотношением «сигнал/шум». Это затрудняет достаточно точное определение акустической анизотропии на основании оценки вре-

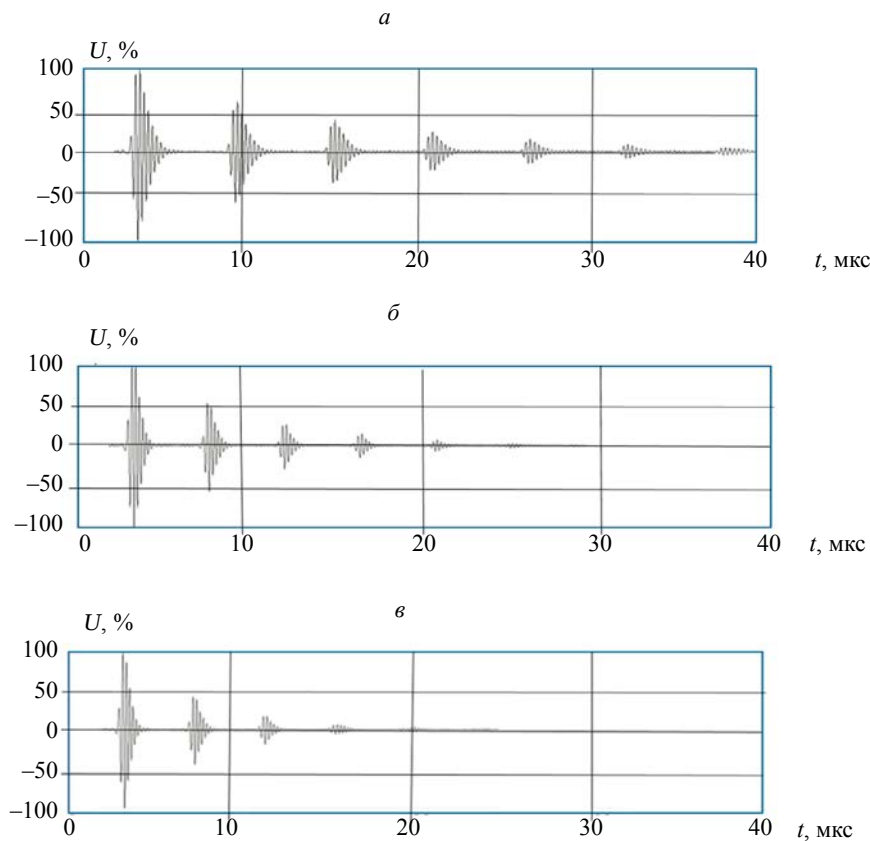


Рис. 6. Осциллограммы отраженных импульсов: исходный образец (акустическая анизотропия близка к 0, направление поляризации излучателя — вдоль НП) (а); образец, деформированный до образования шейки (20 % условной деформации, анизотропия в зоне измерений 0,8 %, направление поляризации излучателя — вдоль НП) (б); образец, деформированный до образования шейки (20 % условной деформации, анизотропия в зоне измерений 0,8 %, направление поляризации излучателя — под углом 45° к НП) (в).

менного сдвига между расщепленными импульсами, как это делается для материалов с высоким уровнем акустической анизотропии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для экспериментов использовали стандартные плоские образцы типа I по ГОСТ 1497 с толщиной рабочей части 7 мм и длиной 110 мм. Шероховатость рабочей поверхности Ra составляла 2,5 мкм по ГОСТ 2589. Измерения проводились для 5 одинаковых образцов.

Пластическое деформирование образцов осуществляли с помощью испытательной машины фирмы Tinius Oilsen Ltd, модель H100KU.

Акустические измерения проводили в моменты остановки верхней траверсы испытательной машины с помощью ИВК «АСТРОН», обеспечивающего возможность прецизионных измерений в реальном масштабе времени задержек и амплитуд ультразвуковых импульсов.

Определение задержек t_2 и t_3 проводили по 1 и 4 отраженным импульсам, что при толщине образца 7 мм составляло порядка 15 мкс.

Метрологически обеспеченная погрешность измерения временных интервалов Δt для ИВК «АСТРОН» составляет ± 2 нс.

Из формулы для анизотропии (4) следует выражение для абсолютной погрешности анизотропии:

$$\Delta A = \sqrt{2} \frac{\Delta t}{t_{cp}}. \quad (19)$$

Таким образом, абсолютная погрешность измерения анизотропии, как следует из формулы (19), теоретически не превышает величины 0,02 %, однако с учетом случайных факторов фактический доверительный интервал значений погрешности, полученный в результате многократных измерений, составил 0,05 % при доверительной вероятности 95 %, что мы и примем за фактическую погрешность определения акустической анизотропии.

Акустические измерения проводились вдоль рабочих частей образцов с шагом 5 мм.

На рис. 7 приведены распределения анизотропии вдоль центральной части образцов в исходном состоянии и деформированных на 5, 10, 15 и 20 %, что соответствовало моменту появления шейки.

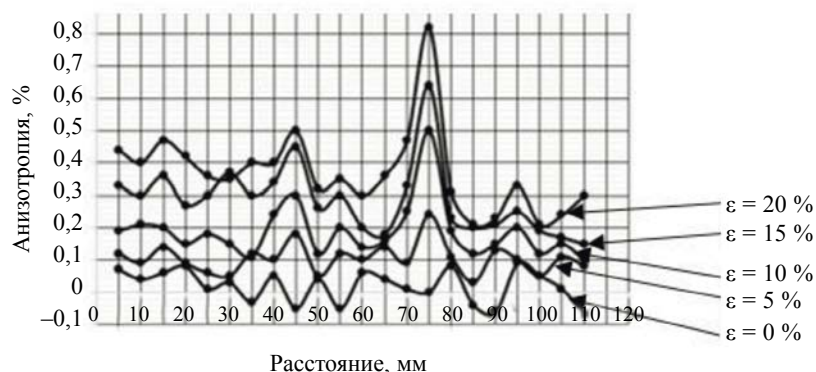


Рис. 7. Распределение акустической анизотропии по длине образца.

Из рис. 7 видно, что распределение анизотропии вдоль рабочей части образцов отличается заметной неоднородностью. При этом следует отметить важный факт: на достаточно ранних стадиях деформирования (не более 5 %) вдоль рабочей части начинают формироваться устойчивые локальные экстремумы анизотропии. Потеря устойчивости процесса деформирования произошло в зоне максимального экстремума, на расстоянии 75 мм от нижнего захвата. Данный результат соответствует ряду положений автоволновой механики пластической деформации [4, 9], согласно которым на стадии параболического упрочнения (а эта стадия является основной для исследуемого материала с ГЦК-структурой) очаги деформации наибольшей мощности (локальные максимумы) останавливаются и в наибольшем из них происходит потеря устойчивости деформации и дальнейшее разрушение. Аналогичное поведение параметра акустической деформации дает основание говорить о возможности разработки инженерной методики контроля закономерностей развития пластических деформаций, а после проведения представительных экспериментальных исследований — и о методике оценки ресурса пластичности и раннего обнаружения зон разрушения материала в составе высоконагруженных ответственных конструктивных элементов, подвергаемых повторно-статическим или циклическим нагрузкам большой амплитуды.

Авторы работ [1, 4] показывают, что в процессе пластической деформации поликристаллического материала возникают и эволюционируют на макроуровне не только поля смещений, но и поля поворотов. Естественно попытаться связать последние с введенным выше понятием поворота локальных осей акустической анизотропии. Экспериментально выявить наличие таких углов поворота в рамках проведенных экспериментов не удалось, что, по-видимому, объясняется большой погрешностью определения угла поворота локальных осей акустической анизотропии вследствие ее малой величины (см. формулу (16)).

ВЫВОДЫ

1. Предложена расчетно-экспериментальная методика определения акустической анизотропии слабо анизотропного ортотропного материала, позволяющая определить не только степень локальной акустической анизотропии, но и ее направление.

2. Проанализированы источники погрешностей предлагаемой методики и границы ее применимости в инженерной практике.

3. Проведены эксперименты на образцах из горячекатаного листа сплава АМг61 по исследованию влияния пластической деформации на закономерности изменения пространственного распределения акустической анизотропии.

4. В целом результаты подтверждают положения автоволновой механики пластичности металлов в части формирования стационарных максимумов пластической деформации на стадии параболического упрочнения: на достаточно ранних стадиях деформирования (не более 5 %) вдоль рабочей части образца начинают формироваться устойчивые локальные экстремумы анизотропии. Потеря устойчивости процесса деформирования произошло в зоне максимального экстремума.

5. Полученные результаты дают основание надеяться, что после проведения представительных экспериментальных исследований может быть разработана инженерная методика неразрушающей оценки ресурса пластичности и раннего обнаружения зон разрушения материала в составе высоконагруженных ответственных конструктивных элементов, подвергаемых повторно-статическим или циклическим нагрузкам большой амплитуды.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев Л.Б., Баранникова С.А. Автоволновая механика пластичности металлов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2019. № 1. С. 49—63.
2. Pelleg J. Mechanical Properties of Materials. Dordrecht: Springer, 2013. 634 p.
3. Messerschmidt U. Dislocation Dynamics during Plastic Deformation. Berlin: Springer, 2010. 503 p.
4. Зуев Л.Б. Автоволновая пластичность. Локализация и коллективные моды. М.: Физматлит, 2018. 207 с.
5. Haken H. Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems. Berlin: Springer Verlag, 2005. 317 p.
6. Zuev L.B., Barannikova S.A., Lunev A.G. Elastic-plastic invariant of strain in metals // Progress in Physics Metals. 2018. V. 18. No. 4. P. 379—481.
7. Zuev L.B., Barannikova S.A., Semukhin B.S. Kinetics of Macrolocalization of Plastic Flow of Metals // Physics of the Solid State. 2018. V. 60 (7). P. 1358—1364.
8. Reyne B., Manach P.-Y., Moes N. Macroscopic consequences of Poibert-Luders and Portevin-Le Chatelier bands during tensile Deformation in Al—Mg alloys // Materials Science & Engineering A. 2019. V. 746. P. 187—196.
9. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука, 2008. 327 с.
10. Муравьева О.В., Муравьев В.В. Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 3—11.
11. Матюк В.Ф. Состояние неразрушающего контроля штампуемости листового проката сталей // Неразрушающий контроль и диагностика. 2012. № 3. С. 15—42.
12. Самокрутов А.А., Бобров В.Т., Шевалдыкин В.Г., Козлов В.Н., Алехин С.Г., Жуков А.В. Исследование анизотропии проката и ее влияния на результаты акустических измерений // Контроль. Диагностика. 2003. № 11. С. 6—19.
13. Семенов А.С., Полянский В.А., Штукин Л.В., Третьяков Д.А. Влияние поврежденности поверхностного слоя на акустическую анизотропию // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59. № 6. P. 201—210.
14. Волкова Л.В., Муравьева О.В., Муравьев В.В., Булдакова И.В. Прибор и методики измерения акустической анизотропии и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10. № 1. С. 42—52.
15. Углов А.Л., Хлыбов А.А. О контроле напряженного состояния газопроводов из анизотропной стали методом акустоупругости // Дефектоскопия. 2015. № 4. С. 9—19.
16. Курашкин К.В. Исследование акустоупругого эффекта в анизотропном пластически деформированном материале // Акустический журнал. 2019. Т. 65. № 3. С. 382—388.
17. Беляев А.К., Полянский В.А., Третьяков Д.А. Оценка механических напряжений, пластических деформаций и поврежденности посредством акустической анизотропии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 4. С. 130—151. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.12
18. Belyaev A.K., Polyanskiy V.A., Semenov A.S., Tretyakov D.A., Yakovlev Yu.A. Investigation of the correlation between acoustic anisotropy, damage and measures of the stress-strain state // Procedia Structural Integrity. 2017. V. 6. P. 201—207.

19. Беляев А.К., Полянский В.А., Третьяков Д.А. Оценка механических напряжений, пластических деформаций и поврежденности посредством акустической анизотропии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 4. С. 130—151. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.12
20. Kobayashi M. Ultrasonic nondestructive evaluation of microstructural changes of solid materials under plastic deformation. Part I. Theory // International Journal of Plasticity. 1998. V. 14. No. 6. P. 511—522.
21. Беляев А.К., Лобачев А.М., Модестов В.С. Пивков А.В., Полянский В.А., Семенов А.С., Третьяков Д.А., Штукин Л.В. Оценка величины пластических деформаций с использованием акустической анизотропии // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2016. № 5. С. 124—131.
22. Дьелесан Э., Руайе Д.М. Упругие волны в твердых средах. Применение для обработки сигналов. М.: Наука, 1982. 424 с.
23. Углов А.Л., Ерофеев В.И., Смирнов А.Н. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. М.: Наука, 2009. 280 с.
24. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В., Чернявский А.Г. Пластическая дисторсия — фундаментальный механизм в нелинейной мезомеханике пластической деформации и разрушения твердых тел // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 1. С. 31—46.
25. Хлыбов А.А., Углов А.Л., Андрианов В.М., Рябов Д.А., Кувишинов М.О. Способ определения акустической анизотропии слабо анизотропного проката / Патент на изобретение № 2745211. Оpubл. 22.03.2021. Бюл. № 9.
26. Хлыбов А.А., Углов А.Л., Прилуцкий М.А. Ультразвуковой датчик сдвиговых волн / Патент на изобретение № 2365911. Оpubл. 27.08.2009. Бюл. № 24.

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ ОСИНЫ (*POPULUS TREMULA*), МОДИФИЦИРОВАННОЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

© 2023 г. А.А. Вьюгинова^{1,*}, А.В. Теплякова^{1,**}, Е.С. Попкова^{1,***}

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Россия 197376 Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5
E-mail: *aavyuginova@etu.ru; **avteplyakova@etu.ru; ***espopkova@etu.ru

Поступила в редакцию 09.10.2022; после доработки 16.12.2022

Принята к публикации 16.12.2022

Оценка акустических свойств объектов с использованием полученных результатов в качестве информативного параметра при определении физико-механических характеристик материала, а также в области неразрушающего контроля объектов, широко применяется в современной науке и технике. Рассмотрена возможность использования данного подхода применительно к деревообрабатывающей промышленности с целью оценки характеристик пиломатериалов, модифицированных ультразвуковым методом. Результаты предыдущих исследований показали эффективность данной технологии для повышения поверхностной плотности и твердости древесины, в связи с чем одной из актуальных задач является поиск критериев, позволяющих оценивать достигаемые параметры модификации, а также оптимизировать настройки соответствующего технологического оборудования. Приведены результаты исследования акустических свойств модифицированной ультразвуковым методом древесины осины (*Populus tremula*), а также показана их применимость в качестве критерия оценки степени модификации заготовок пиломатериалов.

Ключевые слова: ультразвуковая технология, древесина, модификация, поверхностная плотность, акустические свойства, неразрушающий контроль.

DOI: 10.31857/S0130308223010049, EDN: BVETHU

ВВЕДЕНИЕ

Древесина является широко распространенным натуральным материалом, который находит разнообразное применение в самых различных сферах деятельности, в том числе пиломатериалы различного типа широко применяются в строительной отрасли. Преимущества древесины хорошо известны — это экологичность, прочность, простота обработки, внешний вид и относительно низкая цена.

Древесина характеризуется рядом физических и механических свойств, среди которых для строительных материалов внутренней и внешней отделки одним из важнейших является твердость. Твердость поверхности древесины напрямую связана с ударопрочностью, устойчивостью к истиранию и царапинам — чем выше твердость поверхности и плотность древесины, тем меньше она подвержена износу и разрушению.

Классические методы обработки древесины, направленные на повышение ее эксплуатационных характеристик, такие как термомеханическая, химико-механическая, термохимическая, химическая модификации, требуют применения сложных технологических процессов, включающих целый ряд этапов, они являются энергозатратными, а также, как правило, предполагают использование токсичных химических составов [1—3], что приводит в конечном итоге к значительному повышению стоимости продукции. Тем не менее модификация позволяет значительно улучшить такие характеристики древесины как плотность, твердость, прочность, а также снизить гигроскопичность, расширяя, таким образом, возможные сферы применения древесины как конструкционного и отделочного материала. Это обуславливает актуальность задачи поиска новых методов и технологий модификации древесины, которые были бы лишены вышеперечисленных недостатков, а также определения акустических свойств древесины и их качественной и функциональной взаимосвязи с физико-механическими характеристиками как критерия оценки эффективности процесса модификации.

Одним из направлений модификации строительных и отделочных пиломатериалов является модификация поверхности (или лицевого слоя) древесины, которая находится в непосредственном контакте с окружающей средой и подвергается непосредственному воздействию [4]. Такие способы призваны обеспечить улучшение качества строительных пиломатериалов и приемлемую стоимость в отличие от методов глубокой модификации. Для снижения себестоимости модификации поверхности древесины важным является возможность реализации технологии на оборудовании проходного, непрерывного типа и снижение энергозатрат. Некоторые из традиционных вариантов технологий [5, 6], которые предлагались для этих целей, обеспечивают возможность

реализации непрерывного режима обработки, но во всех случаях необходим нагрев и поддержание температуры заготовки, что требует значительных энергозатрат и снова значительно повышает стоимость конечного продукта. Авторами работ [7—10] был предложен способ модификации поверхностного слоя древесины на оборудовании проходного типа с использованием мощных ультразвуковых колебаний, без использования температуры или химических составов. Технология позволяет уплотнить поверхностный слой древесины на глубину 1-2 мм при минимальном увеличении себестоимости.

Технологии и оборудование для воздействия на древесину мощными ультразвуковыми колебаниями с целью изменения ее формы и свойств были описаны в ряде патентов ранее [11—13], однако во всех случаях ультразвук не воздействовал непосредственно на поверхность древесины, что не позволяло обеспечить обработку с большой амплитудой и интенсивностью ультразвуковых колебаний.

Что касается возможностей применения ультразвука в деревообрабатывающей промышленности, то в настоящий момент можно выделить следующие направления применения ультразвука: ультразвуковая сушка древесины, как правило, в комбинации с нагревом [14]; ультразвуковая резка [15, 16]; использование энергии ультразвуковых колебаний для изменения структуры древесины (пластификация, дефибрирование [17, 18]) и извлечения ее компонентов [19] — при этом обработка происходит в результате возникновения кавитационных эффектов в жидкости, в которую помещается образец; ультразвуковое обеззараживание древесины [14]; неразрушающий контроль древесины [20—24], а также определение ее свойств [25—32].

В данной работе впервые была поставлена задача исследования акустических свойств древесины осины (*Populus tremula*), модифицированной ультразвуковым методом, оценки влияния уплотнения поверхностей пиломатериалов на акустические свойства и, в связи с этим, оценка возможности их использования в качестве критерия степени модификации. Подобным образом оценке могут быть подвергнуты также пиломатериалы, поверхность которых была уплотнена с использованием других методов — принципиальным является исследование влияния уплотненных поверхностных слоев.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Идея ультразвукового метода обработки состоит в том, чтобы реализовать принцип ультразвукового волочения (экструзии) древесного материала через ультразвуковой модуль и тем самым добиться уплотнения поверхности древесины. Зазор между ультразвуковыми волноводами меньше толщины пиломатериала, при этом ультразвуковое воздействие высокой интенсивности позволяет перемещать пиломатериалы через зазор. Разница между толщиной пиломатериалов и зазором регулируется, она обозначена как Δ — чем больше эта разница, тем выше степень обработки. Мощные ультразвуковые колебания, которые непосредственно воздействуют на поверхность древесины при непосредственном контакте с ультразвуковыми волноводами, уменьшают трение в зоне контакта и модифицируют поверхность древесины, таким образом происходит одновременное повышение плотности и твердости поверхности пиломатериала. Заготовка подается через зазор с помощью гидравлической системы подачи. Система подачи состоит из привода и толкателя, который перемещается вдоль рамы станка и транспортирует заготовку в ультразвуковой модуль. В результате после обработки пиломатериалы имеют меньшую толщину, повышенную плотность и твердость поверхностного слоя.

Для исследований было подготовлено три образца пиломатериала из осины (*Populus tremula*): влажность — 12 %, длина — 1 м, ширина — 90 мм, толщина — 24,7 мм. Исследуемые образцы, расположенные перед ультразвуковым модулем оборудования, приведены на рис. 1. Предварительно по длине всех трех образцов были проведены измерения средней скорости распространения (времени распространения) ультразвука по толщине, описание используемого оборудования и методики измерений приведены ниже.

После этого каждый из трех образцов был обработан с использованием ультразвукового оборудования, причем модифицируемые участки каждого образца были обработаны с различными значениями Δ : 1,7, 2,7 и 3,7 мм, в результате на каждом образце были сформированы три области, каждая следующая из которых модифицирована в большей степени, чем предыдущая. Эскиз обработанного образца приведен на рис. 2. Такой способ подготовки образцов был выбран для исключения влияния погрешностей, связанных с возможной индивидуальной внутренней структурой каждого образца, и для повышения достоверности экспериментов, при этом измерения после модификации проводились в тех же точках, что и до модификации.



Рис. 1. Исследуемые образцы пиломатериалов перед модулем ультразвуковой обработки.

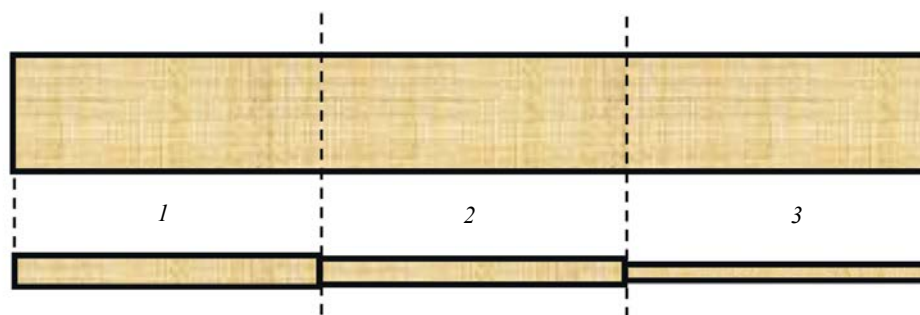


Рис. 2. Схема обработки исследуемых образцов, модифицированных ультразвуковым методом:
1 — $\Delta = 1,7$ мм; 2 — $\Delta = 2,7$ мм; 3 — $\Delta = 3,7$ мм.

Микрофотографии внутренней структуры среза пиломатериалов из древесины осины (*Populus tremula*), прошедших ультразвуковую модификацию, приведены на рис. 3. Результатом обработки является смятие сосудов древесины, смещение поверхностных слоев, в следующем от поверхности годичном слое — такие деформации приводят к уменьшению пористости поверхностных слоев древесины и увеличению ее плотности. Таким образом, на обеих поверхностях пиломатериала (сверху и снизу) формируются уплотненные слои, влияние которых на акустические свойства образцов предстоит оценить.

Далее для каждого участка образца проводили многократные измерения времени прохождения акустического импульса по толщине заготовки, при этом были выбраны отдельные пьезопреобразователи продольной волны с рабочей частотой 600 кГц, реализован сухой акустический контакт. Измерительная установка на основе универсального дефектоскопа ISONIC-2006 приведена на рис. 4. Время прохождения акустического импульса фиксировалось по переднему фронту первого прошедшего сигнала.

На рис. 5 приведены осциллограммы принимаемых сигналов для различных участков одного из образцов по мере увеличения степени обработки Δ . На осциллограммах прослеживается тенденция к увеличению времени прихода первого прошедшего акустического импульса с повышением степени обработки, несмотря на уменьшение толщины с повышением степени обработки, что говорит об уменьшении средней скорости прохождения акустического импульса сквозь образцы с повышением степени модификации.

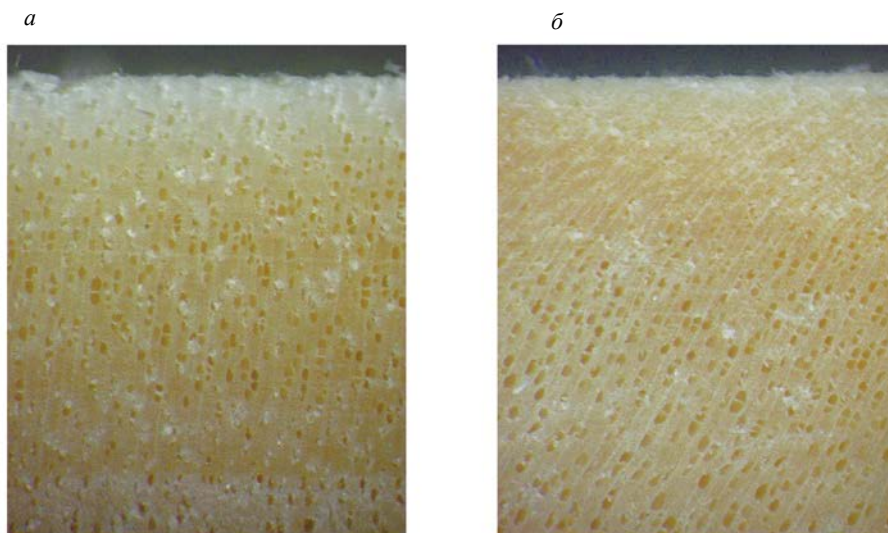


Рис. 3. Микрофотография внутренней структуры среза древесины осины (*Populus tremula*):
 а — контрольный; б — после ультразвуковой модификации.



Рис. 4. Измерительная установка.

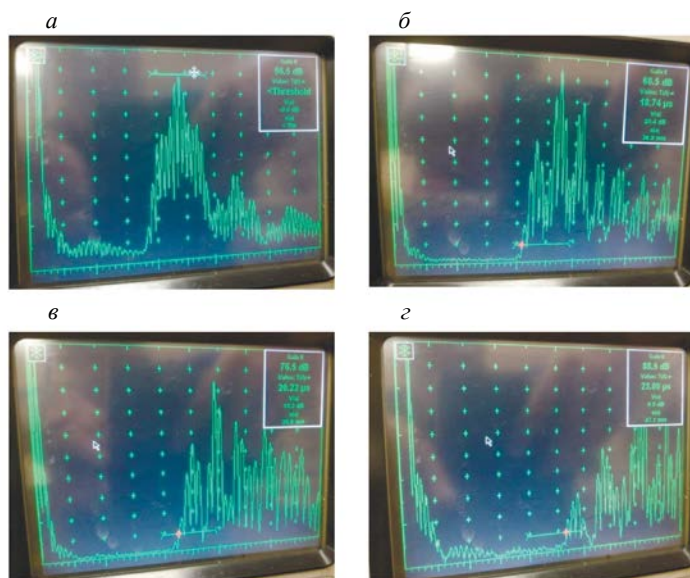


Рис. 5. Осциллограммы принимаемых сигналов:
 а — образец до модификации; б — модифицированный участок при $\Delta = 1,7$ мм; в — модифицированный участок при $\Delta = 2,7$ мм;
 г — модифицированный участок при $\Delta = 3,7$ мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерения времени прохождения t продольной акустической волны по толщине трех образцов модифицированного ультразвуковым методом пиломатериала из осины (*Populus tremula*) для участков с различной степенью обработки Δ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Номер образца	Номер участка	Степень обработки Δ , мм	Время t , с
1	До обработки	До обработки	$16,4 \pm 0,2$
	1	1,7	$17,8 \pm 0,1$
	2	2,7	$19,1 \pm 0,5$
	3	3,7	$20,4 \pm 0,4$
2	До обработки	До обработки	$21,2 \pm 0,8$
	1	1,7	$23,7 \pm 0,7$
	2	2,7	$24,4 \pm 1,0$
	3	3,7	$25,6 \pm 0,9$
3	До обработки	До обработки	$17,5 \pm 0,4$
	1	1,7	$19,1 \pm 0,8$
	2	2,7	$20,4 \pm 0,2$
	3	3,7	$20,3 \pm 0,3$

На рис. 6 приведен построенный по полученным экспериментальным данным график зависимости средней скорости продольной волны от степени обработки Δ пиломатериалов из осины (*Populus tremula*).

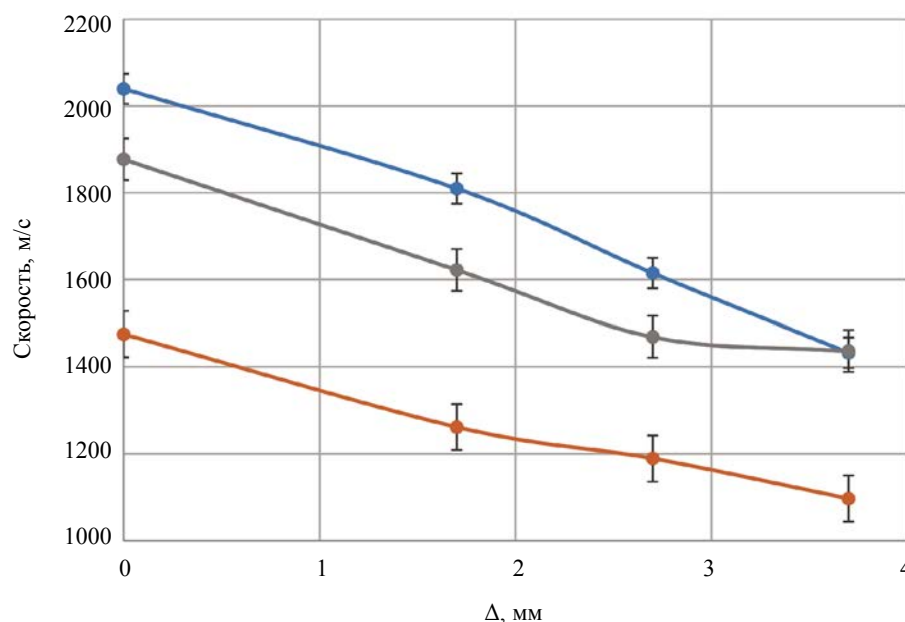


Рис. 6. Зависимость средней скорости продольной волны от степени модификации образцов ультразвуковым методом.

Как видно, средняя скорость распространения продольной акустической волны во всех трех образцах уменьшается по мере увеличения степени обработки, т.е. по мере увеличения плотности и изменения свойств поверхностных слоев. Характер данной зависимости, по-видимому, можно объяснить двумя обстоятельствами. Первое: в результате ультразвуковой модификации образцов упругие постоянные древесины в среднем изменяются незначительно, а средняя плотность возрастает, и поскольку общее выражение для определения скорости звука в среде имеет вид:

$$c = \sqrt{\frac{C_{ij}}{\rho}},$$

где C_{ij} — упругие постоянные; ρ — плотность, то с возрастанием плотности (в данном случае, средней плотности, так как уплотнению подвергаются поверхностные слои древесины) средняя скорость распространения уменьшается. Второе: результатом модификации является искривление и смещение поверхностных слоев, а изменение направления внутренней структуры, которая формируется в направлении, перпендикулярном прозвучиванию, также может приводить к снижению скорости распространения ультразвуковой волны.

Полученная зависимость ярко выражена: снижение средней скорости для трех образцов составляет в среднем 26 %, при этом зависимости имеют почти линейный характер, зависимости аналогичны для всех образцов независимо от начального значения средней скорости до ультразвуковой обработки. Таким образом, данные измерений средней скорости распространения продольной ультразвуковой волны могут быть использованы для оценки степени модификации древесины, степени уплотнения ее поверхностных слоев, а также являться информативным параметром для оценки достигаемой плотности поверхности и применяться для настройки параметров оборудования при ультразвуковой модификации. Подобным образом оценке могут быть подвергнуты также пиломатериалы, поверхность которых была уплотнена с использованием других методов.

ВЫВОДЫ

В данной работе впервые были исследованы акустические свойства образцов пиломатериалов, подвергшихся модификации ультразвуковым методом. Были проведены измерения времени распространения продольной акустической волны в поперечном направлении образцов из осины (*Populus tremula*), поверхность которых была модифицирована с использованием ультразвукового оборудования проходного типа с различными параметрами обработки, соответствующими различной достигаемой плотности поверхностных слоев.

В результате проведенных исследований установлена обратная зависимость средней скорости продольной акустической волны в образцах из осины (*Populus tremula*) от степени обработки, т.е. от результирующей плотности поверхности. Среднее значение снижения средней скорости составило 26 %, зависимости имеют почти линейный характер и аналогичны для всех образцов независимо от начального значения средней скорости до ультразвуковой обработки.

Таким образом, полученные закономерности изменения средней скорости продольной ультразвуковой волны могут быть использованы в качестве критерия оценки степени уплотнения поверхности заготовок пиломатериалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sandberg D., Kutnar A., Karlsson O., Jones D. Wood Modification Technologies: Principles, Sustainability, and the Need for Innovation /1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2021.
2. Dominkovics Z., Dányádi L., Pukánszky B. Surface modification of wood flour and its effect on the properties of PP/wood composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2007. V. 38. P. 1893—1901. DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.04.001
3. Petrič M. Surface Modification of Wood // Reviews of Adhesion and Adhesives. 2013. V.2. P. 216—247. DOI: 10.7569/RAA.2013.097308
4. Tarkow H., Seborg R. Surface densification of wood // Forest Products Journal. 1968. V. 18. No. 9. P. 104—107.
5. Sadatnezhad S.H., Khazaeian A., Sandberg D., Tabarsa T. Continuous surface densification of wood: a new concept for large-scale industrial processing // Bioresources. 2017. V. 12. No. 2. P. 3122—3132.
6. Neyses B. Surface Densification of Solid Wood: Paving the Way Towards Industrial Implementation / PhD dissertation. Lulea University of Technology. 2019.
7. Иванов В.А., Новик А.А., Новик А.А.(мл.), Новик (Вьюгинова) А.А. Устройство для ультразвуковой обработки древесины / Патент РФ 2419537. 2011.

8. Вьюгинова А., Вьюгинов С. Устройство для ультразвуковой обработки пиломатериалов / Патент РФ 130909. 2013.
9. Вьюгинова А.А., Вьюгинов С.Н., Новик А.А. Устройство для ультразвуковой модификации пиломатериалов / Патент РФ 213732. 2022.
10. Vjuginova A.A., Novik A.A., Vjuginov S.N., Ivanov V.A. Ultrasonic modification for improvement of wood-Surface properties // Wood Material Science & Engineering. 2021. DOI: 10.1080/17480272.2021.2006778.
11. Sun-Tae An. Method and apparatus for increasing the hardness and intensity of wood / Patent WO2000013865A3. 2000.
12. Ерофеев А., Конохов А., Легуша Ф., Попов Н., Пугачев С., Семенова Н., Сун-Тэ Ан. Способ уплотнения и формообразования изделий из цельной древесины и устройство для его осуществления / Патент РФ 2122944. 1998.
13. Ерофеев А., Конохов А., Легуша Ф., Попов Н., Пугачев С., Семенова Н., Сун-Тэ Ан. Способ уплотнения и формообразования цилиндрических изделий из цельной древесины и устройство для его осуществления / Патент РФ 2134195. 1998.
14. Bucur V. Acoustics of wood. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. 396 p. DOI: 10.1007/3-540-30594-7
15. Kato K., Tsuzuki K., Asano I. Studies on vibration cutting of wood, part 1 // J. Jap. Wood Res. Soc. 1971. V. 17. P. 57—65.
16. Koc A. B., Liu B. Ultrasonic Cutting of Switchgrass and Miscanthus Stems // Applied Engineering in Agriculture. 2018. V. 34. P. 343—353. DOI: 10.13031/aea.11942
17. Zhengbin H., Zhenyu W., Zijian Z., Songlin Y., Jun M., Xiaoxu W. Influence of ultrasound pretreatment on wood physicochemical structure // Ultrasonics Sonochemistry. 2017. V. 34. P. 136—141. DOI: 10.1016/j.ultronch.2016.05.035
18. Qian J., Li Y., Gao J., He Z., Yi S. The effect of ultrasonic intensity on physicochemical properties of Chinese fir // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. V. 64. 104985. DOI: 10.1016/j.ultronch.2020.104985
19. Bhagya Raj G.V.S., Dash K. K. Ultrasound-assisted extraction of phytochemicals from dragon fruit peel: Optimization, kinetics and thermodynamic studies // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. V. 68. P. 105180. DOI: 10.1016/j.ultronch.2020.105180
20. Bucur V. Ultrasonic techniques for nondestructive testing of standing trees // Ultrasonics. 2005. V. 43. P. 237—239. DOI: 10.1016/j.ultras.2004.06.008
21. Li L., Wang X., Wang L., Allison R. B. Acoustic tomography in relation to 2D ultrasonic velocity and hardness mappings // Wood Science and Technology. 2021. V. 46. P. 551—561. <https://doi.org/10.1007/s00226-011-0426-y>
22. Dahmen S., Ketata H., Ghazlen M. H. B., Hosten B. Elastic constants measurement of anisotropic Olivier wood plates using air-coupled transducers generated Lamb wave and ultrasonic bulk wave // Ultrasonics. 2010. V. 50. P. 502—507. DOI: 10.1016/j.ultras.2009.10.014
23. Longo R., Delaunay T., Laux D., El Mouridi M., Arnould O., Le Clézio E. Wood elastic characterization from a single sample by resonant ultrasound spectroscopy // Ultrasonics. 2012. V. 52. P. 971—974. DOI: 10.1016/j.ultras.2012.08.006
24. Chubinskii A.N., Tambi A.A., Teppoev A.V., Semishkur S.O., Bakhshieva M.A., Anan'eva N.I. Physical nondestructive methods for the testing and evaluation of the structure of wood-based materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. P. 693—700. DOI: 10.1134/S1061830914110023
25. Dündar T., Wang X., Avci N., As E. Potential of ultrasonic pulse velocity for evaluating the dimensional stability of oak and chestnut wood // Ultrasonics. 2016. V. 66. P. 86—90. DOI: 10.1016/j.ultras.2015.11.007
26. Fathi H., Kazemirad S., Nasir V. Lamb wave propagation method for nondestructive characterization of the elastic properties of wood // Applied Acoustics. 2021. V. 171. P. 107565. DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107565
27. Ozyhar T., Hering S., Sanabria S. J., Niemz P. Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves // Wood Science and Technology. 2013. V. 47. P. 329—341. <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0499-2>
28. Vázquez C., Gonçalves R., Bertoldo C., Baño V., Vega A., Crespo J., Guaita M. Determination of the mechanical properties of Castanea sativa Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods // Wood Science and Technology. 2015. V. 49. P. 607—622. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0719-7>
29. Salmi A. Ultrasonic quantitative strength assessment of artificially aged and archaeological wood samples // The Journal of the Acoustical Society of America. 2008. V. 123. P. 3607—3607. DOI: 10.1121/1.2934789
30. Yaitskova N., van de Kuilen J. W. Time-of-flight modeling of transversal ultrasonic scan of wood // The Journal of the Acoustical Society of America. 2014. V. 135. P. 3409—3415. DOI: 10.1121/1.4873519
31. Koczan G., Karwat Z., Kozakiewicz P. An attempt to unify the Brinell, Janka and Monnin hardness of wood on the basis of Meyer law // Journal of Wood Science. 2021. V. 67. P. 7. DOI: 10.1186/s10086-020-01938-4
32. Kang C.-W., Jang E.-S., Lee N.-H., Jang S.-S., Lee M. Air permeability and sound absorption coefficient changes from ultrasonic treatment in a cross section of Malas (*Homalium foetidum*) // Journal of Wood Science. 2021. V. 67. No. 10. DOI: 10.1186/s10086-020-01940-w

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЦИКЛИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ РАСТЯЖЕНИЕМ СТАЛИ 09Г2С, ИЗГОТОВЛЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

© 2023 г. А.Н. Сташков^{1,*}, А.П. Ничипурук¹, Е.А. Щапова¹, Н.В. Гордеев¹, И.В. Вшивцев¹, Н.В. Казанцева¹

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,

Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

*E-mail: stashkov@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 21.10.2022; после доработки 09.12.2022

Принята к публикации 11.12.2022

Проведены испытания на малоцикловую усталость в упругопластической области деформаций образцов из стали 09Г2С, изготовленных на лазерном 3D-принтере методом селективного лазерного сплавления (СЛС-сталь). Измерены предельные петли гистерезиса и полевые зависимости обратимой магнитной проницаемости. Установлено, что нормализация при 980 °С (1 ч) снижает предел прочности СЛС-стали 09Г2С в 2 раза ($\sigma_B = 502$ МПа) и увеличивает относительное удлинение почти в 6 раз ($\delta = 34,6$ %), приближая эту сталь к литой стали 09Г2С. Магнитные свойства (H_c , B_r , μ_{max}) литой и СЛС-нормализованной стали до и после циклических испытаний схожи. Основные изменения этих свойств как литой, так и СЛС-стали наблюдаются на начальном этапе малоцикловых испытаний, дальнейшее увеличение количества циклов (вплоть до разрушения испытываемых образцов) не приводит к их существенному изменению. Характер изменения магнитоупругого поля H_σ , определенного из экспериментальных полевых зависимостей обратимой магнитной проницаемости, во время малоцикловых испытаний для литой и СЛС-сталей кардинально различается: для литой стали 09Г2С магнитоупругое поле H_σ практически не меняется с увеличением числа циклов, тогда как для стали 09Г2С, изготовленной с помощью селективного лазерного сплавления, на первых циклах испытаний наблюдается резкое возрастание величины H_σ на 30 %, что скорее всего связано с возрастанием остаточных механических напряжений.

Ключевые слова: сталь, селективное лазерное сплавление, термическая обработка, растяжение, малоцикловая усталость, магнитные свойства.

DOI: 10.31857/S0130308223010050, EDN: BVMBTK

ВВЕДЕНИЕ

Стальные детали и конструкции, будь то подъемные механизмы, мосты, трубопроводы, детали подвески и трансмиссии, испытывают во время работы знакопеременные нагрузки, иногда превышающие предел упругости. Известно, что циклические нагрузки в упругопластической зоне деформаций (испытания на малоцикловую усталость) приводят к деградации механических свойств стали и разрушению конструкции после количества циклов N . Вовремя заметить такую деградацию металла и предотвратить разрушение — важная задача диагностики, в том числе с привлечением физических неразрушающих методов [1].

Аддитивные технологии получили широкое распространение в аэрокосмической отрасли, медицине, автомобильной промышленности [2—5]. Стальные детали, изготовленные с помощью аддитивных технологий, в частности селективного лазерного сплавления (СЛС), зачастую имеют свойства, отличающиеся от свойств деталей из аналогичной марки стали, но изготовленных с помощью «традиционных» технологий (литьем, ковкой, прокаткой) [6]. В деталях, изготовленных с помощью лазерных 3D-принтеров, возникают остаточные механические напряжения в результате локального нагрева материала в зоне лазерного нагрева и неравномерного охлаждения. Формирование остаточных напряжений в результате теплового воздействия связано с неполной релаксацией термонапряжений. При охлаждении зоны релаксации до исходного состояния в ней должны возникнуть остаточные растягивающие напряжения, а в окружающую зону релаксации материале — компенсирующие их остаточные сжимающие напряжения. В работе [7] приводятся результаты нейтронографических исследований остаточных напряжений в разных направлениях образцов стали 17-4 PH.

В работах [8—10] был установлен монотонный характер деформации сталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий (СЛС-стали), при статических испытаниях. Однако зачастую инженерные конструкции испытывают циклические нагрузки в процессе работы. Данные об усталостных свойствах СЛС-сталей очень ограничены. В работе [11] авторы выявили гораздо лучшие усталостные свойства стали 316L в исходном состоянии по сравнению с аналогами, изготовленными

ми традиционным способом, что, как считается, было вызвано сильным сопротивлением ячеистых структур зарождению трещин. В работе [12] приводятся результаты исследований циклической долговечности СЛС-образцов из стали SS316L с ячеистой структурой.

В работе [13] были исследованы квазистатические свойства при растяжении нержавеющей стали 308L, поведение при циклической деформации, усталостная долговечность и механизмы усталостного разрушения. По сравнению с горячекатаными аналогами образцы, изготовленные с помощью аддитивной технологии WAAM (с помощью проволоочной дуги), показали несколько большую усталостную долговечность при относительно высоких амплитудах деформации, но меньшую усталостную долговечность при малых амплитудах деформации, что связано с их худшим зарождением трещин, но лучшим сопротивлением их распространению.

В работе [14] представлены результаты измерения анизотропии акустической скорости, модуля Юнга, модуля сдвига, коэффициента Пуассона СЛС-образцов из стали 09Г2С. Установлено, что анизотропия акустических свойств в образцах после релаксационного отжига (350 °С в течение 1 и 3 ч) составила 0,26 %, изменение скорости продольной волны в зависимости от стадии термообработки существенно и составляет 1,46 %, для скоростей поперечных волн это различие менее существенно и составляет 0,46 %.

На сегодняшний день отсутствуют работы, в которых приводятся данные о поведении магнитных свойств и остаточных механических напряжений СЛС-образцов из стали 09Г2С, подвергнутых малоцикловым испытаниям.

Вследствие чувствительности магнитных свойств к фазовым и структурным изменениям нами в работах [14—16] была предложена методика оценки остаточных механических сжимающих напряжений в пластически деформированных растяжением конструкционных и инструментальной углеродистых сталях. Методика заключается в экспериментальном определении из полевых зависимостей обратимой магнитной проницаемости магнитоупругого поля H_c и расчете остаточных сжимающих макронапряжений. Однако методика не была опробована на образцах, подвергнутых циклическим деформационным воздействиям.

Целью данной работы является установление закономерностей изменения магнитных свойств, в том числе магнитоупругого поля, чувствительного к действию механических напряжений, на разных этапах малоцикловых испытаний при одноосном растяжении образцов из стали 09Г2С, изготовленных методом селективного лазерного сплавления и литьем до и после термообработок.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве образцов сравнения были взяты литые образцы из конструкционной низколегированной стали 09Г2С (0,1 %С; 1,5 %Mn; <1 %Si). Образцы из СЛС-стали были изготовлены из исходного порошка стали 09Г2С российского производства с помощью лазерного 3D-принтера EOSINT 280M. В камеру принтера предварительно закачивался азот. Размеры фракции исходного порошка составляли от 10 до 45 мкм. Мощность лазера 3D-принтера составляла 200 Вт, диаметр пятна лазера — 50 мкм. Платформу для построения образцов подогревали до 100 °С для лучшей адгезии расплавленного порошка. Образцы отжигали вместе с подложкой при температуре 350 °С в течение 1 и 3 ч для уменьшения внутренних механических напряжений. После отжига образцы отрезали от подложки на электроэрозионном станке. Также часть образцов подвергли нормализации при 980 °С (время выдержки 30 мин), охлаждение на воздухе. Размер образцов для циклических испытаний и магнитных исследований составлял 2×3×120 мм³. На концах образцов были сделаны галтели для шпилечных захватов. Измерения петель магнитного гистерезиса проводили в пермеамetre с помощью измерительного комплекса REMAGRAPH C-500 производства фирмы Magnet Physik Dr. Steingroever GmbH (Германия).

Малоцикловые испытания проводили на разработанной гидравлической установке, представленной на рис. 1. К образцам прикладывалась растягивающая нагрузка, превышающая предел упругости, по достижении которой происходила разгрузка. Тип нагружения — «мягкое» (согласно ГОСТ 25.502—79). Частота циклирования по схеме «нагрузка—разгрузка» составляла ~0,05 Гц. Количество циклов и значение растягивающей нагрузки задавалось оператором, после чего работа установки проходила в автоматическом режиме. Погрешность задания нагрузки составила не более 1 %. После каждого этапа циклических испытаний определялось удлинение образцов. Образцы для проведения циклических испытаний с галтелями на концах для шпилечных захватов вырезались на электроэрозионном станке из исходных заготовок.

Полевые зависимости обратимой магнитной проницаемости были измерены на лабораторной установке, структурная схема которой представлена на рис. 2.

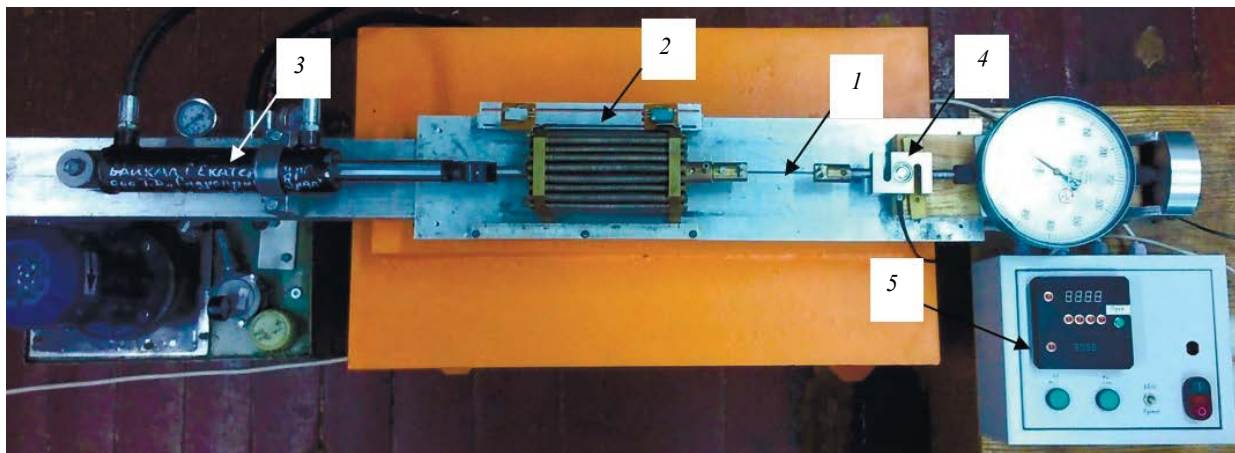


Рис. 1. Внешний вид установки для испытаний на малоцикловую усталость:
1 — испытуемый образец; 2 — демпфер; 3 — гидроцилиндр; 4 — электронный динамометр; 5 — блок управления.

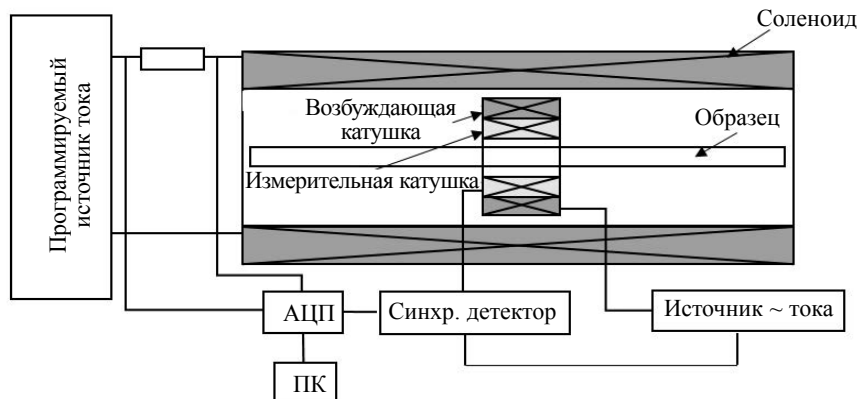


Рис. 2. Структурная схема установки для измерения полевых зависимостей обратимой магнитной проницаемости.

Перемагничивание образцов по предельной петле гистерезиса проводили в соленоиде при частоте изменения поля $5 \cdot 10^{-3}$ Гц. Максимальная напряженность магнитного поля в соленоиде была ± 350 А/см. В обмотку возбуждающей катушки подавался переменный ток небольшой амплитуды (амплитуда магнитного поля много меньше поля коэрцитивной силы образцов) с частотой 30 Гц. Полезный сигнал, пропорциональный обратимой магнитной проницаемости, был измерен катушкой (число витков 900) и детектирован на частоте подмагничивающего поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены измеренные полевые зависимости обратимой магнитной проницаемости образцов литой и СЛС-сталей 09Г2С до и после термической обработки. Все кривые имеют единственный максимум в области отрицательных полей. Наибольшее поле максимума имеет образец из СЛС-стали 09Г2С после гомогенизирующего отжига 350°C , 3 ч. Коэрцитивная сила такого образца также максимальная среди всех образцов. Дополнительная нормализация при 980°C (время выдержки 30 мин) привела к тому, что полевые зависимости для СЛС и литого образцов стали схожи.

На рис. 4 представлены графики зависимости относительного удлинения (δ) образцов литой и СЛС-сталей 09Г2С от количества циклов (N) при испытаниях на малоцикловую усталость. Для каждого образца рассчитывалась нагрузка, исходя из предварительно определенных в рамках

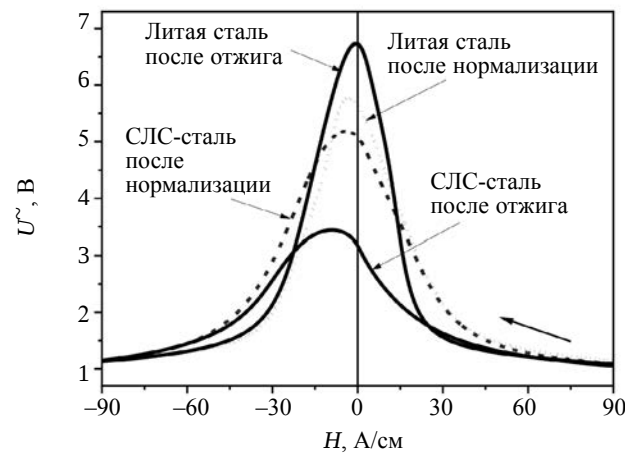


Рис. 3. Полевые зависимости обратимой магнитной проницаемости образцов литой и СЛС-сталей 09Г2С до циклических испытаний. Стрелкой показано направление перемангничивания.

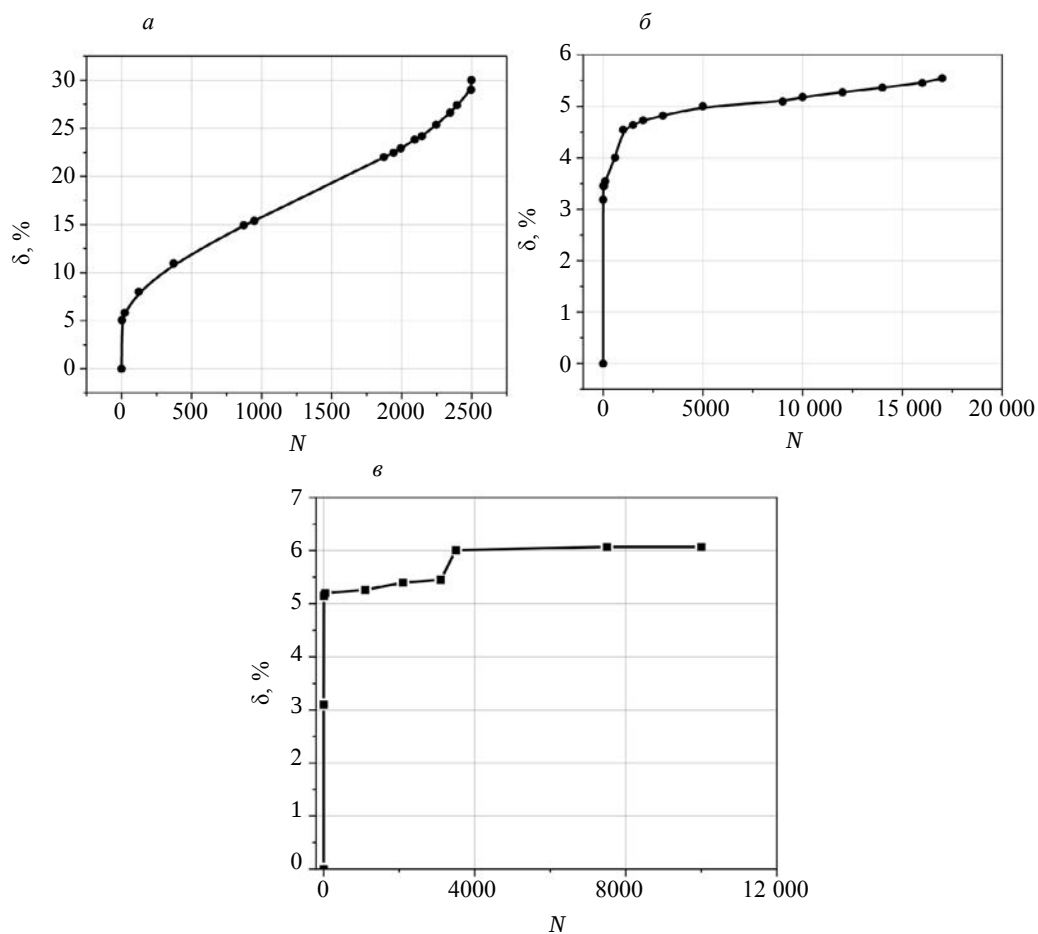


Рис. 4. Графики зависимостей относительного удлинения (δ) образцов литой и СЛС-сталей 09Г2С от количества циклов (N) при испытаниях на малоциковую усталость: литой образец после отжига (а); литой образец после нормализации (б); напечатанный (СЛС) образец после нормализации (в).

статических механических испытаний пределов упругости $\sigma_{0,2}$ и прочности σ_b . Превышение предела упругости составило от 20 до 70 %. Для отожженного СЛС-образца даже незначительное превышение предела упругости привело к его разрушению, поэтому испытания на малоцикловую усталость не проводились. Наибольшее превышение предела упругости (на 70 %) было для литого отожженного образца, наименьшее — для СЛС-нормализованного образца (на 22 %). Несмотря на это, литой отожженный образец выдержал до разрушения 2500 циклов. Из рис. 4 видно, что он был самым пластичным среди всех исследованных образцов, его относительное удлинение у которого в ходе испытаний достигло 30 %, при этом удлинение было монотонным и равномерным. Два других образца (литой нормализованный и СЛС-нормализованный) значительно удлинились на первых циклах испытаний, дальнейший рост относительного удлинения был от 3,5 до 5,5 % для литого нормализованного и от 5,1 до 6,4 % для СЛС-нормализованного образцов. Небольшая ступенька в районе 3000 циклов для СЛС образца (рис. 4в) связана с увеличением прикладываемых напряжений с $(1,1 \cdot \sigma_{0,2})$ до $(1,2 \cdot \sigma_{0,2})$. Нормализация литого образца привела к его упрочнению по сравнению с отожженным образцом. Более подробные структурные исследования приведены в работе [6].

На рис. 5 представлены результаты измерения коэрцитивной силы H_c , остаточной магнитной индукции B_r и максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\max}$ образцов из литой и СЛС-стали 09Г2С на разных стадиях циклических испытаний (при разном относительном количестве циклов N/N^* , где N^* — максимальное количество циклов до разрыва). Из рис. 5а и 5б видно, что начальные значения магнитных свойств образцов различаются. Наименьшая коэрцитивная сила (см. рис. 5а) наблюдается у исходного литого отожженного образца, наибольшая — у СЛС-нормализованного. Обратная тенденция имеется для максимальной магнитной проницаемости: наибольшее значение — у литого отожженного образца, наименьшее — у СЛС-нормализованного. После нескольких циклов нагружения—разгрузки коэрцитивная сила и максимальная обратимая проницаемость становятся близки, кривые $H_c(N/N^*)$ и $\mu_{\max}(N/N^*)$ идут рядом параллельно оси абсцисс. Значения остаточной магнитной индукции B_r (рис. 5б) циклически деформированных образцов различаются (минимальные значения — у литого отожженного образца), однако чувствительности к количеству циклов нет, т.е. кривые $B_r(N/N^*)$ после нескольких циклов деформации идут параллельно оси абсцисс.

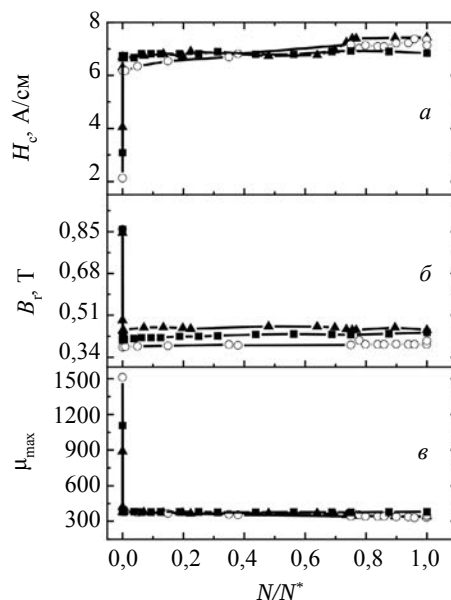


Рис. 5. Графики зависимостей коэрцитивной силы H_c (а), остаточной магнитной индукции B_r (б) и максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\max}$ (в) литой и СЛС-стали 09Г2С от относительного количества циклов при испытаниях на малоцикловую усталость: (○) — литая отожженная сталь; (■) — литая нормализованная сталь; (▲) — СЛС-нормализованная сталь.

На рис. 6 представлены полевые зависимости сигнала измерительной катушки $U \sim(H)$ нормализованных образцов из литой и СЛС-стали 09Г2С, измеренные до и после малоцикловых испыта-

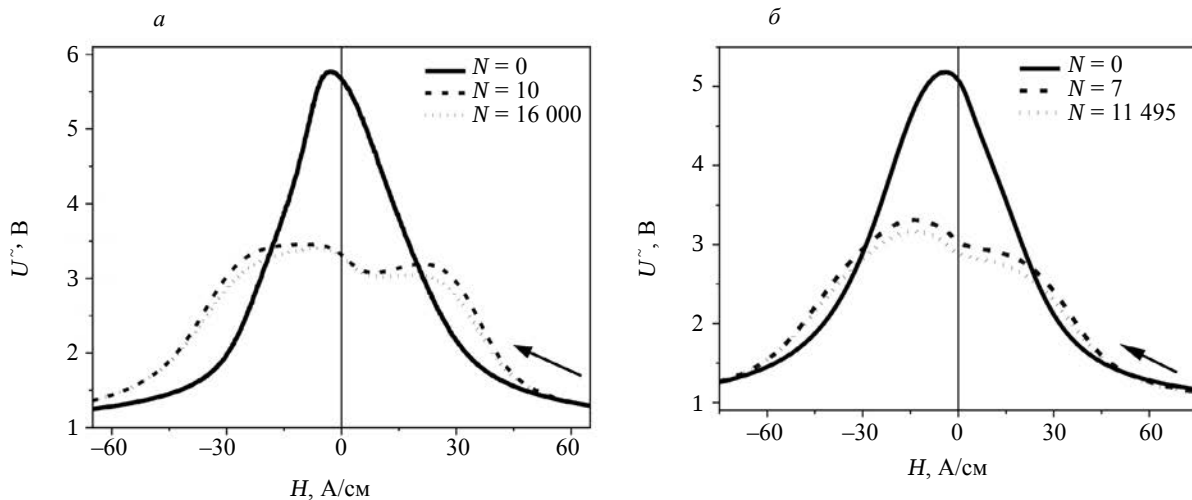


Рис. 6. Полевые зависимости сигнала измерительной катушки $U^{\sim}(H)$ литой (а) и СЛС (б) стали 09Г2С, измеренные до и после малоцикловых испытаний.

ний. Из рис. 6 видно, что на кривых $U^{\sim}(H)$ для образцов в исходном состоянии кривые имеют единственный максимум. Уже после первого цикла нагружения кривые видоизменяются, на них появляется максимум (или перегиб) в области положительных полей, а левый максимум смещается влево. Чем больше количество циклов, тем дальше максимумы друг от друга. Это связано с постепенным удлинением образца и накоплением уровня остаточных механических напряжений в стали с увеличением количества циклов.

Исходные экспериментальные зависимости $U^{\sim}(H)$, представленные на рис. 6, были обработаны с помощью функций псевдо-Фойгта [18]. Каждая зависимость $U^{\sim}(H)$ была описана тремя кривыми с единственными максимумами в различных полях, определены поля левого H_1 и правого H_2 максимумов и рассчитаны магнитоупругие поля H_{σ} . Для примера на рис. 7 представлен результат аппроксимации экспериментальной кривой $U^{\sim}(H)$ для СЛС-нормализованной стали после 10000 циклов нагружения—разгрузки. Из рис. 7 видно, что результатом аппроксимации является получение трех кривых с единственными максимумами в разных полях. Максимум средней кривой находится в области коэрцитивной силы. Появление максимума в области положительных полей, как было описано в [16, 17], связано с наведенной напряжением магнитной анизотропии типа

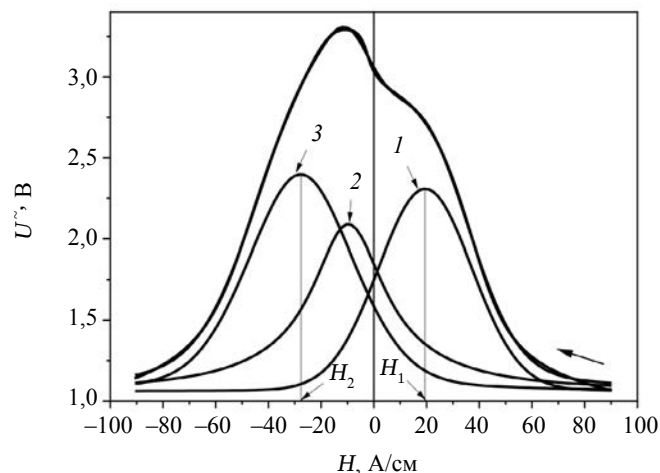


Рис. 7. Результат аппроксимации экспериментальной кривой $U^{\sim}(H)$ функциями псевдо-Фойгта для СЛС-нормализованной стали после 10000 циклов нагружения—разгрузки.

«легкая плоскость» в пластически деформированных образцах во время циклических испытаний. Именно благодаря наличию магнитной текстуры типа «легкая плоскость» появляется возможность разделения вклада в процессы перемагничивания 90- и 180-градусных доменных границ. Вклад 90° доменных границ, наиболее чувствительных к механическим напряжениям, характеризуют кривые 1 и 3 на рис. 7 [16], максимумы которых находятся в полях H_1 и H_2 . Среднее арифметическое этих полей — магнитоупругое поле H_σ .

Графики зависимостей магнитоупругого поля H_σ для нормализованных образцов из литой и СЛС-стали 09Г2С от относительного количества циклов N/N^* представлены на рис. 8. Из рис. 8 видно, что кривые для $H_\sigma(N/N^*)$ для литой и СЛС-сталей значительно различаются. Рост магнитоупругого поля для СЛС-стали наблюдается на всех участках изменения количества циклов, но основное изменение происходило на первых циклах испытаний. Величина магнитоупругого поля H_σ возрастает на 30 % от начала испытаний до разрыва СЛС-образца. Для литого нормализованного образца незначительные изменения магнитоупругого поля H_σ (см. рис. 8) наблюдались только на начальном участке кривой $H_\sigma(N/N^*)$.

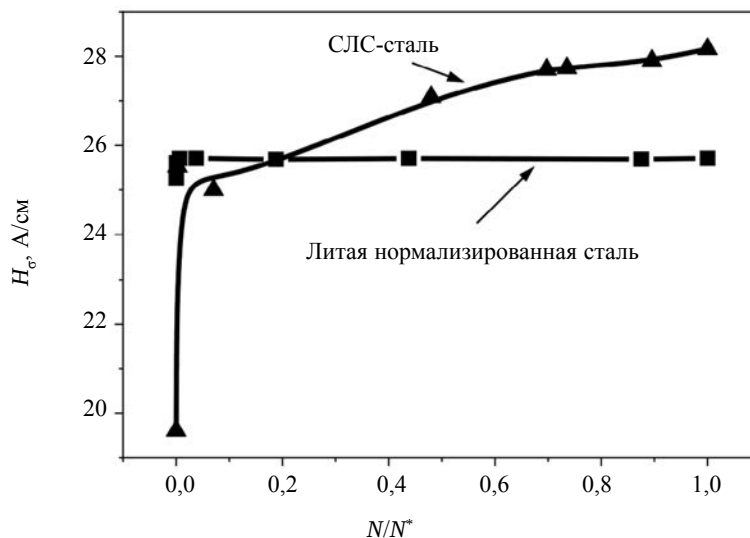


Рис. 8. Графики зависимостей магнитоупругого поля H_σ литой и СЛС-стали 09Г2С от относительного количества циклов N/N^* при испытаниях на малоцикловую усталость.

В случае малоцикловых испытаний при превышении предела упругости материала параметр H_σ (см. рис. 8) пропорционален накопленным остаточным механическим напряжениям [16]. Хотя в СЛС и литой сталях 09Г2С уровень механических напряжений резко возрастает на начальном этапе испытаний (за несколько циклов), последующие нагружения и разгрузки на протяжении тысяч и десятков тысяч циклов, по всей вероятности, не приводят к заметному изменению напряженно-деформированного состояния для литой стали 09Г2С. В силу монотонного роста величины H_σ для СЛС-стали 09Г2С предполагаем, что в материале накапливаются внутренние механические напряжения по мере увеличения количества циклов вплоть до разрушения образцов. Неразрушающий контроль уровня остаточных механических напряжений, как и в случае холодной пластической деформации растяжением, при статических испытаниях [16, 17] возможен по параметру H_σ .

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что СЛС-сталь 09Г2С после изготовления на лазерном 3D-принтере имеет большую прочность ($\sigma_b = 1057$ МПа) и низкую пластичность ($\delta = 6$ %), что нехарактерно для стали 09Г2С, изготовленной литьем и прокаткой. Испытания на малоцикловую усталость СЛС-стали (при превышении предела текучести) невозможны из-за близких значений пределов упругости и прочности.

2. Нормализация при 980 °С (1 ч) снижает предел прочности СЛС-стали 09Г2С в 2 раза ($\sigma_b = 502$ МПа) и увеличивает относительное удлинение почти в 6 раз ($\delta = 34,6$ %), приближая эту сталь по механическим свойствам к литой стали 09Г2С.

3. Основные изменения магнитных свойств (H_c , B_r , μ_{max}) как литой, так и СЛС-сталей наблюдаются на начальном этапе малоцикловых испытаний, дальнейшее увеличение количества циклов (вплоть до разрушения испытываемых образцов) не приводит к существенному изменению магнитных свойств. Характерно, что, несмотря на разницу магнитных свойств недеформированных сталей, в конце малоцикловых испытаний значения магнитных свойств литой и СЛС-сталей 09Г2С становятся практически равны.

4. Характер изменения магнитоупругого поля H_σ , определенного из экспериментальных полевых зависимостей обратимой магнитной проницаемости, во время малоцикловых испытаний для литой и СЛС-сталей кардинально различается: для литой стали 09Г2С магнитоупругое поле H_σ практически не меняется с увеличением числа циклов вплоть до разрушения образца, тогда как для стали 09Г2С, изготовленной с помощью селективного лазерного сплавления, на первых циклах испытаний наблюдается резкое возрастание величины H_σ на 30 %, что скорее всего связано с возрастанием остаточных механических напряжений. Дальнейший рост H_σ не столь существен (около 8 %).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-58-00015 Бел а в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № г.р. 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / Под ред. В.В. Клюева. М., 2005.
2. Yusuf S.M., Cutler S., Gao N. Review: The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry // Metals. 2019. V. 9. P. 1286.
3. Gisario A., Kazarian M., Martina F., Mehrpouya M. Metal Additive Manufacturing in the Commercial Aviation Industry: A Review // Journal of Manufacturing Systems. 2019. V. 53. P. 124—149.
4. Bhavar V., Kattire P., Patil V., Khot S., Gujar K., Singh R. A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing / Additive Manufacturing Handbook. CRC Press, 2017.
5. Blakey-Milner B., Gradl P., Snedden G., Brooks M., Pitot J., Lopez E., Leary M., Berto F., du Plessis A. Metal Additive Manufacturing in Aerospace: A Review // Materials & Design. 2021. V. 209. P. 110008.
6. Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Щапова Е.А., Казанцева Н.В., Макарова М.В. Структура и магнитные свойства стали 09Г2С, полученной методом селективного лазерного сплавления // Физика твердого тела. 2021. Т. 63. Вып. 11. С. 1719—1724.
7. Masoomi M., Shamsaei N., Winholtz R.A., Milner J.L., Gnäupel-Herold T., Elwany A., Mahmoudi M., Thompson S.M. Residual stress measurements via neutron diffraction of additive manufactured stainless steel 17-4 PH // Data in Brief. 2017. V. 13. P. 408—414.
8. Ronneberg T., Davies C.M., Hooper P.A. Revealing relationships between porosity, microstructure and mechanical properties of laser powder bed fusion 316L stainless steel through heat treatment // Materials and Design. 2020. V. 189. P. 108481.
9. Park J.M., Choe J., Kim J.G., Bae J.W., Moon J., Yang S., Kim K.T., Yu J.H., Kim H.S. Superior tensile properties of 1%C-CoCrFeMnNi high-entropy alloy additively manufactured by selective laser melting // Materials Research Letters. 2020. V. 8. P. 1—7.
10. Zhu Z.G., An X.H., Lu W.J., Li Z.M., Ng F.L., Liao X.Z., Ramamurty U., Nai S.M.L., Wei J. Selective laser melting enabling the hierarchically heterogeneous microstructure and excellent mechanical properties in an interstitial solute strengthened high entropy alloy // Materials Research Letters. 2019. V. 7. No. 11. P. 453—459.
11. Elangeswaran Chola, Cutolo Antonio, Muralidharan Gokula Krishna, Vanmeensel Kim, Van Hooreweder Brecht. Microstructural analysis and fatigue crack initiation modelling of additively manufactured 316L after different heat treatments // Materials and Design. 2020. V. 194. P. 108962.
12. Cui Luqing, Jiang Fuqing, Deng Donyong, Xin Tongzheng, Sun Xiaoyu, Taherzadeh Mousavian Reza, Lin Peng Ru, Yang Zhiqing, Moverare Johan. Cyclic response of additive manufactured 316L stainless steel: The role of cell structures // Scripta Materialia. 2021. V. 205. P. 114190.
13. Li Yajing, Yuan Yutong, Wang Dexin, Fu Sichao, Song Danrong, Vedani Maurizio, Chen Xu. Low cycle fatigue behavior of wire arc additive manufactured and solution annealed 308 L stainless steel // Additive Manufacturing. 2022. V. 52. P. 102688.
14. Murav'eva Olga, Murav'ev Vitaly, Volkova Ludmila, Kazantseva Nataliya, Nichipuruk Alexander, Stashkov Alexey. Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology // Additive Manufacturing. 2022. V. 51. P. 102635.

15. Огнева М.С., Ничипурук А.П., Сташков А.Н. Локальное определение поля наведенной магнитной анизотропии и уровня остаточных механических напряжений в деформированных растяжением объектах из малоуглеродистых сталей // Дефектоскопия. 2016. № 11. С. 3—9.
 16. Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Korolev A.V. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel // NDT & E International. 2021. V. 118. P. 102398.
 17. Stashkov A.N., Schapova E.A., Afanasiev S.V., Stashkova L.A., Nichipuruk A.P. Estimation of residual stresses in plastically deformed eutectoid steel with different perlite morphology via magnetic parameters // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2022. V. 546. P. 168850.
 18. Wertheim G.K., Butler M.A., West K.W., Buchanan D.N. Determination of the Gaussian and Lorentzian content of experimental line shapes // Review of Scientific Instruments. 1974. V. 45 (11). P. 1369—1371.
-

НОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОТОННО-РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ С КВАЗИОДНОРОДНОЙ МАССОВОЙ ТОЛЩИНОЙ

© 2023 г. Н.С. Шилкин^{1,*}, В.Б. Минцев¹, Д.С. Юрьев¹, А.В. Канцырев²,
А.В. Богданов², Д.С. Колесников², А.А. Голубев^{2,3}

¹ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН,
Россия 142432 Черноголовка, пр-т Академика Семенова, 1

²НИЦ «Курчатовский институт»,
Россия 123182 Москва, пл. Академика Курчатова, 1

³АО Наука и инновации, Россия 115035 Москва, Кадашевская набережная, 32/2, стр. 1

*E-mail: shilkin@fcp.ac.ru

Поступила в редакцию 24.11.2022; после доработки 14.12.2022

Принята к публикации 16.12.2022

Разработана методика расчета трансмиссии статических объектов с квазиоднородной массовой толщиной по единичному протонно-радиографическому изображению при условии гауссоподобного поперечного профиля пучка. Расчетные изображения трансмиссии предназначены для восстановления плотности исследуемых объектов. Выполнено протонно-радиографическое исследование статических мишеней на экспериментальной установке со специальной магнитной оптикой ПУМА при энергии протонов 800 МэВ и интенсивности 10^{10} частиц на изображение. Показано, что применение методики позволяет восстанавливать трансмиссию исследуемого объекта со средней относительной ошибкой около 1—1,2 %.

Ключевые слова: протонная радиография, протонно-радиографическое изображение, нормализация изображения, трансмиссия, обработка изображений, аппроксимация пространственного профиля пучка.

DOI: 10.31857/S0130308223010062, **EDN:** BVSXNT

ВВЕДЕНИЕ

Один из первых экспериментов по радиографированию статических объектов с помощью протонов был выполнен [1] в 1968 году. В исследовании была применена методика предельного поглощения протонов высокой энергии в исследуемом объекте с равномерной толщиной и было показано, что отличие массовой толщины объекта в 0,2 % может быть зарегистрировано с помощью радиочувствительной пленки. В работе [2] представлена иная методика, основанная на многократном кулоновском рассеянии протонов в исследуемом объекте, и предложено использовать ее для медицинской радиографии. Обе методики показали высокий контраст протонно-радиографических изображений при низком пространственном разрешении, обусловленным размытием изображения из-за многократного кулоновского рассеяния протонов в исследуемом объекте. В работе [3] был проведен анализ взаимодействия параллельного пучка протонов при постоянной плотности частиц с краем пластины постоянной толщины и показано, что размытие изображения объекта в области изменения плотности пропорционально произведению среднего угла многократного кулоновского рассеяния протонов и расстояния от объекта до детектора. Спустя 40 лет для компенсации эффектов кулоновского рассеяния была разработана и использована специальная магнитная ионно-оптическая схема [4]. Ионная оптика позволила минимизировать хроматические и геометрические аберрации протонных радиографических изображений, тем самым существенно улучшив их качество. Другой важной функцией ионной оптики является возможность регулировки оптимальной контрастности изображений исследуемых объектов, что достигается за счет установки коллиматора в плоскость Фурье ионной оптики установки. Коллиматор обеспечивает попадание на плоскость регистрации протонов с заданным диапазоном углов кулоновского рассеяния в объекте. Применение быстрых сцинтилляторов [5] и цифровых камер с электронно-оптическим затвором обеспечило возможность регистрации нескольких протонно-радиографических изображений в разные моменты времени [6], что стало активно применяться в исследованиях быстропротекающих процессов. Протонно-радиографические установки с магнитной оптикой были построены в США [7, 8], России [9, 10] и Германии [11]. Эти установки использовались для исследования статических и динамических объектов с массовой толщиной от 25 мг/см² [12] до 500 г/см² [13] с помощью пучков протонов с энергией от 0,8 до 70 ГэВ.

Для реконструкции плотности исследуемых объектов было разработано несколько подходов обработки протонно-радиографических изображений. Все они основаны на определении ослабления протонного пучка, также называемого трансмиссией. Для описания взаимодействия протонного пучка с объектом обычно используется физическая модель, предполагающая гауссово угловое распределение кулоновского рассеяния протонов [4] и экспоненциальное затухание протонного пучка за счет ядерного рассеяния. Влияние хроматических аберраций на протонно-радиографические изображения с большим диапазоном массовой толщины рассмотрены в работе [14]. Массовую толщину исследуемых объектов, т.е. интеграл плотности вдоль направления движения протонов, восстанавливают из нормализованных протонно-радиографических изображений с использованием аналитических выражений трансмиссии пучка [7]. Обратное преобразование Абеля применяется для восстановления объемной плотности объектов с осевой симметрией по одному радиографическому изображению [15]. В другой группе подходов используются различные аппроксимации распределения плотности в объекте с помощью параметрических моделей [14, 16]. Оптимальные параметры модели определяются из условия, например, минимума суммы отклонений интенсивности экспериментального изображения и его модели. В работе [17] представлена прямая детерминистская модель совместного учета ядерного и кулоновского рассеяния при протонной радиографии толстых объектов, которая итеративно применялась для расчета объемной плотности по измеренным протонно-радиографическим изображениям исследуемого объекта. Метод Монте-Карло также используется для численного моделирования протонно-радиографических исследований со статическими и динамическими объектами [18, 19].

Протонно-радиографические изображения нормализуются при попиксельном делении изображения исследуемого объекта на изображение протонного пучка, получаемое в отсутствии объекта. В случае нестабильности позиции и поперечного профиля пучка изображение пучка обычно определяется расчетным образом, используя области экспериментального изображения с известной массовой толщиной при известном химическом составе объекта. Части протонно-радиографического изображения без объекта имеют трансмиссию равную 100 %, что дает надежную информацию для восстановления изображения пучка.

Иногда исследуемый объект с неизвестной массовой толщиной полностью занимает поле зрения установки. В этом случае нормализация изображения объекта также возможна, но при некоторой дополнительной информации. Одним из таких комплексов условий может быть квазигомогенность исследуемого объекта при известном типе функциональной зависимости поперечного профиля пучка от координат. Цель работы состоит в разработке методики расчета изображения трансмиссии исследуемого объекта с почти однородной массовой толщиной по его протонно-радиографическому изображению, предполагая, что пространственный профиль пучка описывается гауссоподобной функцией.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные данные в работе были получены на протонном микроскопе с использованием магнитной оптики ПУМА [20]. Протонный микроскоп был разработан для исследования статических и динамических объектов с массовой толщиной до 20 г/см² при поле обзора установки ~18 мм с помощью пучка протонов с энергией 800 МэВ. В проведенных экспериментах временная структура импульса протонного пучка состояла из четырех последовательных банчей (сгустков протонов) с интенсивностью около 10¹⁰ протонов на банч, следующих — с интервалом 250 нс. Ширина временного профиля одного банча протонного импульса на полувысоте составляла около 70 нс. Биметаллическая составная пластина из стали и алюминия толщиной 7 мм на входе протонно-радиографической установки обеспечивала формирование пучка с требуемыми размерами и гауссоподобным пространственным распределением интенсивности в плоскости установки исследуемых объектов. Секция согласования ионно-оптической схемы включала три электромагнитные квадрупольные линзы. Секция формирования изображения ионной оптики установки состояла из четырех квадрупольных линз, изготовленных из Nd—Fe—В-постоянных магнитов [21]. Латунный коллиматор с внутренним диаметром 7 мм и длиной 35 мм устанавливали в плоскости установки Фурье. Сцинтиллятор из силиката лютетия толщиной 4 мм использовали для конверсии потока протонов в оптическое изображение, направляемое зеркалом на несколько 14-битных ПЗС камер S2C-017 фирмы Силар, оснащенных электронно-оптическими затворами на базе микроканальных пластин.

Каждая из камер регистрировала изображение объекта при прохождении отдельного банча протонов. Изображения пучка размером 1024 на 1024 пикселей записывали в формате TIFF с глубиной цвета 16 бит. Временной профиль протонного пучка регистрировался быстрым поясом Роговского Bergoz FCT-082 05:1. Исследуемые объекты [22] располагались в мишенной камере при давлении $\sim 10^{-3}$ торр. На установке были выполнены исследования свойств конденсированных взрывчатых материалов, ударно-сжатой плазмы газов, ударного нагружения металлических пластин [23].

ОБРАБОТКА ПРОТОННО-РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Анализ и обработка экспериментальных протонно-радиографических изображений мишеней осуществляли в свободно распространяемой программе ImageJ [24]. Вначале проводили коррекцию пространственной неоднородности светового выхода сцинтиллятора и дефектов матрицы электронной камеры [25]. Корректирующую маску вычисляли с помощью нескольких протонно-радиографических изображений пучка без исследуемого объекта, предполагая гауссоподобный поперечный профиль пучка. Экспериментальные протонно-радиографические изображения исследуемого объекта попиксельно делились на изображение корректирующей маски. Небольшое количество случайных пикселей изображения из-за взаимодействия фонового радиационного излучения с матрицей камеры имело интенсивность много большую, чем интенсивность свечения окружающих их пикселей. Значения интенсивности таких пикселей заменялись значениями, полученными при квадратичной аппроксимации в окрестности радиусом 32 пикселя. Затем скорректированные протонно-радиографические изображения нормализовались, т.е. делились на изображение пучка без исследуемого объекта.

Из-за нестабильности работы ускорителя положение центра, форма и размеры пучка изменялись от сброса к сбросу пучка, поэтому требовалось определять поперечный пространственный профиль пучка для каждого его банча. Профиль пучка восстанавливался, используя области экспериментального протонно-радиографического изображения с известной трансмиссией или области изображения, соответствующие объекту с известной геометрией, распределением плотности и элементным составом.

Пространственный профиль пучка наиболее легко восстанавливается из протонно-радиографических изображений с большими областями, соответствующими одинаковой массовой толщине однородного исследуемого объекта. Процедура нормализации изображения объектов с почти однородной плотностью состояла из трех этапов. На первом шаге обработки находились области изображения объекта с одинаковой трансмиссией пучка. Для этого пространственный профиль изображения объекта аппроксимировался двумерной гауссоподобной функцией. Экспериментальное протонно-радиографическое изображение объекта делилось на найденную расчетную аппроксимирующую функцию профиля пучка. Координаты пикселей с одинаковыми значениями трансмиссии находились на полученном предварительно нормализованном изображении объекта. Определялся массив пикселей с наиболее распространенными значениями. На втором шаге обработки пиксели изображения объекта, найденные на первом шаге, использовались для конечной аппроксимации профиля пучка с помощью двумерной гауссоподобной функции. Следующее приближение нормализованного изображения объекта вычислялось как отношение экспериментального протонно-радиографического изображения и вычисленного изображения пучка. Это нормализованное изображение строилось в единицах трансмиссии выбранной группы пикселей. На третьем шаге расчетное изображение объекта нормировалось в абсолютных единицах трансмиссии с использованием областей изображения, отвечающих нулевой массовой толщине, где трансмиссия равна 100 %. Области изображения с известной трансмиссией пучка также можно использовать для перенормировки.

Данная процедура нормализации изображения основана на том, что изображение протонного пучка, прошедшего через сплошной объект равномерной толщины, сохраняет форму пространственного распределения частиц, но ценой изменения начального углового распределения частиц. Изображение прошедшего через объект пучка протонов описывается гауссоподобной функцией, аналогичной функции, описывающей изображение пучка без исследуемого объекта. Параметры этой функции зависят от настройки протонного микроскопа и массовой толщины исследуемого объекта.

ПРОТОННАЯ РАДИОГРАФИЯ ОБЪЕКТОВ С ПОЧТИ ОДНОРОДНОЙ МАССОВОЙ ТОЛЩИНОЙ

Статические мишени с квазипостоянной массовой толщиной изучали на протонном микроскопе ПУМА. Одним из исследуемых объектов служила пластина из органического стекла с выгравированными на поверхности латинскими буквами **I**, **T**, **E** и **P**. Фотография мишени показана на рис. 1а. Толщина пластины составляла 8 мм, глубина гравировки букв — 0,5 мм. Пластина была ориентирована таким образом, чтобы протонный пучок вначале проходил через грань с гравировкой, а затем выходил через противоположную грань с гладкой поверхностью. Нормализованное изображение пластины представлено на рис. 1б. Оно было восстановлено по одному протонно-радиографическому изображению с использованием вышеописанного алгоритма. Черные области в углах изображения лежат вне поля зрения протонного микроскопа. Вертикальные линии на рис. 1б показывают координаты одномерных массивов пикселей, которые применяли для построения профилей на рис. 2.

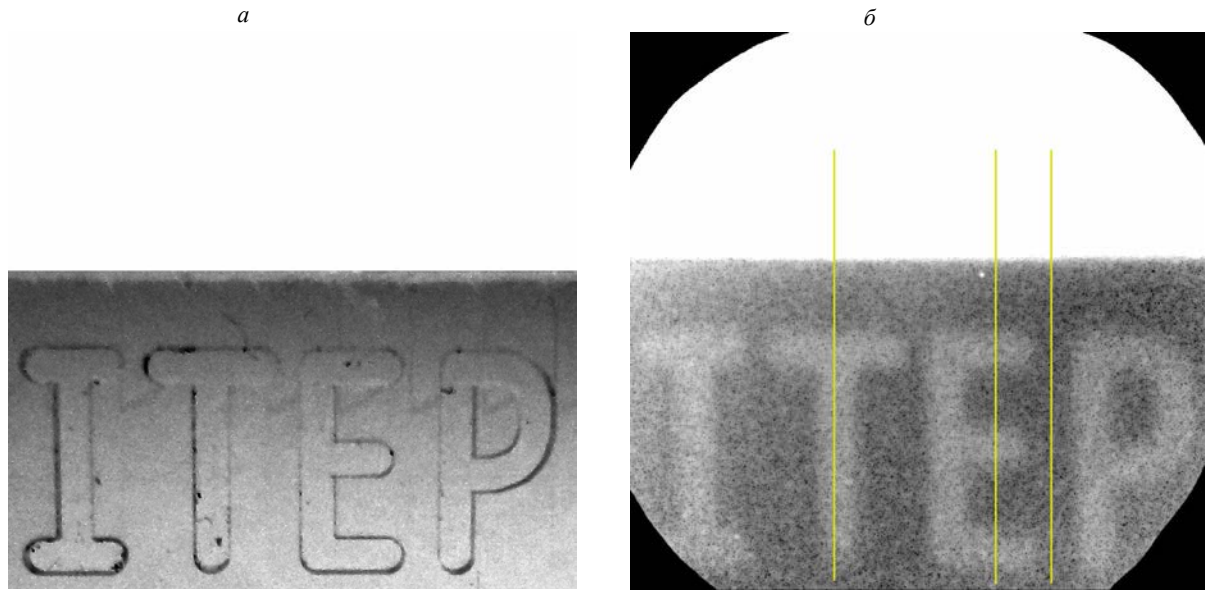


Рис. 1. Пластина из оргстекла с выгравированными буквами **I**, **T**, **E** и **P**:
а — фотография; б — нормализованное протонно-графическое изображение.

При вычислении пространственного профиля пучка использовали данные по интенсивности пикселей изображения пластины за исключением областей около ее края и выгравированных букв, что необходимо для устранения из рассмотрения эффектов, описываемых интегральными выражениями. Протонно-радиографическое изображение поля обзора установки FOV разбивалось на три группы пикселей, которые принадлежали изображению пучка FOV_{BEAM} , изображению пластины FOV_{OBJ} без букв и областей с буквами и около среза пластины FOV_{LET} . Пиксели изображения пластины оставались без изменений. Пиксели из множества FOV_{LET} исключались из рассмотрения. Значения интенсивности пикселей изображения пучка FOV_{BEAM} делились на постоянный множитель M , который компенсировал отсутствие ослабления пучка в области, не занимаемой пластиной. После этого поперечный профиль пучка аппроксимировался двумерной гауссоподобной функцией. Множитель M определялся из условия минимума суммы квадратов отклонений интенсивности скорректированного экспериментального изображения и аппроксимирующей гауссоподобной функции $G(x, y) = \exp(ax^2 + by^2 + cxy + dx + fy + g)$:

$$\min \left(\sum_{FOV_{BEAM}} (G(x, y) - I_{ex}(x, y)/M)^2 + \sum_{FOV_{OBJ}} (G(x, y) - I_{ex}(x, y))^2 \right), \quad (1)$$

где $I_{ex}(x, y)$ — интенсивность пикселя экспериментального изображения с координатами (x, y) ; a, b, c, d, f, g — параметры гауссоподобной функции $G(x, y)$.

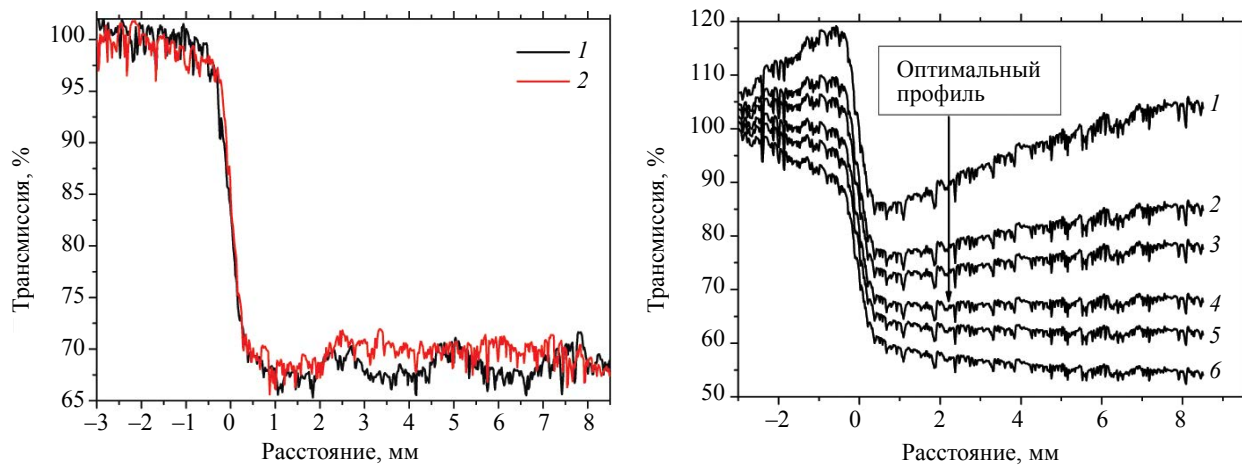


Рис. 2. Вертикальные профили нормализованного изображения:

a — при $M=1,47$ (1 — профиль, проходящий через горизонтальные элементы буквы **Е**; 2 — профиль, проходящий через букву **Т**);
б — расчетные профили, проходящие между буквами **Е** и **Р** при различных M (1 — $M=1$; 2 — $M=1,2$; 3 — $M=1,3$; 4 — $M=1,47$; 5 — $M=1,6$; 6 — $M=1,8$).

Средняя относительная ошибка определения интенсивности каждого пикселя нормализованного изображения пластины изменялась от 1,0 до 1,2 %. Она оценивалась для пикселей изображения, относящихся к одинаковой массовой толщине пластины. Два вертикальных профиля интенсивности единичного изображения показаны на рис. 2 для иллюстрации качества нормализации. Один профиль построен через букву **Т**. Второй профиль проведен параллельно и проходит в том числе через горизонтальные элементы буквы **Е**. По оси абсцисс показано расстояние от границы пластины с вакуумом, положительные значения координат соответствуют пластине. Средняя величина передачи протонного пучка через пластину составила 68 %, которая соответствует параметру $M=1,47$ ($1/M \approx 0,68$). Передача в области, не занимаемой объектом, принималась равной 100 %. Профили нормализованной интенсивности, построенные в областях с однородной массовой толщиной, практически совпадают.

Значения передачи для параллельного протонного пучка в вакууме и для пластины постоянной толщины должны быть близки к соответствующим уровням. Исключение составляет переходная область на границе пластины—вакуум, где пространственный профиль передачи пучка описывается с помощью функции ошибок. Отсюда следует, что чем дальше луч протонов от границы раздела двух соседствующих фрагментов с постоянными толщинами, тем лучше качество нормализации.

На рис. 2б приведена иллюстрация влияния значения параметра M на качество нормализации. Для этого с использованием условия (1) были рассчитаны параметры a, b, c, d, f и g функции $G(x, y)$, аппроксимирующей пространственный профиль пучка при фиксированном M для изображения на рис. 1а. Расчетные вертикальные кривые интенсивности, построенные при разных значениях M для фиксированного пространственного профиля, находящегося на изображении между буквами **Е** и **Р**, показаны на рис. 2б. Оптимальная нормализация достигается для значения $M=1,47$, при котором реализуется минимум выражения (1), а соответствующий профиль 4 на рис. 2б наилучшим образом приближен к ступенчатой функции.

Пространственное разрешение установки σ определялось с помощью аппроксимации профилей передачи $T(x)$ в окрестности ступенчатых перепадов массовой толщины с помощью функции ошибок:

$$T(x) = T_1 + T_2 \operatorname{erf}\left(-\frac{x-x_0}{\sigma\sqrt{2}}\right), \quad (2)$$

где T_1 и T_2 — свободные параметры; x_0 — координата границы ступенчатого изменения массовой толщины пластины.

Пространственное разрешение протонного микроскопа по вертикальной оси σ_y составило величину около 250 мкм. Оно определялось по вертикальным профилям интенсивности изображе-

ния, построенным на границе пластина—вакуум. Пространственное разрешение по горизонтальной оси σ_x оценивалось на уровне 150 мкм по горизонтальным профилям интенсивности изображения, проходящим через скачки плотности на границах пластины и выгравированных букв.

Значение угла аксептанса коллиматора θ_c было уточнено в результате использования теоретических выражений, описывающие трансмиссию, и измеренного значения ослабления протонного пучка в пластине. Суммарная трансмиссия в сплошном однородном объекте T находится как произведение трансмиссии T_{nucl} из-за ослабления пучка в ядерных взаимодействиях и трансмиссии $T_{MCS}(\theta_c)$, определяемой кулоновским рассеянием в мишени и ослаблением пучка в коллиматоре:

$$T = T_{MCS} T_{nucl} 100 \%. \quad (3)$$

Изменение трансмиссии пучка вследствие взаимодействия протонов с ядрами материала мишени описывается следующим выражением:

$$T_{nucl} = \exp\left(-\frac{l}{\lambda_T}\right), \quad (4)$$

где l — массовая толщина исследуемой мишени; λ_T — длина ядерного взаимодействия материала мишени.

Член T_{MCS} рассчитывали с помощью выражения (3), используя измеренную суммарную трансмиссию T и вычисленную с помощью выражения (4) трансмиссию T_{nucl} . Массовую толщину пластины находили как произведение плотности органического стекла ρ на измеренное значение толщины пластины h .

Трансмиссия T_{MCS} из-за кулоновского рассеяния в мишени и ослабления пучка в коллиматоре определяется следующими выражениями [8]:

$$T_{MCS} \approx 1 - \exp\left(-\frac{k}{l}\right), \quad k = \left(\frac{p\beta c\theta_c}{14,1 \text{ МэВ}}\right)^2 \frac{X_0}{2}, \quad (5)$$

где p — момент импульса протонов; c — скорость света; β — скорость протонов в единицах скорости света; l — массовая толщина; X_0 — радиационная длина рассеивающей среды; θ_c — угол аксептанса коллиматора.

Значения параметров X_0 и λ_T органического стекла (полиметилметакрилат) взяты из работы [26]. Выражения (4) и (5) были использованы для вычисления параметра θ_c , значение которого составило 2,7 мрад.

Для восстановления плотности исследуемых объектов с меньшей погрешностью требуется снизить неопределенность в нормализованном изображении. Значение интенсивности сигнала в каждом пикселе протонно-радиографического изображения объекта изменяется случайным образом от сброса к сбросу пучка. Эту флуктуацию сигнала можно рассматривать как шум и устранять методами математической обработки. Уменьшение радиографического шума на изображении объекта было достигнуто усреднением по нескольким нормализованным изображениям. Применялось медианное усреднение, при котором результирующее изображение состояло из пикселей с интенсивностью, равной медианному значению интенсивности пикселей с теми же координатами и взятыми с разных изображений. Фрагмент протонно-радиографического изображения пластины с буквами показан на рис. 3 при медианном усреднении по 3, 7 и 49 изображениям соответственно.

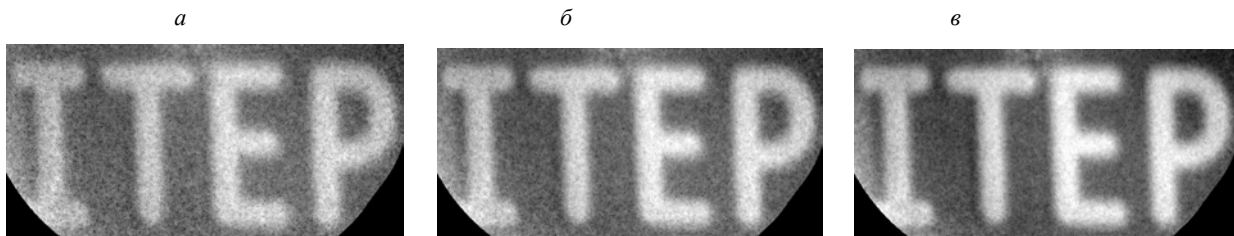


Рис. 3. Медианно-усредненное нормализованное изображение пластины:
а — использовано 3 изображения; б — использовано 7 изображений; в — использовано 49 изображений.

Данный подход может применяться для нормализации протонно-радиографических изображений мишеней с квазиоднородной массовой толщиной и неизвестным распределением плотности. Дополнительным условием нормализации очевидно является сохранение соотношения элементного состава радиографируемого объекта во всем объеме. Возможно локальное отступление от соотношения элементов в объеме мишени, если соответствующие области занимают малую часть протонно-радиографического изображения. Нормализация в абсолютных величинах возможна при наличии области изображения с известной трансмиссией, которая может определяться как экспериментально, так и расчетным образом. Биологические объекты отвечают вышеописанным требованиям, кроме того, они обладают сложной структурой и состоят из элементов с различной плотностью и различным элементным составом. Реконструированное нормализованное изображение аквариумной рыбки Данио-рерио, внедренной в парафиновый блок толщиной 8 мм, показано на рис. 4б, ее фотография представлена на рис. 4а. Парафиновую заливку использовали для сохранения внутренней структуры рыбки, когда ее помещали в вакуум в мишенной камере установки ПУМА. Процедура предварительной обработки исследуемого биологического объекта описана в [27]. Пространственный профиль пучка реконструировали по одному экспериментальному протонно-радиографическому изображению и использовали для нормализации этого изображения в произвольных единицах. Толщина парафина в различных частях объекта варьировалась и абсолютные измерения трансмиссии в фиксированной области парафина не проводились. Средняя трансмиссия в парафине без исследуемого объекта принималась равной 100 % для задания реперного значения. Среднюю точность определения трансмиссии оценивали по областям изображения парафинового блока без рыбки, она близка к 1 %.

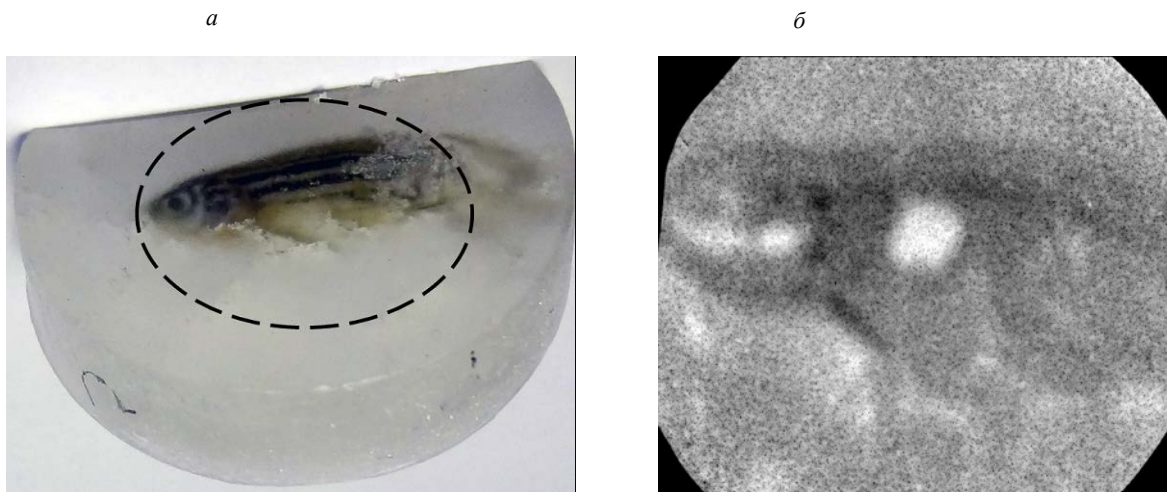


Рис. 4. Рыбка Данио-рерио в парафине:

а — фотография, штриховой линией отмечена граница поля зрения микроскопа; б — нормализованное протонно-графическое изображение.

Качество изображения может быть также улучшено при использовании медианного усреднения по нескольким изображениям. Результаты применения усреднения по 15 и 49 нормализованным изображениям показаны на рис. 5а и б. Относительное изменение трансмиссии в области изображения аквариумной рыбки, внедренной в парафин, находится в пределах $\pm 4\%$. В расчетах, проведенных ранее в [27], относительное изменение трансмиссии исследуемого объекта (рыбки) получить не удалось, а было представлено только протонно-радиографическое изображение объекта с относительной шкалой яркости.

Ранее для построения нормализованных протонно-радиографических изображений объектов, занимающих все поле зрения микроскопа, использовали иной подход [27], основанный на усреднении изображений исследуемого объекта и протонного пучка и последующем делении их друг на друга. Для усреднения отбирали изображения, полученные при примерно одинаковой интенсивности и положении протонного пучка. Из-за нестабильности пространственных параметров пучка требовалось около сотни радиографических изображений исследуемого объекта и столько же изо-

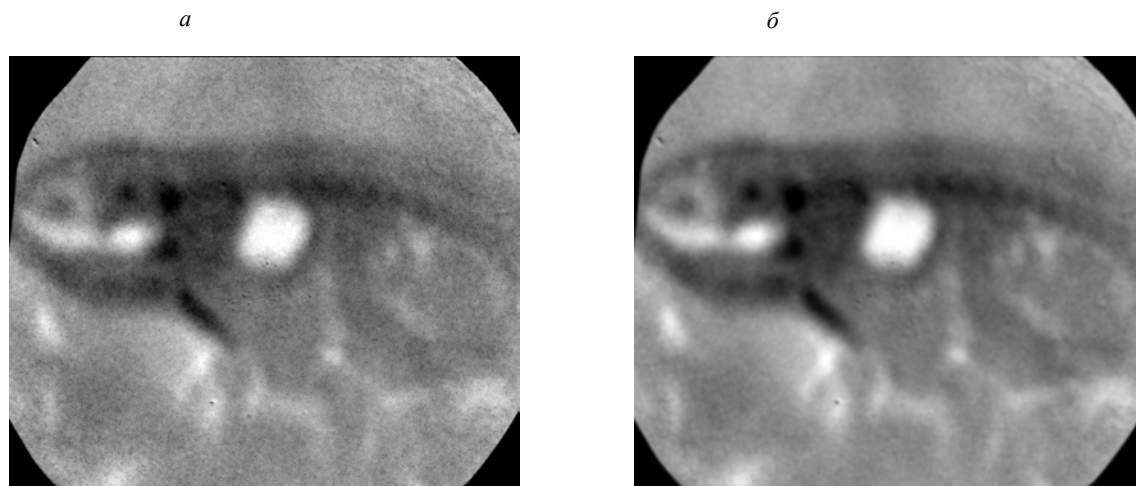


Рис. 5. Медианно-усредненное нормализованное изображение аквариумной рыбки в парафине:
а — использовано 15 изображений; *б* — использовано 49 изображений.

бражений без установленного объекта. При этом нормализация изображений была неполной в том смысле, что позволяла проводить локальное сравнение изменения трансмиссии различных частей исследуемого объекта в произвольных единицах. Предлагаемый подход предназначен для нормализации протонно-радиографических изображений с исследуемым объектом, используя только одно изображение при условии квазиоднородности мишени. Он также позволяет проводить абсолютные измерения изменения трансмиссии по всему полю зрения микроскопа в абсолютных или относительных величинах в зависимости от наличия или отсутствия областей изображения с известной трансмиссией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика нормализации протонно-радиографических изображений исследуемых объектов с почти однородной массовой толщиной разработана для обработки экспериментальных данных, полученных на протонном микроскопе с магнитной оптикой. Методика позволяет рассчитывать изображение в единицах трансмиссии по единичному протонно-радиографическому изображению исследуемого объекта при условии аппроксимации поперечного профиля пучка двумерной гауссоподобной функцией. Процедура нормализации включает учет пространственной неоднородности светового выхода сцинтиллятора, дефектов матрицы электронной камеры, вызванных радиационным повреждением отдельных пикселей в том числе. Численный алгоритм нормализации реализован в программе анализа и обработки изображений ImageJ. Выполнены протонно-радиографические исследования статистических объектов на протонном микроскопе ПУМА. Медианное усреднение по нескольким нормализованным протонно-радиографическим изображениям применялось для уменьшения радиографического шума и дополнительного улучшения качества изображений. Показано, что применение методики позволяет описать трансмиссию каждого пикселя единичного нормализованного изображения объекта со средней точностью 1—1,2 % по всему полю зрения протонного микроскопа. Горизонтальное разрешение протонного микроскопа в проведенных экспериментах составило 150 мкм, а вертикальное — 250 мкм.

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме 0089-2019-0001, № государственной регистрации ААА-А19-119071190040-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koehler A.M. Proton radiography // *Science*. 1968. V. 160. No. 3825. P. 303—304. <https://doi.org/10.1126/science.160.3825.303>
2. West D., Sherwood A.C. Radiography with 160 MeV protons // *Nature*. 1972. V. 239. P. 157—159. <https://doi.org/10.1038/239157B0>
3. West D., Sherwood A.C. Proton-scattering radiography // *Non-destructive Testing*. 1973. V. 6. P. 249—257. [https://doi.org/10.1016/0029-1021\(73\)90072-8](https://doi.org/10.1016/0029-1021(73)90072-8)

4. *Mottershead C.T., Zumbro J.D.* Magnetic optics for proton radiography // Proc. of the 1997 Particle Accelerator Conf. 1997. V. 2. Comyn M. et al. Eds. Vancouver: IEEE. P. 1397—1399. <https://doi.org/10.1109/PAC.1997.750705>
5. *Merill F.E.* Flash proton radiography // Reviews of Accelerator Science and Technology. 2015. V. 08. P. 165—180. <https://doi.org/10.1142/S1793626815300091>
6. *Yates G., Albright K., Alrick K., Gallegos R., Galyardt J., Gray N., Hogan G., Holmes V., Jaramillo S., King N., McDonald T., Morley K., Morris C., Numkena D., Pazuchanics P., Riedel C., Sarracino J., Ziock H.J., Zumbro J.* An intensified/shuttered cooled CCD camera for dynamic proton radiography // Proc. SPIE 3302, Digital Solid State Cameras: Designs and Applications. 1998. V. 3302. Ed. Williams G.M. SPIE. P. 140—151. <https://doi.org/10.1117/12.304577>
7. *King N.S.P., Ables E., Adams K., Alrick K.R., Amann J.F., Balzar S., Barnes Jr P.D., Crow M.L., Cushing S.B., Eddleman J.C., Fife T.T., Flores P., Fujino D., Gallegos R.A., Gray N.T., Hartouni E.P., Hogan G.E., Holmes V.H., Jaramillo S.A., Knudsson J.N., London R.K., Lopez R.R., McDonald T.E., McClelland J.B., Merrill F.E., Morley K.B., Morris C.L., Naivar F.J., Parker E.L., Park H.S., Pazuchanics P.D., Pillai C., Riedel C.M., Sarracino J.S., Shelley Jr F.E., Stacy H.L., Takala B.E., Thompson R., Tucker H.E., Yates G.J., Ziock H.-J., Zumbro J.D.* An 800-MeV proton radiography facility for dynamic experiments // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 1999. V. 424. P. 84—91. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01241-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01241-8)
8. *Morris C.L., Ables E., Alrick K.R., Aufderheide M.B., Barnes P.D., Buescher K.L., Cagliostro D.J., Clark D.A., Clark D.J., Espinoza C.J., Ferm E.N., Gallegos R.A., Gardner S.D., Gomez J.J., Greene G.A., Hanson A., Hartouni E.P., Hogan G.E., King N.S.P., Kwiatkowski K., Liljestrand R.P., Mariam F.G., Merrill F.E., Morgan D.V., Morley K.B., Mottershead C.T., Murray M.M., Pazuchanics P.D., Pearson J.E., Sarracino J.S., Saunders A., Scaduto J., Schach von Wittenau A.E., Soltz R.A., Sterbenz S., Thompson R.T., Vixie K., Wilke M.D., Wright D.M., Zumbro J.D.* Flash radiography with 24 GeV/c protons // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 104905. <https://doi.org/10.1063/1.3580262>
9. *Golubev A.A., Demidov V.S., Demidova E.V., Kats M.M., Kolerov S.B., Skachkov V.S., Smirnov G.N., Turtikov V.I., Fertman A.D., Sharkov B.Y.* Application of TWAC beams for diagnostics of fast processes // Atomic Energy. 2008. V. 104. P. 134—141. <https://doi.org/10.1007/S10512-008-9004-2>
10. *Antipov Yu.M., Afonin A.G., Vasilevskii A.V., Gusev I.A., Demyanchuk V.I., Zyat'kov O.V., Ignashin N.A., Karshev Yu.G., Larionov A.V., Maksimov A.V., Matyushin A.A., Minchenko A.V., Mikheev M.S., Mirgorodskii V.A., Peleshko V.N., Rud'ko V.D., Terekhov V.I., Tyurin N.E., Fedotov Yu.S., Trutnev Yu.A., Burtsev V.V., Volkov A.A., Ivanin I.A., Kartanov S.A., Kuropatkin Yu.P., Mikhailov A.L., Mikhailov K.L., Oreshkov O.V., Rudnev A.V., Spirov G.M., Syrunin M.A., Tatsenko M.V., Tkachenko I.A., Khramov I.V.* A radiographic facility for the 70-GeV proton accelerator of the Institute for high energy physics // Instrum. Exp. Tech. 2010. V. 53. P. 319—326. <https://doi.org/10.1134/S0020441210030012>
11. *Varentsov D., Antonov O., Bakhmutova A., Barnes C.W., Bogdanov A., Danly C.R., Efimov S., Endres M., Fertman A., Golubev A.A., Hoffmann D.H.H., Ionita B., Kantsyrev A., Krasik Ya.E., Lang P.M., Lomonosov I., Mariam F.G., Markov N., Merrill F.E., Mintsev V.B., Nikolaev D., Panyushkin V., Rodionova M., Schanz M., Schoenberg K., Semennikov A., Shestov L., Skachkov V.S., Turtikov V., Udrea S., Vasylyev O., Weyrich K., Wilde C., Zubareva A.* Commissioning of the PRIOR proton microscope // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. P. 023303. <https://doi.org/10.1063/1.4941685>
12. *Freeman M.S., Allison J., Andrews M., Ferm E., Goett J.J., Kwiatkowski K., Lopez J., Mariam F., Marr-Lyon M., Martinez M., Medina J., Medina P., Merrill F.E., Morris C.L., Murray M.M., Nedrow P., Neukirch L.P., Prestridge K., Rigg P., Saunders A., Schurman T., Tainter A., Trouw F., Tupa D., Tybo J., Vogan-McNeil W., Wilde C.* Inverse-collimated proton radiography for imaging thin materials // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. P. 013709. <https://doi.org/10.1063/1.4973767>
13. *Burtsev V.V., Lebedev A.I., Mikhailov A.L., Ogorodnikov V.A., Oreshkov O.V., Panov K.N., Rudnev A.V., Svirskii O.V., Syrunin M.A., Trutnev Yu.A., Khramov I.V.* Use multiframe proton radiography to investigate fast hydrodynamic processes // Combust., Explos. Shock Waves. 2011. V. 47. P. 627—638. <https://doi.org/10.1134/S0010508211060025>
14. *Sjue S.K.L., Fesseha G.M., Merrill F.E., Morris C.L., Saunders A.* High order magnetic optics for high dynamic range proton radiography at kinetic energy 800 MeV // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. P. 015110. <https://doi.org/10.1063/1.4939822>
15. *Holtkamp D.B., Clark D.A., Ferm E.N., Gallegos R.A., Hammon D., Hemsing W.F., Hogan G.E., Holmes V.H., King N.S.P., Liljestrand R., Lopez R.P., Merrill F.E., Morris C.L., Morley K.B., Murray M.M., Pazuchanics P.D., Prestridge K.P., Quintana J.P., Saunders A., Schafer T., Shinas M.A., Stacy H.L.* A survey of high explosive-induced damage and spall in selected metals using proton radiography // AIP Conf. proc. 2004. V. 706. P. 477—482. <https://doi.org/10.1063/1.1780281>
16. *Ferm E.N., Morris C.L., Quintana J.P., Pazuchanics P., Stacy H., Zumbro J.D., Hogan G., King N.* Proton radiography examination of unburned regions in PBX 9502 corner turning experiment // AIP Conf. Proc. 2002. V. 620. P. 966—969. <https://doi.org/10.1063/1.1483699>
17. *Neri F., Walstrom P.L.* A simple empirical forward model for combined nuclear and multiple Coulomb scattering in proton radiography of thick objects // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2005. V. 229. P. 425—435. <https://doi.org/10.1016/J.NIMB.2004.12.116>

18. Freeman M., Allison J., Espinoza C., Goett J.J., Hogan G., Hollander B., Kwiatkowski K., Lopez J., Mariam F., Martinez M., Medina J., Medina P., Merrill F., Morley D., Morris C., Murray M., Nedrow P., Saunders A., Schurman T., Sisneros T., Tainter A., Trouw F., Tupa D., Tybo J., Wilde C. 800-mev magnetic-focused ash proton radiography for high-contrast imaging of low-density biologically-relevant targets using an inverse-scatter collimator // Proc. SPIE. 2016. V. 9783. Medical Imaging 2016: Physics of Medical Imaging. P. 97831X. <https://doi.org/10.1117/12.2216862>
19. Kantsyrev A.V., Scoblyakov A.V., Bogdanov A.V., Golubev A.A., Shilkin N.S., Yuriev D.S., Mintsev V.B. Monte-Carlo Geant4 numerical simulation of experiments at 247-MeV proton microscope // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 946. P. 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/946/1/012019>
20. Kantsyrev A.V., Golubev A.A., Bogdanov A.V., Demidov V.S., Demidova E.V., Ladygina E.M., Markov N.V., Skachkov V.S., Smirnov G.N., Rudskoy I.V., Kuznetsov A.P., Khudomyasov A.V., Sharkov B.Yu., Dudin S.V., Kolesnikov S.A., Mintsev V.B., Nikolaev D.N., Ternovoi V.Ya., Utkin A.V., Yuriev D.S., Shilkin N.S., Fortov V.E., Turtikov V.I., Burtsev V.V., Zhernokletov M.V., Zavialov N.V., Kartanov S.A., Mikhailov A.L., Rudnev A.V., Tatsenko M.V., Varentsov D.V., Shestov L.M. TWAC-ITEP proton microscope facility // Instrum. Exp. Tech. 2014. V. 57. P. 1—10. <https://doi.org/10.1134/S0020441214010151>
21. Kantsyrev A.V., Golubev A.A., Turtikov V.I., Bogdanov A.V., Sharkov B.Y., Demidov V.S., Skachkov V.S., Markov N.V., Mintsev V.B., Fortov V.E., Kolesnikov S.A., Nikolaev D.N., Shilkin N.S., Ternovoi V.Y., Utkin A.V., Yuriev D.S., Burtsev V.V., Zavialov N.V., Mikhailov A.L., Rudnev A.V., Tatsenko M.V., Zhernokletov M.V., Kartanov S.A. ITEP proton microscopy facility // 19th IEEE Pulsed Power Conf. (PPC) 2013. IEEE. P. 1077—1081. <https://doi.org/10.1109/ppc.2013.6627498>
22. Mintsev V.B., Shilkin N.S., Ternovoi V.Ya., Nikolaev D.N., Yuriev D.S., Golubev A.A., Kantsyrev A.V., Skobliakov A.V., Bogdanov A.V., Varentsov D.V., Hoffmann D.H.H. High-explosive generators of dense low-temperature plasma for proton radiography // Contrib. Plasma Phys. 2018. V. 58. P. 93—98. <https://doi.org/10.1002/ctpp.201700141>
23. Kolesnikov S., Dudin S., Lavrov V., Nikolaev D., Mintsev V., Shilkin N., Ternovoi V., Utkin A., Yakushev V., Yuriev D., Fortov V., Golubev A., Kantsyrev A., Shestov L., Smirnov G., Turtikov V., Sharkov B., Burtsev V., Zavialov N., Kartanov S., Mikhailov A., Rudnev A., Tatsenko M., Zhernokletov M. Shockwave and detonation studies at ITEP-TWAC proton radiography facility // AIP Conf. Proc. 1426. 2012. V. 390. P. 390—393. <https://doi.org/10.1063/1.3686300>
24. Schneider C., Rasband W.S., Eliceiri K.W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis // Nat. Methods. 2012. V. 9. P. 671—675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
25. Shilkin N.S., Mintsev V.B., Yuriev D.S., Kantsyrev A.V., Kolesnikov D.S., Bogdanov A.V., Panyushkin V.A., Scobliakov A.V., Gavrilin R.O., Golubev A.A. Spatial calibration of light yield of a proton radiography scintillator // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85. i. 10. [принято к печати] <https://doi.org/10.1134/S1063778822100568>
26. Particle Data Group, Zyla P. et al. Review of particle physics // Prog. Theor. Exp. Phys. 2020. V. 2020. P. 083C01. <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104>
27. Varentsov D., Bogdanov A., Demidov V.S., Golubev A.A., Kantsyrev A., Lang P.M., Nikolaev D.N., Markov N., Natale F., Shestov L., Simoniello P., Smirnov G.N., Durante M. First biological images with high-energy proton microscopy // Phys. Med. A. 2012. V. 29. P. 208—213. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2012.03.002>

МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ ВМЯТИН НА ДОРОЖКАХ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С ДВУМЕРНЫМ ОТОБРАЖЕНИЕМ

© 2022 г. Чжэн Юа^{1,*}, Му Лунтао¹, Чжао Цзюньхао¹

¹Шэньсийский политехнический институт, Сяньян, Китай
E-mail: *zhengyu169@126.com

Поступила в редакцию 03.08.2022; после доработки 30.09.2022

Принята к публикации 30.09.2022

Для реализации методики выявления незначительных повреждений (вмятин) на дорожках подшипников качения были выбраны сверточные нейронные сети (СНС). Чтобы улучшить обучение СНС, для преобразования сигналов вибрации подшипника из изображения в одномерный временной ряд были проанализированы такие алгоритмы преобразования двухмерных изображений, как поля угловой суммы или разности Грамиана, частотно-временная диаграмма вейвлета, матрица перехода Маркова. Чтобы уменьшить объем аппаратных вычислений и сократить время обучения и валидации было использовано кусочно-постоянное представление (КПП) для максимального сжатия данных с сохранением всей информации о сигнале. Также добавляется слой пакетной нормализации для избежания проблемы насыщения градиента функции ReLU, а для преодоления нестабильности стохастического градиентного спуска с импульсом (СГСИ) при разработке СНС применяют метод минипакетов. Каждый вид изображений используется в качестве обучающей выборки, а результаты показывают, что как частотно-временная диаграмма вейвлета, так и диаграмма полей угловой суммы или разности Грамиана могут лучше определять состояние дефекта, причем частотно-временная диаграмма вейвлета была относительно лучше. При сравнении с различными рекуррентными нейросетевыми (РНС) моделями диагностики была доказана обоснованность модели. В то же время модель применяется для идентификации деградации характеристик неисправных деталей, а результаты показывают, что модель может эффективно идентифицировать деградацию внутреннего кольца, наружного кольца и тела качения, а точность для внутреннего кольца и наружного была выше. Данная статья предлагает новую методику выявления вмятин на дорожках подшипников качения.

Ключевые слова: СНС, двумерное изображение, КПП, подшипник качения, диагностика незначительных дефектов.

DOI: 10.31857/S0130308223010074, **EDN:** BWBKMN

1. ВВЕДЕНИЕ

Подшипники качения являются важной основной частью вращающихся механизмов [1] и часто играют важную вспомогательную роль в основном оборудовании [2]. Состояние подшипников качения часто определяет, может ли механизм работать нормально [3, 4]. Поэтому для своевременного обнаружения или предупреждения возможных неисправностей необходимо использовать эффективный метод мониторинга состояния подшипников качения¹ [5]. Это имеет большое значение для обеспечения надежности работы и снижения затрат на техническое обслуживание [6].

В смежных исследованиях Xiaochi L. и др. [7] предложили метод контроля повреждений подшипников², сочетающий алгоритм оптимизации серых волков (ОСВ), нелокальное среднее шумоподавление (НСШ) и полностью адаптированное для шумоподавления разложение на эмпирические моды. Zihao L. и др. [8] описали интеллектуальный метод контроля подшипников качения, основанный на многомасштабном механизме извлечения признаков в смешанной области и доменной адаптации. Xiaojuan L. и др. [9] рассмотрели проблемы потери информации и неправильной работы при извлечении признаков из вибрационных сигналов неисправных подшипников. В статье исследовали гибридный интеллектуальный метод выявления неисправностей машин, основанный на теории вероятностей и улучшенном алгоритме оптимизации серых волков (ОСВ) для оптимизации машины опорных векторов (МОП). Ming W. и др. [10] предложили метод контроля повреждений подшипников качения, основанный на улучшенном разложении по динамическим модам (РДМ). Однако традиционный метод контроля, основанный на фильтрации и подавлении шума,

¹ <http://rcit.su/techinfo66.html>

² Повреждение — нарушение целостности деталей подшипника вследствие воздействия циклических нагрузок в процессе его работы, монтажа, демонтажа, транспортировки и хранения. Вмятина — результат вдавливания твердых частиц отслаивающегося металла в результате образования контактно-усталостных повреждений или попадания в смазку подшипника инородных твердых тел, а также длительного действия на подшипник, находящегося в состоянии покоя, нагрузок пульсирующего характера, приводящих к образованию на дорожках качения колец отпечатков от роликов, называемых «ложным бринеллированием».

производит чрезмерное разложение сигналов от незначительных повреждений, что сокращает полезную информацию и не способствует точной диагностике. В то же время сигналы вибрации подшипника содержат большое количество нелинейных компонентов, пригодность обычных алгоритмов классификации, таких как МОП, не очень хороша.

В связи с вышеуказанными причинами, сверточная нейронная сеть (СНС) обладает хорошей адаптивностью в классификации данных. Tianlong G. и др. [11] непосредственно вводили данные о вибрации подшипника в многомасштабную СНС для диагностирования, но параметры извлечения признаков СНС имеют более очевидные преимущества в высокоразмерных данных [12]. Jiangtao J. и др. [13] описали метод интеллектуального контроля ХСНС (Хаотическая СНС)-ДКП-ОМОВ. Однако этот метод не только имеет комплекс последовательности действий, низкую скорость идентификации неисправностей, но и может иметь долгосрочную зависимость от блоков долгой кратковременной памяти. Xiaoxia Y. и др. [14] реализовали контроль повреждений корпуса подшипников на основе адаптивных графовых сверточных нейросетей (АГСНС), основанных на матричной диаграмме, определяемой по коэффициенту вейвлет-пакета сигнала вибрации корпуса авиадвигателя. Но сигнал вибрации подшипника не был прямо использован, что привело к относительно большому расхождению результатов контроля.

Исходные сигналы вибрации подшипников имеют множество временных характеристик, а содержащаяся в них исходная информация имеет большое значение для осуществления достоверного контроля. Поэтому при выборе СНС в качестве метода обработки информации необходимо максимально использовать исходную информацию, содержащуюся в сигнале. Во-вторых, прямое использование исходных вибрационных сигналов для обучения неизбежно приведет к слишком большой нагрузке на компьютерное оборудование и слишком большому времени обучения, для этого необходимо максимально сократить время обучения, сохранив при этом общую информацию о сигнале. Наконец, метод контроля должен в полной мере использовать способность СНС к распознаванию абстрактных признаков для эффективной идентификации различных незначительных повреждений.

В заключение, используя алгоритм кусочно-постоянного представления (КПП), уменьшается размерность сигналов вибрации подшипников. Одномерные сигналы вибрации преобразуются в двумерные изображения с помощью различных алгоритмов для получения обучающих образцов. Затем разрабатывается СНС, и образцы изображений используются для обучения сети. Наконец, реализована эффективная методика контроля различных незначительных повреждений.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Метод генерации двумерных изображений

Угловые поля Грамиана

Угловые поля Грамиана (УПГ) могут преобразовывать одномерные временные ряды в двумерные графики [15, 16]. Принцип преобразования и формула приводятся в уравнениях (1)–(3):

$$\tilde{x}_i = \frac{(x_i - \max(\mathbf{X})) + (x_i - \min(\mathbf{X}))}{\max(\mathbf{X}) - \min(\mathbf{X})}, \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad \tilde{x}_i \in [-1, 1],$$

где $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ — одномерный временной ряд; $\tilde{x}_i$ — нормализованные элементы одномерного временного ряда.

$$\varphi_i = \arccos(\tilde{x}_i); \quad (2)$$

$$r_i = \frac{t_i}{n},$$

где φ_i — арккосинус $\tilde{x}_i$ в полярных координатах; r_i — радиус в полярных координатах; t_i — временная метка, соответствующая x_i ; n — коэффициент нормализации, показывающий общее число точек в одномерном временном ряде $\mathbf{X}$.

$$\mathbf{GASF} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_1 + \varphi_2) & \cdots & \cos(\varphi_1 + \varphi_n) \\ \cos(\varphi_2 + \varphi_1) & \cdots & \cos(\varphi_2 + \varphi_n) \\ \vdots & & \vdots \\ \cos(\varphi_n + \varphi_1) & \cdots & \cos(\varphi_n + \varphi_n) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{GADF} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & \cdots & \cos(\varphi_1 - \varphi_n) \\ \cos(\varphi_2 - \varphi_1) & \cdots & \cos(\varphi_2 - \varphi_n) \\ \vdots & & \vdots \\ \cos(\varphi_n - \varphi_1) & \cdots & \cos(\varphi_n - \varphi_n) \end{pmatrix},$$
(3)

где **GASF** — поля угловой суммы Грамиана (ПУСГ); **GADF** — поля угловой разности Грамиана (ПУРГ).

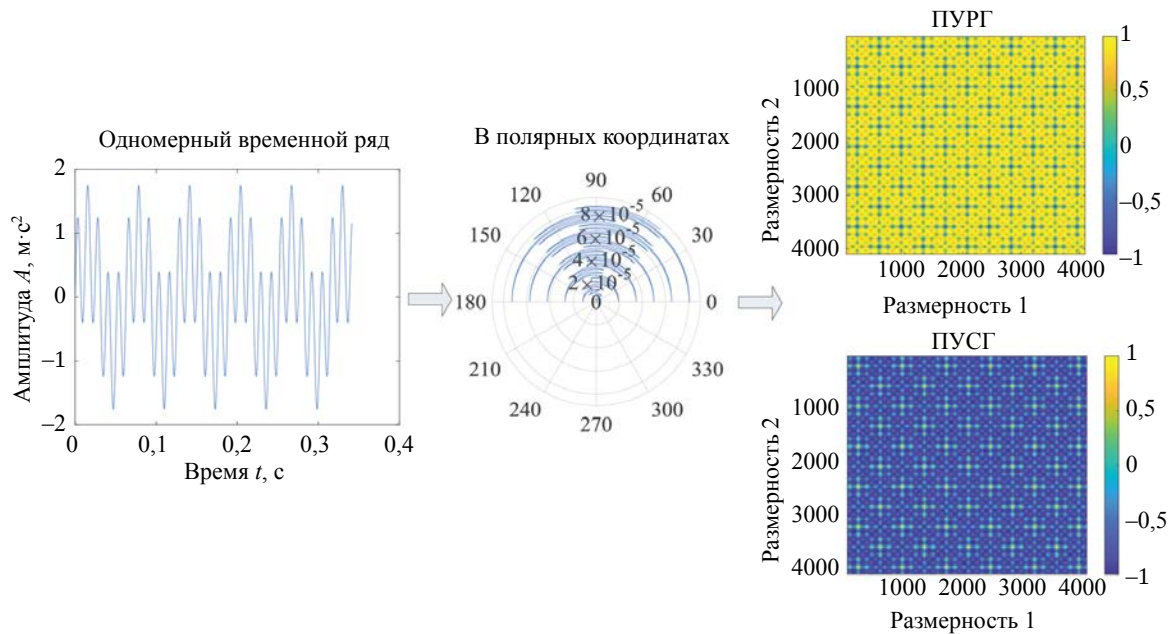


Рис. 1. УПГ-преобразование одномерного сигнала.

Матрица перехода Маркова

Матрица перехода Маркова (МПМ) кодирует информацию о динамическом переходе через вероятность марковского перехода. Формула выглядит следующим образом (см. уравнения (4), (5)):

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \omega_{11}|P(x_i \in q_1|x_{i-1} \in q_1) & \cdots & \omega_{1Q}|P(x_i \in q_1|x_{i-1} \in q_Q) \\ \omega_{21}|P(x_i \in q_2|x_{i-1} \in q_1) & \cdots & \omega_{2Q}|P(x_i \in q_2|x_{i-1} \in q_Q) \\ \vdots & & \vdots \\ \omega_{Q1}|P(x_i \in q_Q|x_{i-1} \in q_1) & \cdots & \omega_{QQ}|P(x_i \in q_Q|x_{i-1} \in q_Q) \end{pmatrix},$$
(4)

где **W** — это матрица перехода Маркова; x_t — данные по временным меткам t в одномерном временному ряду **X**; ω_{ij} — частота квантиля q_i после квантиля q_j ; $\omega_{ij} = P(x_t \in q_i | x_{t-1} \in q_j)$;

$q_j (j \in [1, Q])$ — квантиль; Q — квантильный критерий, распределенный в соответствии с диапазоном значений одномерного временного ряда $\mathbf{X}$.

Матрица перехода Маркова $\mathbf{M}$ строится путем расширения матрицы $\mathbf{W}$ при упорядочивании каждой вероятности во временном порядке:

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} m_{ij|x_1 \in q_i, x_1 \in q_j} & \cdots & m_{ij|x_1 \in q_i, x_n \in q_j} \\ m_{ij|x_2 \in q_i, x_1 \in q_j} & \cdots & m_{ij|x_2 \in q_i, x_n \in q_j} \\ \vdots & & \vdots \\ m_{ij|x_n \in q_i, x_1 \in q_j} & \cdots & m_{ij|x_n \in q_i, x_n \in q_j} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где m_{ij} — вероятность перехода из квантиля q_i в квантиль q_j ; $m_{ij} = P(q_i \rightarrow q_j)$.

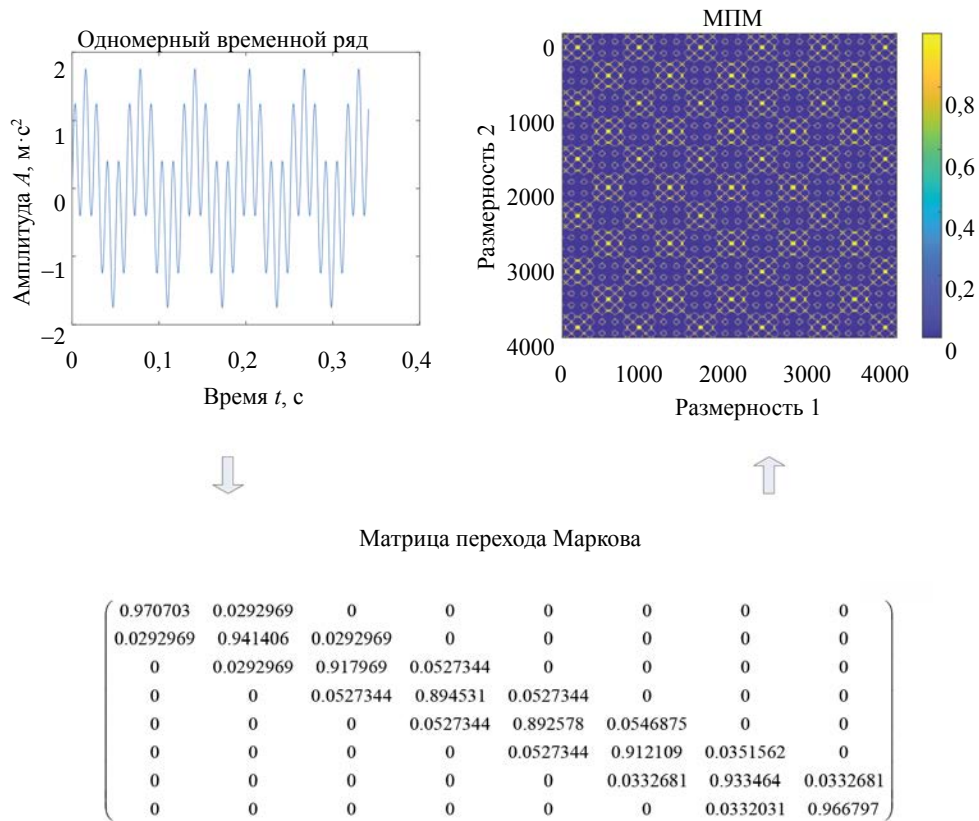


Рис. 2. МПМ-преобразование одномерного сигнала.

Частотно-временная диаграмма вейвлета

Вейвлет-преобразование — средство для частотно-временного анализа сигналов, которым может проводиться обработка сигнала на различных масштабах или разрешениях [18]. Комплексная матрица коэффициентов, полученная из исходного сигнала путем непрерывного вейвлет-преобразования, — это частотно-временная диаграмма вейвлет-преобразования. На рис. 3 показан пример такой диаграммы.

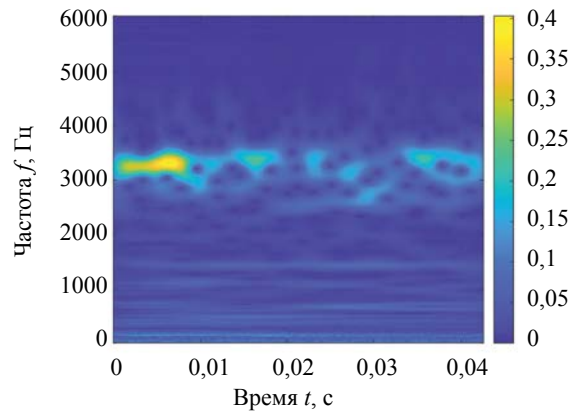


Рис. 3. Частотно-временная диаграмма вейвлета.

СНС

СНС — это разновидность нейронной сети прямого распространения, которая включает в себя сверточные вычисления [19]. Типичные СНС обычно включают сверточные слои, слои функций активации, объединяющие слои и полносвязные слои. Сверточный слой используется для извлечения характеристик данных, и его математическое выражение выглядит следующим образом [20]:

$$x_j^n = f\left(\sum (x_i^{n-1} \cdot \omega_{ij}^n) + b_j^n\right), \quad (6)$$

где x_j^n — j -карта признаков n -го слоя; x_i^{n-1} — i -карта признаков предыдущих слоев; ω_{ij}^n — матрица весов на n -м уровне; b_j^n — соответствующее смещение; $f(\cdot)$ — функция активации.

Объединяющий слой обычно используется для фильтрации информации и уменьшения параметров, участвующих в вычислении в массиве, чтобы предотвратить переобучение. Формула для расчета:

$$x_j^n = f\left(\beta_j^n \text{down}(x_j^{n-1}, M^n) + b_j^n\right), \quad (7)$$

где β_j^n — вес номера j -карты признаков с n слоями; $\text{down}(\cdot)$ — объединяющая функция, включающая максимальное значение, среднее значение и случайное значение; M^n — номер n слоя, который принимает окно свертки, а размер поля свертки $M^n \times M^n$.

Кусочно-постоянное представление

Кусочно-постоянное представление (КПП) — метод восстановления данных исходных временных рядов, используя те же ряды данных разрешения по времени [21], который имеет хороший эффект снижения размерности данных для большинства одномерных временных рядов. КПП-метод рассчитывается по уравнению [22]:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=k(j-1)+1}^{k*j} x_i, \quad (8)$$

где x_i — исходный временной ряд длиной $k \cdot j$; $\bar{x}_j$ — временной ряд после усреднения; j — длина. Из этого уравнения можно получить временные ряды после усреднения, главная идея КПП — кусочно усреднить одномерный временной ряд так, чтобы уменьшить размерность данных и сократить их длину, максимально сохранив общую информацию о ряде.

Рис. 4 показывает угловые поля Грамиана без уменьшения разрешения ($512 \times 512 \times 1$) и после его уменьшения ($64 \times 64 \times 1$).

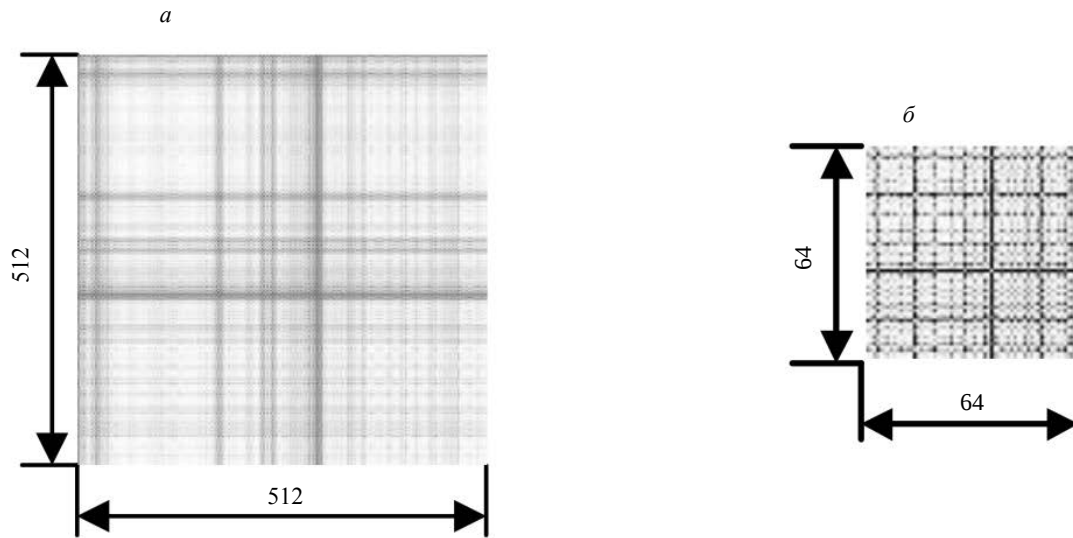


Рис. 4. Результат уменьшения размеров методом КПП: без КПП (а); после КПП (б).

Как видно из рис. 4, после уменьшения разрешения по КПП-алгоритму размер карты угловых полей Грамиана значительно уменьшается. Между тем, полученная карта угловых полей имеет сходство в общих чертах, а в ней сохраняются характеристики изображения.

Метод диагностики

В соответствии с приведенными выше методами преобразования, в данной статье предлагается модель диагностики изображений методом КПП с помощью СНС, как показано на рис. 5.

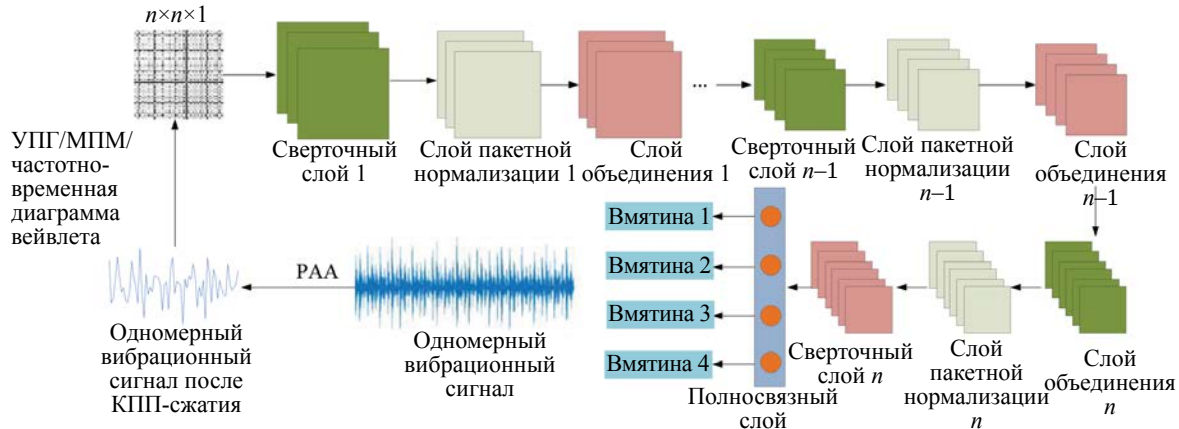


Рис. 5. Модель диагностики изображений методом КПП с помощью СНС.

В данной модели одномерные вибрационные сигналы от подшипников сначала сжимаются по КПП-алгоритму, а затем создаются изображения после расчета УПГ или МПМ, или частотно-временной диаграммы вейвлета.

Операция свертки сначала выполняется через слой свертки для изучения локальных признаков входного изображения, после чего образец изображения вводится в СНС. Чтобы преодолеть проблему насыщения градиента функции активации, после слоя функции активации был введен слой пакетной нормализации [23] для нормализации входных данных функции активации к области с большим значением градиента. Через объединяющий слой карта входных признаков уменьшается для удаления избыточной информации. После нескольких циклов свертки, пакетной нормализации и операций объединения модель завершает обучение на основе признаков. Наконец, полученная информация о признаках, включая пространственные и временные особенности исходного изобра-

жения, вводится в полносвязный слой для повторной интеграции, точной настройки параметров и отображения в пространство меток образца. Для классификации множества повреждений используется функция softmax [24], математическое выражение которой выглядит следующим образом:

$$y_i = f(z_i) = \frac{e^{z_i}}{e^{z_1} + e^{z_2} + \dots + e^{z_M}} = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^M e^{z_j}}, \quad (9)$$

где z_i — вход для i -го выходного нейрона; M — общее число выходных нейронов; f — функция активации Softmax, а $f(z_1) + f(z_2) + \dots + f(z_M) = 1$.

Чтобы ускорить весовое обучение, в качестве метода обучения в данной работе используется стохастический градиентный спуск с импульсом (СГСИ) [25]. Поскольку СГСИ склонен к неустойчивости вычислений из-за различий в выборке, что не способствует получению хороших результатов классификации, в работе используется метод минипакетов [26], а именно: из набора данных выбираются некоторые подмножества данных. Эти выбранные подмножества данных используются для расчета обновленного значения параметров сети, а затем среднее значение обновленных параметров применяют для настройки параметров всей сети, чтобы учесть стабильность и скорость обновления веса. В качестве функции потерь мы используем перекрестную энтропию, формула которой выглядит следующим образом:

$$H = -\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \sum_j p_k^j \log q_k^j, \quad (10)$$

где m — число элементов в минипакете; k — элемент с номером k в минипакете; j — целевой класс с номером j ; p_k^j — это унитарный вектор, который представляет истинную вероятность того, что элемент с номером k попадет в целевой класс j в минипакете; q_k^j — вектор выходной вероятности функции softmax для элемента с номером k в целевом классе j .

3. ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Источники данных и образцы

В качестве экспериментальных данных используются полученные в Университете Кейс Вестерн Резерв результаты по выявлению повреждений в подшипниках. Эти данные были получены в ходе экспериментов с радиальным шарикоподшипником (модель: 6205-2RS JEM SKF) [27]. Перед началом эксперимента на внутреннем кольце, наружном кольце и теле качения подшипника с помощью электроэрозионного станка были сделаны искусственные дефекты — одиночные вмятины разного диаметра. Диаметр и расположение вмятин показаны в табл. 1. Сигнал вибрации собирается акселерометром, который размещается в зоне нагрузки посадочного места подшипника ведущего конца на магнитном основании, а данные вибрации собираются 16-канальным цифровым самописцем с частотой дискретизации 12 кГц. Экспериментальная установка показана на рис. 6.



Рис. 6. Экспериментальная установка.

Таблица 1

Диаметр и расположение отдельных лунок

Диаметр, мм	Расположение
0,1778	ВнешК, ВнутК, ТК
0,3556	ВнешК, ВнутК, ТК
0,5334	ВнешК, ВнутК, ТК
0,7112	ВнутК, ТК

ВнутК: внутреннее кольцо; ВнешК: внешнее кольцо; ТК: тело качения

Для того, чтобы произвести обучение и верификацию сверточной нейронной сети, из исходного вибрационного сигнала непрерывно извлекается определенная длина данных и разбивается на несколько подпоследовательностей, как показано на рис. 7.

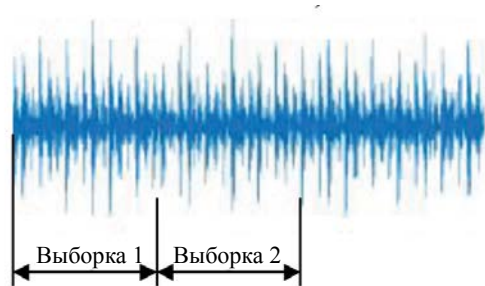


Рис. 7. Разбиение обучающей выборки.

Для того, чтобы уменьшить размер изображений, повысить скорость обучения нейронных сетей и обеспечить получение необходимой информации при считывании данных, длина подпоследовательности данных может быть рассчитана следующим образом:

$$n \geq \text{ceil} \left(\frac{60}{N} f_s \right), \quad (11)$$

где N — скорость оборота подшипника; f_s — частота дискретизации; n — длина данных выборки; ceil — оператор округления.

Подставляя минимальную скорость вращения подшипника в ходе эксперимента, минимальное значение n , которое можно вычислить, равно 417, поэтому длина подпоследовательности данных определяется равной 512. Размер изображения после уменьшения размерности методом КПП составлял $64 \times 64 \times 1$. Экспериментальные данные собраны с исправных и неисправных подшипников,

Таблица 2

Нагрузка двигателя и его обороты

Нагрузка двигателя, кВт	Обороты двигателя, об/мин
0	1797
0,74	1772
1,47	1750
2,21	1730

а типы повреждений разделены на повреждения внутреннего кольца, наружного кольца и тела качения. Подшипники с различными повреждениями находятся под воздействием четырех нагрузок двигателя, приведенных в табл. 2. Данные были разделены на подпоследовательности, и после уменьшения размерности с помощью КПП были созданы двумерные изображения.

Проектирование СНС

Разработанная сверточная нейронная сеть содержит в общей сложности 18 слоев, включая 1 входной слой, 3 сверточных слоя, 3 слоя пакетной нормализации, 4 слоя нелинейной активации, 3 слоя максимального объединения, 2 полносвязных слоя, 1 слой функции softmax и 1 выходной слой. Структурные характеристики СНС представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры каждого слоя сверточной нейронной сети

Наименование	Примечание
Входной слой	64×64, 1 канал
Сверточный слой 1	Размер ядра свертки: 5×5, количество: 32 Размер заполнения: 2
Слой пакетной нормализации 1	Ускоряет сходимость сети во время обучения
Слой функции активации 1	Функция ReLU
Слой максимального объединения 1	Размер объединения: 3×3, шаг: 2
Сверточный слой 2	Размер ядра свертки: 5×5, количество: 32 Размер заполнения: 2
Слой пакетной нормализации 2	Ускоряет сходимость сети во время обучения
Слой функции активации 2	Функция ReLU
Слой максимального объединения 2	Размер объединения: 3×3, шаг: 2
Сверточный слой 3	Размер ядра свертки: 5×5, количество: 64 Размер заполнения: 2
Слой пакетной нормализации 3	Ускоряет сходимость сети во время обучения
Слой функции активации 3	Функция ReLU
Слой максимального объединения 3	Размер объединения: 3×3, шаг: 2
Полносвязный слой 1	Количество выходов: 64
Слой функции активации 4	Функция ReLU
Полносвязный слой 2	Количество выходов: 4
Слой функции Softmax	Рассчитывает вероятность выхода из полносвязного слоя
Слой классификации	Определяет класс дефекта в соответствии с определенной вероятностью

Как показано в табл. 3, в качестве нелинейной функции активации в слое функции активации после слоя свертки в данной работе мы выбираем ReLU, так как функция ReLU имеет быструю скорость сходимости и хорошую производительность по сравнению с другими функциями активации [22].

Количество минипакетов составляет 27, начальная скорость обучения — 0,01, коэффициент уменьшения скорости обучения — 0,1, количество циклов уменьшения скорости обучения — 20. Данные перетасовываются перед каждым циклом обучения или верификации, максимальное количество циклов — 100.

Набор образцов

Для того, чтобы улучшить обобщение классификации нейронной сети, различия в нагрузке игнорируются, внимание уделяется только меткам классов повреждений. Классы образцов делятся

на соответствующие нормальные, повреждения тела качения, повреждения внутреннего кольца и повреждения наружного кольца.

В связи с исследованием задачи диагностики незначительных повреждений (вмятин), в качестве источника данных мы выбираем данные от лунки с наименьшим диаметром 0,1778 мм. Каждый тип образов одномерного временного ряда вибрации подшипника рассчитывается в соответствии с вышеизложенным утверждением. Для каждого вида изображения количество образцов в нормальном состоянии составляет 1450, количество образцов с повреждениями тела качения — 950, количество образцов с повреждениями внутреннего кольца — 952 и количество образцов с повреждениями внешнего кольца — 953. Набор образцов для обучения, набор образцов для верификации и набор образцов для тестирования случайным образом делятся в соотношении 6:1:3.

4. ПРОЦЕСС И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сравнение способности к выявлению повреждений с помощью различных двумерных изображений

Для обучения используется следующее компьютерное оборудование: процессор I5-7500H; ОПЕРАТИВНАЯ ПАМЯТЬ 16 ГБ; GPU 1050Ti; видеопамять 4-5 Гб. Образцы изображений каждого из классов загружаются в СНС соответственно. После обучения кривая точности проверки и кривая значения функции потерь для каждой эпохи показаны на рис. 8.

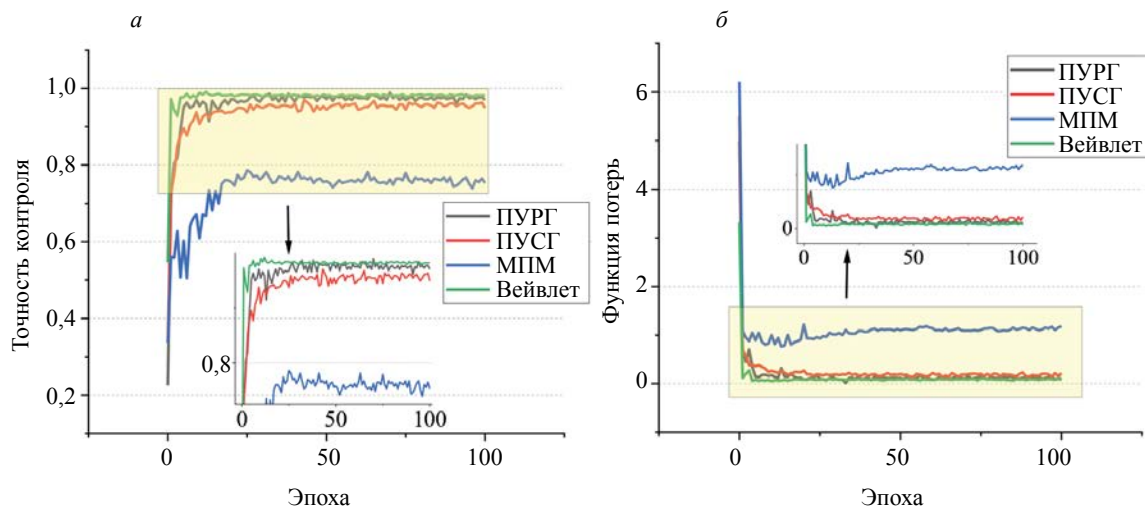


Рис. 8. Сравнение точности контроля и функции потерь для каждого двумерного изображения: определение точности контроля (а); определение функции потерь (б).

Как можно судить из рис. 8, частотно-временная диаграмма вейвлета, ПУРГ и ПУСГ могут увеличить достоверность контроля до значения более чем 90 % и поддерживать высокий уровень в первых 15 эпохах обучения, в то время как точность контроля с помощью МПМ имеет низкую скорость роста. После 100 эпох обучения точность контроля для каждого метода ПУРГ: 98,07 %; ПУСГ 97,37 %, частотно-временная диаграмма вейвлета: 98,61 %; МПМ 77,44 %. Говоря об итоговой достоверности контроля, ПУРГ или ПУСГ или частотно-временная диаграмма вейвлета способны достичь значительно эффекта разрешения повреждений, в то время как МПМ хуже. Что касается значения функции потерь, ПУРГ/ПУСГ/частотно-временная диаграмма вейвлета (все три) могут быстро уменьшиться и стабилизироваться примерно до 0,1 в течение первых 5 циклов, а окончательная частотно-временная диаграмма вейвлета является относительно наименьшей, поэтому, в целом, эффект диагностирования образца с использованием частотно-временной диаграммы вейвлета является наилучшим. Матрица путаницы тестового набора ПУРГ, ПУСГ, частотно-временная диаграмма вейвлета и МПМ построена так, как показано на рис. 9.

Реальный класс дефекта	<i>a</i>				<i>б</i>				<i>в</i>				<i>г</i>							
	ТК	271	9	2	3	ТК	268	10	1	6	ТК	274	3		8	ТК	193	16	33	43
	ВнутК	4	281		1	ВнутК	8	275		3	ВнутК	4	282			ВнутК	16	261	5	4
	ВнешК			435		ВнешК	5		430		ВнешК			435		ВнешК	32	3	382	18
	Б/Д	4	2		280	Б/Д		1		285	Б/Д	3			283	Б/Д	54	6	10	216
	ТК	ВнутК	ВнешК	Б/Д		ТК	ВнутК	ВнешК	Б/Д		ТК	ВнутК	ВнешК	Б/Д		ТК	ВнутК	ВнешК	Б/Д	
Прогнозируемый класс дефекта																				

Рис. 9. Матрица путаницы для каждого набора тестовой выборки:

ПУРГ (а); ПУСГ (б); частотно-временная диаграмма вейвлета (в); МПМ (г); ВнутК — внутреннее кольцо; ВнешК — внешнее кольцо; ТК — тело качения; Б/Д — бездефектный.

Как видно из рис. 9, независимо от типа выборки ошибка контроля в основном возникает при повреждении тела качения, что указывает на то, что повреждение тела качения трудно выявлять, это может быть связано со сложными компонентами сигнала при повреждении тела качения.

Сравнение с другими моделями

Чтобы доказать эффективность этой модели, ее сравнивают с другими распространенными моделями машинного обучения. В качестве моделей сравнения используются ДКП, 2Н-ДКП и УКБ. С точки зрения структуры сети, каждая в своей основе содержит скрытый слой с числом нейронов 100, размер минипакета 27, число эпох обучения 100, а скорость первичного обучения 0,01. За исключением модели СНС в данной работе все остальные сопоставляемые модели проверяются на одномерных выборках данных вибрации подшипников без снижения размерности РАА, длина которых делится на 512 при том же наборе данных. Кривые точности обучения соответствующих моделей показаны на рис. 10, а количество параметров, время обучения и сравнение точности показаны в табл. 4.

Таблица 4

Сравнение эффективностей различных моделей машинного обучения

Модель	Точность контроля	Количество параметров	Время обучения
Вейвлет-КПП-СНС	0,9861	257412	7 мин 58 с
ДКП	0,8854	245604	2 мин 38 с
2Н-ДКП	0,8429	491204	3 мин 15 с
УРБ	0,8932	184304	2 мин 31 с

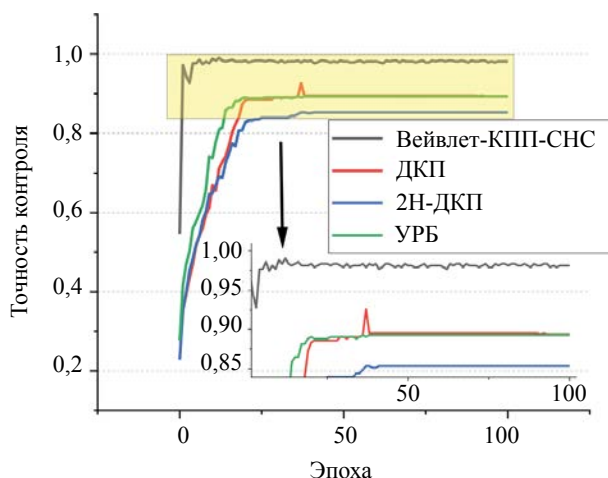


Рис. 10. Сравнение точности контроля каждой модели.

Как видно из рис. 10, достоверность предложенного метода увеличивается быстрее всего, и в конечном итоге она может быть стабилизирована на более высоком уровне. Из табл. 4. следует, что количество параметров обучения модели в данной работе умеренное, хотя время обучения не самое короткое, точность тестового набора самая высокая в пределах допустимого времени обучения. Подводя итог, можно сделать вывод, что предложенный метод имеет очевидные преимущества в достоверности контроля по сравнению с другими методами.

Выявление повреждений при снижении эксплуатационных характеристик подшипников

Для дальнейшего исследования возможностей обнаружения этим методом снижения эксплуатационных характеристик неисправного подшипника качения, в качестве метода генерации образа двумерного изображения выбирается частотно-временная диаграмма вейвлета с наилучшими показателями для выявления незначительных повреждений. Как показано в табл. 1, данные об одиночных повреждениях на различных частях внутреннего кольца, внешнего кольца и тела качения, диаметр лунки которых увеличивается от 0,1778 до 0,7112 мм, получены в виде образцов изображений, число образцов повреждений внутреннего кольца 3794, число образцов повреждений внешнего кольца 2856, число образцов повреждений тела качения 3798. Как указано выше, образцы обучающего, проверочного и тестового множеств случайным образом распределяются в соотношении 6:1:3. Следует отметить, что набор данных, используемый в данной работе, не содержит данных о повреждениях наружного кольца при диаметре лунки повреждения 0,7112 мм. Образцы помещаются в СНС для обучения и верификации. Условия обучения совпадают с вышеизложенным утверждением. Точность тестового набора в процессе обучения показана на рис. 11, а точность окончательного тестового набора — в табл. 5.

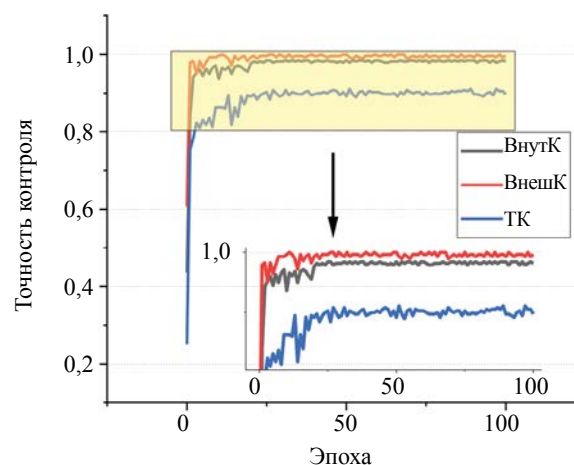


Рис. 11. Сравнение достоверности выявления различных повреждений при износе: ВнутК — внутреннее кольцо; ВнешК — внешнее кольцо; ТК — тело качения.

Таблица 5

Достоверность выявления различных повреждений при износе

Деталь	Точность контроля
ВнутК	0,9868
ВнешК	0,9907
ТК	0,8709

ВнутК: внутреннее кольцо; ВнешК: внешнее кольцо; ТК: тело качения

Как видно из рис. 11, при наличии повреждений внутреннего и внешнего кольца достоверность распознавания степени повреждения быстро увеличивается в первые несколько эпох и затем поддерживается на высоком уровне, в то время как при повреждении тела качения степень повреждения увеличивается относительно медленнее, а уровень распознавания относительно ниже. Из табл. 5 следует, что досто-

верность распознавания степени повреждения внутреннего и наружного колец намного выше, чем тела качения. В заключение следует отметить, что данный метод обладает определенной достоверностью в распознавании степени повреждения внутреннего кольца, внешнего кольца и тела качения, среди которых внутреннее кольцо и внешнее кольцо имеют относительно более высокую достоверность, а тело качения — относительно более низкую, что также указывает на то, что выявление повреждений тела качения является сложным и трудным.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе в качестве основного метода выявления незначительных повреждений (вмятин) была рассмотрена СНС. Для достижения хорошего результата контроля и уменьшения времени обучения СНС, сигнал вибрации подшипника уменьшается и сжимается алгоритмом КПП для сохранения полной информации о сигнале, а затем преобразуется в различные образцы двумерного изображения методом ПУРГ/ПУСГ/частотно-временная диаграмма вейвлета /МПМ. При разработке СНС, чтобы преодолеть проблему насыщения градиента функции ReLU, после каждого слоя свертки добавляется слой пакетной нормализации. Метод СГСИ используется для быстрой настройки веса нейронной сети для ускорения обучения. Чтобы преодолеть нестабильность метода СГСИ в данной работе используется метод минипакетов.

Результаты исследования показывают, что:

- 1) путем преобразования одномерных временных рядов сигналов вибрации подшипников в ПУРГ/ПУСГ/частотно-временная диаграмма вейвлета СНС может быть эффективно использована для обучения и определения класса неисправности;
- 2) алгоритм КПП может уменьшить размерность данных, сохраняя при этом общую информацию о сигнале, что позволяет снизить нагрузку на аппаратное обеспечение для обучения модели;
- 3) временно-частотно-временная диаграмма вейвлета имеет некоторые преимущества в точности контроля и больше подходит для идентификации незначительных дефектов подшипников качения;
- 4) независимо от вида выборки двумерного изображения результат контроля внутреннего и внешнего кольца лучше, чем результат контроля тела качения;
- 5) по сравнению с ДКП/2Н-ДКП/УРБ предложенная модель имеет очевидные преимущества в достоверности контроля;
- 6) при обнаружении ухудшения эксплуатационных характеристик различных повреждений модель в данной работе имеет определенную достоверность идентификации повреждений внутреннего кольца, внешнего кольца и тела качения, причем достоверность идентификации повреждений внутреннего кольца и наружного кольца выше.

Данное исследование было поддержано исследовательскими фондами, поддерживающими проекты Политехнического института Шэньси (№ гранта 2022YKZD-001). Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jie L., Changjie L., Yuhao S., Xingwei S. A study on bearing fault diagnosis based on LSGAN-SqueezeNet // *Journal of Vibration and Shock*. 2022. V. 41. P. 293—300. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2022.12.036>
2. Xiaoli Z., Minping J. Fault Diagnosis of Rolling Bearing Based on Feature Reduction with Global-Local Margin Fisher Analysis // *Neurocomputing*. 2018. V. 315. P. 447—464. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.07.038>
3. Nibaldo R., Pablo A., Lida B., Guillermo C.G. Combining Multi-scale Wavelet Entropy and Kernelized Classification for Bearing Multi-fault Diagnosis // *Entropy*. 2019. V. 21. P. 15—25. <https://doi.org/10.3390/e21020152>
4. Xiaohui G., Shaopu Y., Yongqiang L., Rujiang H., Zechao L. Multi-sparsity-based blind deconvolution and its application to wheelset bearing fault detection // *Measurement*. 2022. V. 199. <https://doi.org/10.1016/j.MEASUREMENT.2022.111449>
5. Mingzhu L., Shixun L., Xiaoming S., Changzheng C. Early degradation detection of rolling bearing based on adaptive variational mode decomposition and envelope harmonic to noise ratio // *Journal of Vibration and Shock*. 2021. V. 40. P. 271—280. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2021.13.034>
6. Yong H., Hong W., Sui G. New fault diagnosis approach for bearings based on parameter optimized VMD and genetic algorithm // *Journal of Vibration and Shock*. 2021. V. 40. P. 184—189. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2021.06.025>
7. Xiaochi L., Shi X., Yundong S., Gongmin L., Jinyu T., Xi Z., Zhuang L. Rolling bearing fault diagnosis method based on GWO-NLM and CEEMDAN // *Journal of Aerospace Power*. 2022. P. 1—13. [10.13224/j.cnki.jasp.20210547](https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20210547)

8. Zihao L., Guangrui W., Qiao Z., Shuzhi D., Xin H., Haoxuan Z. Rolling Bearing Fault Diagnosis Based on Multi-scale Mixed Domain Feature Extraction and Domain Adaptation // Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis. 2022. V. 42. P. 183—185. <https://doi.org/10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2022.01.028>
9. Xiaojuan L., Chengji S. Application of the P-box theory and HGWO-SVM in the fault diagnosis of rolling bearings // Journal of Vibration and Shock. 2021. V. 40. P. 234—241. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2021.22.032>
10. Ming W., Zhang D., Zhen Y., Yong L., Guoqian W. Dynamic mode decomposition and its application in early bearing fault diagnosis // Journal of Vibration and Shock. 2022. V. 41. P. 313—320. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2022.12.038>
11. Tianlong G., Zhenhai S., Chenzhong B., Liang C. Fault diagnosis of rolling bearing based on multi-scale convolutional neural network // Machinery Design & Manufacture. 2022. V. 20. P. 20—23. <https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20211105.003>
12. Xiaoxi D., Qingbo H. Energy-Fluctuated Multiscale Feature Learning With Deep ConvNet for Intelligent Spindle Bearing Fault Diagnosis // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2017. V. 66. P. 1926—1935. <https://doi.org/10.1109/tim.2017.2674738>
13. Jiangtao J., Zifei X., Chun L., Wei-pao M., Jun-qing X., Kang S. Rolling bearing fault diagnosis based on deep learning and chaotic feature fusion // Control Theory & Applications. 2022. V. 39. P. 109—116.
14. Xiaoxia Y., Baoping T., Jing W., Lei D. Fault diagnosis for aero-engine accessory gearbox by adaptive graph convolutional networks under intense background noise conditions. 2021. V. 41. P. 78—86. <https://doi.org/10.19650/j.cnki.cjsi.J2107732>
15. Wang Z., Oates T. Encoding Time Series as Images for Visual Inspection and Classification Using Tiled Convolutional Neural Networks / Workshops at the Twenty-ninth Aai Conference on Artificial Intelligence, 2015
16. Chaolung Y., Zhixuan C., Chenyi Y. Sensor Classification Using Convolutional Neural Network by Encoding Multivariate Time Series as Two-Dimensional Colored Images // Sensors (Basel, Switzerland). 2020. V. 20. P. 168. <https://doi.org/10.3390/s20010168>
17. Hoonyong L., Kanghyeok Y., Namgyun K., Changbum R.A. Detecting excessive load-carrying tasks using a deep learning network with a Gramian Angular Field // Automation in Construction. 2020. V. 120. P. 103390. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103390>
18. Zhupeng W., Jie C., Lianhua L., Lingling J. Fault diagnosis of wind power gearbox based on wavelet transform and improved CNN // Journal of Zhejiang University (Engineering Science). 2022. V. 56. P. 1212—1219. <https://doi.org/10.3785/j.issn.1008-973X.2022.06.020>
19. Sen L., Aiguo W., Xintao D., Cuiwei Y. MGNN. A multiscale grouped convolutional neural network for efficient atrial fibrillation detection // Compbiomed. 2022. V. 148. P. 105863. <https://doi.org/10.1016/J.COMPBIOMED.2022.105863>
20. Reddy B.L., Uma M.R.N., Nelleri A. Deep convolutional neural network for three-dimensional objects classification using off-axis digital Fresnel holography // Journal of Modern Optics. 2022. V. 69. P. 705—717. <https://doi.org/10.1080/09500340.2022.2081371>
21. Yuxian Z., Fang D. Load classification based on piecewise aggregate approximation of particle swarm optimization // Journal of Shenyang University of Technology. 2021. V. 43. P. 123.
22. Ang G., JianYong Z., Fei M., HaoYuan S., Xing Q., Yang X., Xuan L., MengLei G., DanQi L. Electricity Theft Detection Algorithm Based on Triplet Network // Proceedings of the CSEE. 2022. V. 42. P. 3975—3986. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.211040>
23. Yunwei P., Jiang G., Taotao L., Haixiao W. A Recognition Method for Radar Emitter Signals Based on Convolutional Neural Network with Multiple Learning Units // Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications. 2021. V. 44. P. 74—82. <https://doi.org/10.13190/j.jbupt.2021-055>
24. Peng Y., Xiaoxu H., Yuhui H., Jin Y., Shi W., Lei L. Online alarm recognition of power grid dispatching based on BERT-DSA-CNN and a knowledge base // Power System Protection and Control. 2022. V. 50. P. 131. <https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.210705>
25. Ren W., Junpeng H., Qidong Y., Tianren L., Ben Y. Research of LSTM model-based intelligent guidance of flight aircraft // Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2021. V. 53. P. 2054.
26. Hongrui Z., Guojun Y., Chengji Y., Guangming T., Zhan W., Zhongzhe H., Xiaoyang Z., Xuejun A. Survey on Network of Distributed Deep Learning Training // Journal of Computer Research and Development. 2021. V. 58. P. 100.
27. Wade A.S., Robert B.R. Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: A benchmark study // Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. V. 64. P. 100—10.