

УЗК аустенитных сварных швов с учетом трансформированных волн

Сотрудники
ООО «НТК ЭКОНТ»,
г. Москва:



**Гребенников
Валентин
Васильевич**

Главный научный
сотрудник, к. т. н.,
III уровень по
акустическому
виду НК.



**Гребенников
Дмитрий
Валентинович**

Главный инженер, II уровень по ультразвуковому, капиллярному, магнитно-порошковому и визуально-измерительному контролю.

Для контроля аустенитных сварных швов в настоящее время широко используются продольные волны [1–3]. Хорошо известны преимущества и недостатки такого контроля. Среди преимуществ — это относительно меньшее затухание и анизотропия упругих волн в наплавленном металле шва по сравнению с контролем сдвиговыми волнами, а, следовательно, относительно меньший уровень структурных помех. Недостатки — возможность контроля только прямым лучом при условии удаления валика усиления шва, пониженная надежность выявления наиболее опасных дефектов типа трещин и непроваров, присутствие сигналов помех, обусловленных излучением пьезопреобразователем наряду с продольной волной со скоростью C_L под углом ввода α_L волны сдвиговой со скоростью C_T под углом α_T . Здесь и в дальнейшем рассматриваются аустенитные сварные соединения, для которых $C_L = 5700$ м/с, $C_T = 3100$ м/с. Одновременное распространение волн двух типов в аустенитном сварном шве приводит к возникновению серии сигналов, отраженных как от структурных неоднородностей, так и от реальных дефектов. В общем случае на дисплее могут присутствовать следующие полезные сигналы от дефектов, выявленные:

- 1) продольной волной на прямом и отраженном лучах;
- 2) сдвиговой волной на прямом луче и отраженном луче (рис. 1);
- 3) продольной волной, трансформированной в сдвиговую волну непосредственно на дефекте (рис. 2);
- 4) головной волной в случае использования пьезопреобразователей с углами ввода продольной

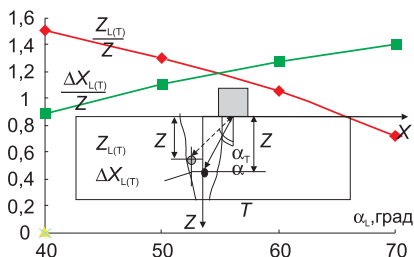


Рис. 1. Выявление дефекта сдвиговыми волнами (вторая волна). Измеренные значения координат $Z_{L(T)}$ и $X_{L(T)}$. Глубиномерное устройство настроено на контроль продольными волнами

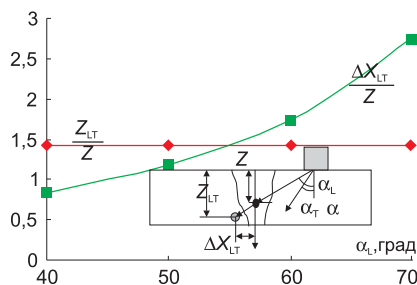


Рис. 2. Трансформация продольных волн в сдвиговые волны на дефекте. Измеренные значения координат Z_{LT} и X_{LT} . Глубиномерное устройство настроено на контроль продольными волнами

волны в диапазоне 60–70° (угол ввода сдвиговой волны $\approx 30^\circ$ вблизи третьего критического угла) (рис. 3);

- 5) продольной волной, отраженной от дефекта и трансформированной в сдвиговую на донной поверхности («самотандем») (рис. 4);
- 6) сдвиговой волной, трансформированной из продольной на донной поверхности (рис. 5);
- 7) продольной волной, трансформированной из сдвиговой на донной поверхности (рис. 6).

Используя геометрическое приближение, можно рассчитать координаты обнаруженных отражателей с учетом изменений углов ввода и скорости распространения упругой волны при трансформации. Учитывая, что в программу глубиномерного устройства дефектоскопа введены скорость C_L и угол ввода α_L продольной волны, измеренные этим устройством глубина Z^{**} залегания выявленного дефекта и расстояния X^{**} до дефектного сечения от точки ввода луча должны заметно отличаться от действительной глубины Z и расстояния X . Как правило, $Z^{**} > Z$ и $X^{**} = X + \Delta X^{**}$ (рис. 1–6). Только при выявлении дефекта продольной волной $Z^{**} = Z$, а $\Delta X^{**} = 0$.

Изменения углов ввода и скорости упругой волны при трансформации является причиной ошибок в определении координат дефектов.

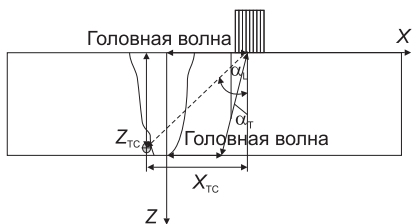


Рис. 3. Выявление дефектов головными волнами

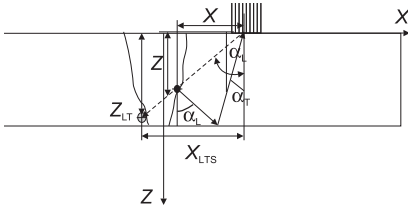


Рис. 4. Выявление дефектов по схеме само-тандем (отражение от дефектов продольных волн с последующей трансформацией их в сдвиговые на донной поверхности)

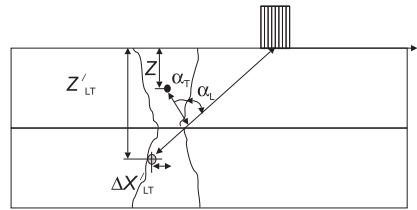


Рис. 5. Выявление дефекта сдвиговыми волнами, трансформированными из продольных волн на донной поверхности. Измеренные значения координат Z'_{LT} и X'_{LT} . Глубиномерное устройство настроено на контроль продольными волнами

При выявлении дефекта сдвиговой волной (рис. 1) измеряемые глубиномером его координаты запишутся следующим образом:

$$Z_{L(T)} = Z \sin^2 \alpha_L / \sin^2 \alpha_T;$$

$$\Delta X_{L(T)} = Z [\operatorname{tg} \alpha_L \sin^2 \alpha_L / \sin^2 \alpha_T - \operatorname{tg} \alpha_L].$$

Графики зависимостей относительных значений $Z_{L(T)}$ и $\Delta X_{L(T)}$ от угла ввода продольной волны α_L представлены на рис. 1. Следует обратить внимание на то, что для преобразователей с углом ввода продольной волны $\alpha_L \approx 60^\circ$ глубина залегания определяется по глубиномерному устройству достаточно правильно ($Z_{L(T)} \approx Z$). Наибольшая ошибка наблюдается для углов $\alpha_L = 40$ и 70° . Во всем диапазоне углов α_L измеренная координата $X_{L(T)}$ отличается от реальной на величину $\Delta X_{L(T)} \approx 1,3 \alpha_L / 45^\circ$.

Трансформация продольных волн в сдвиговые волны непосредственно на дефекте (рис. 2) может играть существенную роль в измерении координат обнаруженных дефектов. Выражения для измеренных глубины залегания дефекта Z_{LT} и смещения координаты ΔX_{LT} записываются следующим образом:

$$Z_{LT} = Z (C_L + C_T) / (2C_T);$$

$$\Delta X_{LT} = Z \operatorname{tg} \alpha_L (C_L - C_T) / (2C_T).$$

Измеренная глубина залегания Z_{LT} отличается от истинной глубины залегания Z в 1,42 раза, а смещение ΔX_{LT} пропорционально глубине залегания дефекта, тангенсу угла ввода α_L , а также относительной разнице скоростей продольных и сдвиговых волн (рис. 2).

Отметим, что контроль осложняется и трансформацией волн на донной поверхности (рис. 3, 4). При УЗК продольными волнами в диапазоне углов ввода лучей $45\text{--}70^\circ$ практически вся энергия продольных волн на

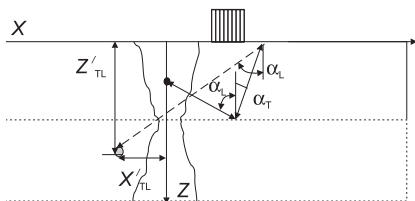


Рис. 6. Выявление дефекта продольными волнами, трансформированными из сдвиговых волн на донной поверхности. Измеренные значения координат Z'_{LT} и X'_{LT} . Глубиномерное устройство настроено на контроль продольными волнами

донной поверхности трансформируется в энергию сдвиговых волн. Диапазон углов трансформированных сдвиговых волн смещается в сторону меньших углов — 25–30° (рис. 5).

Трансформированные сдвиговые волны, распространяясь в аустенитном шве и отражаясь от несплошностей, несут информацию о качестве сварного соединения. Изменения угла ввода и скорости упругой волны при трансформации и в этом случае являются причиной ошибок в определении координат дефектов. Измеренные в этих условиях глубина залегания Z'_{LT} и смещение координаты $\Delta X'_{LT}$ точечного отражателя запишутся следующим образом:

$$Z'_{LT} = H + (H - Z) \sin^2 \alpha_L / \sin^2 \alpha_T;$$

$$\Delta X'_{LT} = (H - Z) [\operatorname{tg} \alpha_L \sin^2 \alpha_L / \sin^2 \alpha_T - \operatorname{tg} \alpha_T],$$

где H — толщина изделия.

Зависимости значений относительных глубин залегания и смещения координаты точечного отражателя запишутся следующим образом:

$$Z'_{LT}/H = H + (\sin^2 \alpha_L / \sin^2 \alpha_T - 1) (1 - Z/H);$$

$$\Delta X'_{LT}/H = (\operatorname{tg} \alpha_L \sin^2 \alpha_L / \sin^2 \alpha_T - \operatorname{tg} \alpha_T) (1 - Z/H).$$

Графики зависимостей относительных изменений измеренных глубины расположения точечного отражателя Z'_{LT} и смещения по координате

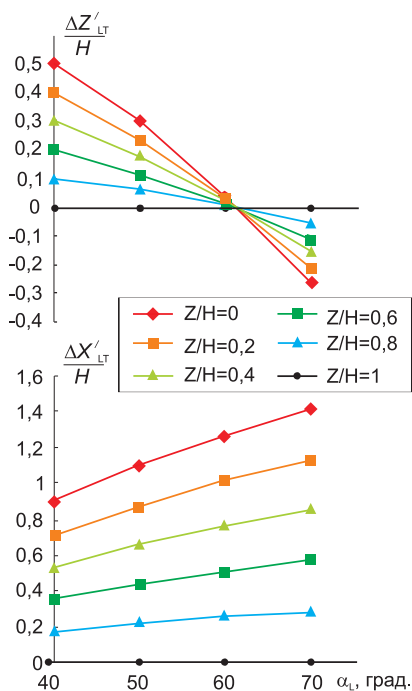


Рис. 7. Зависимости относительных изменений измеренных глубин залегания дефектов (а) и их координат ΔX (б) от угла ввода луча α_L . Трансформация продольных волн в сдвиговые волны на донной поверхности (рис. 5)

нате $\Delta X'_{\text{LT}}$ дефектов показаны на рис. 7. Видно, что измеренная на отраженном луче глубина залегания дефекта соответствует реальной при углах ввода продольной волны $\alpha_L \approx 60^\circ$. Наибольшая ошибка наблюдается для углов ввода $\alpha_L \approx 40^\circ$. Причем во всех случаях эта ошибка максимальна для дефектов, расположенных вблизи поверхности ввода луча. Отклонение измеренной координаты $X_{L(T)}$ дефекта от истинной увеличивается с увеличением угла ввода продольной волны, причем оно максимально также для поверхностных и подповерхностных дефектов.

Естественно, наряду с преобразованием продольной волны в сдвиговую на донной поверхности происходит трансформация сдвиговой волны (волны, которая излучается одновременно с продольной) в продольную волну (рис. 6).

Угол ввода продольных трансформированных волн после преобразования на донной поверхности:

$$\alpha'_L \approx \arcsin(C_T/C_L) \cdot \sin \alpha_T.$$

Трансформированные продольные волны, распространяясь в аустенитном сварном соединении и отражаясь от несплошностей, также несут информацию о качестве сварного соединения. С учетом того, что глубиномер по-прежнему настроен на контроль продольными волнами, выражения для изменений измеряемых значений глубины залегания Z'_{TL} и координаты дефекта $\Delta X'_{\text{TL}}$ записываются в этом случае следующим образом:

$$Z'_{\text{TL}}/H = (\sin^2 \alpha_L / \sin^2 \alpha_T - 1);$$

$$\Delta X'_{\text{TL}}/H = (\text{tg} \alpha_L \sin^2 \alpha_L / \sin^2 \alpha_T - \text{tg} \alpha_T).$$

На рис. 8 приведены графики зависимостей этих величин от угла ввода α_L . Видно, что максимальное изменение измеряемой глубины залегания дефекта наблюдается при углах ввода продольной волны $\alpha_L = 40^\circ$ ($\alpha_T = 20^\circ$). При угле ввода продольной волны $\alpha_L = 60^\circ$ ($\alpha_T = 28^\circ$) изменение измеряемой глубины залегания дефекта близко к нулю. Измеряемое относительное смещение дефекта находится в пределах $0,9 \div 1,4 H$.

При УЗК трансформированными волнами большое значение имеет также чувствительность, которая может быть достигнута. Отношения амплитуд эхо-сигналов от округлого дефекта при выявлении его отраженными от донной поверхности лучом продольной волны ($A\tilde{N}_{\text{LL}}$) и лучами трансформированных на донной поверхности волн ($A\tilde{N}_{\text{LT}}, A\tilde{N}_{\text{TL}}$) запишутся следующим образом:

$$A'_{\text{LT}}/A'_{\text{LL}} = (R'_{\text{LT}}/R'_{\text{LL}}) \exp \{-2(H-Z) [(\delta_T/\cos \alpha_T) - (\delta_L/\cos \alpha_L)]\};$$

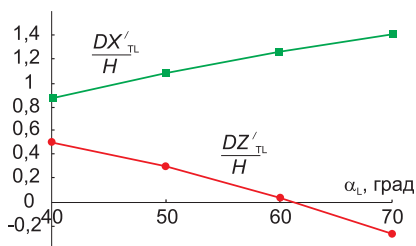


Рис. 8. Зависимости относительных изменений измеренных глубин залегания Z и смещений координаты X дефектов от угла ввода луча α_L . Трансформация сдвиговых волн (вторая волна) в продольные волны на донной поверхности

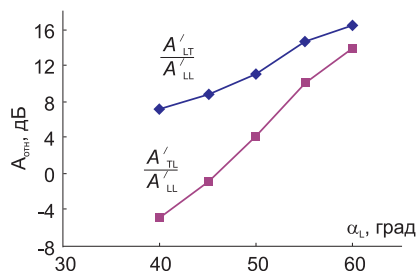


Рис. 9. Зависимости относительных значений амплитуд эхо-сигналов от дефекта, выявляемого трансформированными на донной поверхности волнами, от угла ввода продольной волны

$$A'_{TL}/A'_{LL} = (D_{LT} R'_{TL}/D_{LL} R'_{LL}) \exp \{-2H [(\delta_T/\cos\alpha_T) - (\delta_L/\cos\alpha_L)]\},$$

где D_{LL} , D_{LT} — коэффициенты прозрачности продольных и сдвиговых волн на поверхности ввода ультразвуковых колебаний; R'_{LT} , R'_{TL} — коэффициенты трансформации соответственно продольных волн в сдвиговые и сдвиговых волн в продольные на донной поверхности; δ_L , δ_T — коэффициенты затухания продольных и сдвиговых волн соответственно.

Графики зависимости относительных значений A'_{LT}/A'_{LL} и A'_{TL}/A'_{LL} от угла ввода α_L продольной волны без учета затухания приведены на рис. 9. Видно, что амплитуды эхо-сигналов от дефекта при контроле отраженным лучом трансформированными волнами значительно больше амплитуд эхо-сигналов при контроле продольными отраженными волнами (на 14–16 дБ при угле ввода продольных волн 60°).

При углах ввода 40–45° преимущество сохраняется только для сдвиговых волн, трансформированных из продольных (A'_{LT}). Для продольных волн, трансформированных из сдвиговых (A'_{TL}), наблюдается иная картина: амплитуда эхо-сигнала отраженной продольной волны (A'_{LL}) больше амплитуды эхо-сигнала продольной волны, трансформированной из сдвиговой (A'_{TL}).

Для проверки результатов расчетов по полученным выражениям были выполнены исследования на аустенитном сварном соединении из стали типа X18N10T толщиной ≈ 40 мм. В сварном соединении дисковой фрезой были выполнены надрезы глубиной 1, 3 и 5 мм. Длина надрезов 20–25 мм. Кроме надрезов были выполнены боковые сверления $\varnothing 3$ мм длиной 15 мм. Соединение было проконтролировано с помощью системы Авгур 4.2 компании «ЭХО +» продольными волнами пьезопреобразователем с углом

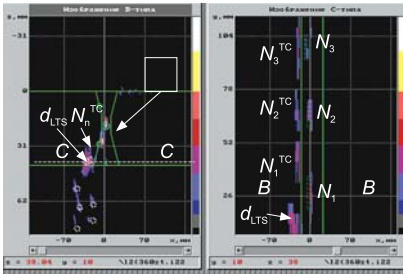


Рис. 10. Голографическое изображение моделей дефектов в образце аустенитного сварного соединения. Система Авгур 4.2. Пьезопреобразователь с углом ввода ультразвуковых колебаний $\alpha = 60^\circ$, рабочая частота $f = 2,5$ МГц, продольные волны

ввода 60° на частоте 2,5 МГц [4]. Результаты контроля представлены на рис. 10 в виде голографических изображений (В- и С-изображения). Положения секущих плоскостей показаны пунктирными линиями, направление распространения упругой волны — стрелкой. Белыми пунктирными окружностями показаны расчетные положения изображений отверстий, зафиксированных трансформированными волнами. На В-изображении видны изображения двух отверстий на глубинах $Z_2 \approx 20$ мм и $Z_3 \approx 30$ мм, выявленных прямым лучом продольной волны (зеленый цвет), а также изображения тех же отверстий на трансформированных волнах (белый цвет). Глубина залегания и положение относительно сварного соединения достаточно хорошо согласуются с расчетными данными. Заметим, что продольной волной, преобразованной из сдвиговой на донной поверхности, выявлены все три отверстия (смещение изображений $\Delta X_{\text{TL}} \approx 52$ мм). В то же время сдвиговой волной, преобразованной из продольной волны, выявлены только два отверстия (смещения $\Delta X_{\text{LT}}^* = 10\text{--}20$ мм).

Кроме изображений отверстий, выявленных на прямом и отраженном лучах продольными и трансформированными волнами, на рис. 9 показано также изображение отверстия ($Z = 30$ мм – d_{LTS}), выявленного по схеме самотандем. Надрезы глубиной 1, 3 и 5 мм выявляются не только продольными волнами на прямом луче (N_1 , N_2 , N_3), но и вторичными головными волнами, распространяющимися вдоль донной поверхности (N_1^{TC} , N_2^{TC} , N_3^{TC}). Изображения надрезов, получаемые на головных волнах, смещены в поперечном направлении относительно надрезов на величину ≈ 15 мм. Некоторое смещение вдоль оси сварного соединения изображения N_1^{TC} можно объяснить влиянием бокового отверстия ($Z = 30$ мм), расположенного вблизи этого надреза.

Выводы

1. Получены выражения для расчета сдвига измеряемых координат выявленных несплошностей относительно их реального положения

в зависимости от угла ввода продольных волн и типа трансформированных волн.

2. Оценены амплитуды эхо-сигналов от несплошностей при выявлении их волнами, трансформированными на донной поверхности.

3. Использование трансформированных волн при контроле аустенитных сварных соединений позволяет получить дополнительную информацию.

4. Наличие дополнительных индикаций от одних и тех же несплошностей может явиться причиной ошибок в определении их координат, а также в оценке качества соединения.

5. При контроле аустенитных сварных соединений волнами, трансформированными на донной поверхности, оптимальным углом ввода продольных волн является угол $\approx 60^\circ$: отсутствует сдвиг глубины залегания выявленных несплошностей, а амплитуда сигнала достигает максимального значения.

Результаты работы создают возможности для дальнейшего развития методологии УЗК аустенитных сварных соединений с целью повышения помехозащищенности контроля и достоверности оценки качества соединений.

Литература

1. Handbook on ultrasonic examination of austenitic welds. Doc. IIS-IIW-836-85.
2. Контроль сварных соединений из сталей аустенитного класса. ПНАЭ Г-7-032-91. — М.: ЦНИИАтоминформ, 1992.
3. Гребенников В. В., Гурвич А. К. Состояние и проблемы ультразвукового контроля аустенитных сварных швов. — Дефектоскопия. 1985. № 9. С. 3-12.
4. Grebennikov V., Badalyan V., Grebennikov D., Vopilkin A. Comparative Analysis of the Ways to Increase Signal to Noise Ratio at NDT Inspection of Austenitic Welds. — In: 15th World Conf. on Non-Destructive Testing. — Rome: 15-21 October 2000.