doi: https://doi.org/10.15407/visn2023.05.093

ЛОБАНОВ
Леонід Михайлович —
академік НАН України,
заступник директора з наукової
роботи Інституту
електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України

ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ВИРОБІВ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ, МЕТОДИ ЛАЗЕРНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТА КОНСТРУКЦІЙ

Доповідь з нагоди вручення Золотої медалі імені Б.Є. Патона НАН України

Шановний Анатолію Глібовичу!
Шановні учасники зборів!
Насамперед хочу ще раз щиро подякувати за нагородження Золотою медаллю імені Бориса Євгеновича Патона. Така висока нагорода є великою пошаною для мене і зобов'язує ще активніше працювати на благо нашої країни.

У наших ранніх роботах було сформульовано фізичні та математичні положення оптичного моделювання зварювальних напружень. На їх основі вперше у світовій практиці із застосуванням полікарбонату як оптично чутливого матеріалу зварних моделей поляризаційно-оптичним методом виявлено особливості напружених станів, що виникають при зварюванні різних типів з'єднань. Побудовано теорію подібності зварювальних напружень. Проведені на прозорих моделях дослідження дозволили отримати великий обсяг даних для вирішення завдань регулювання зварювальних напружень і деформацій.

Найбільш значущих результатів у вирішенні таких завдань вдалося досягти завдяки створенню попередніх напружено-деформованих станів, оптимізованих щодо залишкових зварювальних напружень і деформацій. Попереднє деформування з установленими параметрами забезпечує усунення деформацій при зварюванні стикових і таврових з'єднань елементів листових конструкцій із легких сплавів. При цьому воно не зменшує міцність з'єднань і не змінює структуру метала шва і колошовної зони.

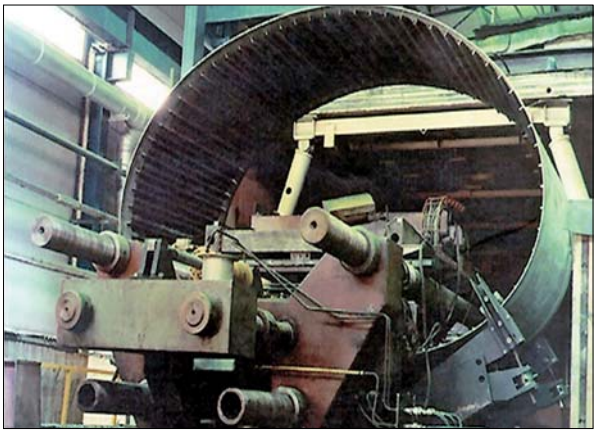


Рис. 1. Стрингерна оболонка космічного призначення з алюмінієвого сплаву АМг6НН у процесі бездеформаційного зварювання

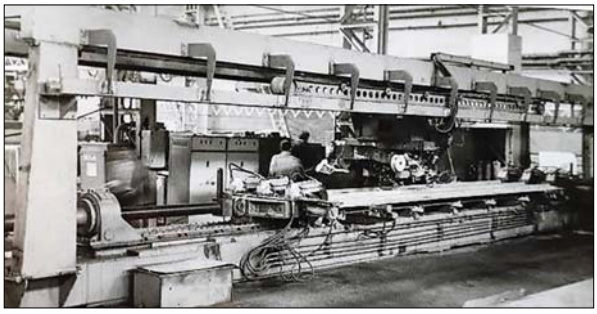


Рис. 2. Силовий стенд для автоматичного зварювання довгомірних стрингерних панелей із застосуванням попереднього деформування

Рис. 3. Академік Б.Є. Патон ознайомлюється з технологією бездеформаційного зварювання довгомірних стрингерних панелей з алюмінієвого сплаву

Із застосуванням попереднього деформування розроблено технологічні процеси виготовлення зварних панелей для авіакосмічної техніки замість панелей, отримуваних пресуванням, фрезеруванням або струганням, з низьким коефіцієнтом використання високовартісних конструкційних матеріалів. Запропоновані режими зварювання і попереднього деформування забезпечили високу якість швів і геометричні допуски до 1 мм на погонний метр.

Вирішено і більш складне завдання — бездеформаційне зварювання великогабаритних стрингерних оболонок космічного призначення. На рис. 1 показано процес бездеформаційного зварювання такої оболонки із високоміцного алюмінієвого сплаву АМг6НН (діаметр оболонки — 4 м, довжина — 2,2 м, товщина — 5 мм; 72 ребра жорсткості з'єднано з оболонкою із застосуванням електронно-променевого зварювання та попереднього пружного деформування). Результати випробувань дослідних зразків таких стрингерних панелей і великогабаритних оболонок, проведених разом із КБ «Південне», показали, що вироби відповідають високим вимогам до міцності, якості і точності виготовлення, а технологія їх виробництва дозволяє підвищити в 3—4 рази коефіцієнт використання конструкційного матеріалу і зменшити трудомісткість робіт. Рекомендації зі збирання та бездеформаційного зварювання тонкостінних панелей і оболонок з повздовжнім оребренням, а також технічну документацію на обладнання для їх реалізації передано КБ «Південне».

Проведено комплекс досліджень з розроблення технології бездеформаційного зварювання стрингерних панелей із високоміцного титанового сплаву ВТ20. Доведено, що виконання швів аргонодуговим зварюванням неплавким електродом по шару активуючого флюсу з використанням попереднього пружного деформування забезпечує високу міцність і геометричну точність таких панелей. Проведені в КБ «Антонов» випробування зазначених панелей на циклічну міцність підтвердили необхідні показники їх втомної довговічності. Розроблену технологію виготовлення стрин-

герних панелей зі сплаву ВТ20 рекомендовано для промислового виробництва.

Створено технологію і обладнання для бездеформаційного зварювання довгомірних стрингерних панелей з алюмінієвого сплаву АМг6 (рис. 2). Застосування таких панелей дозволило усунути обмеження щодо їх розмірів та номенклатури. Слід зазначити, що Борис Євгенович Патон особисто керував створенням і впровадженням зварювальних технологій у ракетобудуванні (рис. 3). За його активної участі було розроблено надійні процеси зварювання в цій галузі та ефективні методи неруйнівного контролю якості зварних з'єднань.

Вирішено завдання бездеформаційного зварювання повздовжніх і кільцевих з'єднань циліндричних оболонкових конструкцій з алюмінієвих сплавів. Створено промислове обладнання для зварювання повздовжнього шва циліндричних оболонок і автоматизовану лінію для зварювання повздовжніх та кільцевих швів довгомірних циліндричних оболонок із попереднім деформуванням.

Особливі труднощі у забезпеченні високої геометричної точності оболонкових конструкцій з алюмінієвих сплавів виникають у ракетній техніці при зварюванні кругових швів. Вварювання фланців, люків та інших конструктивних елементів у тонкостінні оболонки спричиняє значні деформації оболонок у вигляді переміщень колошовної зони до центру їх кривизни. Доведено, що найбільш ефективним засобом усунення вигинів від зварювання кругових швів у тонкостінних сферичних, циліндричних та інших оболонках подвійної кривизни є пружний вигин колошовної зони перед зварюванням у напрямку, протилежному зварювальним переміщенням. За результатами теоретичних і експериментальних досліджень визначено оптимальні параметри попереднього деформування. Створено установки для аргонодугового зварювання кругових швів із застосуванням попереднього пружного вигину, які було впроваджено на підприємствах ракетно-космічної галузі, зокрема їх використовували при створенні комплексу «Енергія-Буран» (рис. 4).

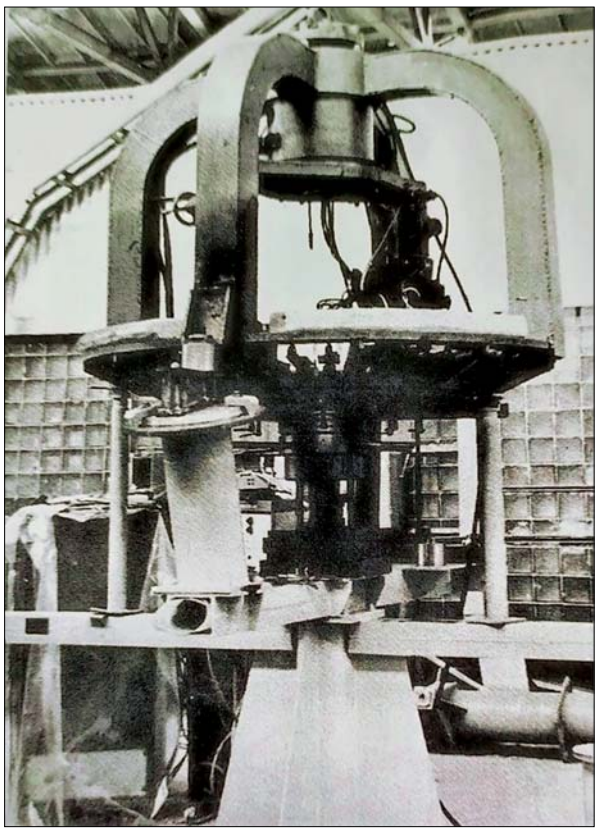


Рис. 4. Промислова установка для бездеформаційного зварювання кругових швів у сферичних оболонках з алюмінієвих сплавів

Нові можливості бездеформаційного зварювання листових конструкцій з алюмінієвих і титанових сплавів в авіакосмічній промисловості відкриває розроблена нами технологія електродинамічної обробки металу шва імпульсами струму високої щільності (понад 1000 А/мм^2). Розроблено наукові засади регулювання напружено-деформованих станів зварних з'єднань при застосуванні процесу електродинамічної обробки. Спільно з Інститутом електродинаміки розроблено необхідні електромеханічні прилади, що дають можливість отримувати імпульси струму високої щільності. Доведено, що електродинамічна обробка забезпечує зниження залишкових зварювальних напружень, подрібнення структури металу шва, підвищення його міцності та циклічної довговічності.

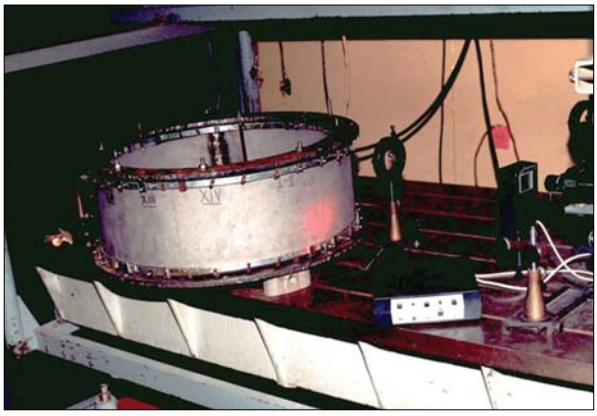


Рис. 5. Загальний вигляд тришарової стільникової оболонки на віброізолюючому голографічному стенді

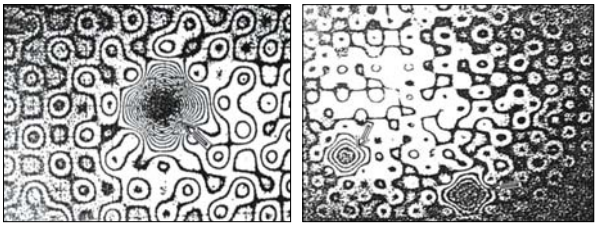
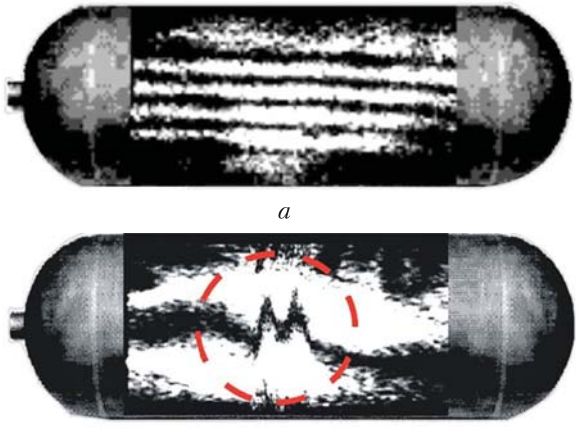


Рис. 6. Інтерферограми, що характеризують дефекти точкових зварних з'єднань оболонки



а

б

Рис. 7. Неруйнівний контроль якості зварних балонів методом електронної ширографії. Картини інтерференційних смуг балона без дефектів (*а*) і балона з тріщиною в повздовжньому зварному шві (*б*)

Нові шляхи вдосконалення цього методу ґрунтуються на модернізації схем джерел живлення імпульсного струму й електродних систем. Дуже перспективним є розроблення методології та апаратури для реалізації електродинамічної обробки безпосередньо в процесі автоматичного аргонодугового зварювання конструкцій відповідального призначення. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність такої технології бездеформаційного зварювання.

Поряд із зазначеними вище технологіями бездеформаційного зварювання було розвинуто методи лазерної інтерферометрії для діагностики зварних з'єднань і конструкцій нової техніки.

Широке визнання здобули праці, присвячені розробленню голографічних методів дослідження напружено-деформованих станів зварних виробів та оцінки їх якості. Побудовано та реалізовано алгоритми програм, які дають можливість на основі даних голографічних вимірів розраховувати компоненти векторів переміщень для великих масивів точок на поверхні досліджуваних об'єктів. Отримано аналітичні співвідношення для визначення точності вимірювання компонентів векторів переміщень залежно від параметрів оптичних схем голографічних інтерферометрів. Доведено, що точність вимірювання компонентів векторів переміщень становить десяті й соті частки мікрона.

Голографічна інтерферометрія є ефективним засобом оцінки стабільності геометричних розмірів високоточних зварних виробів і відкриває нові можливості для неруйнівного контролю якості зварних виробів (рис. 5). Інтерферограми показують наявність дефектних зварних з'єднань, які відображаються у вигляді локальних особливостей картин інтерференційних смуг (рис. 6).

Розроблена методологія голографічної діагностики дозволила оцінити якість і напружено-деформовані стани різних елементів конструкцій, однак перепоною для її застосування в промислових умовах є жорсткі вимоги до віброізоляції як самої оптичної системи,

так і об'єкта досліджень. У зв'язку з цим було проведено комплекс досліджень щодо розвитку нового методу лазерної інтерферометрії — ширографії. Цей метод не потребує захисту оптичної системи від вібрацій, оскільки при його застосуванні реєструються похідні від переміщень, тобто деформації.

Інтенсивний розвиток комп'ютерної і обчислювальної техніки дозволив суттєво вдосконалити метод ширографії і розробити так званий метод електронної ширографії. Важливою його особливістю є те, що він дозволяє представити картину інтерференційних смуг на екрані дисплею, виключаючи будь-який запис на реєструвальне середовище. Цей метод застосовують для розв'язання складних задач, пов'язаних з аналізом деформацій та контролем якості елементів конструкцій у промислових умовах.

Ефективним є застосування електронної ширографії для неруйнівного контролю якості тонкостінних балонів високого тиску, які працюють при циклічному навантаженні. З його використанням можна виявляти такі дефекти, як, наприклад, тріщини в повздовжньому зварному шві, що виникають при випробуванні балонів на малоциклову втому під навантаженням тиском. Так, на рис. 7 наведено картини інтерференційних смуг балона з такою тріщиною і балона без дефектів. Ширографія дозволяє виконувати діагностику дефектів, які неможливо виявити іншими методами неруйнівного контролю якості. У нашому Інституті створено портативну апаратуру для ширографічного контролю якості і картини інтерференційних смуг.

Виконано контроль якості стрингерних панелей авіаційного призначення з титанового сплаву. При локальному термічному навантаженні за допомогою інтерферограми виявлено тріщиноподібний дефект у зоні з'єднанні листа з одним із ребер жорсткості. Для підвищення достовірності контролю побудовано також тривимірну картину деформування поверхні панелі в зоні дефекту і криві розподілу похідних уздовж характерних перерізів (рис. 8).

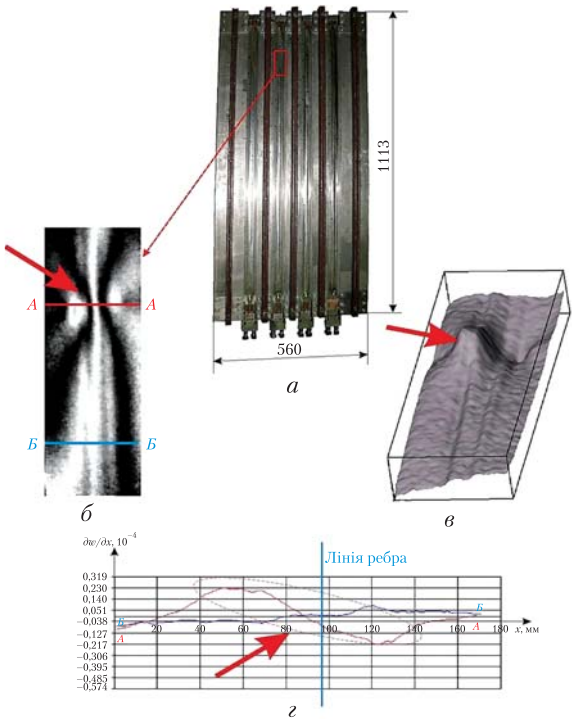


Рис. 8. Неруйнівний контроль якості стрингерної панелі з титанового сплаву ВТ-20 методом електронної ширографії: *а* — зразок стрингерної панелі, виробленої на основі технології бездеформаційного зварювання із застосуванням прорізних швів; *б* — інтерферограма, що характеризує наявність дефекту прорізного шва; *в* — тривимірна картина деформування поверхні панелі в зоні дефекту; *г* — криві розподілу похідних $\partial w/\partial x$ вздовж обраних перерізів (А—А — переріз з дефектом; Б—Б — переріз без дефекту)

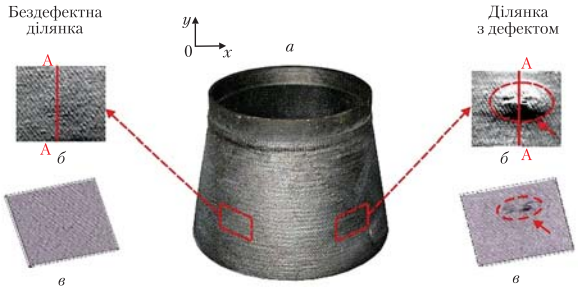
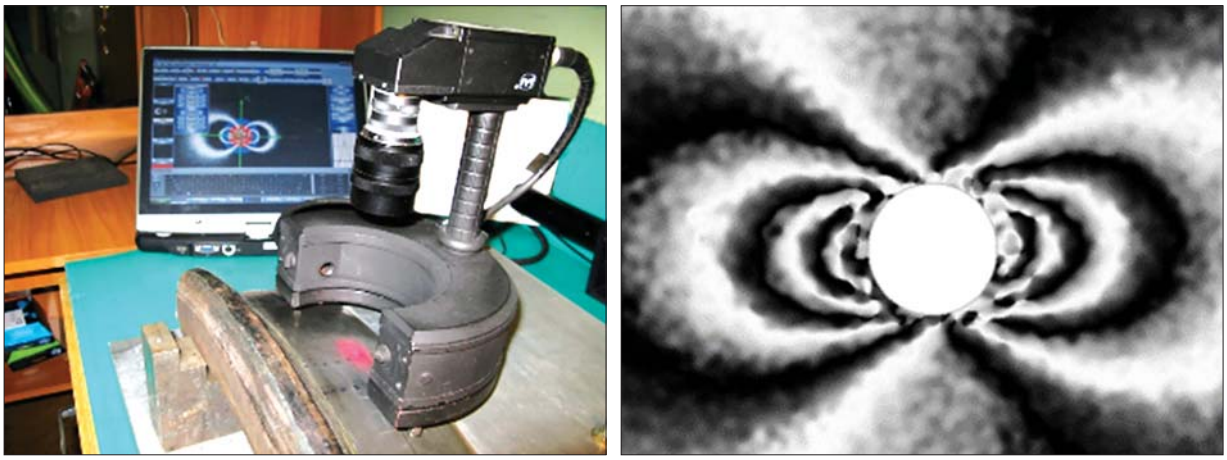
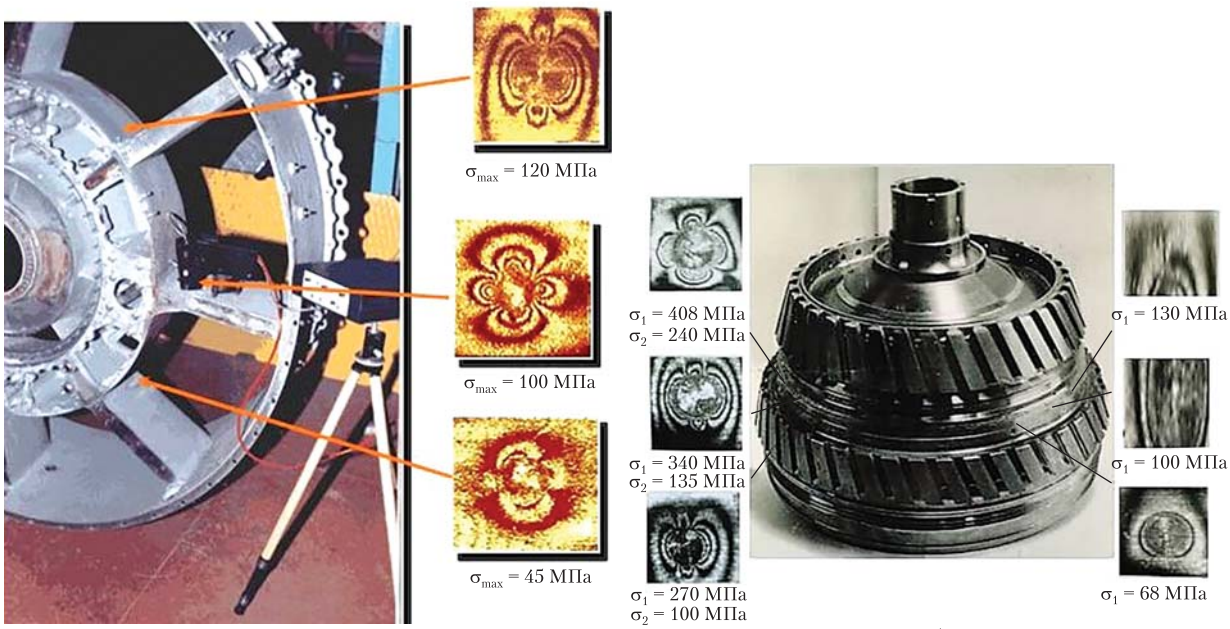


Рис. 9. Ширографічний контроль якості елемента оболонки космічного призначення з вуглецевого композиційного матеріалу: *а* — загальний вигляд оболонки; *б* — широграми з нанесеними досліджуваними перерізами бездефектної ділянки та ділянки з дефектом відповідно; *в* — 3D-зображення розподілу похідної $\partial w/\partial y$ на ділянках, що підлягали контролю



а *б*

Рис. 10. Метод визначення залишкових напружень із застосуванням електронної спекл-інтерферометрії в поєднанні з висвердлюванням малого отвору діаметром 1 мм: а — об'єкт дослідження і прилад для визначення залишкових напружень; *б* — картина інтерференційних смуг біля отвору, що характеризує залишкові напруження



а *б*

Рис. 11. Приклади промислового використання розробленого в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України методу визначення залишкових напружень: *а* — вузол кріплення авіаційного двигуна (матеріал — магнієвий сплав); *б* — дисковий елемент газотурбінного ротора (матеріал — високолегована сталь)

Ширографія відкриває широкі можливості для діагностики виробів із композиційних матеріалів. Наприклад, на замовлення КБ «Південне» ми провели ширографічний контроль оболонки космічного призначення з вуглецевого композиційного матеріалу (рис. 9).

На основі лазерної інтерферометрії створено ефективний метод визначення залишкових напружень. Суть цього методу полягає в спекл-інтерферометричній реєстрації площинних переміщень, викликаних розвантаженням напружень за допомогою малого отвору діаметром 1 мм (рис. 10*а*). Картина інтерференційних смуг біля отвору відразу показує напрямки головних напружень (рис. 10*б*). Автоматизована система комп'ютерної обробки інтерферограм дозволяє отримувати кількісні значення напружень з високою точністю. Для широкого практичного використання методу прийнято відповідний стандарт, розроблений нами згідно з правилами, встановленими в національній стандартизації України.

Міжнародний інститут зварювання проводив конкурс, на якому порівнювали результати визначення залишкових напружень різними засобами. Аналіз результатів вимірів однотипних зразків зварних з'єднань засвідчив, що розроблений у нашому Інституті метод і апаратура для його реалізації забезпечують найбільш достовірні вимірювання. Методологія і обладнання для визначення залишкових напружень ефективно використовуються в лабораторній практиці Інституту і за договорами та контрактами передаються як українським організаціям, так і фірмам з Китаю і Південної Кореї.

Досвід використання розробленого методу показав його високу ефективність для оцінки напруженого стану зварних конструкцій і виробів. Як приклад застосування цього методу можна навести його використання для оцінки напруженого стану вузла кріплення авіаційного двигуна з магнієвого сплаву і дискового елемента газотурбінного ротора з високолегованої сталі, що дало змогу оптимізувати технології їх виготовлення (рис. 11).

Однак слід підкреслити, що, незважаючи на переваги, цей метод визначення залишкових напружень залишається частково руйнівним, оскільки порушує цілісність поверхні досліджуваного об'єкта. Ми запропонували замінити процес створення отворів для релаксації напружень неруйнівним способом локальної релаксації на основі використання імпульсу електричного струму високої щільності. Встановлено, що при його введенні відбувається релаксація напружень і в околі місця введення імпульсу струму виникають переміщення точок поверхні, які вимірюються методом електронної спекл-інтерферометрії та характеризують залишкові напруження. Створено необхідне обладнання і проведено експерименти на тестових зразках з алюмінієвого сплаву щодо оцінювання впливу імпульсу струму різних параметрів на релаксацію напружень. Зараз тривають роботи з удосконалення неруйнівного методу визначення напружень з метою забезпечення його практичного використання.

Завершуючи доповідь, хочу висловити почуття глибокої вдячності всім колегам за багаторічну підтримку моєї наукової діяльності. Зараховую себе до патонівської наукової школи, створеної Борисом Євгеновичем разом з його батьком Євгеном Оскаровичем Патоном. До неї належать також десятки академіків і членів-кореспондентів нашої Академії, сотні докторів і кандидатів наук. Патонівська наукова школа живе у працях науковців нашого Інституту, які зробили і, без сумніву, зроблять ще багато корисного для розвитку науки і техніки у нашій країні.

Дякую за увагу!