

DOI 10.53364/24138614\_2023\_30\_3\_29  
ЭОЖ 629.7

## РЕНТГЕНДІК БҰЗБАЙТЫН БАҚЫЛАУ ӘДІСТЕРІ

<sup>1</sup>**Керибаева Т.Б.**,\* «Авиациялық техника және технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы

<sup>1</sup>**Рысбекова А.А.**, «Авиациялық техника және технологиялар» кафедрасының оқытушысы

<sup>1</sup>**Әбдіматова Т.Д.**, «Авиациялық техника және технологиялар» кафедрасының оқытушысы

<sup>1</sup>**Тойлыбай Ө.**, «Авиациялық техника және технологиялар» кафедрасының оқытушысы

<sup>1</sup>**Сейфула Г.Н.**, «Авиациялық техника және технологиялар» кафедрасының оқытушысы

<sup>1</sup>«Азаматтық авиация академиясы» АҚ, Алматы қ., ҚР.

\*E-mail: [talshyn.keribayeva@agakaz.kz](mailto:talshyn.keribayeva@agakaz.kz)

**Аңдатпа.** Композициялық материалдар ұшақ құрылымында жиі кездесетін материалдардың бірі. Авиацияда композиттерді қолданудың маңыздылығы жоғары болғандықтан, механикалық қасиеттермен бірге салмақ азайтуды қамтамасыз ету үшін, сонымен қатар апатты сәтсіздіктердің алдын алу үшін сенімді бұзбайтын бақылау әдістері қажет. Бұл мақалада осы саладағы қазіргі жағдайға шолу жасалады және маңызды авиациялық композиттердің тұтастығын бағалау кезінде бұзбайтын бақылаудың рентгендік әдістері кездесетін жетістіктер мен қиындықтарға баса назар аударылады. Зақымдануды анықтау және ұшақтардың бастапқы және қайталама конструкцияларында пайдалану үшін және композиттік материалдардың сипаттамаларын анықтау үшін бұзбайтын бақылаудың озық сертифицираталған әдістеріне назар аударылады.

**Түйін сөздер:** акустикалық эмиссия; ұшу аппараттарының композициялық конструкциялары; бұзбайтын бақылау; рентгенография және томография

## МЕТОДЫ РЕНТГЕНОВСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

<sup>1</sup>**Керибаева Т. Б.**\*, старший преподаватель кафедры «Авиационная техника и технологии»

<sup>1</sup>**Рысбекова А. А.**, преподаватель кафедры «Авиационная техника и технологии»

<sup>1</sup>**Абдиматова Т. Д.**, преподаватель кафедры «Авиационная техника и технологии»

<sup>1</sup>**Тойлыбай О.**, преподаватель кафедры «Авиационная техника и технологии»

<sup>1</sup>**Сейфула Г. Н.**, преподаватель кафедры «Авиационная техника и технологии»

АО "Академия гражданской авиации", г. Алматы, РК.

\*E-mail: [talshyn.keribayeva@agakaz.kz](mailto:talshyn.keribayeva@agakaz.kz)

**Аннотация.** Композитные материалы являются одними из наиболее распространенных материалов в конструкции самолета. Из-за высокой важности использования композитов в авиации необходимы надежные методы неразрушающего контроля, чтобы обеспечить снижение веса в сочетании с механическими свойствами, а также предотвратить катастрофические сбои. В этой статье дается обзор текущей ситуации в этой области и делается акцент на достижениях и трудностях, с которыми сталкиваются рентгеновские методы неразрушающего контроля при оценке целостности важных авиационных композитов. Основное внимание уделяется передовым сертифицированным методам неразрушающего контроля для обнаружения повреждений и использования в первичных и вторичных конструкциях самолетов, а также для определения характеристик композитных материалов.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия; композитные конструкции летательных аппаратов; неразрушающий контроль; ультразвуковой контроль; рентгенография и томография.

**X-RAY NON-DESTRUCTIVE CONTROL METHODS**

<sup>1</sup>**Keribayeva T.B\***, senior Lecturer of the Department of «Aviation Engineering and Technology»

<sup>1</sup>**Rysbekova A.A.**, lecturer of the Department of «Aviation Engineering and Technology»

<sup>1</sup>**Abdimatova T. D.**, lecturer of the Department of «Aviation Engineering and Technology»

<sup>1</sup>**Toilybai O.**, lecturer of the Department of «Aviation Engineering and Technology»

<sup>1</sup>**Seyfula G. N.**, Lecturer of the Department of "Aviation Engineering and Technology"

<sup>1</sup>JSC "Academy of Civil Aviation", Almaty, Kazakhstan

\*E-mail: talshyn.keribayeva@agakaz.kz

**Abstract.** Composite materials are among the most common materials in aircraft construction. Due to the high importance of using composites in aviation, reliable non-destructive testing methods are needed to ensure weight reduction in combination with mechanical properties, as well as to prevent catastrophic failures. This article provides an overview of the current situation in this area and focuses on the achievements and difficulties encountered by reogenic methods of non-destructive testing in assessing the integrity of important aviation composites. The focus is on advanced certified non-destructive testing methods for damage detection and use in primary and secondary aircraft structures, as well as for determining the characteristics of composite materials.

**Keywords:** acoustic emission; composite structures of aircraft; eddy current testing; radiography and tomography.

Рентгенографияда әртүрлі материалдарға ену және зерттелетін объектінің көлеңкелі бейнесін алу үшін қысқа толқынды электромагниттік сәулелену (жоғары энергиялы рентгендік фотондар) қолданылады. Материал неғұрлым тығыз болса, жолдың ұзындығы неғұрлым ұзағырақ болса және рентген сәулесінің сіңуі неғұрлым жоғары болса, сыналатын объект арқылы рентген детекторына өткенде рентген сәулесі соғұрлым әлсірейді. Белгілі бір энергияның рентген сәулелерінің затпен әрекеттесуі Бир-Ламберт Заңымен келесідей сипатталады:

$$\ln I \propto Z \rho x; y; z \rho d / \delta I_0$$

мұндағы  $I$ -өтетін сәуленің қарқындылығы,  $I_0$ -түсетін сәуленің қарқындылығы,  $m$ -фотоэлектрлік эффекттер мен шашырау салдарынан пайда болатын сәуле траекториясы бойындағы ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) нүктедегі сызықтық әлсіреу коэффициентінің мәні және интеграция рентген көзі мен арасындағы  $l$  сызығы бойымен жүреді. Демек, әр түрлі жерлерде кескіннің күңгірттенуінің (тығыздығының) өзгеруі материалдың тығыздығында, материалдың қалыңдығында немесе екеуінде де тексерілетін объектінің сәйкес нүктелері арасында айырмашылық бар екенін көрсетеді. Бұл әртүрлі ақауларды сипаттауға болатын әдіс. Кәдімгі рентгенография-егер олардың бағыты рентгенге перпендикуляр болмаса, аэроғарыштық композиттердегі қатты қосындылар, талшықтардыңмещысуы және матрицаның жарылуы сияқты жалпақ емес ақауларды анықтаудың ең танымал әдістерінің бірі. Алайда, егер ақаулар тегіс бетке қойылса, қабаттасатын ақауларды бөлу мүмкін емес, ал егер рентгенограммалар болса, тереңдікті сандық бағалау мүмкін емес, әр түрлі бұрыштарда жасалмайды [1].

Кәдімгі рентгенге сүйене отырып, компоненттердің ішкі ерекшеліктерін визуализациялау және олардың үш өлшемді геометриясы туралы сандық ақпарат алу үшін рентгендік компьютерлік томография (ХСТ немесе КТ) және рентгендік компьютерлік ламинография (ХКЛ немесе КЛ) сияқты жетілдірілген әдістер жасалды.

Аэроғарыштық композиттерді бұзбайтын бақылауға арналған компьютерлік томография [2].

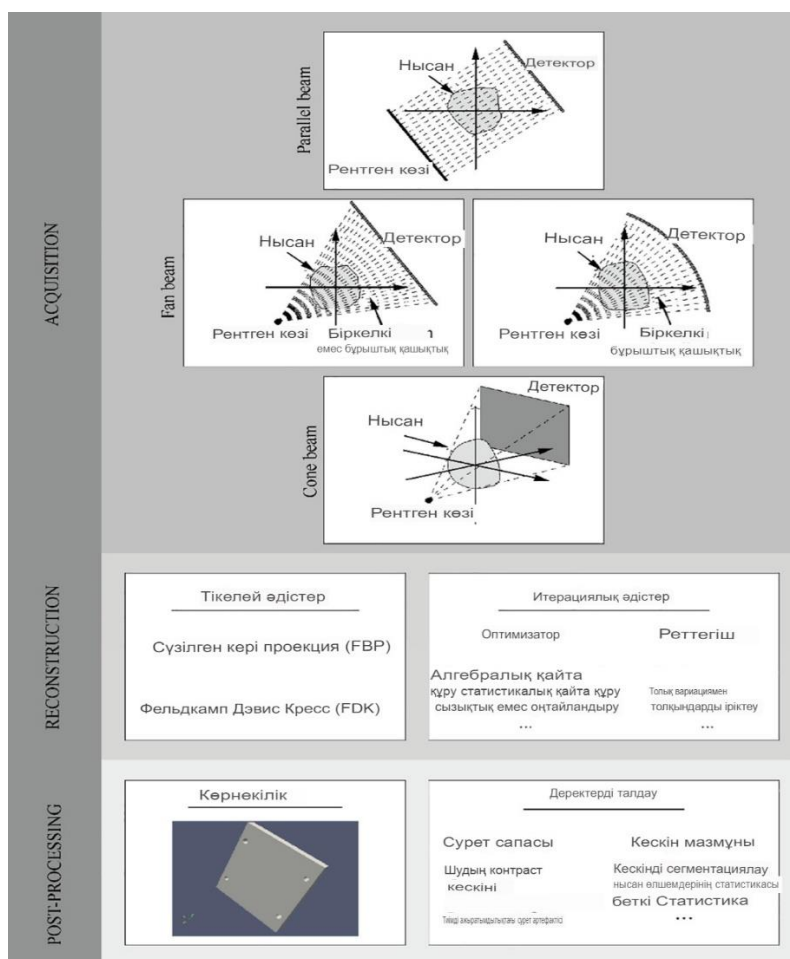
Компьютерлік томография өлшемдер мен көлемді бөлшектерді жоғары дәлдікпен анықтау үшін тамаша бейнелеу әдісін ұсынады, үш өлшемді өлшемде, бұл әсіресе

аэроғарыштық композиттерді бұзбай бақылау үшін пайдалы, мұнда компоненттердің құрылымдық тұтастығын тексеру өте маңызды (яғни жасырын және күрделі геометриялық пішіндер). НАСА-ның бұзбайтын бағалау ғылымдары бөлімінің (NESB) белсенді зерттеу саласы болып табылатын компьютерлік бұзбайтын бақылау саласында композиттік ламинаттардағы зақымданудың күрделі сипатын көрсету үшін КТ нәтижелері қолданылады. Содан кейін бұл нәтижелер басқарылатын толқындардың ішкі зақымданулармен өзара әрекеттесуін модельдеу үшін эластодинамикалық ақырлы интеграция әдісінің бағдарламалық құралына енгізіледі (мысалы, стратификация зақымдануы). Компьютерлік томография сонымен қатар ұшақ апаттарын тергеудегі алтын стандарт болып табылады.

Компьютерлік томография деректер жиынтығынан пайдалы ақпаратты құру және алу үшін қадамдар тізбегі қажет: суретте көрсетілгендей. Томографиялық ақпарат объектінің рентген көзі (монохроматикалық немесе полихроматикалық) мен детектор арасындағы айналмалы тақтаға орналастыру арқылы көру бұрыштарының (немесе "проекциялық бұрыштардың") дәйектілігімен жүйелі түрде алынатын бірқатар рентгенограммалардан (немесе проекциялардан) алынады. Проекциялар алынғаннан кейін объект проекциялық кескіндерді енгізу арқылы қайта құрылады "қайта құру алгоритмі". Компьютерлік томография жүйелерінің көпшілігі есептеу шығындары мен қайта құру уақыты бойынша алгоритмдерінің болжамды сипатына байланысты кері сүзгіден өткен қайта құру алгоритмінің түрін жүзеге асырады. Сканерленетін объектіні ББӨ-мен жуықтауға қол жеткізу үшін (дәл шешім орталық бөліктен тыс жерде жоқ) сәуле әр сәуле траекториясы үшін интегралдар объект арқылы кері проекцияланады. ББ әдістері шу деңгейі төмен проекциялық кескіндер жеткілікті болған жағдайда жақсы жұмыс істейді, бірақ күрделі жағдайларда баламалы итерациялық қайта құру әдістері айтарлықтай артықшылықтарға ие болуы мүмкін. Компьютерлік томографияның көлемі қалпына келтірілгеннен кейін пайдалы ақпаратты кескінді қарау және өңдеу технологиялары арқылы алуға болады - бұл кезең визуализация деп аталады. Қол жеткізілген кескін сапасы негізінен шудың, контрастың, кеңістіктік ажыратымдылықтың бәсекелес факторларымен анықталады және артефактілер деп аталатын жасанды ерекшеліктер. Мысалы, сәулені күшейту және шашырау. Композиттердің компьютерлік томографиясын қолданудың көп бөлігі купондарды немесе шағын панельдерді сканерлеуге бағытталған, бірақ нақты компоненттерге емес. Бұл шектеулерден екі факті туындайды:

(1) детектордың пиксель өлшемі компоненттің геометриясына байланысты көбінесе пиксель өлшемінен 2-3 есе үлкен ажыратымдылықты шектейді.

(2) детектормен қамтылған тиімді аймақ әдетте 2000-4000 пиксель құрайды және бұл тексерілетін объектінің көлемін шектейді. Басқаша айтқанда, қазіргі ұрпақтың КТ жүйелерімен алынған егжей-тегжейге үлгі мөлшері әсер етеді [3].



Сурет 1. Әлсіреудің контрасты

Көміртекті талшықтар мен шайыр арасындағы ыдырау айырмашылығы өте аз болғандықтан, кеуектілікті, талшық құрылымын, шаршаудан туындаған тар жарықтарды және көміртекті пластикалық материалдардағы соққылардың зақымдануын дәл анықтау қиын. Сондықтан бұл саладағы зерттеулердің көпшілігі рентгендік микротомография (немесе м-КТ) жүйелерін қолдану арқылы жүргізілді. м-КТ принциптері КТ-мен бірдей, бірақ көзі ретінде рентген сәулесінің дақ өлшемі қолданылады (электрмен соғылатын анодтық нысананың ауданы-термоэлектрондық сәуле шығаратын тақталар), оны ондаған микрометрмен өлшеуге болады, бұл конус сәулесінің ұлғаюын микрометрлік ажыратымдылыққа қол жеткізу үшін пайдалануға мүмкіндік береді дақ мөлшері.

Кеуектілік. М-КТ көміртегі негізіндегі композициялық материалдардағы кеуектілікті сандық бағалау, сондай-ақ автоклавтан тыс емделген талшық/термоактивті матрица жүйелеріндегі кеуектіліктің эволюциясын зерттеу үшін қолданылды. Конустық сәулелік КТ көмегімен композициялық материалдардағы кеуектілікті сандық бағалауға негізгі кедергі жүйе болып табылады- бұл материал мен ауа арасындағы бетті анықтау. Өлшенген кеуектілік сегменттеу әдісіне және қолданылатын параметрлерге байланысты. Бұл мәселе, ақылға қонымды шешіммен, кеуектілікті М-КТ жүйелерінен гөрі стандартты компьютерлік томография жүйелерімен анықтауға мүмкіндік береді. 2010 жылы Кастнер және т. б. көміртекті пластикалық материалдардағы қайталану мен дәлдіктің жоғары деңгейімен кеуектілікті Өлшеу мақсатында компьютерлік томография деректерін бағалау үшін сегменттеу әдісі енгізілді [4].

Талшықтың архитектурасы және орналасуы. Макроскопиялық талшықты турникеттің геометриясы жоқ бір бағытты композиттер үшін жеке талшықтар стандартты М-КТ конустық

сәулелік жүйелерімен өңделмейді. Көміртекті талшықтардың диаметрі әдетте 10 мм-ден аз деп есептесек, жеке талшықтардың кескінін алу үшін үлгі өлшемі 6 мм-ден аз болуы керек.

Алайда, автоклавтан тыс емделген композиттерде, мысалы, екі өлшемді және үш өлшемді тоқылған композиттерде, қабатты материалдың салыстырмалы түрде төмен тығыздығы және жоғары кеуектілігі контрастты заттардың көмегімен талшықтардың құрылымын анықтауға мүмкіндік береді. Мысалы, маталарды алтынмен, мыспен және контрастты йодпен жабу құрал (жабынның қалыңдығы 0,025–0,05 мм) талшықтардың өлшемдері мен бағдарын, сондай-ақ қабаттардың қалыңдығын өлшеуге мүмкіндік беретіндігін көрсетті. Дегенмен, олар қатты әлсірететін жабындардың болуына байланысты қайта құруларда арқалықтарды қатайту артефактілерінің бар екенін хабарлады. Сонымен қатар, контрастты заттар композициялық материалдардың механикалық қасиеттеріне әсер етуі мүмкін [5].

Соққы кезінде зақымдану сипаттамасы. Компьютерлік томография соққы кезінде көміртекті пластикалық материалдардың зақымдануын талдау үшін пайдаланылды, соның ішінде бір бағытты көміртекті талшықты панельдің бүкіл қалыңдығына таралған стратификацияны анықтау, әсер ету энергиясының әртүрлі деңгейлеріндегі көміртекті талшықты эпоксидті ламинаттардың әсер ету қасиеттерін зерттеу және бүкіл қалыңдығына тігілген бір бағытты ламинаттардың айқаспалы жерлерінде жарықтар пайда болуын көрсету. Осы зерттеулерде қолданылатын камералардың өлшемдері қажеттілікке байланысты салыстырмалы түрде үлкен (стандартты КТ-да қажетті ажыратымдылықтағы кескіндерді алу үшін) - стандартты соққы сынағының нәтижелері үшін суретті қараңыз. Жалпы соққы сынағында қолданылатын бұл үлкен, жұқа үлгілер компьютерлік томография үшін өте қолайлы емес.

Шаршаудан туындаған зақымданудың сипаттамасы. CFRPS-тегі шаршаудан болатын зақым көбінесе әртүрлі қисық жазықтықтарда және олардың интерфейстерінде пайда болады. Композициялық материалдардың шаршау қасиеттерін зерттеудің көпшілігі макроскопиялық масштабта зақымданудың жинақталуының материалдың қасиеттерінің нашарлауына әсерін бағалау үшін жүргізілді, бірақ соңғы уақытта шаршаудан туындаған зақым туралы микромеханикалық түсінік қалыптастыруға назар аударылды. Мысалы, қатайтатын бөлшектердің жарықшақтың таралуына әсерін зерттеу көміртекті-эпоксидті композиттер әдебиетте баяндалған [5].

Шаршау сынағынан өткен көміртекті талшықты купондағы шаршаудан туындаған зақымдарды жақсырақ визуализациялау үшін қалпына келтірілген М-КТ көлемін қалпына келтіру алгоритмін жасады. Мұндай зақым көбінесе әртүрлі қисық жазықтықтарда және олардың интерфейстерінде пайда болады, олар иілу пайда болғанға дейін тегіс болады. Осылайша, олар визуализацияның ең күрделі түрлерінің бірі болып табылады. Алайда олардың М-КТ сканері шамамен 15 мм–20 мм ажыратымдылықта жеке көміртекті талшықтарды тани алмады. Мұндай жұмыс, ол шыны талшықты композиттерді шаршау сынақтары кезінде талшықтардың бұзылуын анықтау үшін жеткілікті рұқсат қабілеттілігін көрсетпеді [6].

Жергілікті жерде бақылау. Аэроғарыштық композиттік панельдерді орнында бақылау, мысалы, шаршау жүктемесі кезінде зақымданудың пайда болуы мен өршуі, рентгендік компьютерлік жүйелерді қолдану арқылы өте қиын, сондықтан әдебиеттерде бұл туралы аз хабарланады. Бұл, бір жағынан, аэроғарыштық құрылымдардың жоғары арақатынасына, екінші жағынан, рентгендік компьютерлік томографияның зертханалық жүйелерінде сынақ стендтерін орнатуға қойылатын талаптарға байланысты. Конус тәрізді сәуле түрінде кескін алу үшін максималды арнайы ажыратымдылыққа жету үшін сыналатын нысан сәулелену көзіне мүмкіндігінше жақын орналасуы керек. Сонымен қатар, жүйе тармақтарында сипатталғандай сыналған нысанды рентген сәулесімен жарықтандыруға мүмкіндік беретін етіп жасалуы керек.

Көру өрісін шектеу. Нысан детектордың көру аймағынан тыс болған кезде, мысалы, суретте көрсетілген құрылым. Егер бойлық және көлденең диаметрлер айтарлықтай ерекшеленсе немесе сканерленетін объект арқылы өтетін жолдың ұзындығы әртүрлі бұрыштарда күрт өзгерсе, онда сканерлеу және қайта құру қиын. Сонымен қатар, арақатынасы жоғары нысандар сәуленің өтуінде үлкен ауытқуларға әкелуі мүмкін, бұл қалпына келтірілетін көлемде артефактілердің пайда болуына әкеледі. Мұндай жағдайларда тіпті объектінің рентген көзімен соқтығысу қаупі бар, сондықтан көзді объектіден алыс орналастыру керек, бұл нашар ажыратымдылыққа әкеледі.

Көру өрісінің шектелуін жеңу үшін үш стратегия қолданылады: қос энергетикалық сканерлеу, қызығушылық аймағын сканерлеу және компьютерлік ламинография. Екі энергетикалық сканерлеу әртүрлі рентген энергиясымен екі сканерлеуді орындайды, біреуі қысқа жол ұзындығы үшін оңтайландырылған, екіншісі ұзағырақ жол ұзындығы үшін оңтайландырылған. Содан кейін бұл проекциялар жақсартылған реконструкцияны алу үшін қайта құрылатын рентгенографиялық мәліметтердің бірыңғай жиынтығына біріктіріледі. Жоғары ROI кескіндерін алу жоғары ажыратымдылықтағы нысанның шағын көлемдерінің кескіндерін алуға мүмкіндік береді. ROI сканерлеу зерттеулерінің көпшілігі нысанның кейбір бөліктері қалпына келтірілмеген жағдайда пайда болатын кесу мәселесін жеңу үшін деректерді толтыру әдістерін қолданды. Мысал ретінде параллель сәуле және конус сәулесін алуға болады. Нысан үшін қол жетімді априорлық ақпаратты (мысалы, АЖЖ деректері) пайдалану да қайта құруды жақсарта алады [7,8].

#### Компьютерлік ламинография (КЛ)

Ламинографиялық сканерлеу компьютерлік томографияға ұқсас, дегенмен үлгінің қозғалысы мен сканерленген деректерді қалпына келтіру әдісі кәдімгі компьютерлік томографиядан ерекшеленеді. Компьютерлік томографиядан айырмашылығы, ламинографиялық деректерді алу кезінде тек шектеулі көлемдегі томографиялық ақпарат қажет. Демек, КЛ көмегімен сканерлеу уақыты аз, бұл оны аэроғарыштық қосымшаларға қолайлы етеді, өйткені әдетте бір шың энергиясымен алынған бірнеше рентгенография қолданылады. Сонымен қатар, бұл орналасу айналу бұрышының әрбір ұлғаюы кезінде рентген сәулесінің бірдей өтуіне кепілдік береді және жергілікті жоғары ажыратымдылықпен (1 мм) көлденең созылған үлгілердің кескіндерін алуға мүмкіндік береді. КЛ суреттерге қарағанда сапалы болуы мүмкін көру бұрышы шектеулі компьютерлік томография, әсіресе бұрыштық диапазонда үлкен шектеулер бар жерлерде. Осылайша, композиттік құрылымдарының жоғары ажыратымдылықтағы көлемді визуализациясына компьютерлік томография немесе бұзбайтын бақылаудың кез келген басқа үш өлшемді әдістері арқылы мүмкін болмайтын деңгейлерде қол жеткізуге болады [9].

Компьютерлік ламинографияның маңызды аспектілері. Іс жүзінде КЛ жүйесінің қозғалыс траекториясын алынған ламинографиялық ақпараттың көлемі мен объектінің салмағы, өлшемдері мен геометриясы арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз ететіндей етіп реттеу маңызды.

Ротациялық сканерлеуді қолдана отырып, компьютерлік томографияның зертханалық жүйелерін қолдана отырып, ламинография жүргізу мүмкіндігі туралы зерттеулер туралы хабарланды. Сонымен қатар, егер үлгіні жылжытудың қосымша жүйесі қарастырылған болса, басқа траекториялар зертханалық рентгендік компьютерлік томография жүйелерінің көмегімен де жасалуы мүмкін. Ламинографиялық сканерлеудің әртүрлі траекторияларының әсерін, сондай-ақ манипулятор жүйелерінің өнімділігін зерттеу үшін арнайы Nikon Metrology рентгендік компьютерлік сканерінде орналастырылған әртүрлі үлгі манипулятор жүйелерін зерттеді. Үлгінің өлшемдері 300мм\*300мм\*5мм (үлгі стандартты КТ-да қажетті ажыратымдылықпен алуға болатыннан әлдеқайда үлкен екенін ескеріңіз) және бір жағынан найзағайдан қорғау үшін мыс торы бар көміртекті пластикалық ламинаттардан жасалған. Олар әртүрлі энергия диапазонындағы бірнеше соққылардың зақымдануын анықтаған кезде

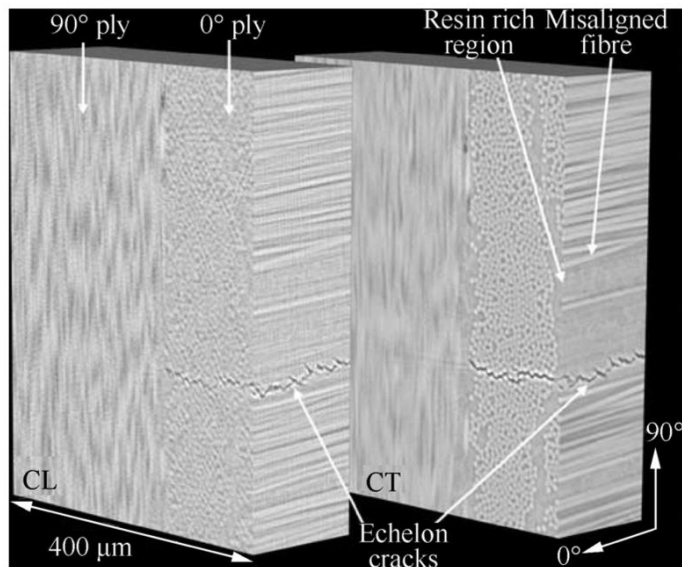
растрлық және шектеулі бұрыштық сканерлеу траекторияларын салыстырды. Бірқатар суреттерді қарап шыққаннан кейін, олар жалпы көру бұрышы шектеулі қайта құрудың растрлық ажыратымдылыққа қарағанда төмен ажыратымдылығы бар екенін хабарлады. Олар жасаған қорытындыларға сүйене отырып, күрделі беттері бар растрлық сканерлеу траекториялары технологияны реактивті қозғалтқыштардағы үлкен композиттік желдеткіш қалақтары сияқты күрделі конструкцияларға қолдануға мүмкіндік береді. Олар сондай-ақ Hexapod манипулятор жүйесі Робот манипуляторымен салыстырғанда жақсы ажыратымдылықты қамтамасыз ететінін көзбен анықтады [10].

Белгілі бір траекториялар үшін сүзілген кері проекция әдістерін қайта құруға бейімдеуге болады, ал итерациялық әдістерді жалпы қолдануға болады. Жалпы, итерациялық әдістер кескіннің жақсы сапасын қамтамасыз етеді. Сүзу арқылы кері проекциялау әдістеріне қарағанда итерациялық әдістердің маңызды артықшылықтарының бірі-олардың априорлық ақпаратты, мысалы, АЖЖ деректерін қайта құру процесіне объект туралы қосу мүмкіндігі. О'Брайен және т.б. белгілі бір ақаулары бар композиттік панельдің жеңілдетілген моделін (өлшемдері 70,7 мм-ден 70,7 мм-ден 4 мм-ге дейін) қолданды. Олар бір мезгілде қайталанатын қайта құру әдісін де, конъюгат градиентінің ең кіші квадраттарын қайта құру алгоритмдерін де қарастырды және екі әдіс те перспективалы нәтижелер көрсететінін атап өтті. Априорлық ақпаратты қолдана отырып, қайталанатын қалпына келтіру алгоритмдерін қолдану ламинографиялық бұлыңғырлық артефактілерін азайтады және контрастты арттырады, осылайша ақауларды анықтаудың жоғары ықтималдығын және осылайша аэроғарыштық құрылымдарды сенімді бұзбайтын бақылауды қамтамасыз етеді.

Аэроғарыштық композиттерді бұзбайтын бақылауға арналған Ламинография. Аэроғарыш өнеркәсібінде компьютерлік ламинография (КЛ), кейіннен қайта құру үшін толық бұрылуды қажет етпейтін тәсіл ретінде стандартты әдіске балама болып табылады [11].

КЛ сонымен қатар өте тегіс немесе сәл қисық ұшақ конструкцияларын тексеру кезінде аэронавтикада бұзбайтын бақылаудың сертификатталған міндетті әдісі ретінде ультрадыбыстық бақылауға өміршең балама ұсынады. Мысал ретінде, 8-сілтемеде К жақтауларын ультрадыбыстық бақылау кезінде артқы қабырғадан тұрақты эхо алу қиынға соғады, (бұл бөлік күрделі геометриясы мен өткір бұрышына байланысты әлі де қолмен тексеріліп жатқанын ескеріңіз), әсіресе 5-8 мм кіші радиуста, ламинаттың үлкен қалыңдығымен, шамамен 20 мм. 2008 жылдан бастап Airbus A400M8 ұшағының тік ұшақ корпусындағы жарықтарды тексеру үшін ламинографияны сертификаттады, бұл оны анықтауға мүмкіндік береді. 95% сенімділік шегінде 90% ықтималдығы бар ақаулар [12].

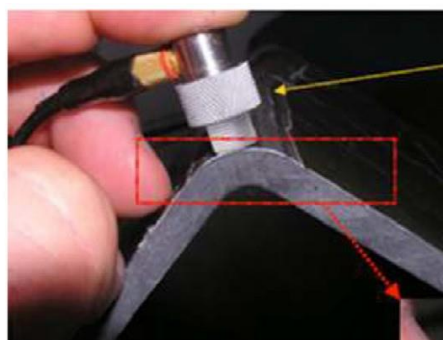
2010 жылы Моффат және тең автор жалпы қалыңдығы 1 мм үлкен көміртекті пластикалық панельдердің жоғары ажыратымдылықтағы кескіндерін алу мүмкіндігін зерттеу үшін синхротронды сәулеленуі бар КЛ қолданды. Біріншіден, зақымдану белгілерінің КТ және КЛ суреттерін салыстыру үшін суретте көрсетілгендей салыстырмалы түрде шағын үлгі өлшемі пайдаланылды. Екі жағдайда да шайырға бай жерлер мен офсеттік талшықтар сияқты композиттік ақауларды сәтті анықтауға болады [13].



Сурет 9. КТ (оң жақта) және КЛ (сол жақта) көмегімен алынған көлемдерді салыстыру

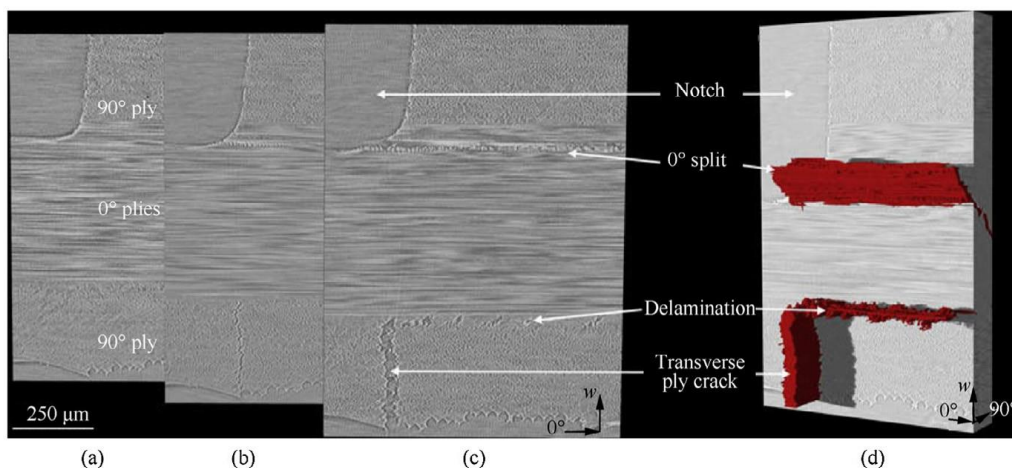


(a) Automatic inspection at Airbus



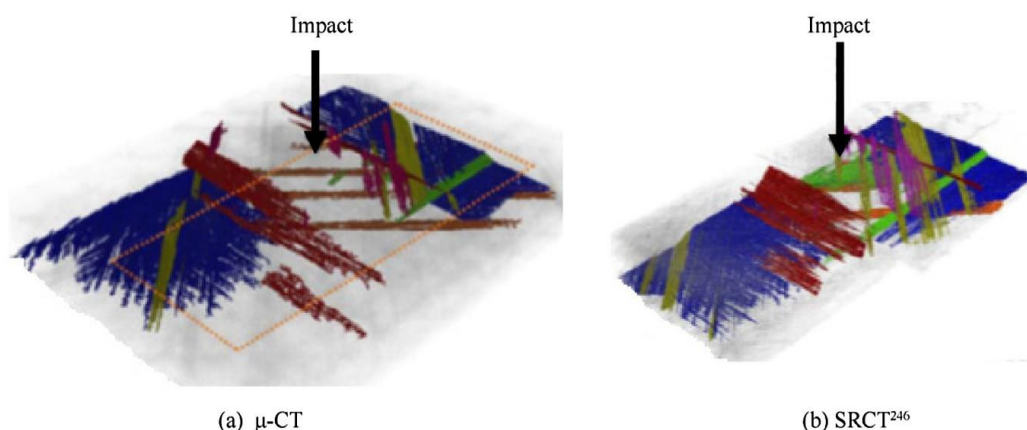
(b) Situation for manual ultrasonic inspection of radius areas

Сурет 8. Аэроғарыштық құрылымдарды ультрадыбыстық бақылау



Сурет 10. Суреттегідей көлемде шамамен бірдей кесілген үш сІ кескінінің жиынтығы. Өр түрлі жүктемелер кезінде алынған 9: (а) жүктелмеген күйде, (б) және (в) біртіндеп көтерілетін жүктемелерде. (D) суретте зақымдану сегменттелген және жарықтардың үш өлшемді табиғатын көрсету үшін қоршаған материал кесілген.





**Сурет 11.** (а) I-КТ көмегімен алынған үлгінің шегінде соққы аймағын қоршап тұрған зақымданулардың морфологиясын көрсететін үш өлшемді сегментация, (б) SRCT көмегімен алынған аймақты көрсететін нүктелі аймақ.

Кесу ұшының айналасындағы бейнелеу 20 кВ энергиясы бар монохроматикалық рентген сәулесінің көмегімен жасалды. Зақымдану механизмдерін микромеханикалық бағалау мүмкіндігі 10- суретте көрсетілді.

Әдебиеттерде одан да үлкен композиттік панельдерді қолдана отырып, аэроғарыштық композиттердің ақауларын анықтау үшін КЛ-ді сәтті қолдану туралы хабарланды. Мысалы, Рехак және басқалар КЛ-дің 240 мм-ден 140 мм-ге дейінгі және қалыңдығы 12,5 мм-ге дейінгі әр түрлі тереңдіктегі ақауларды анықтау қабілетін зерттеді. Көміртекті пластикалық ламинаттың әрқайсысының диаметрі 3,0 мм және тереңдігі белгілі, оның ішінде бірнеше шыны талшықтар бар.

RoI сканерлеуімен қолданылатын Ламинография көміртекті талшықтың диаметрінен кіші деңгейлерде жақсы ажыратымдылықты қамтамасыз етеді. Сілтемеде үш өлшемді соққының зақымдану морфологиясы суретте көрсетілгендей I-КТ және синхротронды сәулелену КТ деректерін пайдалана отырып, сол "сіріңке таяқшасының" үлгісінде сегменттелген. Көк түс стратификацияға тән, ал басқалары түстер әрбір сәйкес қабатта пайда болатын матрицаның жарылуын көрсетеді. Көріп отырғанымыздай, аэроғарыш өнеркәсібіндегі сыни тексерулер үшін осы тәсілдің тиімділігін көрсететін әртүрлі ақаулар сәтті сипатталды [14].

### Әдебиеттер

1. Лу Ю. Цемент негізіндегі пьезоэлектрлік сенсорды қолдана отырып, бетон материалдары мен конструкцияларын бұзбай бағалау [диссертация]. Гонконг: Гонконг ғылым және технология университеті; 2010.

2. Гарни Г. Талшықтармен нығайтылған полимерлі композиттерді бұзбай бақылау әдістерімен анықталған ақаулар. Энн Арбор: ProQuest; 2006.

3. Бирк А., Грин Р. Бұзбайтын бақылау жөніндегі нұсқаулық, 7 том: ультрадыбыстық бақылау. Колумбус: Американдық бұзбайтын бақылау қоғамы; 1991. 2-бет.

4. Д'Оразио Т, Лео М, Дистанте А, Гуарнелла С, Пианезе В, Гаваччини Г. Композиттік материалдардағы ішкі ақауларды анықтауға арналған автоматты ультрадыбыстық бақылау. Бұзбайтын бақылау, 2008; 41(2).

5. Аймерих Ф, Мейли С. Соққы кезінде композиттік ламинаттардағы матрицаның зақымдануын ультрадыбыстық бағалау. Ағылшын тіліндегі жазбалар 2000; 31 (1):1-6.

6. Хасиотис Т, Бадोगианнис Е, Цувалис Н.Г. Қабатты композиттік материалдардағы ақауларды бақылау үшін ультрадыбыстық С сканерлеу әдістерін қолдану. Құрылыс газеті - J Mech Eng 2011;57 (3):192-203.

7. Хеймбс С., Хеллер С., Миддендорф П., Хенель Ф., Вайссе Дж. Қысу кезінде алдын ала созылатын көміртекті пластиналарға төмен жылдамдықты әсер ету: сынақ және модельдеу. *Int J Impact Eng* 2009.
8. Хокинс Г., Шиффер П., Джонсон Э. Аэроғарыш өнеркәсібіндегі қалың композиттерді зерттеу — сандық бұзбайтын бағалаудағы прогреске шолу. Берлин: Springer; 1991.
9. Ваара П., Лейнонен Дж. Көміртекті талшықты композиттерді бұзбайтын бақылауға технологиялық шолу. Кеми: Кеми-Торнио қолданбалы ғылымдар университетінің басылымдары; 2012.
10. Бирт Э., Смит Р. талшықты арматураланған полимерлі композиттердегі кеуектілікті өлшеуге арналған NDE әдістеріне шолу. *Insight-Cond monitor* 2004 Бұзбайтын бақылау.
11. Уильямс Дж.Х., Найеб-Хашеми Х., Ли СС. Графит талшықты композиттегі ыдырау және ультрадыбыстық жылдамдық. J деструктивті емес бағалау 1980.
12. Доктор С., Холл Т., Рид Л. САФТ-ультрадыбыстық бақылауға арналған сигналдарды өңдеу технологиясының эволюциясы. Бұзбайтын бақылау, 1986.
13. Сташевский В., Боллер С., Томлинсон Г.Р. Аэроғарыштық құрылымдардың өнімділігін бақылау: интеллектуалды сенсорлық технологиялар және сигналдарды өңдеу. Хобокен: Джон Уайли және ұлдары; 2004.
14. Хонарвар Ф., Шейхзаде Х., Молес М., Синклер А. Н. NDE ультрадыбыстық сигналдарының уақыт ажыратымдылығы мен сигнал/шу қатынасын жақсарту. Ультрадыбыстық 2004.

### References

1. Lý Iý. Tsement negizindegi pezoelektrlik sensory qoldana otyryp, beton materialdary men konstrýktsionalaryn buzbaı baǵalaý [dissertatsııa]. Gonkong: Gonkong ǵylym jáne tehnologıa ýnıversıtetı; 2010.
2. Garnı G. Talshyqtarmen nyǵaıtylǵan polımerli kompozıterdi buzbaı baqylaý ádisterımen anyqtalǵan aqaýlar. Enn Arbor: ProQuest; 2006.
3. Bırk A., Grın R. Buzbaıtyn baqylaý jónindegi nusqaýlyq, 7 tom: ýltradybystyq baqylaý. Kolýmbyıs: Amerıkandyq buzbaıtyn baqylaý qoǵamy; 1991. 2-bet.
4. D ' Orazio T, Leo M, Dıstante A, Gýarnella S, Pıaneze V, Gavachchını G. Kompozıttık materialdardaǵy ishki aqaýlardy anyqtaýǵa arnalǵan avtomatty ýltradybystyq baqylaý. Buzbaıtyn baqylaý, 2008; 41(2).
5. Aımerıh F, Meılı S. Soqqy kezinde kompozıttık laminattardaǵy matrıtısanıń zaqymdanıyn ýltradybystyq baǵalaý. Aǵylshyn tilindegi jazbalar 2000; 31 (1):1-6.
6. Hasiotis T, Badogiannis E, Tsývalis N.G. Qabatty kompozıttık materialdardaǵy aqaýlardy baqylaý úshın ýltradybystyq C skanerleý ádisterin qoldanı. Qurylys gazetı - J Mech Eng 2011;57 (3):192-203.
7. Heimbs S., Heller S., Middendorf P., Henel F., Vaisse Dj. Qysý kezinde aldyn ala sozylatyn kómirtekti plastınalarǵa tómen jyldamdyqty áser etý: synaq jáne modeldeý. *Int J Impact Eng* 2009.
8. Hokin G., Shiffer P., Djonson E. Aeroǵarysh ónerkásibindegi qalyń kompozıtterdi zertteý — sandyq buzbaıtyn baǵalaýdaǵy progreske sholý. Berlin: Springer; 1991.
9. Vaara P., Lemonen Dj. Kómirtekti talshyqty kompozıterdi buzbaıtyn baqylaýǵa tehnologıalyq sholý. Kemi: Kemi-Tornio qoldanbaly ǵylymdar ýnıversıtetiniń basylymdary; 2012.
10. Birt E., Smit R. talshyqty armatýralanǵan polımerli kompozıtterdegi keýektilikti ólsheýge arnalǵan NDE ádisterine sholý. *Insight-Cond monitor* 2004 Buzbaıtyn baqylaý.
11. Ýılıams Dj.H., Nareb-Hashemi H., Lı SS. Grafıt talshyqty kompozıttegi ydyraý jáne ýltradybystyq jyldamdyq. J destrýktivtı emes baǵalaý 1980.
12. Doktor S., Holl T., Rid L. SAFT-ýltradybystyq baqylaýǵa arnalǵan sıgnaldardy óńdeý tehnologıasynyń evolýtsııasy. Buzbaıtyn baqylaý, 1986.

13. Stashevskii V., Boller S., Tomlinson G.R. Aeroğaryshtyq qurylymdardyń ónimdiligin baqylaý: intellektýaldy sensorlyq tehnologiıalar jáne signaldardy óndeý. Hoboken: Djon Ýailı jáne uldary; 2004.

14. Honarvar F., Shehzade H., Moles M., Sinkler A. N. NDE ýltradybystyq signalдарының ыақыт ажыратымдылығы мен signal/shý қатынасын жақсарты. Ыltradybystyq 2004.