



КОНТРОЛЬ ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ КОНСТРУКЦІЙ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

А. М. ОВСЯНКІН, В. Я. ДЕРЕЧА, В. В. ЛУБЯНИЙ

Розглянуто питання оцінки втомних пошкоджень конструкцій з вуглепластиків неруйнівними методами контролю. Експериментальна оцінка проведена на зразках з однонаправленого вуглепластика з концентратором напружень після різних рівнів циклічного навантаження чистим вигином. Представлені результати контролю пошкодженості візуально-оптичним, акустичним і вихрострумовим методами. Визначено межі застосування методів.

Evaluation of fatigue damage in structures of coal-plastic by NDT methods is considered. Experimental evaluation has been performed on samples of unidirectional coal-plastic with a stress raiser after different levels of cyclic loading by pure bending out. The paper gives the results of controlling the damage level by visual-optical, acoustic and eddy current methods. Limits of the method applicability have been determined.

Аналіз особливостей втомного руйнування ПКМ і методів його оцінки. Полімерні композиційні матеріали (ПКМ) широко застосовуються в сучасному авіабудуванні. Найбільш розповсюдженими в авіаційних конструкціях з ПКМ є карбоволокніти, бороволокніти й органоволокніти. Останнім часом ПКМ використовується не тільки для виготовлення елементів обшивки, але і для виготовлення силового набору конструкцій, що значно підвищує показники їх вагової ефективності. Так, з карбоволокнітів (вуглепластиків) виготовляються ряд балансувальних агрегатів (рулі висоти, рулі повороту та ін.), а в деяких випадках вертикальне і горизонтальне оперення літака повністю виготовляється з карбоволокнітів.

Карбоволокніти — це композиції, що складаються з полімерного сполучення (матриці з епоксидних, фенолформальдегідних або поліамідних смол) і підсилювачів (наповнювачів) у вигляді вуглецевих волокон. В конструкціях використовують різні марки карбоволокнітів КМУ-1, КМУ-1У, КМУ-2, КМУ-2Л, КМУ-3, КМУ-3Л та ін., що відрізняються видом матриці, а також видом наповнювача і типом його укладки [1].

Перевага застосування сучасних композиційних матеріалів полягає в тому, що конструкції з них можуть бути спроектовані цілеспрямовано для забезпечення відповідності широкому діапазону вимог. Але при цьому необхідно враховувати, що їхні фізичні характеристики змінюються також широко внаслідок множини змінних факторів — волокна і типу матриці, орієнтації волокон, товщини шару і послідовності укладення шарів, які пов'язані з виробництвом. Для встановлення достовірності відповідних характеристик розрахунковим значенням композиційні матеріали потребують виконання поширених випробувань. Важливою є проблема забезпечення надійності матеріалів в конструкціях в

процесі експлуатації. Конструкції з композитів повинні бути надійними і працездатними як при багатократних повторюваннях циклів навантаження, так і при ударних діях. Встановлено, що навіть при незначних рівнях навантаження у виробках з композиційних матеріалів виникають мікротріщини, які під дією вологості, температури та інших факторів суттєво знижують їхні фізико-механічні властивості і несучу здатність елементів конструкції. Актуальним є своєчасне виявлення втомних пошкоджень таких елементів.

Для відстеження втомних пошкоджень і встановлення ресурсних характеристик більшість авіакосмічних фірм-виготовлювачів проводять випробування композиційних матеріалів на панелях-зразках або на натурних конструктивних елементах [2]. Вважають, що найкращим варіантом підтвердження відповідності матеріалів і конструкцій вимогам міцності є випробування на повномасштабних натурних агрегатах при моделюванні експлуатаційних навантажень. Втомні випробування викликають напружений стан, що виникає внаслідок дії спектра навантажень, який моделює термін служби конструкції.

При реалізації натурних випробувань навантаження прикладаються за допомогою гідравлічних силозбуджувачів (гідроциліндрів) сервогідравлічної важільної системи. Важільна система може містити до десяти і більше важелів, що складають основу випробувального стенда. Реакції конструкції на навантаження від гідроциліндрів на таких стендах записуються через мережу вимірювальних тензодатчиків (наприклад, провід зі змінним при деформуванні електричним опором).

Критичні зони з точки зору втомної міцності додатково контролюються з підвищеною частотою візуальними і неруйнівними методами контролю [2]. Проблема використання неруйнівних методів при таких випробуваннях стає важливою у зв'язку із застосуванням результатів випробу-



вань в експлуатації. При наявності результатів сумісних тензометричних і неруйнівних випробувань неруйнівний контроль (НК) може бути в достатній мірі інформативним при оцінюванні технічного стану і залишкової міцності конструкцій при їх технічному обслуговуванні. Актуальним є вибір оптимальних методів і засобів НК. Для цього необхідно враховувати агрегатний стан матеріалу, його структуру, здатність взаємодіяти з проникним випромінюванням та фізичними полями, розміри, конфігурацію і конструктивні особливості об'єкту. ПКМ — досить складний об'єкт контролю через неоднорідність структури (яка може бути односпрямована, подовжньо-поперечна, комбінована), має специфічні фізичні властивості (електричні, теплові, звукоізоляційні), малі значення щільності тощо. Оцінка ефективності існуючих методів НК показала, що найбільш інформативним для ПКМ можуть бути акустичні, радіохвильові, теплові, оптичні, радіаційні та вихрострумкові методи. Враховуючи особливості карбоволокнітів (електропровідність вугільних волокон) і умови контролю в експлуатації для вуглепластиків, найбільш ефективно можуть використовуватися акустичні і вихрострумкові методи [3].

З акустичних методів для контролю конструкцій з ПКМ частіше використовують імпедансний метод і метод вільних коливань [3]. Імпедансний метод ґрунтується на визначенні пошкоджень (дефектів) по зміні акустичного імпедансу контрольованого виробу.

Контроль методом вільних коливань заснований на ударному збудженні в контрольованому виробі вільно затухаючих пружних коливань і реєстрації зміни їх спектрів в зонах дефектів. Метод ефективно використовується для контролю розшарування конструкцій невеликої товщини.

Вихрострумний контроль використовують для виявлення дефектів в електропровідних матеріалах. Щільність вихрових струмів в матеріалі об'єкта залежить від електричних властивостей і геометричних параметрів об'єкта. У вуглепластиках це пов'язане зі щільністю волокон та їх з'єднанням, а також ступенем з'єднання шарів з волокон. Найбільшою перевагою вихрострумних методів є можливість контролю невеликих по площині ділянок деталей, розташованих у важкодоступних місцях конструкцій.

Вимогам більшої інформативності відповідає комплексний контроль, проте актуальним залишається вибір одного найбільш оптимального методу і засобу контролю для забезпечення контролепридатності конкретного матеріалу і конструкцій в експлуатації.

В роботі розглядається спосіб оцінки засобів контролю на зразках з ПКМ з різними рівнями втомних пошкоджень, який дозволяє обрати найбільш придатний засіб неруйнівного контролю

(НК) для застосування його на випробувальному стенді і далі в експлуатації для оцінки технічного стану об'єкту в процесі напрацювання.

Експериментальні дослідження втомних пошкоджень на зразках з ПКМ. Для оцінювання втомних пошкоджень використовували зразки з односпрямованого шаруватого вуглепластика КМУ-11Э-0,08 на основі вуглецевої стрічки ЭЛУР-0,08ПА і зв'язуючого ЭДТ-69Н, характеристики яких відповідають реальним конструкціям. Зразки виготовлені у вигляді плоских прямокутних пластин завтовшки 2,2 мм і розміром 200×20 мм з орієнтацією шарів волокон вздовж зразка.

Для локалізації втомних пошкоджень на ребрі зразків було виконано надрізи (концентратори напружень) у вигляді півкола радіусом 1 (одна серія зразків) і 1,5 мм (друга серія зразків) для вибору оптимальної швидкості появи пошкоджень. Перед навантаженням зразки перевіряли на відсутність дефектів за допомогою приладів акустичного і вихрострумного контролю. Отримання втомних пошкоджень дослідних зразків шляхом чистого вигину проводили на втомній випробувальній машині МПИ-8 при навантаженнях перпендикулярно напрямку волокон зразків. Рівень навантаження зразків визначено з урахуванням міцності матеріалу зразка і можливостей випробувальної машини.

Для максимального прогинання $f = 0,8$ мм на базі довжиною $L = 50$ мм, що забезпечує машину МПИ-8, рівень напружень зразка завтовшки 2,2 мм досягає $\sigma = 366$ МПа, що відповідає $0,33\sigma_b$ матеріалу КМУ-11Э-0,08.

Навантаження зразків з концентраторами $r = 1$ і 1,5 мм з даним напруженням проведено з попередньою візуально-оптичною оцінкою пошкоджень і вимірюванням довжини тріщин за допомогою мікроскопа МБС-2. Зона розповсюдження тріщини також сканувалася за допомогою вихрострумного дефектоскопа ТВД. Навантаження здійснювалося в діапазоні від 0 до 10^6 циклів. Для детального аналізу зображення зон пошкоджень використовували їхнє збільшення за допомогою цифрового фото. Одержано, що в процесі навантаження відбувається зародження втомної тріщини в зоні концентратора напруг (для зразка з $r = 1$ мм при кількості циклів $N = 3000$, для зразка з $r = 1,5$ мм при $N = 2000$) і її подальше розповсюдження вздовж зразка (рис. 1), розшарування в зоні концентратора (рис. 2), а також порушення цілісності матриці (рис. 3).

Швидкість зростання тріщини для зразків з більшим концентратором напружень збільшується (рис. 4).

Чисельні значення інформаційного сигналу вихрострумного дефектоскопу майже не змінювалися на початковому етапі навантаження (до 10^5 циклів). Суттєвих змін сигналів не відбувалося і при зростанні навантаження до 10^6 циклів.

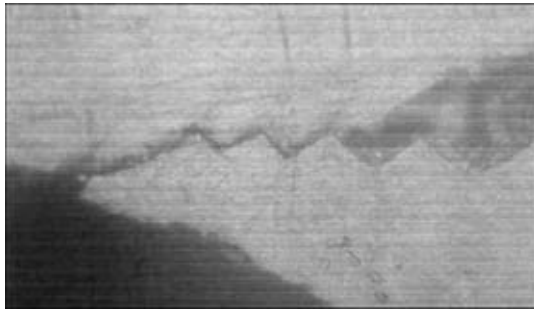


Рис. 1. Загальний вигляд втомної тріщини зразка з концентратором

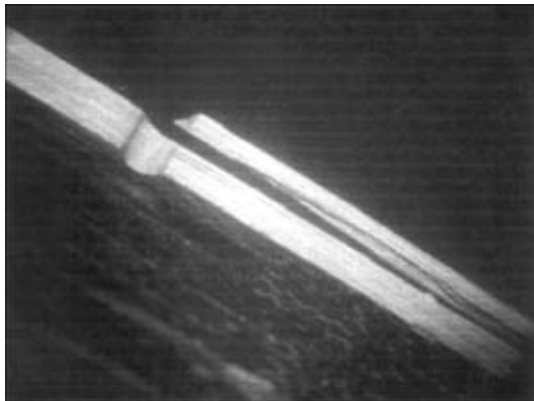


Рис. 2. Загальний вигляд крайового розшарування зразка в зоні концентратора

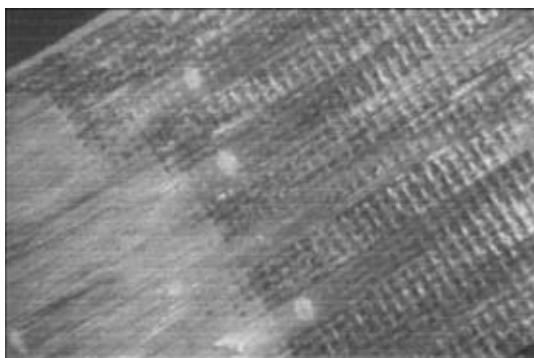


Рис. 3. Загальний вигляд розтріскування матриці зразка

Залежно від концентратора напружень порізнному розвивалися інші порушення: крайове розшарування починалося при $N = 2 \cdot 10^5$ і при $N = 10^5$ відповідно для $r = 1$ і $1,5$ мм, початок порушення матриці відслідковувалось при $N = 4 \cdot 10^5$ і при $N = 2 \cdot 10^5$ для таких же концентраторів.

Далі для отримання набору зразків з метою їхнього дослідження приладами НК були прийняті зразки з концентраторами напружень $r = 1,5$ мм з подальшим навантаженням від 10^5 до 10^6 циклів.

Для оцінки пошкоджень зразків застосовували імпульсний дефектоскопи ИД-91М, АД-60С (з розподільно-сумісними і сумісними перетворювачами) і вихрострумові дефектоскопи ВД-3.01 та ВДЦ в амплітудному варіанті як такі, що найбільш використовуються при визначенні технічного ста-

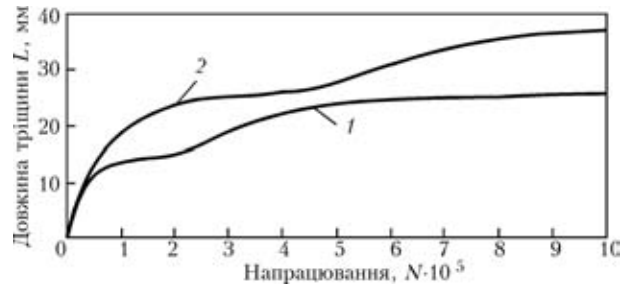


Рис. 4. Залежність довжини втомної тріщини від напруження для зразків з концентратором $r = 1$ (1) і $1,5$ мм (2)

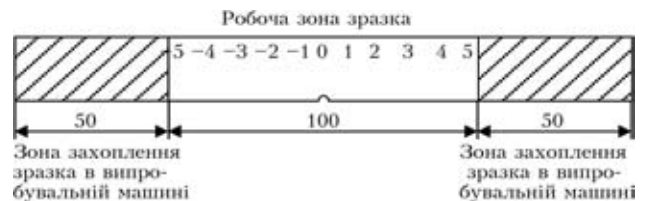


Рис. 5. Точки контролю при скануванні робочої зони зразка

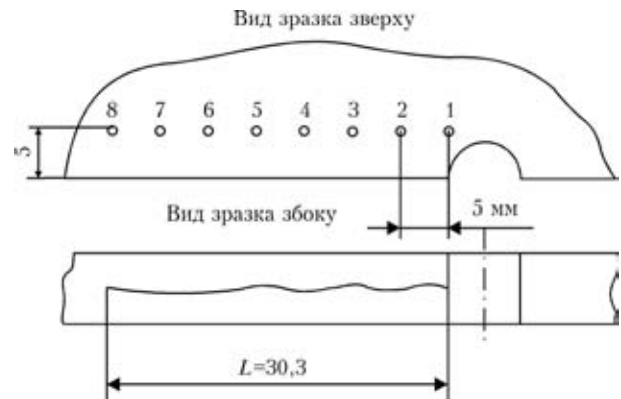


Рис. 6. Точки контролю в зоні розшарування зразка

ну вітчизняних ПС. Для сканування робочої зони зразків точки контролю маркували в середині зразка (на відстані одна від одної 10 мм) (рис. 5), зони розшарування і зони тріщини згідно схем, представлених на рис. 6 і 7.

Залежності зміни амплітуди інформаційних сигналів ΔA (показання індикаторів приладів) від відстані від концентратора при скануванні робочої зони зразків (навантаження $N = 1 \cdot 10^6$ циклів) наведено на рис. 8.

При деякому зміщенні розподілу сигналів відносно зони концентратора напружень спостерігається однозначне збільшення амплітуди ΔA інформаційного сигналу для усіх засобів контролю поблизу концентратора. Найбільші зміни ΔA відзначалися при використанні імпульсного дефектоскопа ИД-91М із сумісним перетворювачем (СП) і дефектоскопу АД-60С також із СП. Найменша величина сигналу ΔA була отримана при скануванні робочої зони зразків роздільно-сумісним перетворювачем (РСП) дефектоскопа АД-60С і при використанні вихрострумових де-

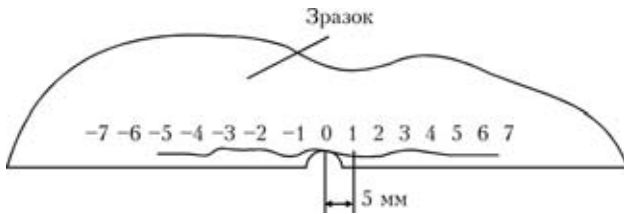


Рис. 7. Точки контролю в зоні тріщини

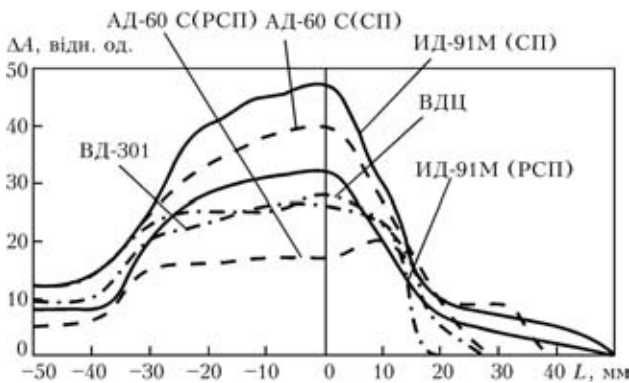


Рис. 8. Залежність амплітуди сигналів при скануванні робочої зони зразка ($N = 10^6$ циклів) різними засобами

фектоскопів ВД-3.01 і ВДЦ. При зменшенні навантажень (від $N = 1 \cdot 10^6$ до $N = 2,5 \cdot 10^5$) спостерігається пропорційне зменшення амплітуди (ΔA) для всіх засобів НК з побічною закономірністю відносно концентратора напружень. Залежності амплітуди сигналів від рівня навантаження для точки 0 робочої зони, відповідної концентратору, представлені на рис. 9.

З аналізу залежностей виходить, що найбільшу чутливість до втомних пошкоджень мають дефектоскопи ИД-91М і АД-60С з суміщеними перетворювачами (криві 1, 2) при деяких відхиленнях амплітуд сигналів на початковому і подальшому етапах навантажень. Сигнали вихрострумів дефектоскопів для прийнятих рівнів навантажень змінюються в незначній мірі (криві 4, 5), що може бути пов'язано зі зберіганням цілісності карбоволокон [5].

Тріщини і розшарування зразків при навантаженні спостерігали на зразках безпосередньо від концентратора напружень. При скануванні цих зон спостерігається зменшення інформаційного сигналу за рахунок впливу крайової зони. Максимальне значення сигналу ΔA для дефектоскопів ИД-91М і АД-60С не перевищує 25 % шкали індикатора, але розподіл одержаних при скануванні сигналів по поверхні зразка в зоні розшарування має однозначну залежність зростання з характерним максимумом (рис. 8).

Зміни амплітуд сигналів при скануванні зони тріщини характеризуються більш симетричним розподілом показників відносно концентратора напружень.

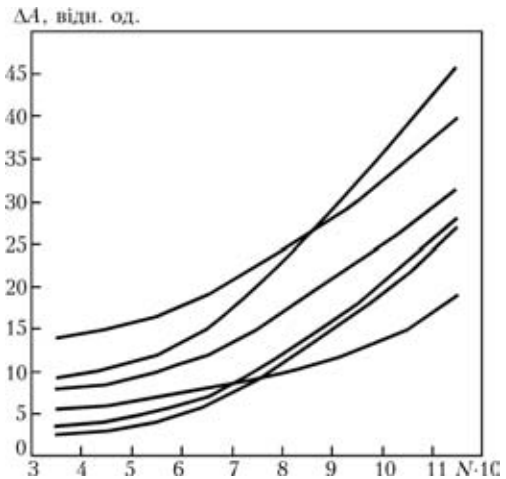


Рис. 9. Залежність амплітуди сигналу при скануванні зразків від прикладеного навантаження: 1 — ИД-91 М (СП); 2 — АД-60 С (СП); 3 — ИД-91 М (РСП); 4 — ВД-3,01; 5 — ВДЦ; 6 — АД-60 С (РСП)

Результати сканування відповідають результатам спостережень, отриманих візуально-оптичним методом з деяким перевищенням розміру зон пошкоджень, що виявляються засобами НК. З результатів оцінки засобів контролю виходить, що найбільш інформативна оцінка пошкоджень досягається на певному віддаленні від крайової зони елемента конструкції (в даному випадку не менше 10 мм, що відповідає варіанту контролю робочої зони зразків). Найбільш чутливими засобами НК до порушень при втомі є імпедансні дефектоскопи з суміщеними перетворювачами, які бажано використовувати залежно від ступеня навантажень (в даному випадку АД-60С або ИД-91М). Вихрострумів засоби контролю можна використовувати як додаткові для визначення цілісності карбоволокон.

При додатковому визначенні залишкової міцності елементів конструкцій після навантажень результати інструментального контролю пошкоджень можна використовувати для прогнозування технічного стану і визначення залишкового ресурсу конструкцій.

Проведен анализ состояния проблемы подтверждения выносливости авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов в связи с их широким распространением для изготовления ответственных элементов. Вопросы оценки усталостной прочности являются актуальными при испытаниях и при эксплуатации конструкций.

Рассмотрены вопросы оценки усталостных повреждений конструкций из углепластиков при использовании неразрушающих методов контроля. Экспериментальные исследования проведены на образцах из однонаправленного углепластика КМУ-11Э-0.08 со стандартным концентратором напряжений. Образцы циклически нагружались чистым изгибом. Оценку разрушения проводили

визуально-оптическим, акустическим и вихретоковым методами. Визуально-оптическим методом устанавливали момент зарождения и контролировали распространение усталостной трещины (рис. 1), расслаивание материала (рис. 2) и растрескивание матрицы (рис. 3). Для оценки поврежденных приборами акустического и вихретокового контроля были определены зоны контроля — рабочая (средняя) зона (рис. 5), зоны расслоения (рис. 6) и трещины (рис. 7).

Наибольшая информативность о повреждениях получена при сканировании рабочей зоны образцов. Результаты сканирования отличаются в зависимости от типа дефектоскопа и первичного преобразователя (рис. 8). Величина амплитуды сигнала акустических дефектоскопов существенно изменяется при увеличении количества циклов нагружения. Незначительные изменения сигналов при вихретоковом контроле могут быть связаны с сохранением целостности карбоволокон при использованных уровнях нагружений. При сравнительной оценке средств контроля установлена наибольшая информа-

тивность о повреждениях импедансного метода при сканировании совмещенными преобразователями на определенном (в данном случае не менее 10 мм) расстоянии от краевой зоны элемента конструкции. Вихретоковый контроль может использоваться как дополнительный для определения нарушения целостности карбоволокон при значительных уровнях нагружений.

1. Работников Ю. Н., Туполев А. А. Применение углепластиков в конструкции летательных аппаратов // Механика композитных материалов. — Рига. — 1981. — № 4. — С. 657–667.
2. Блэк С. Проведение статических и усталостных испытаний для подтверждения выносливости конструкций // High Performance composites. — 2003. — № 1. — Р. 1–13.
3. Дефектология и обеспечение качества в производстве и эксплуатации авиационной техники / А. М. Овсянкин, И. П. Белокур, В. В. Лубяный и др. — Киев, 2001. — 148 с.
4. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Ч. 2 / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1986. — 488 с.
5. Фудзи Т., Язако М. Механика разрушения композиционных материалов / Пер. с япон. — М.: Мир, 1982. — 232 с.

Нац. авиац. ун-т, АНТК ім. О. К. Антонова,
Київ

Надійшла до редакції
12.10.2006



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «АЛТЕС»

105066, г. Москва, Токмаков пер., д. 14, стр. 3

Тел./факс: (495) 267-99-77, (495) 261-46-49, (495) 267-67-92, (495) 265-10-83, (495) 265-17-82

Научно-техническое предприятие АЛТЕС основано в 1991 г. АЛТЕС занимается разработкой и изготовлением оборудования автоматизированного, механизированного и ручного ультразвукового контроля, которое обеспечивает максимальную надежность, производительность и информативность процесса контроля качества при минимальном участии оператора-дефектоскописта.

В настоящее время в составе предприятия работают специалисты высшей квалификации по акустическому методу контроля, высококвалифицированные электронщики, программисты, конструкторы.

За достижения в области неразрушающего контроля ведущие специалисты предприятия награждены международной медалью «Рентген-Соколов».

Аппаратура, выпускаемая АЛТЕС, хорошо зарекомендовала себя в нефтегазодобывающей и перерабатывающей, химической промышленности, на предприятиях Газпрома, заводах металлоконструкций, на транспорте, при строительстве мостов, в судостроении, в энергетике, авиации и пр.

АЛТЕС предлагает к внедрению: аппаратуру ручного контроля и комплекты ПЭП различного назначения, вспомогательную оснастку, СОП; механизированные установки УЗК; автоматизированные высокоскоростные установки и системы контроля в технологическом потоке производства различных изделий (труб, проката, листов и др.). Особой популярностью пользуется малогабаритная установка измерительная ультразвуковая серии «Сканер» — модель «СКАРУЧ» (УИУ «СКАРУЧ»), которая предназначена для оперативного обнаружения и определения характеристик дефектов в сварных соединениях и основном металле трубопроводов, сосудов и металлоконструкций с толщиной стенки 4...60 мм и проведения толщинометрии изделий толщиной до 100 мм. Установка используется для ручного и механизированного ультразвукового контроля и работает в режиме автоматической фиксации и расшифровки результатов контроля при ручном сканировании системой преобразователей, а также в режиме ручного дефектоскопа (толщиномера) общего назначения.

Установка прошла государственные испытания и имеет хорошие отзывы от предприятий различных отраслей, сертифицирована Госстандартом РФ и допущена к применению ГГТН РФ на подконтрольных объектах.