

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ЕЛЕМЕНТІВ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ ПЕРЕТВОРЮВАНОВОГО ОБ'ЄМУ КОСМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ МЕТОДОМ ШИРОГРАФІЇ

Л.М. Лобанов, В.А. Півторак, І.В. Киянець, В.В. Савицький

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

За результатами експериментальних досліджень, проведених методом електронної ширографії, розроблено технології неруйнівного контролю якості та виявлення зон втрати стійкості елементів і вузлів тонкостінних конструкцій перетворюваного об'єму космічного призначення при навантаженні їх внутрішнім тиском, термічним, механічним та комбінованим способами. Ефективність застосування запропонованих технологій була підтверджена при проведенні експериментів з діагностики натурних як розгорнутих конусних елементів конструкцій перетворюваного об'єму, так і нерозгорнутих у вигляді гофрованих дисків. Бібліогр. 6, рис. 8.

Ключові слова: конструкції перетворюваного об'єму, неруйнівний контроль якості, електронна ширографія

В аерокосмічній промисловості конструкції перетворюваного об'єму (КПО) є активно досліджуваною областю космічних технологій, що дозволяють спростити доставку необхідного вантажу на навколосезну орбіту. У переважній більшості космічні КПО являють собою оболонки з еластичних м'яких матеріалів, здатні піддаватися багаторазовим неруйнівним згинанням. Відповідно, головну увагу розробників техніки даного типу сфокусовано на забезпеченні жорсткості оболонки та її стійкості після розкриття за допомогою різноманітних методів, що мають обмежену ефективність.

Окремим класом конструкцій, що трансформуються, є КПО з металевою оболонкою, в яких використання геометричних закономірностей згинання поверхонь дозволяє реалізувати об'ємне деформування, порівняне з вигинанням м'яких матеріалів. Такий тип КПО є оригінальною розробкою ІЕЗ ім. Є.О. Патона і не має близьких аналогів. Технологія формування вихідних гофрованих дисків, що використовується, дозволяє виготовляти оболонкові конструкції з широко розповсюджених матеріалів і отримувати після трансформації якісні герметичні вироби [1–3].

Підвищення надійності та довговічності роботи таких конструкцій обумовлено вдосконаленням методів неруйнівного контролю якості зварних з'єднань та просторової конструкції в цілому.

Широкі можливості для неруйнівного контролю якості КПО надають методи лазерної інтерферометрії – цифрової голографії, електронних спекл-інтерферометрії та ширографії [4–6]. Найперспективніший з них – метод електронної ширографії, що має такі суттєві переваги: наочність,

безконтактність, нечутливість до впливу вібрацій на об'єкт дослідження, діагностика у реальному масштабі часу об'єктів складної форми і значних розмірів, отримання даних про деформацію поверхні контрольованих об'єктів.

Ширографія ефективна для неруйнівного контролю якості, коли дефект у контрольованій ділянці об'єкта викликає аномальну деформацію його поверхні, спричинену навантаженням (нагріванням, розтягуванням, стисканням тощо). Ця аномалія виявляється внаслідок локальної зміни інтерференційної картини смуг і характеризується кривою розподілу похідної від переміщень в площині об'єкта (u, v) або позаплощинних переміщень (w) по напрямку x або y (визначається широзсувом) уздовж обраних перерізів. При цьому екстремуми, які виникають на кривій зміни похідної, вказують на присутність дефектів на контрольованій ділянці об'єкта.

Важливою перевагою електронної ширографії є те, що на відміну від традиційних методів, які вказують тільки на наявність або відсутність дефекта, вона дає можливість візуалізувати концентрацію напружень, яка обумовлена дефектом або конструктивними особливостями об'єкта дослідження. Метод електронної ширографії надає також можливість оперативно контролювати об'єкти значних розмірів, що визначається потужністю лазера (більша потужність, більшу площу можна освітити).

Метод ширографії не потребує особливого захисту від вібрацій, оскільки в ньому реєструються похідні від переміщень, він не чутливий також до переміщення об'єкту як цілого, оскільки таке переміщення не викликає деформації. При контролі

якості методом електронної широкографії поверхню об'єкту, що контролюється, повністю або частково освітлюють когерентним лазерним випромінюванням. Розсіяне дифузною поверхнею об'єкту світло, створюючи спекл-структуру, попадає на ширелемент та фокусується в площині зображень цифрової камери. На матриці камери формується пара зміщених в напрямку широзсуву зображень точок об'єкту. Величина та напрямок зміщення зображень точок на матриці камери визначається параметрами ширелементу [5].

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено КПО, які призначені для використання у випадках, коли потрібно полегшити їх доставку та монтаж на місці експлуатації завдяки скороченню поздовжнього розміру. Після виготовлення розмір такої конструкції у складеному стані може бути меншим за робочий у десять разів. Монтаж полягає у встановленні конструкції на місце використання та перетворенні поздовжнього розміру до робочого значення подаванням у внутрішню порожнину надлишкового тиску величиною близько 1,0...1,2 атм.

Ефект формозміни забезпечується тим, що корпус конструкції збирають із необхідної кількості перетворюваних елементів, що являють собою гофровані диски. Одна пара дисків, що з'єднані між собою уздовж кільцевих шпангоутів великого діаметру, дозволяє отримати односекційну КПО. При використанні двох або більшої кількості пар дисків можливо виготовити багатосекційну конструкцію. Диски зварюють між собою через кільцеві шпангоути по великим і малим діаметрам.

Гофровані диски отримують із тонколистової замкненої зрізаної конічної оболонки ротаційним формоутворенням кільцевих гофрів у спеціальній формі, починаючи від малого діаметру конуса до більшого. Гофрований диск може бути знову перетворений у конічну оболонку. Схеми контрольованих сталевих і титанових конусних елементів наведено на рис. 1.

Проведені експерименти на тестових зразках конічних елементів (рис. 1) зі сталі 12Х18Н10Т розмірами $\text{Ø}222 \times \text{Ø}122 \times 107$ мм, 6 гофрів (а); $\text{Ø}414 \times \text{Ø}248 \times 148,5$ мм, 15 гофрів (б) і титанового сплаву ВТ1-0 розмірами $\text{Ø}600 \times \text{Ø}246 \times 379$ мм, 38 гофрів (в), всі з товщиною стінки 0,2 мм, із попередньо закладеними дефектами розмірами від 2 до 20 мм. В якості навантаження використовували термічний та механічний спосіб, а також внутрішній тиск.

В титанових конусах виявлено дефектні ділянки у вигляді корозійного стоншення матеріалу з внутрішньої сторони розмірами 15×10 та 20×2 мм. В якості навантаження застосовували

термічний спосіб, а саме, обдув повітрям температурою близько 100°C впродовж 5...10 с.

Запис широкограм здійснювали з двократним оптичним збільшенням як на стадії нагрівання, так і на стадії охолодження. Величина широзсуву уздовж напрямку ОХ або ОУ дорівнювала 5 мм. Результати, які характеризують наявність дефекту на внутрішній поверхні досліджуваного об'єкта наведено на рис. 2, 3. Розподіл похідної $\partial w/\partial x$ або $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу відображав деформування із площини поверхні в контрольованій зоні поверхні конуса. Локальна різка зміна величини та знаку похідної характеризує наявність дефектної зони (позначена стрілкою). Окрім закладеного дефекту у вигляді тріщини (рис. 3, в позначено літерою А), на досліджуваній ділянці поверхні конусного елемента № 2 виявлено дефект розмірами близько 5 мм в діаметрі (позначено літерою Б).

Проведені експериментальні дослідження титанових та сталевих конусних елементів (рис. 1, б, в), спрямовані на виявлення попередньо закладених дефектів в зварному шві. Дефекти мали розміри 7×2 мм (сталеві конуси) та пори менше 2 мм (титанові конуси). В якості навантаження

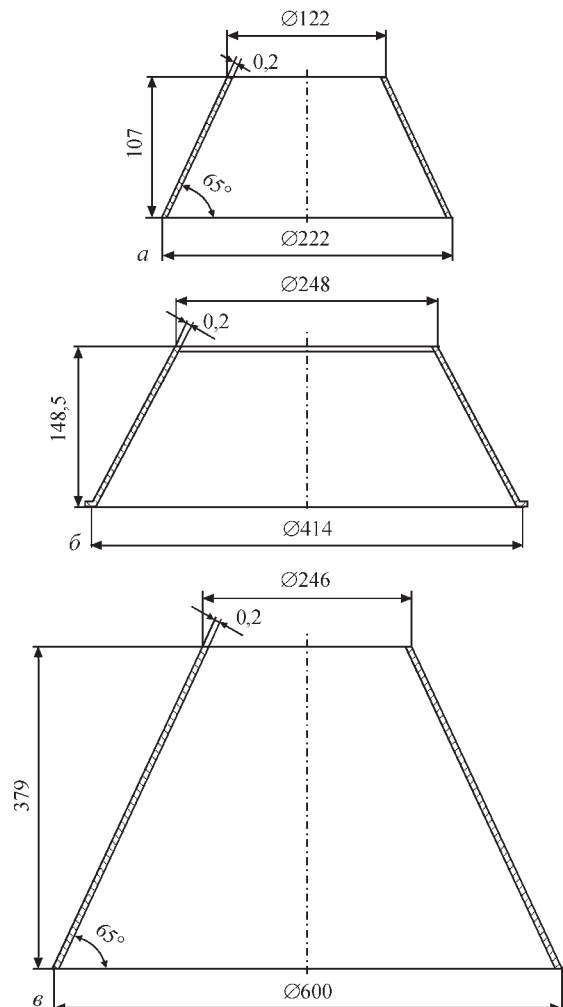


Рис. 1. Схеми контрольованих сталевих і титанових гофрованих конусних елементів (опис див. у тексті)

використовували термічний спосіб, а саме, обдув повітрям температурою близько 100 °С (для сталевих) та 150 °С (для титанових) впродовж 5...10 с.

Запис широграм здійснювали з оптичним збільшенням 2,5:1 як на стадії нагрівання, так і на стадії охолодження. Величина широзсуву уздовж напрямку ОУ дорівнювала 5 мм. Результати, які характеризують наявність дефекту на внутрішній поверхні зварного шва досліджуваного об'єкта наведено на рис. 4, б-г та рис. 5, б-г. Розподіл похідної $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу відображав деформування із площини поверхні в контрольованій зоні поверхні конуса. Локальна різка зміна величини та знаку похід-

ної на фоні регулярно відображених гофрів характеризує наявність дефектної зони (позначена стрілкою).

При конструюванні елементів та вузлів КПО, які використовують в аерокосмічній промисловості, важливими є дослідження на стійкість під навантаженням оболонок довільної форми, гладких та підкріплених, ізотропних та анізотропних, деформованих в межах та за межами пружності. У зв'язку з цим проведено експериментальні дослідження, спрямовані на розробку ширографічної технології виявлення зон втрати стійкості елементів конічних КПО під дією механічного навантаження уздовж осі конуса та термічного

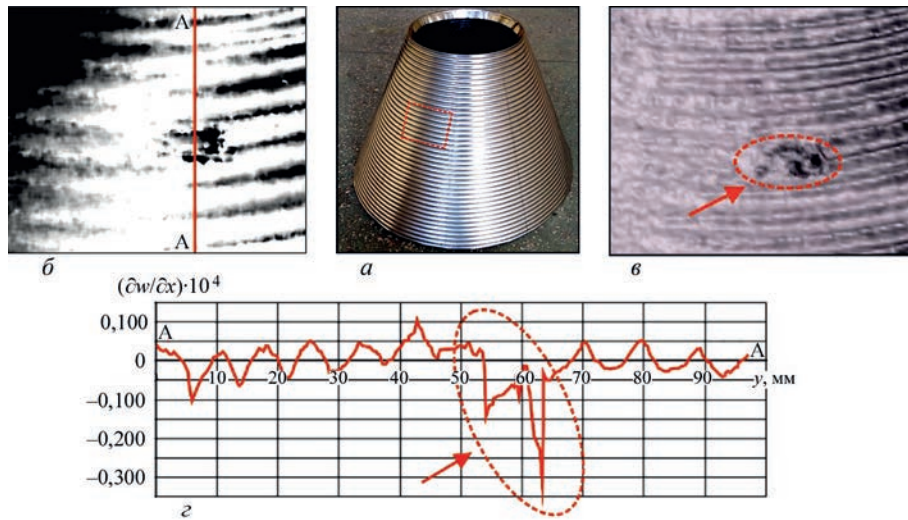


Рис. 2. Неруйнівний контроль якості титанового (ВТ1-0) конусного елемента під дією термічного навантаження (обдув повітрям температурою близько 100 °С впродовж 10 с, на стадії охолодження): а – загальний вигляд досліджуваного конусного елемента; б – широграма контрольованої ділянки з нанесеним досліджуваним перерізом А-А; в – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial y$ на досліджуваній ділянці з дефектом поверхні конуса на стадії охолодження; г – крива зміни похідної $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу А-А (місце дефекту позначене стрілкою)

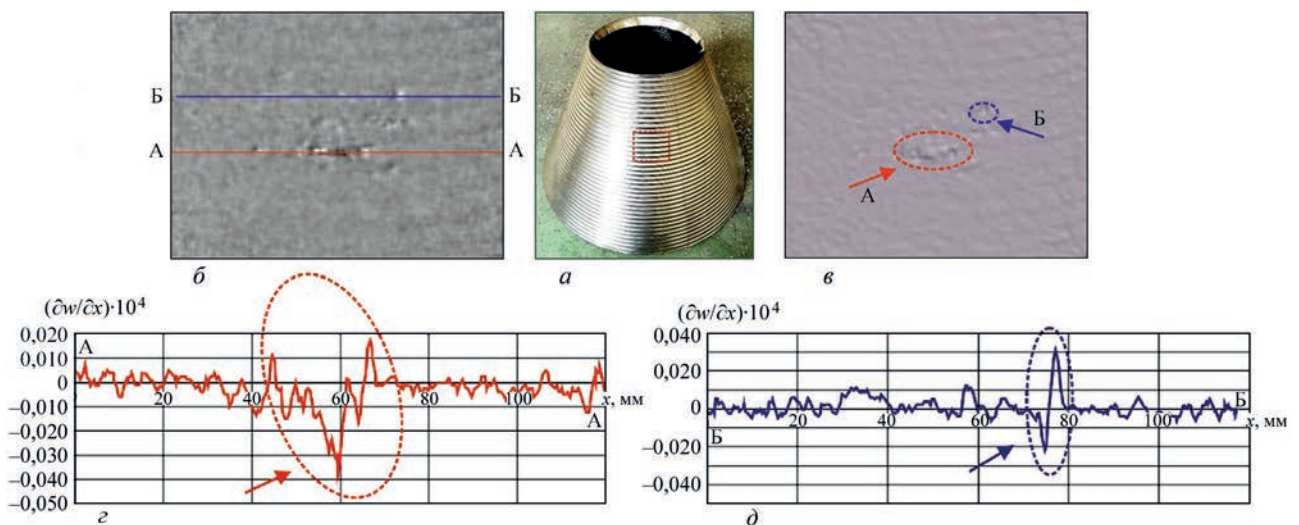


Рис. 3. Неруйнівний контроль якості титанового (ВТ1-0) конусного елемента під дією термічного навантаження (обдув повітрям температурою близько 100 °С впродовж 5 с, на стадії охолодження): а – загальний вигляд досліджуваного конусного елемента; б – широграма контрольованої ділянки з нанесеними досліджуваними перерізами А-А і Б-Б; в – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial x$ на досліджуваній ділянці з дефектом поверхні конуса на стадії охолодження; г, д – криві зміни похідної $\partial w/\partial x$ уздовж обраних перерізів А-А та Б-Б (місця дефектів позначені стрілками)

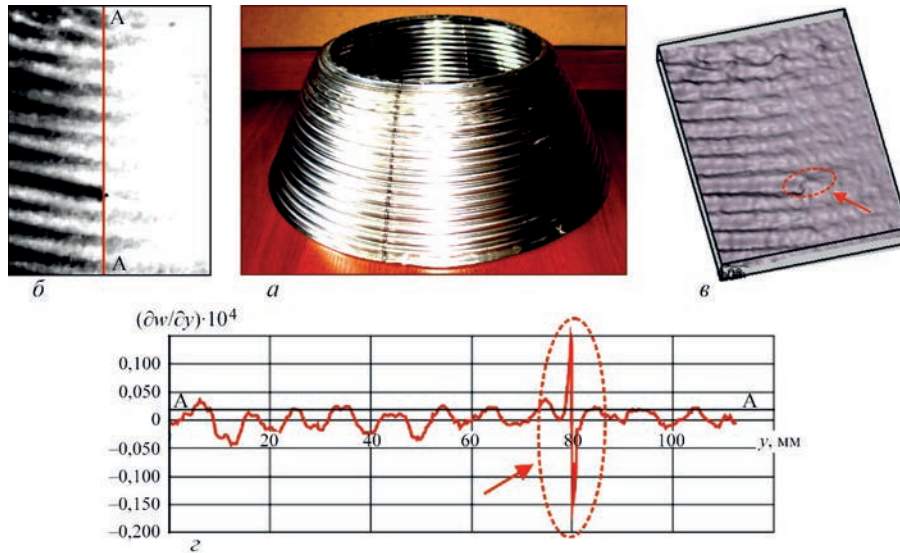


Рис. 4. Неруйнівний контроль якості сталевого (12X18H10T) конусного елемента під дією термічного навантаження (обдув повітрям температурою близько 100 °С впродовж 10 с, на стадії охолодження): *a* – загальний вигляд досліджуваного конусного елемента; *b* – широграма контрольованої ділянки з нанесеним досліджуваним перерізом А-А; *c* – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial y$ на досліджуваній ділянці з дефектом поверхні конуса на стадії охолодження; *d* – крива зміни похідної $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу А-А (місце дефекту позначене стрілкою)

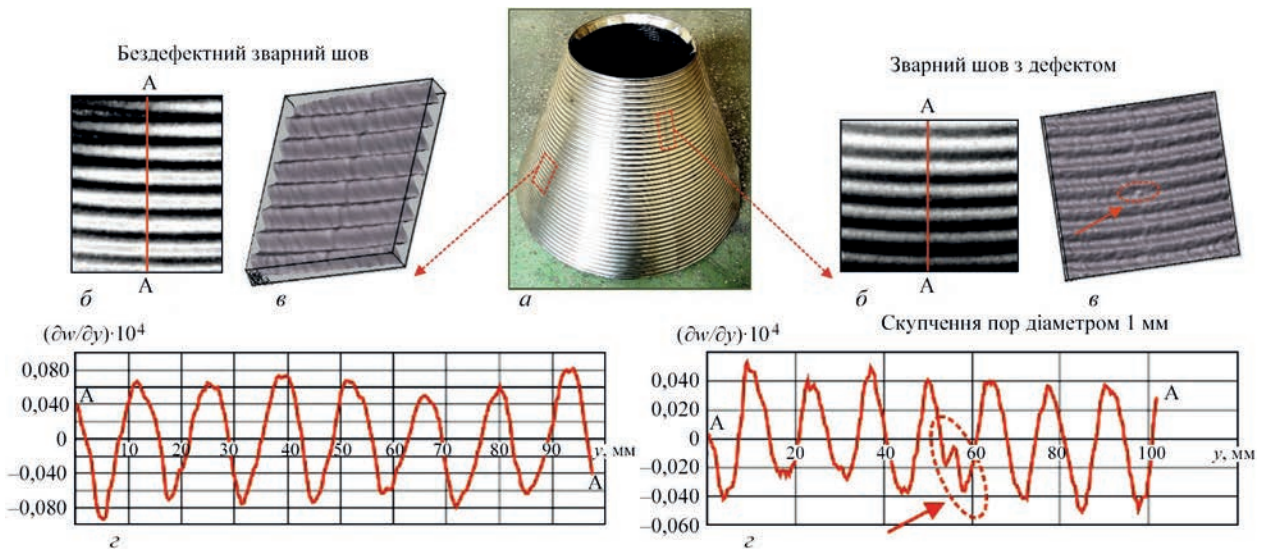


Рис. 5. Неруйнівний контроль якості титанового (BT1-0) конусного елемента під дією термічного навантаження (обдув повітрям температурою близько 150 °С впродовж 10 с, на стадії охолодження): *a* – загальний вигляд досліджуваного конусного елемента; *b* – широграма контрольованої ділянки з нанесеним досліджуваним перерізом А-А; *c* – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial y$ на досліджуваній ділянці поверхні конуса на стадії охолодження (у випадку наявності дефекту, його місце позначено стрілкою); *d* – криві зміни похідної $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу А-А (у випадку наявності дефекту, його місце позначено стрілкою)

навантаження перпендикулярного досліджуваній поверхні.

В якості об'єкта досліджувався конусний елемент, виготовлений зі сталі 12X18H10T, розмірами $\varnothing 414 \times \varnothing 248 \times 148,5$ мм, що мав 15 гофрів (рис. 1, б). Велику та малу основу конуса фіксували з використанням двох дисків, які зв'язували між собою за допомогою гвинта, розміщеного уздовж осі конуса. Застосовували навантаження шляхом вкручування гвинта, що призводило до стискання дисків. При термічному навантаженні використо-

ували промисловий фен з метою обдуву струменем теплого повітря температурою близько 100 °С впродовж 10...15 с.

Запис широграм здійснювали з оптичним збільшенням 2,5:1 як на стадії нагрівання, так і на стадії охолодження. Величина широзсуву уздовж напрямку ОУ дорівнювала 5 мм. Експерименти проводили із поступовим збільшенням стискання фіксуючих дисків та обдуву контрольованої ділянки конусу струменем теплого повітря. Отримані результати, що характеризують наявність зон

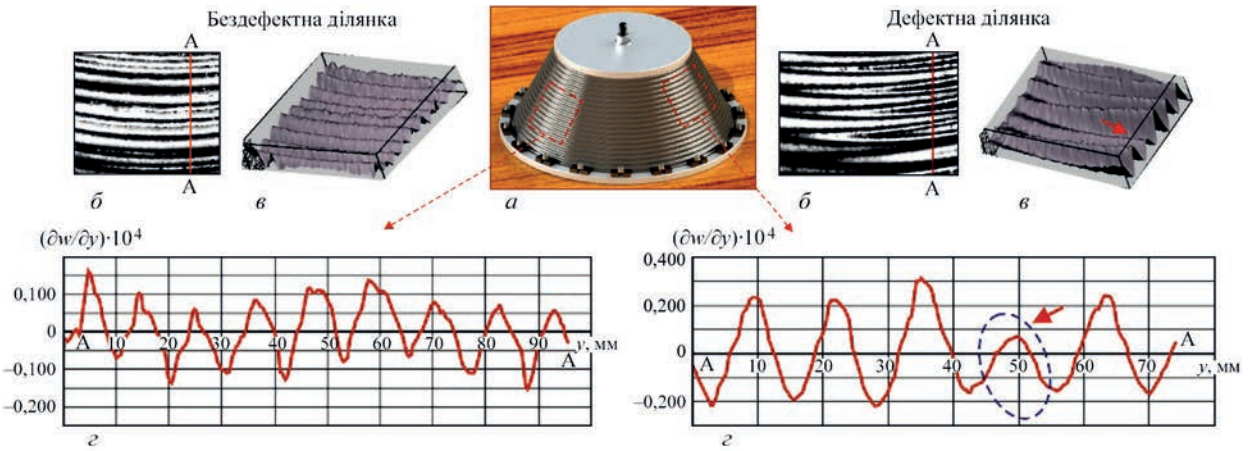


Рис. 6. Ширографічна діагностика сталевого (12X18H10T) конуса на бездефектній ділянці та із зоною втрати стійкості в одному гофрі, що знаходяться під дією комбінованого навантаження (механічне + термічне): *a* – загальний вигляд досліджуваного конусного елемента; *б* – широграми з нанесеним досліджуваним перерізом А-А на бездефектній ділянці та з дефектом, відповідно; *в* – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial y$ на досліджуваній ділянці поверхні конуса на стадії охолодження (*y* випадку наявності дефекту, його місце позначено стрілкою); *г* – криві зміни похідної $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу А-А (*y* випадку наявності дефекту, його місце позначено стрілкою)

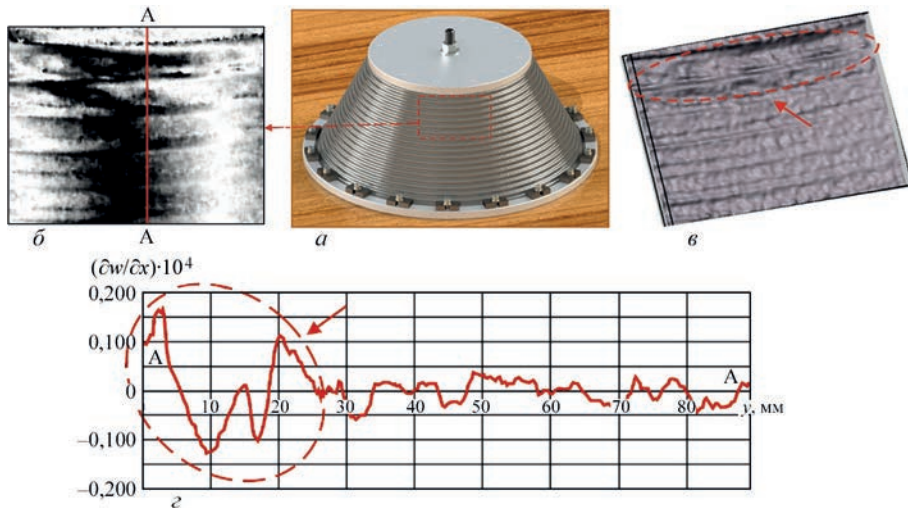


Рис. 7. Ширографічна діагностика сталевого (12X18H10T) конуса із зоною втрати стійкості, що виявлена під дією комбінованого навантаження (механічне + термічне): *a* – загальний вигляд досліджуваного конусного елемента; *б* – широграма контрольованої ділянки з нанесеним досліджуваним перерізом А-А; *в* – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial y$ на досліджуваній ділянці з зоною втрати стійкості поверхні конуса на стадії охолодження; *г* – крива зміни похідної $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу А-А (місце дефекту позначене стрілкою)

втрати стійкості досліджуваного об'єкта наведено на рис. 6, 7.

Під час розробки технології виявлення дефектних зон та контролю ділянок втрати стійкості, в якості досліджуваного об'єкта використовували конічні елементи КПО у розгорнутому вигляді. Показано, що метод електронної ширографії у поєднанні з механічним та термічним навантаженням дозволяє виявляти дефектні ділянки у вигляді корозійних пошкоджень, дефектів зварного з'єднання і зони втрати стійкості під впливом зовнішнього навантаження.

Розглянуто можливість контролю якості конічних елементів КПО у вигляді гофрованих дисків до їх розгортання, з використанням методу електронної ширографії. Проводили експеримен-

ти, спрямовані на дослідження конічних дисків зі сталі 12X18H10T та 08X18H10T розмірами $\varnothing 222 \times \varnothing 122 \times 107$ мм, що мали, відповідно, 6 та 8 гофрів (рис. 1, *a*). Для навантаження конічних дисків використовували термічний спосіб, а саме обдув струменем повітря з температурою близько 150°C , та внутрішній тиск, який здійснювали шляхом накачування або стравлювання повітря з контролем його значень за допомогою манометру, при герметизованих великій і малій основах гофрованих дисків (рис. 1).

Проведення експериментальних досліджень контролю якості елементів КПО у вигляді нерозгорнутих гофрованих дисків з використанням розробленого програмного забезпечен-

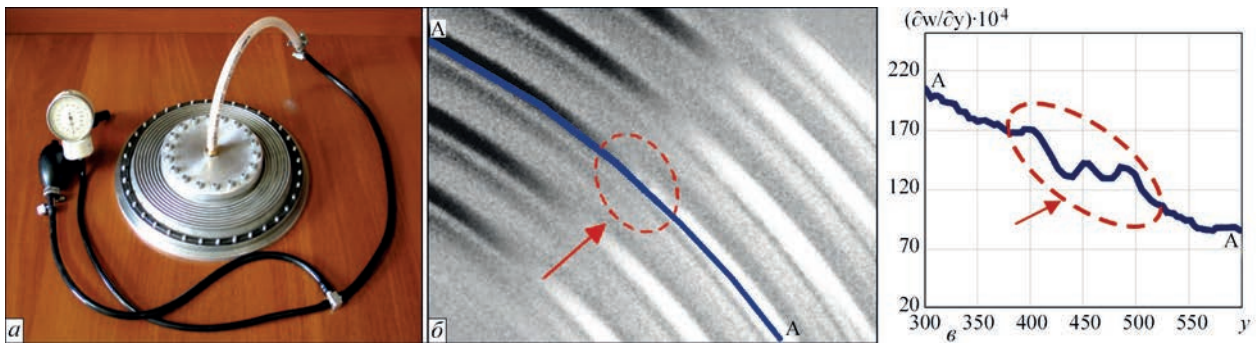


Рис. 8. Ширографічний контроль якості сталевого (08X18H10T) кінцевого складеного гофрованого диску з використанням комбінованого навантаження: *a* – загальний вигляд досліджуваного диску, зафіксованого в навантажувальному пристрої; *б* – широграма контрольованої дефектної ділянки з нанесеним досліджуваним перерізом А-А; *в* – крива зміни похідної $\partial w/\partial y$ уздовж перерізу, що співпадає з верхівкою гофра, на досліджуваній ділянці поверхні диску на стадії охолодження (дефектна ділянка позначена стрілкою)

ня дозволило виявити попередньо закладені дефекти на ділянці поверхні, що знаходиться на верхівці складеного гофра. Запис широграм здійснювався з оптичним збільшенням 2,5:1 з використанням навантаження внутрішнім тиском або комбінованого навантаження – підвантаження внутрішнім тиском до певної величини і обдув повітрям температурою близько 100 °С впродовж 5...10 с. Величина широзсуву уздовж напрямку гофра дорівнювала 3 мм. На рис. 8 наведено результати ширографічного контролю якості кінцевого нерозкритого гофрованого диску з використанням комбінованого навантаження на ділянці, що містить дефект розмірами 5×0,8 мм, який розташований у верхівці складеного гофра.

Висновки

Проведені експериментальні дослідження із застосуванням методу електронної ширографії, спрямовані на розробку технології неруйнівного контролю якості елементів та вузлів тонкостінних КПО космічного призначення при навантаженні їх термічним, механічним та комбінованим способами.

Отримані результати проведених досліджень підтвердили можливість та доцільність діагностики конусних елементів КПО з використанням методу електронної ширографії у поєднанні з термічним навантаженням при неруйнівному контролі якості та комбінованим навантаженням (механічне стискання плюс термічний обдув) для виявлення зон втрати стійкості.

Виконані експериментальні дослідження показали, що застосування методу електронної ширографії з використанням розробленого програмного забезпечення у поєднанні з навантаженням внутрішнім тиском або комбінованим методом (внутрішній тиск плюс термічний обдув) для

виявлення дефектних зон, дозволяє проводити діагностику нерозгорнутих конусних елементів КПО у вигляді гофрованих дисків.

Список літератури

1. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Волков В.С. (2011) Конструкции преобразуемого объема (Обзор). *Автоматическая сварка*, **12**, 30–39.
2. Лобанов Л.М., Волков В.С. (2014) Конструкции преобразуемого объема космической техники. *Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. Вып. 2*. Днепропетровск, ГП КБ «Южное», сс. 55–60.
3. Paton B.E., Lobanov L.M., Volkov V.S. (2015) Metal transformable-volume structures for space engineering. *Acta Astronautica*, **110**, 50–57. Doi: 10.1016/j.actaastro.2015.01.005.
4. Hung Y.Y., Ho H.P. (2005) Shearography: An optical measurement technique and applications. *Materials Science and Engineering*, **R49**, 61–87.
5. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкая Е.М., Киянец И.В. (2008) Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной ширографии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 7–13.
6. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Киянец И.В., Олейник Е.М. (2004) Методика, технология и аппаратура ширографического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций. *Там же*, **3**, 25–28.

References

1. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Volkov, V.S. (2011) Transformable structures (Review). *The Paton Welding J.*, **12**, 25-33.
2. Lobanov, L.M., Volkov, V.S. (2014) Transformable volume structures for space engineering. *Space engineering. Rocket armaments*. In: *Transact. Issue 2, Dnepropetrovsk, GP KB Yuzhnoe*, 55-60 [in Russian].
3. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Volkov, V.S. (2015) Metal transformable-volume structures for space engineering. *Acta Astronautica*, **110**, 50-57. Doi: 10.1016/J.actaastro.2015.01.005.
4. Hung, Y.Y., Ho, H.P. (2005) Shearography: An optical measurement technique and applications. *Mater. Sci. & Engin.* **R49**, 61-87.
5. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitskaya, E.M., Kiyansets, I.V. (2008) Diagnostics of structural elements and assemblies with application of the method of electron shearography. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 7-13 [in Russian].
6. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Oleinik E.M., Kiyansets, I.V. (2004) Procedure, technology and instrumentation of shearographic nondestructive testing of materials and elements of structures. *Ibid.*, **3**, 25-28 [in Russian].

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРЕОБРАЗУЕМОГО ОБЪЕМА КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ МЕТОДОМ ШИРОГРАФИИ

Л.М.Лобанов, В.А. Пивторак, И.В. Киянец, В.В. Савицкий

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

По результатам экспериментальных исследований, проведенных методом электронной широгрфии, разработана технология неразрушающего контроля качества и выявления зон потери устойчивости элементов и узлов тонкостенных конструкций преобразуемого объема космического назначения при нагрузке их внутренним давлением, термическим, механическим и комбинированным способами. Эффективность применения предложенных технологий была подтверждена при проведении экспериментов по диагностике натуральных как развернутых конусных элементов конструкций преобразуемого объема, так и неразвернутых в виде гофрированных дисков. Библиогр. 6, рис. 8.

Ключевые слова: конструкции преобразуемого объема, неразрушающий контроль качества, электронная широгрфия

NONDESTRUCTIVE TESTING OF ELEMENTS OF THIN-WALLED TRANSFORMABLE STRUCTURES FOR SPACE APPLICATIONS BY SHEAROGRAPHY METHOD

L.M. Lobanov, V.A. Pivtorak, I.V. Kiyaneets, V.V. Savitsky

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

Results of experimental studies conducted by electron shearography method were used to develop the technology of nondestructive testing of quality and detection of buckling zones in elements and components of thin-walled transformable structures for space applications at their loading by internal pressure, by thermal, mechanical and combined methods. Effectiveness of application of the proposed technologies was confirmed during performance of experiments on diagnostics of both full-scale deployed conic elements of transformable structures and non-deployed ones in the form of corrugated discs. 6 Ref., 8 Fig.

Keywords: transformable structures, nondestructive testing of quality, electronic shearography

Надійшла до редакції
20.02.2019

ХVІІІ МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2019

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

19 - 22 листопада

МЕТАЛ-БРОСКА УКОРЧУВАННЯ ГІДРАВЛІКА ПНЕВМАТИКА ВІДШИВНИКІ УКРТОР УКРИТВО УКРИРОМ АВТОМАТИЗАЦІЯ ЗРАЖКИ, СТАНДАРТИ ЕТАЛОНИ, ПРИЛАДИ ВІДОМО-ТРАНСПОРТНЕ СКЛАДСЬКЕ ОБЛАДНАННЯ БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА



ОРГАНІЗАТОР:
Міжнародний виставковий центр

Генеральний інформаційний партнер: **ОБОРУДОВАННЯ ІНСТРУМЕНТ**
Ексклюзивний медіа партнер: **ЖУРНАЛ ГОЛОВНОГО ІНЖЕНЕРА**

Технічний партнер: **ReutMedia**

IEC

Міжнародний виставковий центр
Україна, 02002, Київ
Броварський пр-т, 15
М "Лівобережна"

☎ (044) 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.мвц.укр
www.tech-expo.com.ua