



УДК 621.791: 624.07.4-436:620.191.38

Чертов І.М.¹, Літвінов О.П.²

¹ Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". Україна, Київ.

² Приазовський державний технічний університет. Україна, Маріуполь

КИЇВСЬКІ ШКОЛИ ЗВАРЮВАННЯ У ВИРІШЕННІ ПРОБЛЕМ ТОЧНОСТІ РОЗМІРІВ РАКЕТНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Анотація

З середини минулого століття в провідних країнах світу було розгорнуто виробництво потужних ракет-носіїв. Над проблемами зварювання на замовлення ракетобудівників серед інших ефективно працювала кафедра зварювання КПІ, де проводилися дослідження деформації складних несучих конструкцій. Було встановлено залежності деформацій від основних умов зварювання та запропоновані технологічні заходи щодо їх запобігання.

Abstract

Production of high-capacity carrier rockets was deployed in leading countries of the world starting from the middle of the last century. Among other institutions, the Welding Chair of the Kyiv Polytechnic Institute and Paton welding Institute, involved in research on deformations of complex load-carrying structures, was efficiently working on the problems of welding by request of rocket producers. Dependencies of deformations upon the main welding conditions were derived, and technological arrangements were suggested for elimination of the deformations.

Технології сучасного ракетобудування нараховують більш півстоліття. У виготовленні цих

складних інженерних споруд застосовують сучасні види зварювання, які удосконалювалися спеціалістами різних організацій, у тому числі й спеціалістами Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона, НТУУ "КПІ", Приазовського державного технічного університету, конструкторами та технологами ракетобудівної галузі тощо. Ними були виконані різноманітні й досить важливі наукові дослідження. На протязі більш ніж 20-ти років науковці удосконалювали заходи попередження деформацій й напружень, розробляли нові технології складання конструкцій, запроваджували технології покращення якості метала шва.

Результати досліджень були свого часу надруковані у відкритих наукових часописах. Але в публікаціях того часу було заборонено вказувати область застосування результатів, зокрема посилатися на ракетобудівну галузь. Метою цієї публікації є ознайомлення широкого кола спеціалістів із деякими науковими роботами — внеском зварників Київських наукових шкіл, що їх виконано на замовлення ракетобудівників. Тому сьогодні визначити які з досліджень виконувалися саме для ракетобудування краще робити самим учасникам робіт з використанням довідкових, мемуарних та інших джерел. Іншою метою цієї роботи є аналіз досліджень, що їх зробили київські науковці для забезпечення необхідної точності зварних ракетних конструкцій.

Перш за все роботи київських зварників почалися на замовлення дніпропетровських ракетобудівників. В 1951 р. в м. Дніпропетровську на базі автомобільного заводу було створено завод по виготовленню ракет-носіїв по проектам С.П. Корольова. Прототипом його першої ракети Р-1 була відома німецька ракета часів другої світової війни "Фау-2" В. Брауна. Технологія виробництва також копіювала німецькі технології. Це було не дуже вдале рішення, тому при випробуваннях траплялися аварії. Але випуск ракет Р-1 і Р-2 нарощувався. З 1954 р. КБ "Південного машинобудівного заводу" було перетворено в Особливе конструкторське бюро "Південне" і головний конструктор М.К. Янгель почав самостійну роботу по створенню нових типів ракет-носіїв і космічних літальних апаратів [1]. Над проблемами виготовлення ракет-носіїв працювали десятки науково-дослідних інститутів,

лабораторій, підприємств. В 1966 р. для вирішення специфічних проблем ракетно-космічної техніки в м. Дніпропетровську було створено академічний підрозділ – Сектор проблем технічної механіки.

Зварювання із самого початку створення сучасних ракетно-космічних конструкцій стало провідною (разом з паянням – незамінною) технологією з'єднання [2]. Але при всіх способах зварювання плавленням можуть виникнути такі дефекти, як деформування, короблення деталей й внутрішні напруження, які в більшості випадків суттєвим чином впливають на експлуатаційно-технічні показники виробів [3]. Відповідальними вузлами ракет-носіїв, до якості виготовлення яких пред'являються особливі вимоги (точності розмірів, міцності та ін.), є паливні баки, які одночасно служать як елементи корпусу (рис. 1) [1]. Спрощено типову зварну конструкцію баків можна представити як велику шарову або циліндричну обичайку (діаметром у середньому 2...4 метри), що стикується з двома днищами через шпангоути, одним, чи декількома люками; все – з алюмінієвих сплавів [3]. При виготовленні зварюють повздовжні шви обичайки, кругові шви, що з'єднують штамповані днища із обичайками, вварюють штамповані горловины люків (фланців) у обичайки (рис. 2) [4]. До того ж корпусні конструкції мають багато інших

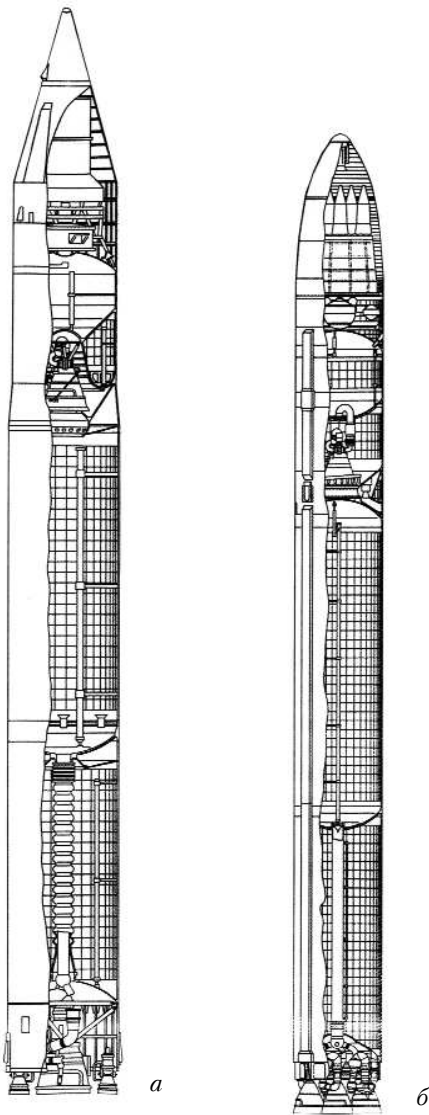


Рис. 1. Компонівка ракет-носіїв КБ "Південне":
а – 15А11 системи "Периметр"; б – 15А18М ракетного комплексу Р-36М2 "Воевода"

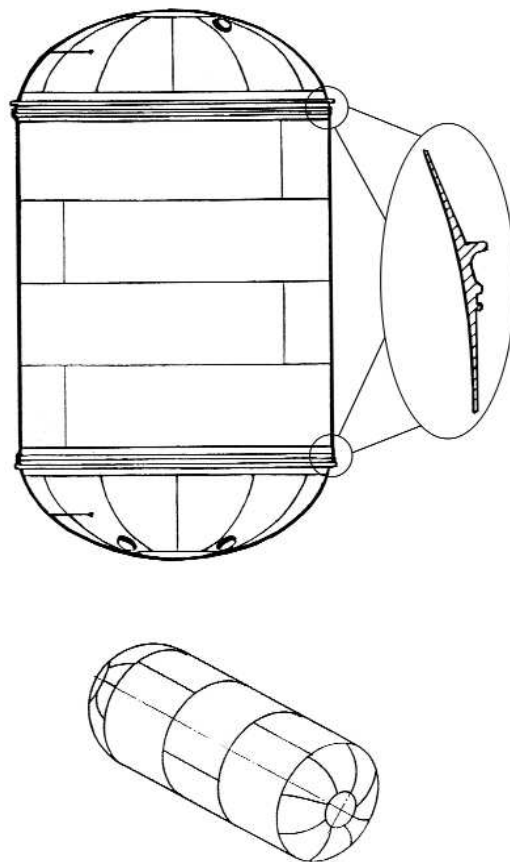


Рис. 2. Схеми бака ракети-носія

вузлів, що їх приварюють. У процесі виконання такої роботи деформуються фланці, обичайки, сферична оболонка.

Тонкостінні оболонкові конструкції, особливо великогабаритні, мають зварні з'єднання, що перехрещуються у різних напрямках, а також з'єднання врізних елементів. Саме в таких конструкціях з пониженою жорсткістю листових елементів оболонки виникають великі деформації — переміщення, що направлені перпендикулярно к вихідному положенню частки конструкції біля шву (зони термічного впливу) і самого шва, метал якого застигаючи, стискується. При наступному зниженні температури металу шва показники механічних якостей підвищуються и в зварному з'єднанні виникають значні зусилля по переміщенню. На час повного застигання (19-я и 20-я хвилини) переміщення зупиняються. Фланці отримують еліпсність, у них мають місце перекося й зсуви осей; самі циліндри й оболонки згинаються та втрачають свою первісну форму (рис. 3). Сукупність всіх видів деформацій і неточності виготовлення призводять до відхилення геометрії звареної конструкції від проектної. Одним з найпоширеніших дефектів є прогин оболонки й значне переміщення її до центра осі циліндру або центра сфери, що відбувається в результаті зварювання. Особливо несприятливий випадок — вварювання групи фланців, коли внаслідок

накладення полів напружень та деформацій зростає прогин оболонки і нерівномірність розподілу його по різних напрямках [5, 6]. Зрозуміло, що зміна форми і розмірів при деформуванні оболонки ракет, баків для пального, рульових пристроїв та інших елементів неприпустимо. Інакше ні про яку точність попадання та міцність самої ракети не може бути й мови.

Багатьма спеціалістами ряду країн серед інших досліджень було вивчено вплив технологічних факторів, зокрема форми шва і умови формування валика, на міцність з'єднання. Але ці дослідження не давали можливості визначити стабільність і міцність всієї конструкції в цілому. В дослідженні проблем і удосконаленні технологій зварювання несучих конструкцій ракет, що їх активно виготовляли по проектам С.П. Корольова на заводі "Прогресс" у м. Куйбишеві (зараз м. Самара) та по проектам М.К. Янгеля і О.М. Макарова на підприємстві "Південмаш", вже з середини 1950-х років почали займатися в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона й на зварювальному факультеті (з 1954 р. — кафедра зварювального виробництва) Київського політехнічного інституту (тепер НТУУ «КПІ»). Вивчення деформацій і напруг при зварюванні було одним з основних напрямків досліджень, що їх успішно проводили викладачі і аспіранти кафедри під керівництвом І.П. Трочуна та І.М. Жданова [7].

Було розроблено декілька типів деформометрів. В КПІ і ІЕЗ ім. Є.О.Патона було створено механічні деформометри, що мають важливу вимірювальну систему, дані з якої передаються індикаторам годинникового типу, системі дзеркал, а також індуктивні датчики, механотронні, пневмоконтактні перетворювачі з манометрами або інші перетворювачі в вимірювальних системах. Для дослідження деформацій на протязі часу було застосовано електротензометрію за допомогою тензорезисторів [8]. В Гольяттинському політехнічному інституті В.І. Столбовим із співробітниками на замовлення ракетобудівного

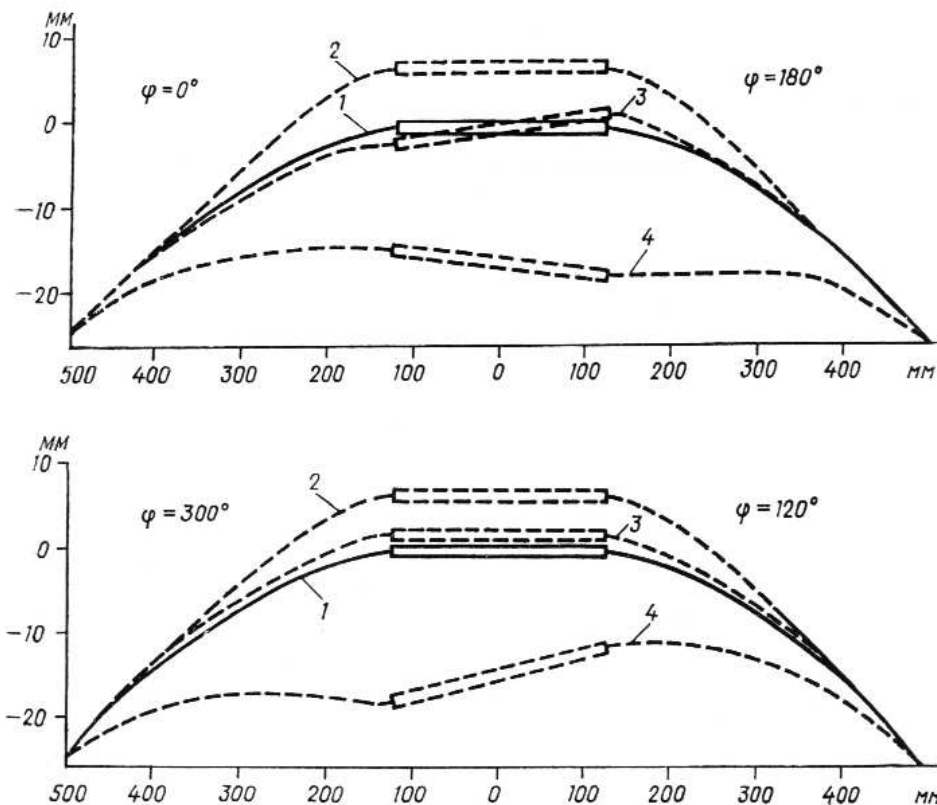


Рис. 3. Деформації від вварювання фланців

заводу "Прогресс" було розроблено конструкцію датчика з фоторезистором, що перетворює переміщення в електричний сигнал. Цей деформометр побудовано так, що він показує переміщення крайок в процесі зварювання [9]. В КПІ А.К. Гончаром та іншими розроблена методика и прилад для вимірювання деформацій і напружень у глибині металу, що заснована на вимірюванні змін діаметрів отворів на різних фіксованих рівнях по товщині виробу. Загальний стан розподілу напружень в елементах конструкцій визначають на моделях за допомогою поляризаційно-оптичного методу, що його запропоновано в ІЕЗ ім. Є.О. Патона Л.М. Лобановим та ін. Експериментальні дослідження покладені в основу методів розрахунків і очікування деформацій і напруг. Слід відмітити, що в створення цього напрямку науки про міцність зварних конструкцій зробили також вчені з наукової школи Г.О. Ніколаєва (В.О. Вінокуров, В.М. Сагалевич та ін).

Метою досліджень було досягнення точних розмірів зварних конструкцій, зокрема ракетних і суднових. Труднощі полягали в тому, що конструкції мали досить великі габарити при відносно тонких стінках оболонок, а також в складних фізико-хімічних якостях конструкційних матеріалів. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона було досліджено види зварювальних деформацій при виготовленні полих сферичних оболонок із сплаву АМг6 меридіональними швами [10, 11]. На виконання завдання ракетобудівників, в КПІ досліджувалися часові переміщення ділянок полих сферичних оболонок зі сплаву АМг6 товщиною 10 мм при вварюванні фланцю діаметром 270 мм круговим стиковим швом. Досліди проводились на сферичних зразках 1000×1000 мм в плані з радіусом кривизни 600 мм. Фланець приєднували аргонодуговим зварюванням неплавким електродом [12]. Крім досліджень, що їх виконували фахівці київських наукових шкіл зварювання, деформації вивчали й спеціалісти інших установ. Так за допомогою метода умовних пластичних деформацій було здійснено чисельний аналіз розподілу напруг у поверхні деформованих пластин; встановлено, що з підвищенням радіусу диска радіальні напруження знижуються, а окружні – збільшуються [13].

Знання характеру можливих деформацій дозволяють ще на стадії проектування вносити корективи, що необхідні для забезпечення точності розмірів, вибрати необхідне технологічне оснащення і технологію виготовлення. Тому теоретичні і експериментальні вирішення поточних питань продовжувалися і в наступні роки. Разом із спеціалістами заводу "Прогресс" фахівцями КПІ і ІЕЗ ім. Є.О. Патона в 1970–80-х роках було досліджено деформації циліндричних обичайок

реальних натурних зразків ракетної техніки, спроектованої в КБ С.П. Корольова (з сплаву АМг6 товщиною до 10 мм, діаметром 500 мм, довжиною 1000 мм). При зварюванні повздовжних швів доведено, що способи попереднього розтягування, які використовують на виробництві, не є ефективними і не забезпечують гарантованої якості з'єднання. Було запропоновано схему прикладання активних зусиль саме в межах ширини зони, в якій очікуються пластичні деформації. При автоматичному аргонодуговому зварюванні по запропонованій технології ширина зони пластичної деформації знизилася з 90 мм до 70 мм з відносними розмірами від 0,40% до 0,25% відповідно [14, 15].

Особливу складність в виготовленні паливних баків ракетних конструкцій являє собою процес зварювання фланців в бік циліндрової оболонки. Лінія з'єднання проходить на циліндричній поверхні з радіусом кривизни 800...1000 мм і має еліптичну форму, що її отримують при вирізанні отвору для фланцю діаметром 300 мм. При виконанні кругового з'єднання такого незручного контуру виникали неприпустимі деформації і напруження у зоні зварювання, що загрожували аваріями при запуску ракет-носіїв. До вирішення цієї важливої проблеми в 1960-х роках були залучені фахівці кафедри зварювального виробництва КПІ І.М. Жданов, І.М. Чертов, А.С. Карпенко та інші, які дослідили рівень деформацій і напружень, встановили залежність від різних умов підготовки і зварювання і запропонували виконувати пружний вигін оболонки, щоб забезпечити попередні розтягування і значно зменшити залишкові зварювальні деформації [16]. Застосування навмисного вигину заготовок дало загальне зниження залишкових деформацій і напружень у зоні зварювання (рис. 4). Для того, щоб дослідити залежність міцності від техніки зварювання і впливу умов підготовки великогабаритних вузлів ракет, в ІЕЗ ім. Є.О. Патона Л.М. Лобановим і Б.А. Стебловським були запропоновані і виконані експерименти з різними формами формуючих пристроїв. Було знайдено найкращі варіанти пристроїв, що впроваджені на заводах галузі (рис. 5) [17]. Виправлення деформованих тонкостінних оболонок запропоновано виконувати в матриць-підкладці за допомогою імпульсного місцевого навантаження [18].

Подальші дослідження і розроблення необхідних програм визначення рівнів можливого зміщення люків, що вварюють, дозволяє компенсувати зварювальні деформації. На наукових засадах були запропоновані раціональні технології, що дозволили знизити трудомісткість виготовлення конструкцій і забезпечити достатню якість. Було вивчено переміщення оболонок під впливом вва-

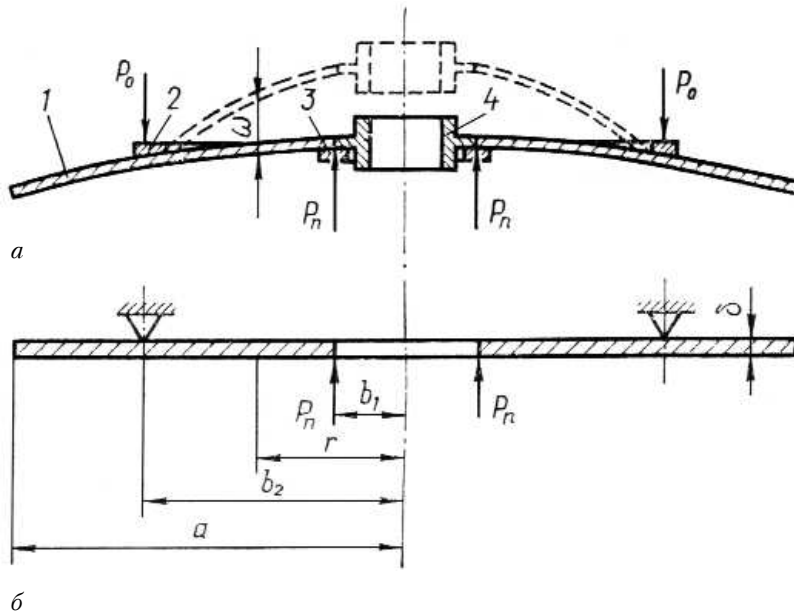


Рис. 4. Схема пружного вигину:
 а – принципова, б – розрахункова

ривання окремо розташованих фланців, а також групи фланців [19]. Криві розподілу прогинів були побудовані з урахуванням статистичного оброблення результатів вимірів. Дослідні роботи з вивчення способів виключення зварювальних деформацій й напружень показали, що найбільш ефективним способом є навмисний вигін крайок оболонок в бік, протилежній деформації, що очікується. Вихідними даними для проектування компенсації прогинів шляхом застосування пластичного вигину крайки оболонки під фланець були величина й характер переміщень елементів, що з'єднуються. Було запропоновано також засто-

сування спеціальних пристроїв, що заважали деформації конструкцій у процесі зварювання [16].

Для вибору технології, що забезпечує мінімальні залишкові напруження та деформації в процесі виготовлення конструкції, важливе значення має порівняльна оцінка напружено-деформованого стану при зварюванні різними способами. Таке зіставлення доцільно проводити при оптимальних умовах для кожного зі способів відповідно до прийнятих у виробничій практиці режимах [20]. Виходячи з того, що при утворенні деформацій і напружень у з'єднанні визначальним фактором є зміна температурного стану, що помітно залежить від способу зварювання, у роботі наведені експериментальні результати порівняльної оцінки напружено-деформованого стану при зварюванні вузьких пластин: плавким

електродом, вольфрамовим електродом і плазмовою дугою. При плазмовому зварюванні поперечна деформація найменша й розподілена по перетину більш рівномірно, ніж при зварюванні плавким або вольфрамовим електродом. Слід зазначити, що на осі шва поперечна деформація приблизно дорівнює поздовжній і становить при зварюванні плавким електродом 0,16%, вольфрамовим 0,13% і плазмовою дугою 0,12%. Розподіл деформацій і напружень свідчить про те, що в середній частині з'єднання виникає плаский напружений стан, причому метал шва випробує двохосьове розтягування зі співвідношенням

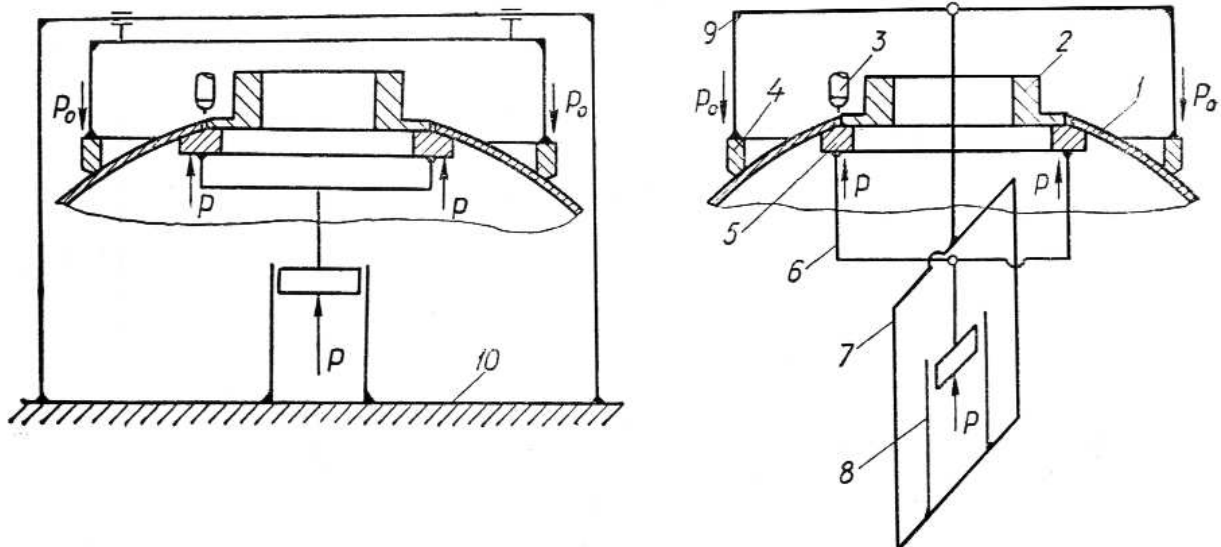


Рис. 5. Принципові схеми пристроїв для вварювання фланців у сферичні оболонки

подовжніх і поперечних напружень близьким до одиниці. Зона пластичної деформації мінімальна при зварюванні плазмовою дугою (110 мм) і максимальна при зварюванні плавким електродом (172 мм). Крім того, залежно від способу зварювання змінюється не тільки ширина зони пластичних деформацій, але і їхня величина (рис. 6) [20].

Багаторічні масштабні дослідження напружень і деформацій крупнопанельних конструкцій (в першу чергу судових та авіаракетної техніки) було підсумовано в монографії, яка підготовлена в 1986 році співробітниками зварювального факультету КПІ [21]. Додатковою перевагою цієї роботи є те, що вона відповідає вимогам навчального посібника. На протязі більше ніж 20-ти років науковці впроваджували нові більш ефективні досконалі прийоми боротьби із деформаціями й напруженнями, розробляли нові технології складання конструкцій, запроваджували технології покращення якості металу шва. Було вивчено переміщення оболонки під впливом вварювання окремо розташованих фланців, а також групи фланців. Проблеми деформацій, герметичності та міцності ракетних конструкцій, що їх вивчали в КПІ, привертала увагу ще й на початку ХХІ століття, застосовуючи новітні методи досліджень.

Висновки

Над проблемами зварювання на замовлення ракетобудівників серед інших ефективно працювала кафедра зварювального виробництва КПІ, де

проводилися дослідження деформації складних несучих конструкцій.

1. В КПІ спеціалістами зварювального факультету виконано дослідження зварювальних деформацій і напружень на замовлення ракетобудівної галузі, зокрема КБ "Південне", Південного машинобудівного заводу, заводу "Прогрес". Частина досліджень і пропозицій зроблено разом із співробітниками Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона та робітниками зварювальних відділів КБ і підприємств галузі.

2. Дослідження виконували на зразках-імітаторах різних вузлів ракетних і судових конструкцій із застосування розроблених або удосконалених на зварювальному факультеті механічних деформометрів годинникового типу, пневмоконтактних перетворювачів, електротензометрів та інших приладів.

3. Встановлено залежності деформацій від основних умов зварювання, розміри деформацій на зразках і виробках, що дало змогу розробити заходи щодо їх запобігання, запропонувати технологічні заходи щодо зменшення деформацій та напружень до мінімально дозволених норм.

4. Були виконані порівняльні дослідження впливу способів зварювання на температурний стан металу в зоні з'єднання, встановлені розміри деформацій і залишкових напружень в залежності від умов підготовки та зварювання конструкцій, розроблені оптимальні режими технологій виготовлення паливних баків та подібних конструкцій.

Литература

1. *Привзаны временем*. От противостояния к международному сотрудничеству / Под общ. ред. С.Н. Колюхова. — Д.: АРТ-ПРЕСС, 2004. — 768 с.

2. *Трочун И.П.* Внутренние усилия и деформации при сварке. — М.: Машгиз, 1964. — 180 с.

3. *Ракеты и космические аппараты* Конструкторского бюро "Южное". Днепропетровск: ГKB "Южное" им. М.К. Янгеля, 2000. — 239 с.

4. *"Секретный"* підрозділ галузі: Нариси історії фізико-технічного інституту Дніпропетровського національного університету / Редкол. — М.В. Поляков (керівник). — Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2001. — 376 с.

5. *Сагалевич В.М., Вершинский А.В.* Перемещение сферической оболочки при сварке

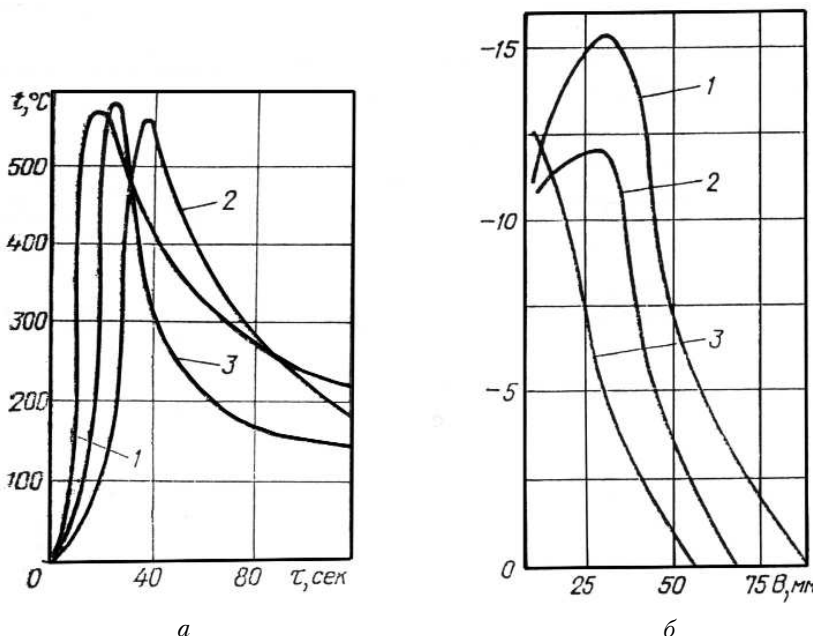


Рис. 6. Температурні цикли (а) і пластичні деформації (б) від зварювання: 1 — аргондуговим плавким електродом, 2 — аргондуговим вольфрамовим електродом, 3 — плазмовим способом



круговых швов./Сб.: Остаточные напряжения и прочность сварных соединений. — М: Машиностроение, 1969. — С. 18–35.

6. *Остаточные деформации при варке фланцев в пологие сферические оболочки* /А.А. Казимиров, А.Я. Недосека, И.В. Пархоменко, Л.М. Лобанов, Г.Л. Зубриенко //Автомат. сварка, 1972. — № 3.

7. *Гапченко М.Н.* Подготовка кадров по сварочному производству в Киевском ордена Ленина политехническом институте //Автогенное дело, 1951. — № 5. — С. 24–27.

8. *Касаткин Б.С., Кудрин А.Б., Лобанов Л.М.* Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справочное пособие. — К.: Наук. думка, 1981. — 583 с.

9. *Столбов В.И., Осянкин Г.В., Гевлев В.А.* и др. Датчик для регистрации смещения свариваемых кромок// Автомат. сварка — 72. — № 9. — С. 75–76.

10. *Недосека А.Я., Козулин Г.П., Моисеенко В.П.* Поперечные укорочения листовых конструкций из алюминиевых сплавов //Там же. — 1966. — № 12. — С. 12–17.

11. *Лобанов Л.М., Павловский В.И., Касаткин Б.С.* Расчет напряжений и деформаций сферической оболочки //Там же. — 1983. — № 2. — С. 1–10.

12. *Лобанов Л.М., Павловский В.И., Касаткин Б.С.* Исследование особенностей образования напряжений и деформаций при выполнении круговых сварных соединений в оболочках из алюминиевых сплавов // Там же. — 1983. — № 4. — С. 1–10.

13. *Характер* развития деформации при варке фланца в сферическую оболочку /И.М. Чертов, И.М. Жданов, А.С. Карпенко, Е.А. Коршенко, В.М. Прохоренко // Там же. — 1973. — № 11. — С. 73–74.

14. *Осадчук В.А., Цимбалюк Л.И.* Розподіл залишкових напружень у шарі з увареним циліндричним диском. //Фіз.-хім. матеріали. — 2003. — 39. — № 2. — С. 66–70.

15. *Влияние* предварительного упругого выгиба на деформации сферической оболочки при варке фланцев / И.М. Жданов, И.М. Чертов, А.С. Карпенко и др.//Автомат. сварка, 1974. — № 6. — С. 31–33.

16. *О параметрах* предварительного упругого выгиба применительно к сферическим оболочкам / Л.М. Лобанов, В.И. Махненко, Е.А. Великоиваненко и др.// Там же. — 1988. — № 9. — С. 1–4.

17. *Стебловский Б.А., Лобанов Л.М.* Влияние формы шва на прочность сварных соединений сплава АМг6 //Там же. — 1974. — № 7. — С.44–46.

18. *Чертов И.М., Карпенко А.С., Зубриенко Г.Л.* Деформации и напряжения при сварке с предварительным растяжением продольных швов цилиндрических обечаек из сплава АМг6. //Там же. — 1980. — № 5. — С. 31–33.

19. *Эффективность* импульсного нагружения для правки тонкостенных сварных конструкций электрогидроимпульсным методом /В.И. Махненко, В.М. Шекера, Н.Н. Фортунатова, А.С. Шкатов и др. //Там же. — 1980. — № 5. — С. 8–11.

20. *Сравнительная* оценка напряженно-деформированного состояния при сварке встык узких пластин из сплава АМг6 /И.М. Чертов, Н.К. Мякий, И.М. Жданов, В.М. Прохоренко, Е.А. Коршенко, А.С. Карпенко (КПИ). Б.С. Касаткин, Л.М. Лобанов, Б.А. Стебловский, А.Н. Корниенко. //Там же. — 1972. — № 7. — С. 32–37.

21. *Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М.* Напряжения и деформации при сварке. — К.: Вища школа, 1987. — 246 с.