



## ВИХРЕТОКОВЫЕ МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ЗОНЕ ЗАКЛЕПОК МНОГОСЛОЙНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. Н. УЧАНИН

*Рассмотрена проблема выявления дефектов в зоне заклепок многослойных авиационных конструкций вихретоковым методом и представлены различные подходы к ее решению. Предложена классификация различных способов контроля зоны заклепок и проведен сопоставительный анализ их достоинств и недостатков. Представлены новые вихретоковые преобразователи для контроля зоны заклепок в статическом и вращательном режиме и результаты их исследования.*

*The paper deals with the problem of defect detection in the zone of rivets of multiyear aircraft structures by eddy current method and presents various approaches to its solution. Classification of different methods of controlling the rivet zone is suggested, and comparative analysis of their advantages and disadvantages is performed. New eddy current transducers for control of the rivet zone in the static and rotary mode and results of their examination are presented.*

**Введение и постановка задачи.** Большинство элементов современных авиационных конструкций представляют собой многослойные неразъемные узлы с большим количеством крепежных деталей (заклепок, болтов, штифтов и т. д.), которые ослабляют конструкцию и являются зоной концентрации напряжений. Поэтому индивидуальная оценка технического состояния и контроль зоны крепежных отверстий являются очень важным звеном при проведении работ по продлению ресурса самолетов и реализации концепции допустимого повреждения [1–3]. Наиболее эффективным для контроля зоны отверстий является вихретоковый метод, на основе которого разработано большое количество технологий контроля. Важным преимуществом технологий вихретокового контроля является возможность выявления дефектов усталостного и коррозионного происхождения во внутренних слоях многослойных конструкций, в том числе без демонтажа крепежных элементов и без разборки конструкций [4–9]. Это позволяет эффективно использовать вихретоковый метод контроля зоны заклепок не только во время ремонта авиационной техники, когда имеется возможность для демонтажа крепежных элементов [10], но и непосредственно во время испытаний и эксплуатации [6–8, 11–12]. В этом случае используют низкие рабочие частоты и низкочастотные вихретоковые преобразователи (ВТП) для обеспечения большой глубины проникновения вихревых токов. Чувствительность к дефектам в случае их залегания во внутренних слоях многослойных конструкций резко уменьшается из-за скин-эффекта, влияние которого оценивается расчетной величиной, называемой стандартной глубиной проникновения вихревых токов  $\delta$  [13]. Эта величина рассчитывается в зависимости от параметров контролируемого материала (удельной электропроводности и магнитной проницаемости) и рабочей частоты из соотношений для плоской электромагнитной волны.

Понятно, что величина  $\delta$  является скорее характеристикой материала, чем параметром вихретокового контроля, так как известно, что плотность вихревых токов за пределами этой величины вполне достаточна для получения информации о состоянии этих слоев материала вихретоковым методом. Поэтому введено понятие реальной глубины проникновения вихревых токов, величина которой оценивается равной  $2,8\delta$  [13, 14]. Наши исследования показали, что реальная глубина залегания выявляемых дефектов может значительно превышать теоретически установленные пределы, которые определяются стандартной или реальной глубиной проникновения вихревых токов [15]. Поэтому нами была предложена концепция «ограниченной шумами глубины проникновения вихревых токов» [16], из которой логично следует концепция «ограниченной шумами глубины залегания выявляемых дефектов» [9]. В указанных работах показано, что единственным ограничителем для достижения нужной глубины контроля является уровень шумов, и предложены методики определения этого параметра для реальных условий контроля. Поэтому для эффективного выявления дефектов в зоне заклепок исключительно важно обеспечить низкий уровень шумов. Сложность проблемы заключается в том, что заклепка даже без дефекта является дополнительным источником сигналов помех. Это связано с тем, что она является своего рода допустимым дефектом, от влияния которого нужно отстроиться. Кроме того, параметры конструкции в зоне заклепки могут варьировать, что служит дополнительным источником помех. В частности, могут изменяться диаметр заклепки и отверстия, удельная электропроводность материала заклепки, расстояние между склепанными слоями конструкции, толщина защитного лакокрасочного покрытия и т. д. Более того, при некачественной технологии производства может иметь место овальность отверстия под заклепку и самой заклепки или нарушена форма ее

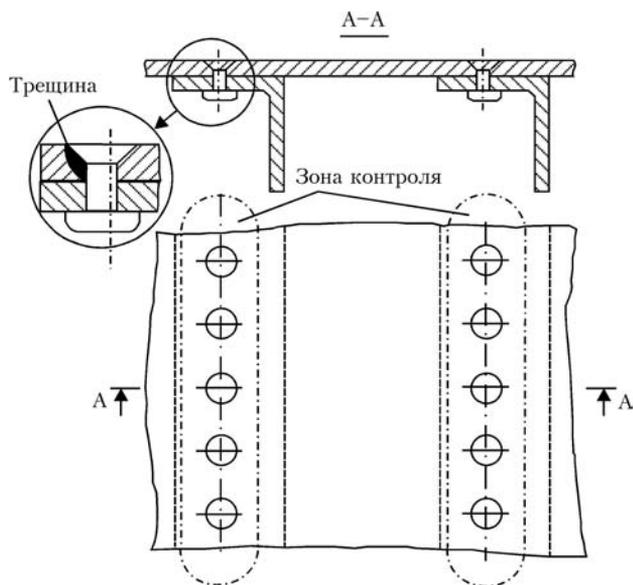


Рис. 1. Схема типичного простейшего авиационного узла типа «стрингер-обшивка» с заклепочным рядом

головки. Для устранения влияния этих факторов необходим комплекс специальных мер, среди которых наиболее важным является *выбор конструкции вихретокового преобразователя*.

Таким образом, проблема выявления дефектов многослойных узлов из алюминиевых сплавов в зоне заклепочных соединений без разборки и удаления заклепок является одной из наиболее критичных и сложных проблем НК в авиационной промышленности. Представленная проблема становится особенно актуальной для обеспечения надежной долгосрочной эксплуатации самолетов, время работы которых превысило первоначально заданный срок, а также для реализации концепции допустимого повреждения.

Типичный пример простейшей авиационной двухслойной конструкции, в которой стрингер соединяется с внешней обшивкой самолета регулярным рядом потайных заклепок, приведен на рис. 1. Штрих-пунктирной линией выделена зона контроля. На выноске показано расположение возможной трещины. Во многих случаях опасными признаются трещины, которые не выходят за головку заклепки. В общем случае количество соединенных слоев может быть большим, и дефекты

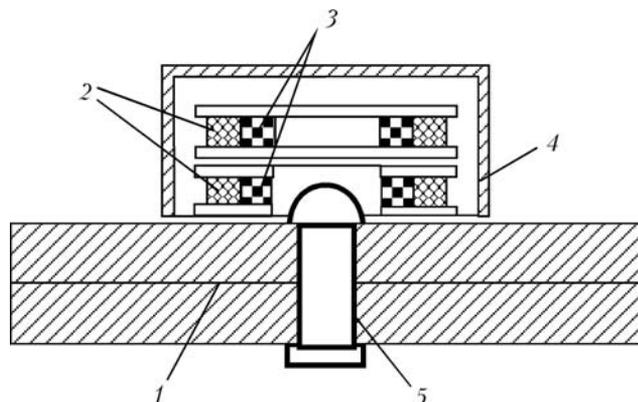


Рис. 2. Конструкция ВТП кольцевого типа

могут быть расположены во внутренних слоях. Потайными заклепками в большинстве случаев присоединяют элементы конструкции к внешней обшивке самолета. Внутренние соединения часто выполняют при помощи заклепок с головками разнообразной формы. В некоторых случаях используют болтовые соединения.

**Классификация способов вихретокового контроля зоны заклепок.** Все технологии вихретокового контроля заклепочных соединений по характеру сканирования контролируемой зоны можно условно разделить на три основные группы: 1) статический способ — проводится путем установки ВТП на заклепку или рядом с ней; 2) скользящий способ — проводится при постепенном перемещении ВТП вдоль ряда заклепок или около него; 3) вращательный способ — ВТП устанавливается на заклепку и вращается вокруг нее вручную или при помощи двигателя.

Эти способы используют для выявления дефектов как во внешней обшивке, так и во внутренних слоях многослойных конструкций. При этом технологии каждой группы имеют свои достоинства и недостатки, поэтому возможность и эффективность их применения определяется особенностями авиационной конструкции и требуемым уровнем чувствительности и глубины контроля.

В отдельную группу можно вынести способы вихретокового контроля с двумерной визуализацией распределения сигнала ВТП по поверхности в зоне заклепки. Эти технологии в большинстве случаев предусматривают построчное сканирование контролируемой поверхности и применяются преимущественно для обнаружения поверхностных дефектов.

**Статический способ.** Для реализации технологий этой группы используют ВТП кольцевого типа («Ring Probe» или «Encircling Probe» [12]). Конструкция ВТП кольцевого типа представлена на рис. 2. Кольцевой ВТП для контроля зоны заклепок состоит из двух, подключенных последовательно генераторных обмоток 3, и двух дифференциально включенных измерительных обмоток 2. Характерной особенностью кольцевого ВТП является наличие центрального отверстия в корпусе 4 ВТП, диаметр которого соответствует диаметру заклепки 5, соединяющей многослойную конструкцию 1. Соответственно для заклепок разного типа и размера изготавливают ВТП с разным диаметром отверстия. По своей физической сущности кольцевые ВТП относятся к ВТП абсолютно компенсированного типа, в которых для уменьшения небаланса генераторная и измерительная обмотки разделены на две идентичные части: основную и компенсационную. Компенсационная часть обмоток размещена непосредственно над основной. Основная и компенсационная части измерительной обмотки включены встречно.

Специальный кольцевой ВТП типа ARK 1/8 разработан нами в Центре «Леотест-Медиум» (г. Львов) для проведения контроля зоны заклепок гермошпангоута самолетов «Боинг-747», которые эксплуатируются украинскими гражданскими авиакомпаниями. Разработанный ВТП обеспечивает

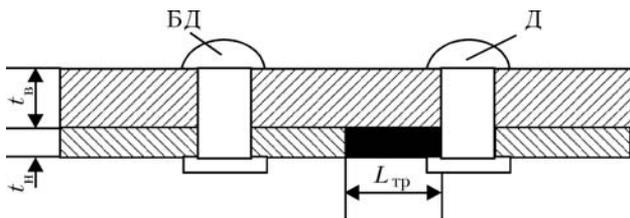


Рис. 3. Схематическое изображение контрольного образца для настройки дефектоскопа при выявлении трещин в зоне заклепок под обшивкой толщиной 1,8 мм ( $t_b = 1,8$  мм и  $t_n = 0,8$  мм;  $L_{тр} = 5$  мм)

выявление трещин длиной  $L_{тр}$  более 5 мм во втором слое двухслойной конструкции из алюминиевого сплава (толщины слоев: верхнего  $t_b = 1,8$  мм и нижнего  $t_n = 0,8$  мм) в зоне заклепок с диаметром головки 8 мм. Для настройки кольцевого ВТП используется стандартный образец из пластин соответствующей толщины (см. рис. 3). Стандартный образец имеет заклепку без дефекта (БД) и с дефектом (Д), что соответствует необходимой чувствительности контроля (5 мм). Искусственный дефект типа трещина был изготовлен электроэрозионным методом и имеет раскрытие 0,1 мм. Разработанный ВТП типа ARK 1/8 отличается от стандартных кольцевых датчиков значительно меньшей высотой (11,6 мм для ARK 1/8 против 25 мм для ВТП немецкой фирмы «Rohmann»). Это позволило проводить контроль в зонах с ограниченным доступом, которые имеют место в самолетах этого типа. ВТП типа ARK 1/8 был адаптирован для работы в составе дефектоскопов типа ELOTEST фирмы Rohmann с помощью четырехштырькового разъема фирмы «Fischer». Диапазон рабочих частот от 600 Гц до 10 кГц. Для установки на головку заклепки ВТП имеет внутреннее отверстие диаметром 8,3 мм. Необходимо отметить, что в дальнейшем был разработан кольцевой ВТП типа ARK 2/8 высотой 9,5 мм, чувствительность которого полностью соответствует чувствительности ВТП типа ARK 1/8. Это позволило еще больше расширить зону возможного контроля.

Методика контроля с помощью кольцевого ВТП предусматривает использование комплексной плоскости для разделения сигналов от дефектов и изменений зазора между ВТП и контролируемой поверхностью. Для нашего случая сигналы от зазора и дефекта во внутреннем слое на рабочей частоте 3 кГц отличаются по фазе приблизительно на  $90^\circ$ . Поэтому, при установке ВТП на бездефектную заклепку образца (см. рис. 3) регулируют поворот комплексной плоскости таким образом, чтобы ориентировать годографы сигналов при вариациях зазора в горизонтальном направлении. В этом случае при установке ВТП на заклепку с дефектом годограф сигнала имеет вертикальное направление. Преимуществом технологий этого типа является простота и относительно высокая производительность контроля. К недостаткам следует отнести возможное влияние большого количества мешающих факторов, которые во многих случаях невозможно учесть. На сигнал кольцевого ВТП влияют вариации диаметра отверстия

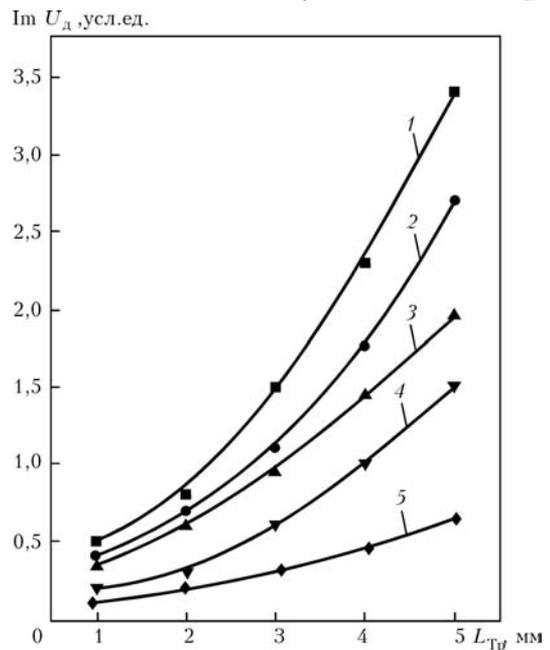


Рис. 4. Зависимость сигнала кольцевого датчика от длины трещины  $L_{тр}$  для разных толщин верхней обшивки  $t_b$ , мм: 1 — 0; 2 — 0,5; 3 — 1,0; 4 — 1,5; 5 — 2,0

или заклепки, изменения электропроводности материала заклепки, изменения толщины слоев или промежутка между слоями многослойного объекта контроля, изменения толщины защитного покрытия и т. п. Поэтому на практике по этой технологии решают задачи выявления достаточно длинных сквозных трещин. В частности, в приведенном примере порог чувствительности, на который настраивался дефектоскоп, составлял 5 мм по длине (трещина сквозная).

Проведенные исследования показали, что существует зависимость между амплитудой (в нашем случае Y-составляющей) сигнала и длиной трещины, которая, в принципе, может быть использована для количественной оценки параметров выявления трещин. На рис. 4 приведена зависимость между амплитудой сигнала  $U_d$  кольцевого ВТП типа ARK 1/8 в условных величинах (делениях шкалы индикатора) от длины трещины  $L_{тр}$  для различных толщин  $t_b$  верхней обшивки ( $t_b = 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$  мм).

Необходимо обратить внимание на то, что приведенная зависимость получена в лабораторных условиях, когда действие перечисленных выше мешающих факторов было полностью исключено. Только поэтому можно было получить надежные сигналы от трещин длиной 1 мм и более. На практике при проведении количественной оценки параметров выявленных трещин влияние перечисленных факторов также необходимо учитывать.

В случае же, когда направление распространения трещины от заклепки известно, можно использовать другой вариант статического способа, при котором используют ВТП меньших размеров и без центрального отверстия. Все процедуры методики контроля в этом случае подобны методике, описанной выше для кольцевого ВТП. Отличие состоит в том, что ВПГ устанавливают сбоку заклепки.

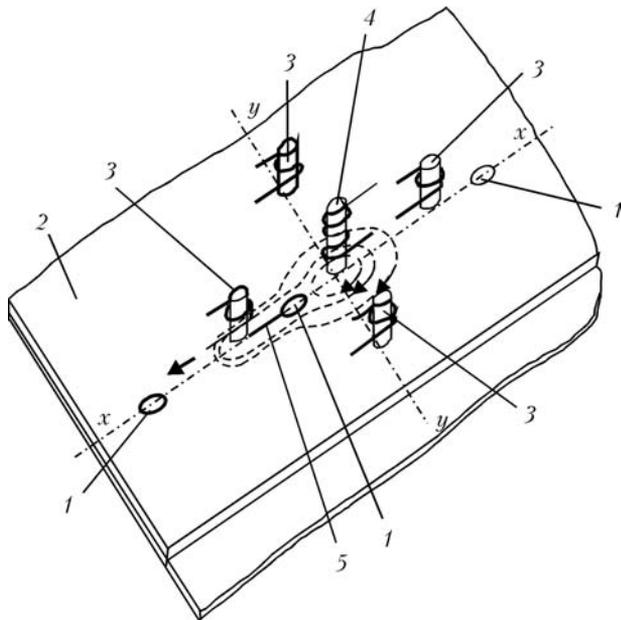


Рис. 5. Конструкция скользящего ВТП

лепки. Для такого варианта реализации статического способа используют абсолютно компенсированные ВТП, подобные представленным на рис. 2. Эти ВТП изготавливают без центрального отверстия, благодаря чему они, в отличие от кольцевого ВТП, могут быть изготовлены значительно меньшего диаметра, что улучшает их разрешающую способность. По такому варианту статического способа при помощи ВТП диаметром 7,6 мм контролируют, в частности, отдельные детали самолета БОИНГ-737.

**Скользящий способ.** При реализации технологий второй группы ВТП перемещают вдоль ряда заклепок. В большинстве случаев центр ВТП перемещается вдоль оси, соединяющей центры заклепок. В случае контроля ряда заклепок с головками на рабочей поверхности ВТП делают паз, ширина и глубина которого соответствует диаметру и высоте головки заклепок. В англоязычной литературе такие ВТП называют «Slide» или «Sliding probe» (при дословном переводе — «скользящий датчик»). Один из вариантов конструкции скользящего ВТП представлен на рис. 5 [17].

Представленный скользящий ВТП состоит из одной центральной обмотки возбуждения 4 и четырех измерительных обмоток 3, которые расположены симметрично и соединены последовательно. ВТП устанавливают на контролируемый многослойный узел 2 с рядом заклепок 1. Сканирование проходит по оси  $x-x$ , которая соединяет центры заклепок. Направление сканирования на рис. 5 показано стрелками. При наличии в заклепке дефекта типа трещина 5, происходит перераспределение контуров вихревых токов (показано на рис. 5 штриховой линией), которые отличаются от контуров вихревых токов в случае бездефектной заклепки.

Годографы сигналов при проведении контроля заклепок с помощью скользящего ВТП наблюдаются в комплексной плоскости (рис. 6), для чего могут быть использованы универсальные вихрево-токовые дефектоскопы. На рис. 6, а представлены характерные годографы сигнала скользящего ВТП от бездефектной заклепки [17]. После проведения компенсации небаланса ВТП направление годографа от бездефектной заклепки поворотом комплексной плоскости располагают в горизонтальном направлении. Контурной линией на рис. 6, а выделена зона, в которой могут проходить годографы сигналов от бездефектной заклепки при случайном смещении ВТП от центральной оси сканирования. Отклонение годографа сигнала от бездефектной заклепки в вертикальном направлении не превышает величины  $y_0$ . На рис. 6, б показан типичный годограф сигнала от заклепки с продольной трещиной 5 (рис. 5), который имеет форму характерной петли. Из представленных годографов очевидно, что оператор достаточно легко может отличить годографы от дефектной заклепки от сигналов бездефектной заклепки. Можно также выделить сектор комплексной плоскости для настройки автоматической сигнализации дефектоскопа. В нашем случае это будет выделенный штриховыми линиями правый верхний сектор, который соответствует критерию  $y \leq y_0$  и  $x \leq -x_0$ .

Для контроля заклепок скользящим способом предложены также ВТП, в которых генераторные и измерительные обмотки установлены на отдельных сердечниках и разнесены на относительно большое расстояние [18, 19]. В англоязычной ли-

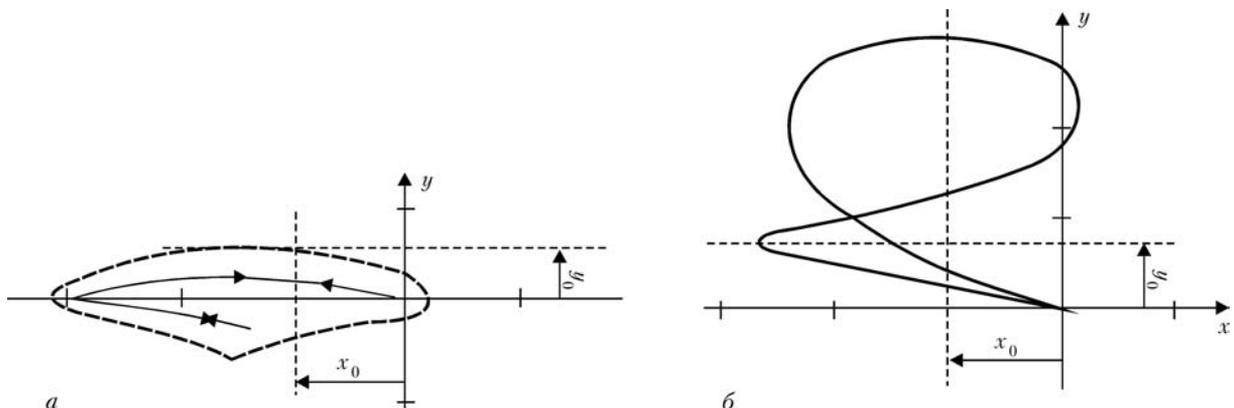


Рис. 6. Типовые годографы сигналов от скользящего ВТП при сканировании бездефектной заклепки (а) и заклепки с продольной трещиной (б)

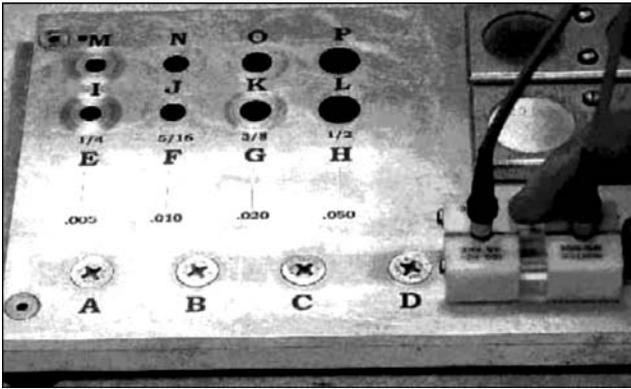


Рис. 7. Скользящий ВТП со сменной вставкой между обмотками

температуре такие ВТП называют «sliding driver/receiver probe». В некоторых конструкциях таких ВТП расстояние между генераторной и измерительной обмотками может регулироваться для изменения глубины проникновения вихревых токов в зависимости от глубины залегания трещин, которые необходимо выявлять. Внешний вид такого варианта ВТП с диэлектрическими вставками, регулируемыми расстояние между обмотками, приведен на рис. 7. ВТП установлен на стандартный образец с заклепками (A, B, C, D), около которых электроэрозионным методом вырезаны тонкие дефекты типа трещины разной длины (одна заклепка установлена в бездефектной зоне). Недостатком таких ВТП есть, на наш взгляд, большой сигнал небаланса ВТП при установке на бездефектный материал. Это может приводить к помехам, связанным, в частности, с изменениями зазора между ВТП и контролируемой поверхностью, неоднородностью удельной электропроводности и т. п.

Основным преимуществом скользящего способа контроля есть его высокая производительность, которая даже превышает производительность статического способа с применением кольцевого ВТП. Однако имеется ряд ограничений, среди которых недостаточная чувствительность, особенно к трещинам, расположенным перпендикулярно направлению сканирования. Другим ограничением является требование регулярности расположения заклепок, т. е. они должны быть расположены на одинаковом расстоянии. Поэтому этот способ эффективен в случаях, когда направление возможной трещины заранее известно и совпадает с направлением регулярного ряда заклепок, а требования к чувствительности невысокие.

Скользящий способ контроля зоны заклепок может быть успешно реализован при помощи мультидифференциальных ВТП. Особенностью этих ВТП, определяющей их преимущество при контроле зоны заклепок, есть очень высокая степень компенсации небаланса и, соответственно, подавление помех. Для типовых заклепок, используемых в авиации, могут быть использованы ВТП типа Леотест МДФ 1501 и МДФ 1701 [20, 21].

К скользящему способу можно отнести технологии контроля, которые предусматривают сканирование не через центры ряда заклепок, а на определенном расстоянии от них [4, 7, 19]. Автором этой статьи разработана эффективная методика

вихретокового контроля с целью выявления трещин, ориентированных под углом  $90^\circ$  к направлению заклепочного ряда. Методика предусматривает использование мультидифференциальных ВТП типа Леотест МДФ 1201 и МДФ 0901, которые удачно объединяют необходимую глубину контроля и высокую разрешающую способность с малыми размерами (12,5 и 9,0 мм соответственно). На основе предложенной методики хорошо выявляются усталостные трещины, расположенные поперек ряда заклепок и выходящие за головку заклепки на 2...3 мм. Методика обеспечивает достаточно высокую производительность контроля и возможность контроля анизотропных материалов. Однако, чувствительность при этом ограничена из-за помех в виде сигналов от заклепочных отверстий. Избавиться от помех можно на основе амплитудного разделения сигналов, при котором о наличии трещины свидетельствует превышение заданного порога сигнала, который выбирается больше уровня сигнала от отверстий без дефекта. Возможна также амплитудно-фазовая отстройка от влияния отверстий [4, 7].

**Вращательный способ.** Наилучшую чувствительность при контроле зоны заклепок имеют методики, построенные на вращении ВТП вокруг заклепки. Предыдущие технологии на основе кольцевого и вращательного способов позволяют выявлять преимущественно трещины, выходящие за пределы головки заклепки. Размер таких трещин может быть уже больше критического. На основе мультидифференциальных низкочастотных ВТП стало возможным разработать методику выявления трещин, которые не выходят за головку заклепки. Методика использует особенность конструкции ВТП, при которой обеспечивается высокий уровень компенсации небаланса при установке его соосно с заклепкой. Этот небаланс благодаря круговой симметрии сохраняется и при вращении ВТП вокруг заклепки. В частности, для контроля реальных авиационных конструкций из алюминиевого сплава Д16Т с потайными заклепками (диаметр головки 8 мм, диаметр отверстия 4 мм) нами совместно с АНТК «Туполев» разработана методика контроля на основе использования ВТП типа Леотест МДФ 1201, позволяющая выявлять трещины длиной более 1мм [22]. Важно, что для реализации этой методики могут использоваться относительно простые вихретоковые дефектоскопы со стрелочной или светодиодной индикацией изменений сигналов ВТП. Схема расположения ВТП относительно заклепки потайного типа и схема вращения сканирования при выявлении трещин под головкой заклепки представлена на рис. 8.

В соответствии с методикой ВТП 2 устанавливаются соосно с заклепкой при помощи специальной оправки из диэлектрика 3, проводят компенсацию небаланса и наблюдают за изменениями контролируемого сигнала при вращении ВТП (рис. 8). В случае вращения ВТП над бездефектной заклепкой баланс не нарушается. При наличии дефекта 1 баланс нарушается. Для реализации методики достаточно обеспечить вращение в обе стороны на угол от  $45^\circ$  до  $90^\circ$ . В случаях,

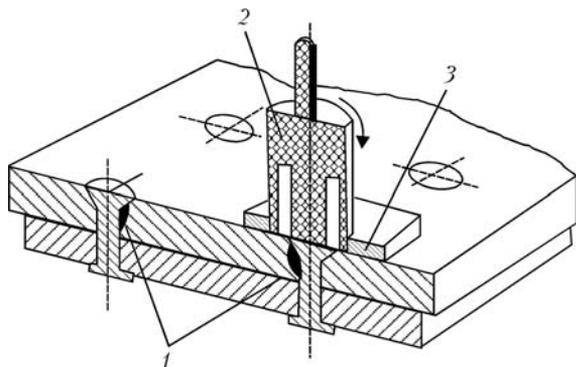


Рис. 8. Схема установки ВТП и сканирования при выявлении трещин под головкой заклепки потайного типа

когда направление возможного распространения трещины известно, методика может быть усовершенствована. В частности, настройка может проводиться непосредственно на контролируемом изделии с заклепкой. При этом выбирают ориентацию ВТП таким образом, чтобы не чувствовать трещину. Угол вращения ВТП в таком случае может быть ограничен  $45^\circ$ . При контроле анизотропных по удельной электропроводности материалов применение этой методики усложняется. В этом случае необходимо проводить наблюдение сигналов на экране дефектоскопов универсального типа в комплексной плоскости, поворот которой выбирают таким образом, чтобы уменьшить влияние анизотропии на одну из компонент сигнала. Важно также обеспечить тщательное центрирование заклепки и ВТП, что может уменьшать производительность контроля [22].

Для выявления дефектов под выступающими над контролируемой поверхностью заклепками с округлыми и цилиндрическими головками (диаметр головки 10 мм, диаметр отверстия 6 мм) в

Львовском центре «Леотест-Медиум» был разработан специализированный ВТП типа Леотест МДФ 2201/10R. Этот ВТП имеет центральное отверстие соответствующего диаметра для установки его на заклепку. Диаметр ВТП — 22 мм, что обеспечивает возможность его установки на типовых расстояниях между заклепками. Отметим, что в этом случае нет необходимости применять диэлектрическую накладку для центрирования ВТП при вращении, так как ВТП центрируется самой заклепкой.

Специализированный ВТП типа Леотест МДФ 2201/10R исследовали на рабочей частоте 2 кГц с регистрацией сигнала в комплексной плоскости с помощью универсальной компьютерной вихревой системы на основе платы типа EddyMax фирмы «Test Maschinen Technik GmbH». Эксперимент проводился на образце из алюминиевого сплава Д16 с отверстием диаметром 6 мм, от которого электроэрозионным способом прорезаны искусственные дефекты типа трещины раскрытием 0,1 мм, длиной от 1 до 6 мм (через 1,0 мм). Образец с дефектом накрывался пластиной с отверстием диаметром 6 мм без дефекта и соединялся заклепкой. На рис. 9, а, б приведены годографы сигналов ВТП, полученные при вращении ВТП над образцом с трещиной длиной 1 мм (рис. 9, а) и 2 мм (рис. 9, б). На рис. 9, в и 9, г приведены сигналы от помех, которые получены путем вращения ВТП вокруг бездефектного образца (рис. 9, в) и поднятием ВТП над образцом на высоту приблизительно 3...4 мм (рис. 9, г). После установки ВТП на образец проводили компенсацию небаланса и поворот комплексной плоскости таким образом, чтобы сигнал от дефекта был вертикально направлен снизу доверху. Чувствительность при регистрации сигналов от трещины длиной 1 мм

и сигналов помех была одинаковой. Для трещины длиной 2 мм чувствительность была уменьшена на 12 дБ. Анализ годографов показывает, что длина трещины очень сильно влияет на амплитуду сигнала. В частности, сигнал от трещины длиной 2 мм больше, чем в три раза сигнала от трещины длиной 1 мм. При этом сигнал от трещины длиной 1 мм больше, чем на 6 дБ превышает уровень сигнала от основных помех, что подтверждает высокую селективность контроля с помощью представленного ВТП.

Сравнительные исследования показали, что представленный ВТП имеет лучшую чувствительность и селективность при выявлении дефектов во втором от поверхности слое, чем стандартные ВТП, предназначенные для решения той же задачи. Стандартные ВТП используют систему разнесенных генераторных и измерительных обмоток, которые расположены по разные стороны заклепки («sliding driver/receiver probe»). Как уже отмечалось выше, такой ВТП не является компенсированным, что определяет высокий уровень сигналов от по-

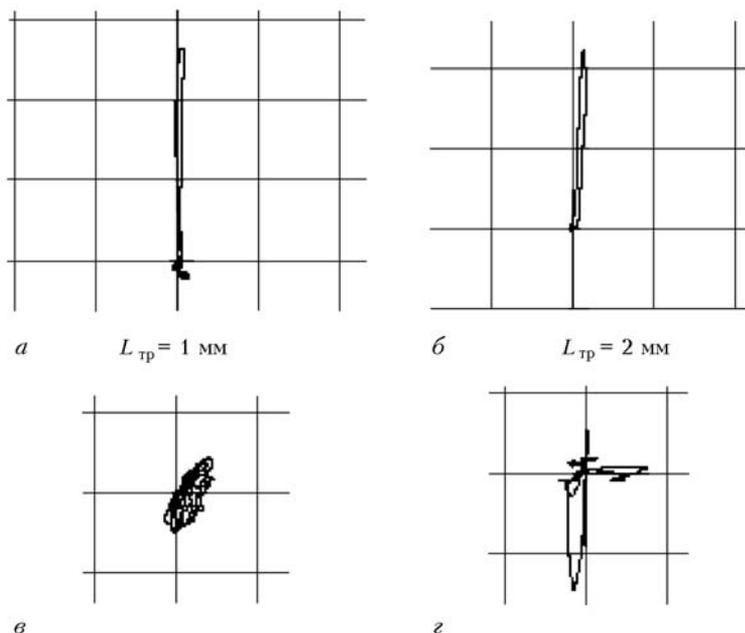


Рис. 9. Сигналы вращательного ВТП от дефектов типа трещина длиной 1 мм (а) и 2 мм (б) под головкой заклепки и обшивкой толщиной 2 мм, а также сигналы от помех при вращении над бездефектной заклепкой (в) и при изменении зазора (г)



мех. Это объясняет основное преимущество ВТП типа Леотест МДФ 2201/10R, которое состоит в высокой степени компенсации сигнала небаланса.

Дальнейшее улучшение селективности и чувствительности вращательного способа при контроле зоны заклепок может быть достигнуто на основе использования динамического метода обработки сигнала ВТП. Для реализации динамического метода в данном случае необходимо обеспечить высокую частоту вращения установленного над заклепкой ВТП. Для реализации такой технологии разработаны специализированные роторные сканеры, которые обеспечивают вращение ВТП вокруг заклепки [23,24]. Конструкция одного из вариантов ВТП и принцип вращательного метода выявления дефектов под заклепкой, реализованного в приборе Eddiscan [23], представлены на рис. 10.

На рис. 10 приведена типовая двухслойная конструкция из двух обшивок 3, соединенных при помощи заклепки 1. С целью обнаружения мелких трещин под головкой заклепки над ней с помощью двигателя вращается сканирующий преобразователь в виде П-образного ферритового сердечника 5 с обмоткой параметрического ВТП 4, размещенной на одном плече сердечника 5. Сканирующий преобразователь размещается таким образом, чтобы одно из плеч сердечника размещалось по центру заклепки. Таким образом, при вращении вокруг оси заклепки обеспечивается радиальное направление (относительно заклепки) первичного поля. При вращении над бездефектной заклепкой импеданс параметрического ВТП не изменяется, так как система «ВТП–объект контроля» симметрична относительно оси заклепки. Баланс нарушается в случае наличия дефектов в одном из слоев конструкции. ВТП возбуждается прямоугольными импульсами частотой 1 кГц. Подобная система контроля после определенной модернизации реализована в специализированном вихретоковом дефектоскопе для обнаружения трещин в зоне заклепок Nortec 30 Eddyscan. Но здесь, в отличие от приведенной выше, используется возбуждение прямоугольными импульсами с помощью неподвижной индуктивной обмотки, соосной с заклепкой, а на конце вращающегося по периферии вокруг заклепки П-образного сердечника установлен вместо индуктивной обмотки датчик Холла.

Дефектоскоп комплектуется разными роторными сканерами для контроля заклепок различного диаметра (от 5,7 до 12,1 мм). В документации на дефектоскоп декларируется возможность выявления трещин на глубине 6,35 мм (для немагнитных заклепок) и 12,7 мм (для ферромагнитных). Для такой технологии очень важно обеспечить точное центрирование роторного сканера относительно заклепки. Поэтому в приборе существует возможность центрирования роторного сканера при установке его на заклепки с помощью специального шаблона на экране. Производительность контроля согласно документации – 5 с на заклепку. Дефектоскоп Nortec 30 Eddyscan использовался в АНТК «АНТОНОВ». По результатам анализа конструкции ВТП и из опыта работы с прибором можно наряду с позитивными качест-

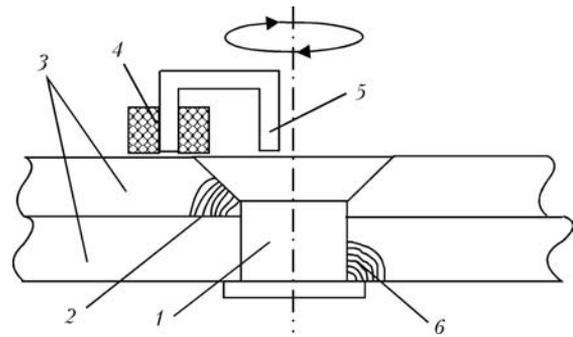


Рис. 10. Схема реализации вращательного метода выявления дефектов под головкой заклепки [24]: 1 – заклепка; 2 – дефект в верхнем слое; 3 – обшивки авиационной конструкции; 4 – индуктивная обмотка; 5 – ферритовый П-образный сердечник; 6 – дефект в нижнем слое

вами прибора указать на ряд недостатков, среди которых, кроме высокой стоимости дефектоскопа, влияние мешающих факторов: изменение промежутка между слоями многослойной конструкции, овальность заклепки и т.д. Кроме того, большой размер роторного сканера не позволяет проводить контроль во многих труднодоступных местах авиационных конструкций. Подобные системы контроля разрабатывают и другие известные фирмы. В частности, американская фирма «Foerster Instrument Incorporated» ([www.foerstergroup.com](http://www.foerstergroup.com)) предлагает вихретоковую специализированную систему RIVET CHECK 2839 на основе использования портативного компьютера. В системе используются роторный сканер с двигателем, с помощью которого ВТП вращается вокруг заклепки. Обеспечивается наглядное центрирование роторного сканера над заклепкой по изображению на дисплее, который показывает, в каком направлении необходимо для этого переместить сканер. После проведения центрирования вихретоковая система автоматически запоминает данные, полученные при полном вращении ВТП. Программно обеспечивается оптимальный режим для обнаружения дефектов в определенном слое (первом, втором или третьем) конструкции из трех обшивок толщиной 1 мм каждый. Независимая экспертиза этого прибора (проведена NASA) показала, что система обеспечивает обнаружение трещин длиной 0,81 мм в первом слое с вероятностью обнаружения 0,9. Собственные исследования фирмы показали, что доработанный вариант системы обнаруживает трещины длиной 0,51 мм (в первом слое), 1,0 мм (во втором слое) и 2,5 мм (в третьем слое).

Следует отметить, что для контроля заклепок делаются попытки разработать более экзотичные конструкции, среди которых системы, использующие электромагнитное поле, которое вращается вокруг оси заклепки за счет различия фазы тока возбуждения пространственно разнесенных обмоток возбуждения или многоэлементные ВТП [25–27]. Но такие системы пока широко не используются.

Для анализа сигналов ВТП при контроле заклепок разрабатываются алгоритмы для автоматической идентификации обнаружения дефектов. В качестве примера приведем работу [28], в которой

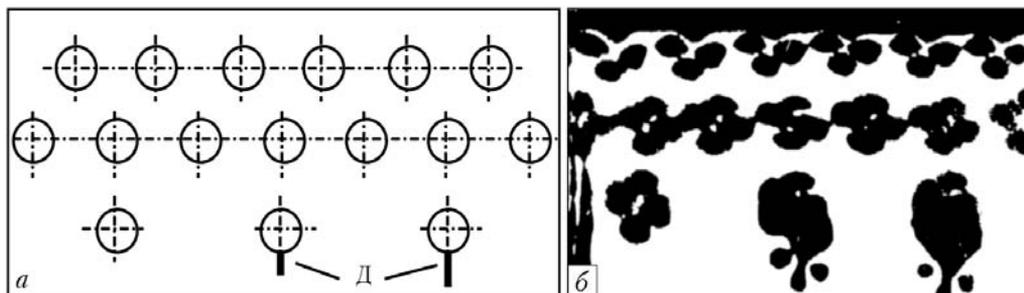


Рис. 11. Двухмерная визуализация фрагмента авиационной конструкции с дефектами в зоне заклепок: *a* — схема расположения заклепок и дефектов *D* на образце; *b* — полутоновая дефектограмма

рассмотрена возможность применения различных алгоритмов для предварительной обработки сигналов ВТП (медианная фильтрация, поворот сигнала в комплексной плоскости и нормализация), а также проанализированы четыре типа алгоритмов выделения информативных признаков (на основе простой технологии расчета вектора средних сигналов на интервале, расчета Фурье, использования вейвлет-преобразований и метода главных компонент). Для классификации сигналов применяли двухслойную искусственную нейронную сеть [29]. В итоге авторы определяют, что для поставленной задачи могут применяться все из проанализированных методов выделения информационных признаков. Разница состоит только в количестве коэффициентов, необходимых для достижения достаточной точности классификации дефектов по сигналам ВТП [28].

Широкие возможности для интерпретации результатов контроля зоны заклепок дают методы двухмерной визуализации [30, 31]. На рис. 11 приведены чертежи фрагмента неразъемного узла вертолета с заклепками (рис. 11, *a*) и двухмерная полутоновая дефектограмма его контроля (рис. 11, *b*). Фрагмент имеет три ряда заклепок (по шесть, семь и три заклепки в ряду — сверху вниз на рис. 11, *a*). В зоне двух заклепок третьего (нижнего на рис. 11, *a*) ряда во внешней обшивке есть усталостные трещины *D* эксплуатационного происхождения. На дефектограмме изображение от бездефектных заклепок представляет собой «розетку», количество лепестков которой обусловлено четырьмя отдельными зонами чувствительности при применении четырехэлементного дифференциального ВТП. Изображение от заклепки с дефектом существенно отличается от изображения бездефектной заклепки, которое при расшифровке диаграмм можно принять за «эталон».

Еще большие перспективы для выявления дефектов в зоне заклепок дают новые алгоритмы, реализующие принципы вихретоковой вычислительной томографии [32]. Подходы вихретоковой визуализации дают возможность послышной визуализации результатов контроля на заданной глубине. Созданные на сегодняшний день томографические системы вихретокового контроля не обеспечивают высокой производительности контроля и на практике широко не используются. Но уже полученные результаты показывают, что с повышением быстродействия средств вычислительной техники и разработкой «быстрых» алгорит-

мов, методы томографии будут создавать широкую перспективу при решении сложных задач вихретокового контроля, к которым относится и контроль зоны заклепок [32].

Для полноты картины представим методы выявления дефектов в зоне заклепок на основе визуализации с применением магнитооптического метода (в англоязычной литературе применяется аббревиатура MOI — Magneto-Optic Imaging) для регистрации распределения электромагнитных полей [33–35]. Объединение в магнитооптическом методе оптического и вихретокового метода позволяет проводить наблюдения в режиме реального времени изображений несплошностей в контролируемом материале. В основу этой технологии положен магнитооптический эффект Фарадея, состоящий во вращении плоскости поляризации линейно поляризованного света под действием магнитного поля, параллельного направлению прохождения света через прозрачный материал. Сегодня магнитооптическая техника используется в качестве чувствительных элементов специальные материалы, обеспечивающие очень высокое удельное вращение Фарадея. Это делает возможным практическое применение этого эффекта для прямого наблюдения аномалий электромагнитного поля, связанного с искажениями вихревых токов при наличии дефектов в электропроводной среде. Реализация магнитооптического метода возможна в двух режимах — проникающего и отраженного излучения. В нашем случае применяют режим отраженного излучения, что позволяет удвоить угол поворота плоскости поляризации за счет двухразового прохождения света через чувствительный элемент. Одним из требований при применении магнитооптических систем есть формирование в контролируемом объекте однородных токов. Для этого электромагнитное поле возбуждается в тонкой проводящей пленке, которая накладывается на контролируемый материал. Магнитооптическое изображение формируется в случае, когда несплошности изменяют распределение вихревых токов в материале, за счет чего появляются аномалии перпендикулярной (относительно контролируемой поверхности) составляющей электромагнитного поля.

На рис. 12 схематически представлено устройство формирования магнитооптического изображения в зоне заклепки, которое состоит из источника света *5* с поляризатором *4*, обмоток для формирования первичного электромагнитного поля *3*, чувствительного элемента в виде пластины из спе-

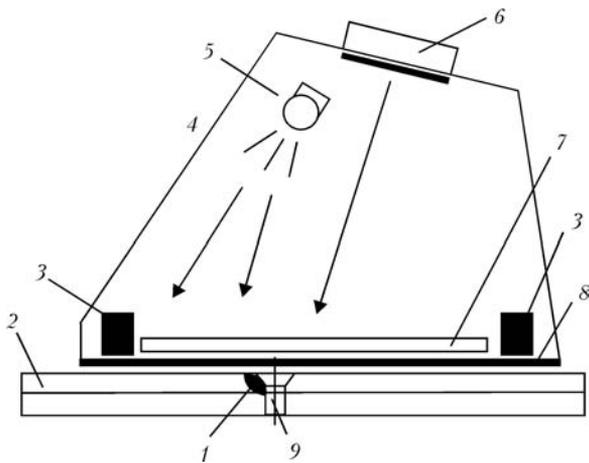


Рис. 12. Схема формирования магнитооптического изображения

циального материала 7, электропроводной пленки 8 и анализатора поляризованного света 6. Устройство накладывается на двухслойную конструкцию 2 с заклепкой 9, в зоне которой возможен дефект 1. Магнитооптические системы относительно нечувствительны к эффекту зазора, поэтому удаление краски или другого диэлектрического покрытия необязательно. Однако для улучшения изображения важно обеспечить плотное прилегание к контролируемой поверхности.

Приборы для магнитооптического контроля предлагаются американской фирмой PRI Research & Development Corporation. Прибор обеспечивает контроль на рабочих частотах от 1,5 до 200 кГц. В состав прибора входит головка сканирования, которая накладывается на контролируемую поверхность. Бездефектные заклепки создают изображения круговой формы. Все изображения, на которых нарушена округлая форма, означают трещину или коррозионное повреждение. На магнитооптической дефектограмме, приведенной на рис. 13, можно увидеть образы двух заклепок без дефектов и двух заклепок с трещинами. Изображения были получены на высоких рабочих частотах 50... 100 кГц. Изображения могут наблюдаться оператором на персональном устройстве наблюдения PVS (Personal Viewing System) или передаваться на дополнительный внешний монитор.

Вихретоковые магнитооптические системы МОИ уже нашли применение в практике, в частности в американских авиационных концернах Boeing и Lockheed Martin. В Варшавском институте авиационных войск (ITWL – Instytut Techniczny Wojsk Lotniczy) системы МОИ используются для продления ресурса истребителя Ми-14, бомбардировщика Су-22 и транспортного самолета Як-40. При этом отмечается уменьшение времени контроля больших поверхностей, возможность контроля через слой краски без необходимости ее удаления, возможность наблюдения изображения дефекта в реальном времени, простота интерпретации изображений. Но кроме многих позитивных качеств метод имеет и недостатки, в частности, при контроле выпуклых и вогнутых поверхностей. В этом случае из-за отдаления головки сканирования от поверх-

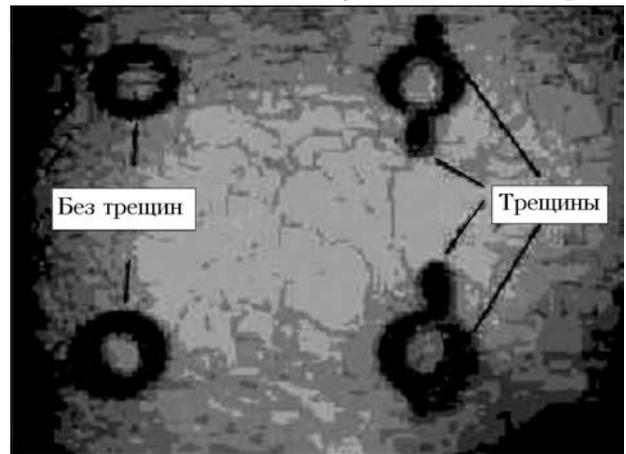


Рис. 13. Магнитооптические изображения заклепок без трещин (слева) и заклепок с трещинами (справа)

ности значительно уменьшается чувствительность, а также искажается часть изображения [35]. Кроме того, при выявлении трещин во внутренних слоях или под головкой заклепки магнитооптические системы не достигают уровней чувствительности, представленных выше вращательных систем вихретокового контроля.

### Выводы

Рассмотрена проблема выявления дефектов в зоне заклепок многослойных авиационных конструкций вихретоковым методом и представлены различные подходы к ее решению.

Предложено классифицировать различные способы контроля зоны заклепок по способу сканирования контролируемой зоны вихретоковым преобразователем на статический, скользящий и вращательный способы.

Представлены вихретоковые способы контроля зоны заклепок с двумерной визуализацией результатов контроля и показаны их ограничения, в частности, при контроле поверхностей со сложной геометрией.

Проведен сопоставительный анализ достоинств и недостатков различных способов контроля зоны заклепок. Показано, что наибольшую чувствительность, глубину и селективность контроля имеют вращательные способы, в которых используется симметрия контролируемой зоны. Наибольшую производительность контроля имеют статический и скользящий способы. При реализации статического и скользящего способов имеет место большое влияние мешающих параметров, которые могут существенно ограничивать возможность контроля в сложных условиях.

Представлены новые ВТП для контроля зоны заклепок в статическом и вращательном режиме и результаты их исследования. Предложенные кольцевые ВТП для статического контроля имеют значительно меньшую (по сравнению со стандартными) высоту, что расширяет возможности контроля в труднодоступных местах. Разработанные ВТП мультидифференциального типа для контроля во вращательном режиме превосходят известные по чувствительности, селективности и глубине контроля.



1. Schmidt H.-J., Schmidt-Brandecker B., Tober G. Design of modern aircraft structure and the role of NDI // *Insight*. — 2000. — 42, № 3. — P. 141–147.
2. Jamet J. Non-destructive testing of aeronautical structures // *Ibid.* — 1996. — 38, 12. — P. 844–845.
3. Ball D. L. The Role of Nondestructive Testing in Aircraft Damage Tolerance // *Materials Evaluation*. — 2003. — № 7. — P. 814–818.
4. Учанин В. Н. Вихретоковый метод обнаружения скрытых дефектов усталостного и коррозионного происхождения. — Киев: О-во «Знання» УССР, 1988. — 20 с.
5. Тетерко А. Я., Учанин В. Н., Дорофеев А. Л. Контроль дефектов под обшивкой // Новые физические методы неразрушающего контроля качества продукции. — М.: МДНТП. — 1977. — С. 30–35.
6. Выявление дефектов в неразъемных конструкциях // Авиационные материалы. Дефектоскопия металлов / В. Н. Учанин, А. Л. Дорофеев, Ю. Г. Казаманов и др. — М.: ВИАМ, 1979. — Вып. 6. — С. 59–64.
7. Учанин В. Н., Цирг В. Н. Опыт применения низкочастотных вихретоковых дефектоскопов для выявления скрытых дефектов усталостного и коррозионного происхождения // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1989. — № 4. — С. 71–75.
8. Учанин В. Н., Цирг В. Н. Обнаружение скрытых коррозионных повреждений авиационных конструкций вихретоковым методом // Физ.-хим. механика материалов. — 1990. — № 4. — С. 103–104.
9. Учанин В. Н. Развитие вихретоковых методов обнаружения подповерхностных дефектов // Праці 3-ї Наук.-техн. конф. «Приладобудування 2004: стан і перспективи». — Київ: ПБФ НТТУ «КПІ», 2004. — С. 190–191.
10. Беда П. И., Санунов В. М. Опыт вихретокового контроля крепежных отверстий в конструкциях авиационной техники // Дефектоскопия. — 2000. — № 4. — С. 3–9.
11. *Nondestructive Testing Handbook*. Vol. 4: Electromagnetic Testing (Eddy current, flux leakage and Microwave Nondestructive Testing). Second edition. Edited by R. C. McMaster and P. McIntire. USA: American Society for NDT, 1986. — 677 p.
12. Mahi Uddin Khan. Monitoring of aircraft structure and engine components through eddy current testing during maintenance // Proc. of the joint EC-IAEA meeting «NDT methods for monitoring degradation». Petten (Netherlands). — 1999. — P. 196–205.
13. Hagmaier D. J. Eddy Current Standard Depth of Penetration // *Materials Evaluation*. — 1985. — № 10. — P. 1438–1441.
14. Mottl Z. The quantitative relations between true and standard depth of penetration for air-cored probe coils in eddy current testing // *NDT & International*. — 1990. — 23. — № 1. — P. 11–18.
15. Uchanin V. The investigation of low frequency eddy current probes with super high penetration (THP04). Abstracts of 16-th world conference on non-destructive Testing, Montreal, august 30–september 3, 2004. — P. 145.
16. Mook G., Bauke H., Uchanin V. Wirbelstromprüfung mit hohen Eindringtiefen — Theorie und Praxis. Abstracts of the DACH (DGZfP, ЦГfZP, SGZP) Jahrestagung Innsbruck, Mai 29–31, 2000 (см. также сайт: www.ndt.net. Интернет видання NDTnet. — Aug. 2000. — 5, №8).
17. Пат. № 2541772 (Франція). G 01 N 27/90. Procédé et dispositif pour l'examen non destructif de jonctions rivetées ou analogues au moyen d'une sonde à courants de Foucault / J.-L. Arnaud, M. Floret (Франція). — № 8303043, заявл. 24.02.1984. Опубл. 31.08.84. — 22 с.
18. Hagmaier D. J. Nondestructive testing developments in the aircraft industry // *Materials evaluation*. — 1991. — № 12. — P. 1470–1478.
19. Hagmaier D. J. Application of crack detection to aircraft structures // *Fatigue crack measurement: techniques and applications* / Editors K. J. Marsh, R. A. Smith, R. O. Ritchie. — Warley (UK): EMAS, 1991. — P. 419–455.
20. Uchanin V., Mook G., Stepinski T. The investigation of deep penetrating high resolution EC probes for subsurface flaw detection and sizing, 8-th Europ. Conf. for NDT, Barcelona. 2002 (див. також сайт: www.ndt.net. Интернет видання NDTnet. — February 2003. 8, № 2).
21. Uchanin V. New type multidifferential eddy current probes for surface and subsurface flaw detection // *Zeszyty problemowe Badania nieniszczace*. Warszawa. — 2001. — № 6. — С. 201–204 (см. также сайт: www.usndt.com.ua).
22. Учанин В. Н., Цирг В. Н. Выявление усталостных трещин под головкой заклепок вихретоковым методом // Тез. докл. X Всесоюз. науч.-техн. конф. «Неразрушающие физические методы и средства контроля» (г. Львов). — Кн. 2. — 1984. — С. 35.
23. Harrison D. The detection of cracks under installed fasteners by means of a scanning eddy current method. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. — Vol. 6A. — La Jolla: Edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press. — 1987. — P. 1013–1017.
24. Пат. № 4496904 США, МКИ G 01N 27/72. Eddy current measurement apparatus for non-destructive testing in the vicinity of fastener / David J. Harrison (Англия). — № 336341; заявл. 19.05.81; опубл. 29.01.85; НКИ 324/227. — 9 с.
25. Пат. № 4379261 США, МКИ G 01N 27/90. Rotating magnetic field device for detecting cracks in metal / Kenneth M. Lakin (США). — № 185968, заявл. 10.09.80; опубл. 05.04.83; НКИ 324/240. — 8 с.
26. *CS-Pulsed Eddy Current Inspection for Cracks in Multi-Layered Joint Al-Alloy Aircraft Structures* // W. Bischoff, H.-A. Crostack, M. Maass, Th. Meier, G. Tober. *Internet Journal — NDTnet*. — 1998. — 3, № 9.
27. *Eddy Current Sensor Network for Aircraft Fatigue Monitoring* / N. Goldfine, V. Zilberstein, A. Washabaugh et al // *Materials evaluation*. — 2003. — № 4. — P. 852–859.
28. Lingvall F., Stepinski T. Automatic detection and classifying defects during eddy current inspection of riveted lap-joints // *NDT & International*. — 2000. — 33. — P. 47–55.
29. Учанин В. М., Карпаш М. О. Застосування нейронних мереж для ідентифікації та оцінки параметрів дефектів вихреструмним методом // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — Вип. 7. — 2002. — С. 124–129.
30. Тетерко А. Я., Учанин В. М. Вихреструмна дефектоскопія зварних швів із застосуванням двовимірної візуалізації // Там же. — Київ-Львів. — 1999. — С. 68–69.
31. Мок Г., Учанин В. Візуалізація результатів неразрушаючого контролю вихретоковим методом // Там же. — Київ-Львів. — Вип. 5. — 2000. — С. 9–16.
32. *Subsurface imaging by deep penetrating eddy current tomography* / A. A. Vertiy, S. P. Gavrillov, V. N. Stepanyuk, V. N. Uchanin // Там же. — Вип. 9: Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів. Зб. наук. праць. — Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 2004. — С. 123–127.
33. Simms S. MOI: Magneto-Optic/Eddy current Imaging // *Materials evaluation*. — 1993. — № 5. — P. 529–534.
34. *Magneto-Optic/Eddy Current Imaging of Aging Aircraft: A New NDI Technique* // G. L. Fitzpatrick, D. K. Thome, R. L. Skaugset, W. C. L. Shih, E. Y. C. Shih, *Materials Evaluation*. — 1993. — 51, № 12. — P. 1402–1407.
35. Klimaszewski S., Ziela M., Dragan K. Badanie wielowarstwowych polaczen nitowzch statkow powietrznych za pomoca systemu MOI. *Zeszyty problemowe Badania nieniszczace*. — Warszawa, 2003. — № 8. — S. 133–136.