

УДК 620.179.14

**Канд. техн. наук В. Н. Учанин¹, В. Г. Тихий², И. И. Кириченко¹,
канд. техн. наук В. Г. Рыбачук¹**

¹ *Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, г. Львов*

² *ГП «КБ «ЮЖНОЕ», г. Днепропетровск*

ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Представлено два характерных примера применения вихретокового метода для обнаружения дефектов и оценки зоны разупрочнения сварных соединений алюминиевых конструкций. Предложенная технология вихретоковой дефектоскопии с применением низких рабочих частот позволяет выявлять как поверхностные, так и подповерхностные дефекты различного типа. Метод оценки зоны разупрочнения базируется на корреляции механических характеристик материала, таких как твердость с измеряемой вихретоковым методом удельной электрической проводимостью материала. Полученные результаты показывают эффективность вихретокового метода для неразрушающего контроля сварных конструкций.

Ключевые слова: *неразрушающий контроль, вихретоковый преобразователь, сварное соединение, дефект, помеха, алюминиевый сплав, зона разупрочнения.*

Введение

При неразрушающем контроле (НК) ответственных конструкций особое внимание следует уделять сварным соединениям. Это связано с возможным разупрочнением материала в зоне термического влияния и появлением дополнительных специфических дефектов сварки, которые могут существенно влиять на надежность конструкций [1–2]. Все дефекты сварного шва целесообразно разделить на два основных класса: 1) линейные дефекты (непровары и трещины) и 2) локальные дефекты (поры, неметаллические и металлические (вольфрамовые) включения, включения окисных плен) [3]. Линейные дефекты расположены преимущественно вдоль сварного шва и их длина намного больше глубины и раскрытия (ширины). В локальных дефектах все геометрические параметры близки.

Для неразрушающего контроля сварных швов чаще всего применяют рентгеновский и ультразвуковой методы [4], каждый из которых имеет свои ограничения и недостатки. Рентгеновский метод требует двухстороннего доступа к контролируемому объекту (что не всегда возможно, особенно для заключительных швов габаритных конструкций), является достаточно дорогим и оказывает вредное воздействие на окружающую среду. Недостатками рентгеновского метода являются также очень низкая чувствительность к дефектам типа «слипание» в сварных швах изделий из алюминиевых сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой (ЭЛС). Недостатками

ультразвукового метода являются низкая чувствительность к некоторым характерным для сварных швов дефектам («слипание», окисная пленка, вольфрамовые включения), существующие ограничения при контроле тонкостенных конструкций и необходимость использования контактных жидкостей.

Современная практика показывает большие перспективы вихретокового метода при НК сварных швов, особенно в случае тонкостенных конструкций толщиной до 3–4 мм [3–8]. Вихретоковый метод может быть перспективным и для современных методов сварки – лазерным лучом и трением. Эти методы сварки в комплексе с вихретоковым методом НК используются при производстве новых самолетов фирмы Airbus [9]. Ниже представлены возможности вихретокового метода для решения двух характерных задач НК сварных швов:

- 1) выявления дефектов в сварных швах, выполненных дуговой сваркой;
- 2) определения зоны разупрочнения материала в зоне термического влияния сварных швов.

Вихретоковая дефектоскопия сварных швов

Рассмотрим результаты, полученные при разработке вихретокового метода НК заключительных сварных швов топливных баков из алюминиевого сплава АМГ-6. Сложность задачи состояла в необходимости выявлять как приповерхностные дефекты, так и внутренние скрытые дефекты на глубине до 2–3 мм. Исследование воз-

возможности выявления внутренних дефектов сварных швов в условиях действия помех проводились при помощи универсальной компьютерной системы вихретокового контроля на базе платы типа EddyMax. На рис. 1 представлена схема сканирования вихретоковым преобразователем (ВТП) зоны сварного шва при ручном контроле. Согласно методике, необходимо установить ВТП на расстоянии 10–15 мм от границы 1 сварного шва в точке Б (2 на рис. 1). Поворотом ВТП сориентировать его для получения максимальной чувствительности по продольным относительно сварного шва дефектам (метка 3 на корпусе ВТП должна быть ориентирована в направлении сварного шва) и провести компенсацию небаланса сигнала ВТП. Зона сварного шва сканируется по зигзагообразной траектории симметрично относительно середины шва по пунктирной линии 4 с шагом $K_{СК} = 1,0–2,0$ мм (рис. 1). Ширина зоны сканирования $l_{СК} = 20–30$ мм.

Исследования показали, что при отсутствии помех, связанных с неоднородностью материала в зоне сварного шва, современные вихретоковые преобразователи позволяют выявлять дефекты типа трещина с протяженностью по глубине $a = 2$ мм при глубине их залегания до 6 мм. Однако помехи могут существенно (в 2 раза) ограничить глубину контроля. Исследования на образцах реального сварного шва показали, что амплитуда сигнала от дефекта с глубиной залегания $h_3 = 3$ мм ненамного превышает уровень помех, обусловленных неоднородностью геометрии сварного шва после удаления валика усиления.

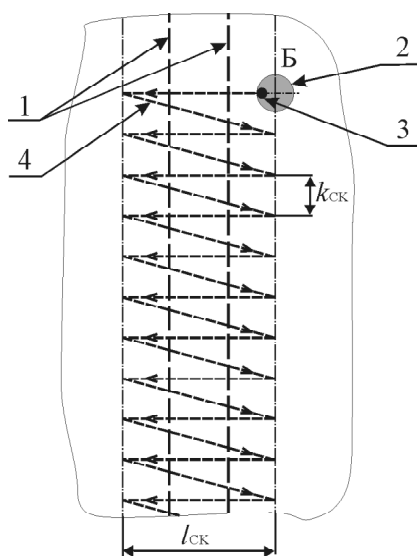


Рис. 1. Схема сканирования зоны сварного шва: 1 – границы сварного шва; 2 – положение ВТП при проведении компенсации небаланса; 3 – метка на корпусе ВТП; 4 – зигзагообразная схема сканирования; $K_{СК}$ – шаг сканирования; $l_{СК}$ – ширина зоны сканирования

На рис. 2 приведены сигналы от дефекта с $h_3 = 3$ мм (обозначено буквой Д), которые можно сопоставить с сигналами от помех (обведено пунктиром и обозначено буквой П). Кроме сигналов в комплексной плоскости, на рис. 2, б записаны вертикальная (сверху) и горизонтальная (снизу) составляющие сигнала с временной разверткой. При этом, разворотом комплексной плоскости сигнал от дефекта с глубиной $h_3 = 3$ мм ориентирован по вертикальной оси комплексной плоскости. При выбранном развороте комплексной плоскости эффективно применение различного усиления по вертикальной и горизонтальной оси. В нашем случае усиление K_Y по вертикальной оси на 6 дБ больше усиления K_X по горизонтальной оси. Видно, что вертикальная составляющая сигнала от дефекта приблизительно на 6 дБ превышает сигналы от помех, что особенно заметно по сигналу вертикальной составляющей сигнала с временной разверткой (рис. 2, б сверху). Такое соотношение сигнал/помеха считается достаточным для достоверного выявления дефекта.

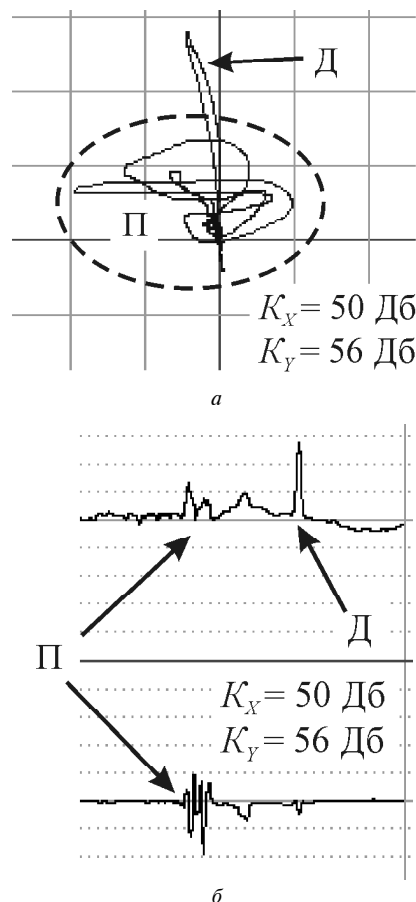


Рис. 2. Сигналы помех и дефекта с глубиной залегания $h_3 = 3,0$ мм: а – комплексная плоскость; б – сигнал с временной разверткой

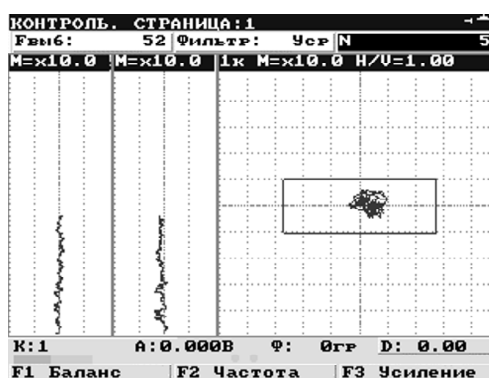
Приведенные результаты показывают возможность разделения полезных сигналов от дефекта с глубиной залегания $h_3 = 3,0$ мм от сигналов от помех на основе использования различия фазы этих сигналов, так как сигналы от помех «вытягиваются» в комплексной плоскости в горизонтальном направлении, характерном для поверхностных дефектов.

Предложенная методика может быть реализована на основе применения современных универсальных дефектоскопов с новыми селективными ВТП мультидифференциального типа [10]. Вихретоковые дефектоскопы нового поколения (в частности, прибор типа ВД 3-71) позволяют проводить контроль в широком диапазоне рабочих частот, наблюдать сигнал в комплексной плоскости или с временной разверткой, применять различные фильтры и регистрировать сигналы в памяти дефектоскопа с возможностью их последующей обработки в персональном компьютере [11].

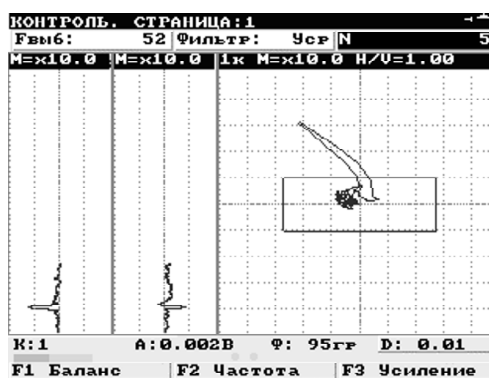
На основании проведенных исследований разработана временная методика, которая предусматривает применение дефектоскопа типа ВД 3-71 и проведение контроля последовательно в двух режимах при помощи двух различных ВТП. Основной режим предусматривает проведение контроля при помощи ВТП типа Леотест МДФ 0803 на двух рабочих частотах: на низкой частоте 1,2 кГц (канал 1 дефектоскопа) и на средней частоте 12 кГц (канал 2). При этом, на экране дефектоскопа наблюдаются сигналы нижней частоты (1,2 кГц) и одновременно при помощи автоматической сигнализации дефекта фиксируется превышение уровня сигнала на частоте 12 кГц. При необходимости оператор может провести повторное сканирование зоны контроля и провести наблюдения на частоте 12 кГц. Таким образом, основной режим обеспечивает выявление подповерхностных дефектов, залегающих на глубине до 2,5 мм, на рабочей частоте 1,2 кГц с одновременной регистрацией поверхностных и приповерхностных дефектов на глубине до 0,5–1,0 мм. Дополнительный режим предусматривает проведение контроля при помощи ВТП типа Леотест МДФ 0603 на рабочей частоте 18 кГц. При условии применения более высокой частоты этот ВТП имеет лучшую чувствительность и разрешающую способность при выявлении поверхностных и приповерхностных дефектов. При этом, лучше подавляются помехи, связанные с неоднородностью удельной электрической проводимости (УЭП) и геометрии сварного шва. Глубина контроля за счет выбора ВТП меньшего размера и более высокой рабочей частоты ограничивается поверхностным слоем глубиной до 0,5 мм. Дополнительный режим рекомендован для участков сварного шва с плохой обработкой

поверхности, когда возможность работы в основном режиме ограничена.

Наиболее сложной задачей было обеспечить возможность выявления скрытых дефектов сварных швов, залегающих на глубине более 1 мм. На рис. 3 представлено сигналы помех, полученные при сканировании бездефектной зоны сварного шва, и сигналы от дефекта типа непровар, залегающего на глубине 2 мм. Дефект типа непровар имитирован прорезью толщиной 0,5 с неконтролируемой стороны сварного шва. Для имитации сигналов от помех выбран наиболее неблагоприятный для проведения контроля образец с существенной деформацией кромок, за счет чего после удаления усиления в зоне наблюдается большая кривизна поверхности.



а



б

Рис. 3. Сигналы от бездефектного сварного шва (а) и подповерхностного дефекта типа непровар с глубиной залегания $h_3 = 2,0$ мм (б) на экране дефектоскопа ВД 3-71

Представленные результаты показывают возможность четкого выделения сигналов от скрытых дефектов сварных швов на глубине до 2 мм на фоне помех, обусловленных влиянием неоднородностей геометрии сварного шва.

Вихретоковый метод определения зоны разупрочнения сварных швов

При сварке изделий из алюминиевых термоупрочняемых сплавов образуются два участка:

переплавленный металл и зона термического влияния, в которой наблюдаются участки полной или частичной перекристаллизации [2]. При этом нарушаются условия оптимальной термической обработки, что приводит к изменениям структуры и ухудшению механических свойств. Известно, что ЭЛС позволяет сваривать алюминиевые сплавы без существенного разупрочнения [12]. Это возможно за счет высокой скорости процесса сваривания, когда кривая нагрева и охлаждения термического цикла не пересекается с кривыми распада твердого раствора [13]. Тем не менее, расширение зоны термического влияния и, соответственно, зоны разупрочнения возможно при нарушениях оптимального режима сварки, особенно при необходимости повторной подварки в местах выявленных дефектов.

Традиционным способом контроля зоны термического влияния является анализ распределения твердости материала в околошовной области. Более эффективен и практичен контроль размеров зоны термического влияния на основе измерения УЭП вихретоковым методом. Контроль основан на взаимосвязи изменений прочностных свойств алюминиевых сплавов и их УЭП. Подобный подход используется для определения зон разупрочнения авиационных конструкций при перегревах (например, после пожаров) [6].

Экспериментальные исследования сварных соединений из термоупрочняемого алюминиевого сплава 1201 выявили наличие взаимосвязи

между распределением твердости и УЭП в зоне сварного шва, характер которых представлен на рис. 4. Анализ зависимостей показывает полное соответствие точек, в которых происходит изменение УЭП и твердости. Поэтому размеры зоны разупрочнения можно контролировать путем измерения распределения УЭП с регистрацией границ участка, где наблюдаются ее изменения [6, 7]. Точное определение зоны термического влияния и соответственного разупрочнения материала при сварке (и подварке) позволило обосновать выбор ширины зоны утолщения конструкции в различных участках сварного шва и уменьшить общий вес конструкции без снижения ее надежности.

Для автоматизации контроля размеров зоны термического влияния и разупрочнения сварных соединений из термоупрочняемых алюминиевых сплавов был разработан специализированный вихретоковый структуроскоп «ЗОНА», принцип работы которого состоит в непрерывном измерении УЭП материала во время перемещения ВТП перпендикулярно стыку сварного соединения и отображении результатов на экране матричного индикатора. На сегодняшнее время задача может быть решена на основе применения универсального вихретокового дефектоскопа типа ВД 3-71 с абсолютным компенсированным вихретоковым преобразователем. Для этого необходимо использовать датчик пути, разработанный в процессе модернизации дефектоскопа [14].

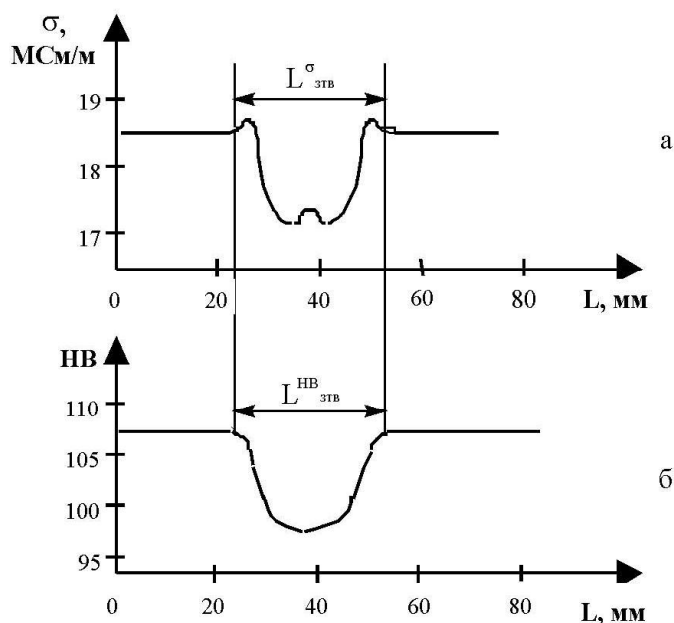


Рис. 4. Изменения УЭП (а) и твердости (б) сплава 1201 поперек сварного соединения, выполненного ЭЛС: $L_{зтв}^{\sigma}$ – зона термического влияния по изменению УЭП; $L_{зтв}^{НВ}$ – зона термического влияния по изменению твердости

Выводы

1. Вихретоковый метод может быть успешно применен для НК сварных швов, в частности, для оценки структурных изменений и выявления поверхностных и подповерхностных дефектов. Вихретоковый контроль сварных швов усложняется помехами, обусловленными неоднородностью удельной электрической проводимости и нарушениями геометрии. Для дефектоскопии сварных швов перспективны селективные ВТП мультимодифференциального типа. Для подавления специфических помех, обусловленных неоднородностью сварного шва, эффективно применение ВТП с малой базой размещения измерительных обмоток. Представленные методики контроля могут быть реализованы на основе применения универсального вихретокового дефектоскопа типа ВД 3-71.

Перечень ссылок

- Патон Б. Е. Специфика образования шва при электронно-лучевой сварке / Б. Е. Патон, Г. И. Лесков, Л. И. Живаго // Автоматическая сварка. — 1973. — № 3. — С. 1–5.
- Сазонов Ю. И. Проблемы технической диагностики электронно-лучевой сварки / Ю. И. Сазонов // Дефектоскопия. — 2006. — № 12. — С. 70–88.
- Дослідження вихрострумів перетворювачів для виявлення дефектів зварних швів тонкостінних елементів космічних конструкцій / [В. М. Учанин, В. Г. Тихий, І. І. Кириченко та ін.] // Електромагнітний, акустичний та оптичний неруйнівний контроль матеріалів та виробів / Серія : Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — Львів : Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 2006. — Вип. 11. — С. 123–126.
- Неразрушающий контроль: В 5 кн. / [Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потапов А. И.; ред. Сухорукова В. В.] — М. : Высш. шк., 1991. — Кн. 2 : Акустические методы контроля: практ. пособие. — 283 с.
- Применение вихретоковых приборов для выявления оксидных плен в сварных швах изделий из алюминиевых сплавов / [Тетерко А. Я., Учанин В. Н., Рыбаков Б. М., Емельянова Л. Н.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 1989. — № 2. — С. 66–68.
- Механіка руйнування та міцність матеріалів: довідн. посібн. Т. 9 : Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / [Осташ О. П., Федірко В. М., Учанин В. М. та ін.] ; під заг. ред. Панасюка В. В. — Львів : Сполом, 2007. — 1068 с.
- Рыбачук В. Г. Электромагнитный метод неразрушающего контроля зоны термического влияния сварных швов алюминиевых изделий / В. Г. Рыбачук // Физ.-хим. механика материалов. — 1991. — № 1. — С. 107–109.
- Визначення можливостей виявлення дефектів зварних швів космічних конструкцій в умовах дії завод / [Учанин В. М., Тихий В. Г., Хомченко М. В., Кириченко І. І.] / Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — Львів : ФМІ НАНУ, 2008. — Вип. 13 : Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів та конструкцій. — С. 20–26.
- Assler H. Design of Aircraft Structure under Special Consideration of NDT / H. Assler // 9-th Europ. Conf. for NDT, Berlin, 2006. — (интернет-журнал: www.ndt.net. — 2006. — Vol. 11. — № 11).
- Учанин В. Н. Вихретоковые мультимодифференциальные преобразователи и их применение / В. Н. Учанин // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 2006. — № 3. — С. 34–41.
- Универсальные вихретоковые дефектоскопы ОКО-01 и ВД 3-71 и их применение для выявления скрытых дефектов в неразъемных узлах авиационной техники / [В. Н. Учанин, Г. Г. Луценко, А. В. Джаганян и др.] // зб. доповідей 9-ї конф. «Неруйнівний контроль». — Київ, 2007. — С. 139–146.
- Бондарев А. А. Состояние техники и преимуществ процесса электронно-лучевой сварки конструкций из алюминиевых сплавов / А. А. Бондарев // Сварка алюминиевых сплавов криогенного и общего назначения. — К. : Наукова думка, 1984. — С. 10–19.
- Рабкин Д. М. Особенности электронно-лучевой сварки алюминиевых сплавов / Рабкин Д. М., Воропай Н. М., Бондарев А. А. // Автоматическая сварка. — 1971. — № 2. — С. 48–52.
- Учанин В. Н. Усовершенствование универсального вихретокового дефектоскопа ВД 3-71 / [В. Н. Учанин, А. В. Джаганян, А. В. Опанасенко и др.] // Матеріали 15-ї міжн. наук.-техн. конф. «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів — «ЛЕОТЕСТ-2010». — Львів : Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 2010. — С. 30–33.

Поступила в редакцию 30.06.2010

Учанін В.М., Тихий В.Г., Кириченко І.І., Рибачук В.Г. Застосування вихрострумове-го методу для неруйнівного контролю зварних з'єднань

Представлено два характерних приклади застосування вихрострумове-го методу для знаходження дефектів і оцінки зони знеміцнення зварних з'єднань алюмінієвих конструкцій. Запропонована технологія вихрострумове-го дефектоскопії із застосуванням низьких робочих частот дозволяє виявляти як поверхневі, так і підповерхневі дефекти різного типу. Метод оцінки зони знеміцнення базується на кореляції механічних характеристик матеріалу, таких як твердість з вимірюваною вихрострумівим методом питомою електричною провідністю матеріалу. Отримані результати показують ефективність вихрострумове-го методу для неруйнівного контролю зварних конструкцій.

Ключові слова: неруйнівний контроль, вихрострумівий перетворювач, зварне з'єднання, дефект, завада, алюмінієвий сплав, зона знеміцнення.

Uchanin V.M., Tihij V.G., Kyrychenko I.I., Rybachuk V.G. The application of eddy current method for non-destructive testing of welded joints

Two characteristic examples of eddy current method application for flaw detection and the weakened zone estimation in welding of aluminum alloy constructions are presented. Proposed eddy current flaw detection technology with low operational frequency application permit to uncover surface and subsurface different type flaws. The method of weakened zone estimation is based on the correlation of material mechanical properties such as hardness and measured by eddy current method electric conductivity distribution. The obtained results show the eddy current method efficiency for nondestructive evaluation of welded constructions.

Key words: non-destructive testing, eddy current probe, welded joint, flaw, noise, aluminum alloy, weakened zone.