

УДК 539.3

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОСУДИН СФЕРИЧНОЇ ФОРМИ З ЛИСТОВОЇ СТАЛІ ШЛЯХОМ ГІДРОФОРМУВАННЯ

П. П. Гонтаровський, канд. техн. наук

gontarpp@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8503-0959

Н. В. Сметанкіна, д-р техн. наук

nsmetankina@ukr.net

ORCID: 0000-0001-9528-3741

Н. Г. Гармаш, канд. техн. наук

garm.nataly@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4890-8152

І. І. Мележик, канд. техн. наук

melezhyk81@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8968-5581

Т. В. Протасова, канд. техн. наук

tatyprotasova@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1489-2081

Інститут енергетичних машин і систем
ім. А. М. Підгорного НАН України,
61046, Україна, м. Харків,
вул. Комунальників, 2/10

Надійшла і безпечна експлуатація посудин, наповнених газом або рідиною під високим тиском, потребує виконання певних вимог до їх міцності. Важливим також є зниження ваги й матеріалоемності. Численні галузі промисловості, серед яких автомобілебудування, хімічне машинобудування, ракетно-космічна промисловість, що масово поставляють продукцію, для виготовлення компонентів ефективно використовують технологію гідроформування, що являє собою процес обробки металів, при якому конструкції складної форми створюються за допомогою тиску рідини й обмеження переміщень замість традиційних механічних навантажень (або у поєднанні з ними). Успішне впровадження цієї технології стає можливим завдяки перевагам, які має гідроформування порівняно з традиційними методами, такими, як збірка штампунків за допомогою зварювання. У даній роботі пропонується моделювання виготовлення посудин сферичної форми з листової сталі шляхом гідроформування. Використовується розроблене на основі методу скінченних елементів програмне забезпечення, що дозволяє розв'язувати пружнопластичні задачі термомеханіки шляхом кроків за часом або навантажень у поєднанні з ітераційним процесом на кожному з них, у ході якого уточнюється геометрія деформованої деталі. Для опису напружено-деформованого стану застосовується логарифмічна міра деформації, яка дає змогу відобразити реальні процеси, що відбуваються у заготовці. Пластичні деформації враховуються за допомогою деформаційної теорії. Завдяки комп'ютерному моделюванню технології гідроформування одержано моделі сферичної форми, які мають найменшу металоємність при високому тиску. Отримані моделі посудин деформуються пружно при повторному навантаженні за рахунок підвищення границі текучості матеріалу, тому не зазнаватимуть пошкоджень від малоциклової втоми. Вони можуть бути використані в аерокосмічній техніці як паливні баки для зрідженого кисню чи фтору та водню. Комп'ютерне моделювання процесу гідроформування дозволяє швидше і дешевше встановити параметри посудин різноманітних розмірів і з різних матеріалів, а також, не вдаючись до багаторазових експериментальних спроб, отримати прийнятний результат.

Ключові слова: гідроформування, пружнопластична задача, метод скінченних елементів, логарифмічна міра деформації.

Вступ

Сталеві балони, наповнені газом або рідиною, що працюють в умовах високого тиску, повинні задовольняти поставленим вимогам до їх міцності і безпеки експлуатації. При незначному об'ємі досить часто вони мають велику вагу. Одним із найбільш відповідальних і дорогих вузлів ракетно-космічної техніки, для яких значущим чинником виступає зменшення ваги, є паливні баки ракет-носіїв, дослідження міцності яких – ключова й актуальна задача [1–3]. Посудини сферичної форми при заданому тиску мають мінімальну металоємність і рівномірний розподіл напружень у стінках. Крім того, для них характерне максимальне відношення об'єму до площі поверхні, що дуже важливо при збереженні рідин чи зріджених газів при низьких температурах від нагрівання з боку навколишнього середовища.

Пропонується комп'ютерне моделювання технології виготовлення посудин за формою, близькою до сферичної, із сталевих листів шляхом гідроформування [4] – відносно нового процесу обробки металів тиском, який має багато переваг над традиційними процесами холодного штампування, зокре-

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.

© П. П. Гонтаровський, Н. В. Сметанкіна, Н. Г. Гармаш, І. І. Мележик, Т. В. Протасова, 2025

ма, дозволяє створювати складніші компоненти за меншу кількість операцій. Для певних геометричних форм технологія гідроформування дає змогу створювати деталі, які мають меншу вагу, підвищену границю текучості матеріалу, дешевші у виробництві й можуть бути виготовлені з меншої кількості заготовок, завдяки чому залишається менша кількість матеріальних відходів.

Крім того, процес гідроформування має низку переваг над іншими процесами формування, що допомогло йому знайти широке застосування в різних галузях. До переваг технології відносять: можливість створення елементів, що обертаються, потоншення стінок [5], покращення механічних властивостей, якісніша обробка поверхні [6], менша кількість компонентів, необхідних для складання конструкції [7], а також менша кількість необхідних доопрацювань, завдяки створенню геометрії, ближчої до необхідної кінцевої форми [8]. Ці переваги передусім пов'язані зі здатністю робочої рідини рівномірно чинити тиск на всю поверхню матеріалу, а також з можливістю обладнання змінювати тиск рідини під час циклу формування на основі оптимізованої траєкторії навантажень.

Гідроформування використовується в багатьох галузях виробництва [8–10], включаючи автомобільну й аерокосмічну промисловість, для виготовлення компонентів, які інакше було б важко або неможливо сформувати [11–13]. Тиск рідини дозволяє рівномірніше деформувати матеріал і створювати тиск у напрямках, відмінних від напрямку формування, що дає змогу одержувати додаткові промислові можливості. Таким чином, гідроформування заповнює виробничу прогалину, забезпечуючи вищу формованість матеріалу, ніж звичайне холодне формування [8], при менших затратах і тривалості циклу порівняно з іншими спеціалізованими й нетрадиційними технологіями формування листового металу, такими як суперпластичне формування або формування повзучістю [14].

Постановка задачі моделювання виготовлення посудин сферичної форми з листової сталі гідроформуванням

Спочатку пропонується виготовити шляхом штамповки два еліптичні днища з відношенням діаметра D до глибини H , рівним чотирьом, що найбільш поширені в хімічній промисловості і технологія виробництва яких добре налагоджена. Потім із сталюого листа товщиною h вирізається смуга шириною приблизно $0,415 D$ і довжиною πD , далі шляхом вальцювання виготовляється циліндрична обичайка діаметром D , яка зварюється по висоті одним швом. Висота циліндричної обичайки шляхом розрахунків добирається таким чином, щоб посудина набувала сферичної форми при якомога меншому тиску під час гідроформування, що зберігає від руйнування зварні шви. Обидва днища приварюються з обох сторін до циліндричної обичайки, після чого зварні шви зачищаються від нерівностей. Зварні шви повинні бути високої якості і для забезпечення їх міцності виконуються в середовищі інертного газу (аргону). У центрі одного з днищ просвердлюється отвір і вварюється штуцер, через який під високим тиском подаватиметься мастило, щоб заготовка посудини набула сферичної форми.

При закачуванні мастила необхідно подбати про те, щоб у заготовку посудини не потрапило повітря. У цьому випадку можливе руйнування посудини під час гідроформування не буде супроводжуватися розлітанням уламків.

Меридіональний переріз виготовленої заготовки посудини зображено на рис. 1. Перед гідроформуванням заготовку слід витримати при високій температурі, щоб досягти релаксації залишкових напружень від штамповки і зварювання.

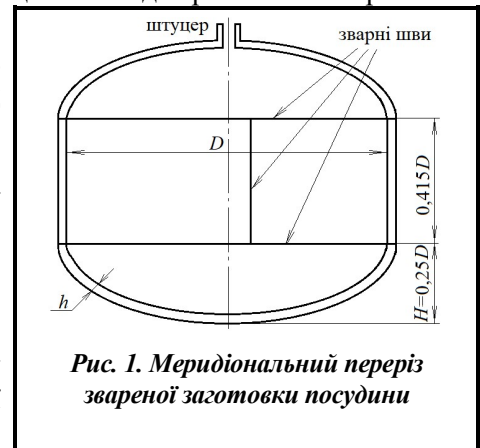


Рис. 1. Меридіональний переріз звареної заготовки посудини

Результати комп'ютерного моделювання гідроформування сферичних посудин

Процес гідроформування моделюватимемо шляхом розв'язання пружно-пластичної задачі для осесиметричної розрахункової схеми симетричної половини заготовки.

Для цього використовуються розроблені за допомогою методу скінченних елементів [15, 16] розрахункова методика й програмне забезпечення, що дозволяють розглядати кінетику термонапруженого стану конструкцій різного рівня складності [17, 18] зі змінними властивостями матеріалу з урахуванням реальних експлуатаційних умов навантаження [19, 20] і пластичних деформацій [21, 22].

При розробці розрахункових схем система завдання вихідних даних ґрунтується на топологічно регулярній декомпозиції тіла на елементи у вигляді довільних шестигранників, геометрія й зовнішні впливи на які можуть задаватися в різних системах координат, довільно орієнтованих стосовно глобальної декартової системи. Дискретизація на найпростіші скінченні елементи за заданою інформацією проводиться програмою автоматично [17, 18].

Властивості матеріалів, з яких складається конструкція, можуть залежати від температури і задаються як таблиці для її фіксованих значень. Для інших значень температури вони визначаються за допомогою лінійної чи квадратичної інтерполяції.

У задачі може задаватися довільна кількість типів граничних умов, розподілених на сторонах елементів. Для кожної підобласті зазначається номер граничних умов. Компоненти граничних умов можуть змінюватися за координатами і за часом і задаватися за допомогою спеціальних функцій для фіксованих моментів часу. Для задачі теплопровідності можуть бути задані граничні умови 2-го чи 3-го роду, а також теплообмін випромінюванням. Для задачі механіки задаються компоненти напружень або переміщень у глобальній чи місцевій системах координат. Початкові умови можуть бути задані постійними величинами або отримані шляхом розв'язання стаціонарної задачі за заданих граничних умов.

У розрахунках будемо вважати, що товщина сталюгого листа складає $h=1$ см, діаметр серединної поверхні обичайки $D=200$ см, її висота 83 см. Меридіональний перетин еліптичного днища наближено замінюється торовою і сферичною підобластями. На рис. 2 показано осесиметричну розрахункову схему половини звареної заготовки посудини, що складається із підобластей трьох видів: циліндричної, торової та сферичної.

Геометрія підобластей задається координатами їх вершин r і z , а для тора і сфери в масиві координат задаються і координати r і z точок на середині дуги. Ознакою того, що далі в масиві координат будуть задані значення r і z для криволінійної поверхні, виступає число $1E7$. По товщині підобласті розбиваються на 4 скінченні елементи таким чином, щоб крайні з них були у два рази менші за середні. Уздовж меридіана циліндра торова і сферична підобласті рівномірно розбиваються на 10, 7 і 20 скінченних елементів.

На симетричному осьовому перерізі розрахункової схеми задаються граничні умови симетрії $u_z=0$, $\tau_{rz}=0$. Навантаження прикладається у вигляді напруження по нормалі до внутрішньої поверхні і змінюється від 4 МПа, залежно від деформації цієї поверхні, 22-ма кроками за навантаженням із інтервалом у 1 МПа. Фізичні властивості матеріалу приймалися наступними: модуль пружності сталі $E=2 \times 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуасона $\nu=0,3$. При розв'язанні пружно-пластичної задачі використовувалася деформаційна теорія пластичності [23]. Діаграма деформування сталі наведена на рис. 3.

На кожному кроці для збіжності розв'язання задачі задавалося 9 ітерацій, після чого визначалася геометрія деформованої розрахункової моделі, тобто використовувалася логарифмічна міра деформації, бо вона при моделюванні гідроформування більш правильно описує реальний процес. Навантаження тиском по нормалі до внутрішньої поверхні потребує перерахування на кожному кроці геометрії деформованої посудини, без чого неможливо отримати правильний результат.

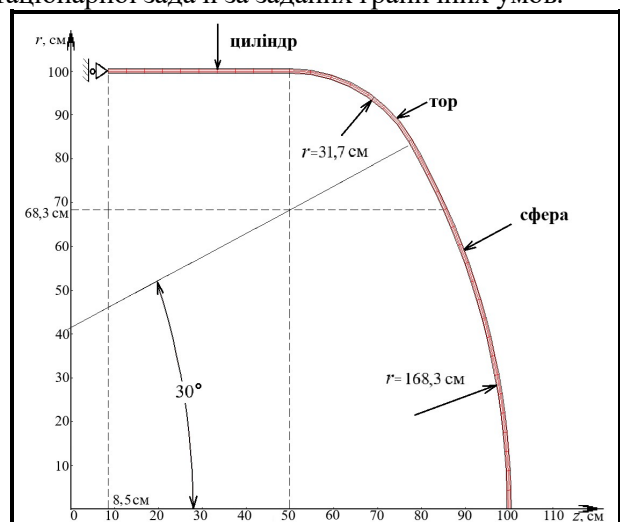


Рис. 2. Осесиметрична розрахункова схема половини звареної заготовки посудини

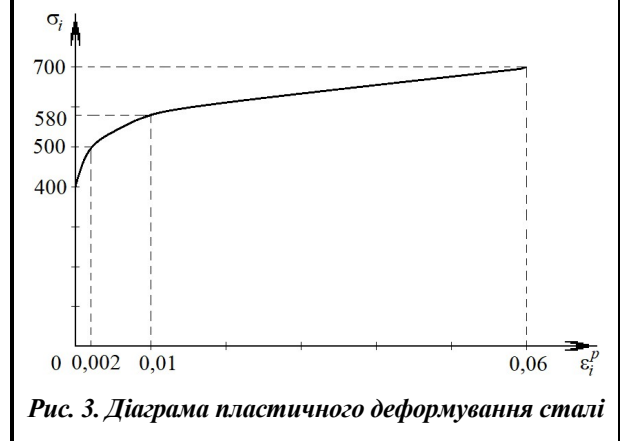


Рис. 3. Діаграма пластичного деформування сталі

У табл. 1 наведено розміри посудини в радіальному і осьовому напрямках відносно центра залежно від дії внутрішнього тиску P .

При тиску $P=24$ МПа форма посудини найбільше наближається до сфери, незважаючи на різницю в 1,4 см у радіальному і осьовому напрямках. При подальшому збільшенні тиску до 26 МПа, попри те, що тіло має майже однакові розміри в радіальному і осьовому напрямках, меридіональний перетин посудини менше нагадує коло. При куті близько 36° до осі z радіус посудини максимальний і складає приблизно 113 см.

Аналогічні розрахунки були виконані для випадку, коли товщина стінок заготовки становить $h=0,6$ см. Навантаження прикладалося починаючи від 2,5 МПа із кроком у 0,62 МПа. Посудина набула сферичної форми при тиску близько 14,9 МПа. У табл. 2 наведено радіальні й осьові розміри посудини залежно від тиску P .

Геометрія моделі посудини, виготовленої з листа сталі товщиною $h=1$ см при тиску $P=24$ МПа, надана на рис. 4, а виготовленої з листа товщиною $h=0,6$ см при тиску $P=14,9$ МПа – на рис. 5.

Інтенсивність напружень σ_i у стінках моделі посудини, виготовленої з листа товщиною $h=1$ см при тиску $P=24$ МПа, знаходиться в межах 555,8–703,6 МПа, інтенсивність деформацій ε_i при цьому не перевищує 6,15 %, а накопичена інтенсивність пластичних деформацій ε^p_i не більша за 5,85 %.

Інтенсивність напружень σ_i у моделі посудини, що виготовлена з листа товщиною $h=0,6$ см при тиску $P=14,9$ МПа, перебуває в межах 568,3–725,5 МПа, інтенсивність деформацій ε_i має значення менші за 7,07 %, а накопичена інтенсивність пластичних деформацій ε^p_i не перевищує 6,75 %.

Таблиця 1. Розміри посудини в радіальному і осьовому напрямках відносно центра

P , МПа	0	23	24	25	26
l_r , см	100,0	104,7	105,5	106,3	107,4
l_z , см	91,5	102,6	104,1	105,5	107,2
(l_r-l_z) , см	8,5	2,1	1,4	0,8	0,2

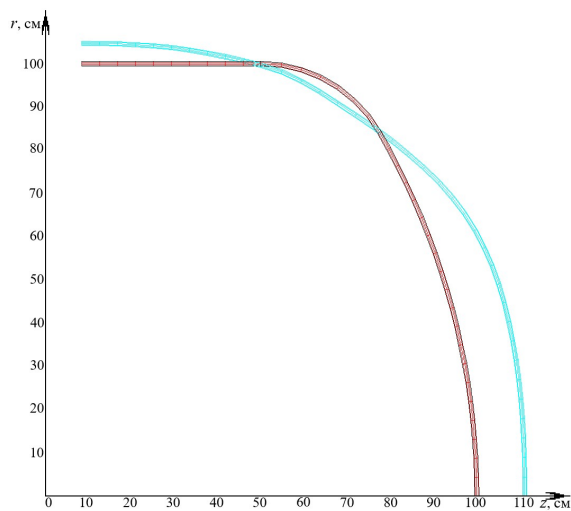


Рис. 4. Геометрія моделі посудини, виготовленої з листа сталі товщиною $h=1$ см

Таблиця 2. Радіальні й осьові розміри посудини залежно від тиску P

P , МПа	0	14,3	14,9	15,5	16,1
l_r , см	100,0	105,3	106,2	107,2	108,6
l_z , см	91,5	104,0	105,5	107,1	109,0
(l_r-l_z) , см	8,5	1,3	0,7	0,2	-0,4

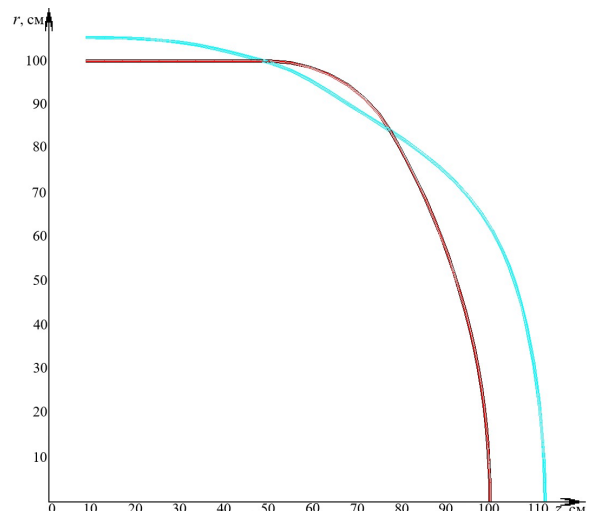


Рис. 5. Геометрія моделі посудини, виготовленої з листа сталі товщиною $h=0,6$ см

Висновки

Технологія гідроформування забезпечує можливість формування порожнистих деталей складної форми з окремих вихідних деталей в поєднанні з поліпшеними характеристиками жорсткості й міцності за рахунок зменшення кількості зварних швів і зниження витрат на збірку деталей. Посудини сферичної форми мають найменшу металоємність. Мінімальна поверхня стосовно об'єму посудини мінімізує теплообмін із навколишнім середовищем, що дуже важливо при їх експлуатації.

Отримані у роботі шляхом комп'ютерного моделювання процесу гідроформування зразки посудин деформуються пружно до тиску 24 МПа і 14,9 МПа при товщинах листа $h=1$ см і $h=0,6$ см відповідно при повторному навантаженні, тому не зазнаватимуть пошкоджень від малоциклової втоми. Вони можуть бути використані в аерокосмічній техніці як паливні баки ракет-носіїв для зрідженого кисню чи фтору та водню. Для кращої теплоізоляції ззовні їх можна покривати шаром дрібнопористого пінопласту. До того ж такі паливні баки матимуть мінімальну вагу, що важливо при польоті ракети. Існує багато інших варіантів використання гідроформування в конструктивних елементах аерокосмічної промисловості, деталі яких мають високу вартість і досить чутливі до ваги.

Розглянуті моделі посудин до гідроформування мали об'єм 4120 літрів, а після їх деформування до сферичної форми – 4960 літрів, тобто збільшення об'єму відбулося практично на 20,4 %, що теж має важливе практичне значення. При наповненні таких посудин природним газом під високим тиском можна перевозити їх автомобільним транспортом, а після обладнання спеціальним пристроєм із манометром використовувати для зарядки звичайних побутових газових балонів у місцях, де відсутнє централізоване газопостачання.

У хімічній промисловості навантаження конструкцій за межами експлуатаційних параметрів дозволяє в місцях концентрації напружень підняти межу текучості матеріалу й уникнути пошкоджень від малоциклової втоми, збільшивши тим самим ресурс обладнання. Крім того, цей прийом використовується для зменшення металоємності конструкцій.

Комп'ютерне моделювання процесу гідроформування дає змогу швидше і дешевше підібрати висоту обичайок і отримати параметри посудин інших розмірів та з інших матеріалів, що дозволяє уникати багаторазових експериментальних досліджень для того, щоб досягти прийняттого результату. Зменшення товщини стінки обичайки навіть у межах одного міліметра дає можливість отримати кращі параметри посудини під час гідроформування.

Фінансування

Результати цієї статті частково отримано у рамках виконання НДР за Цільовою науково-технічною програмою оборонних досліджень НАН України на 2025–2029 рр., код програмної класифікації видатків (КПКВК) 6541230 (прикладні дослідження).

Література

1. Gontarovskiy P., Smetankina N., Garmash N., Melezhyk I. Numerical analysis of stress-strain state of fuel tanks of launch vehicles in 3D formulation. In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds). *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2020. ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham, 2021. Vol. 188. P. 609–619. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_52.
2. Akimov D. V., Gryshchak V. Z., Gomenyuk S. I., Larionov I. F., Klimenko D. V., Sirenko V. N. Finite-element analysis and experimental investigation on the strength of a three-layer honeycomb sandwich structure of the spacecraft adapter module. *Strength of Materials*. 2016. Vol. 48. Iss. 3. P. 379–383. <https://doi.org/10.1007/s11223-016-9775-y>.
3. Gontarovskiy P. P., Smetankina N. V., Garmash N. G., Melezhyk I. I., Protasova T. V. Three-dimensional stress-strain state analysis of the bimetallic launch vehicle propellant tank shell. *Strength of Materials*. 2023. Vol. 55. Iss. 5. P. 916–926. <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00582-9>.
4. Bell C., Corney J., Zuelli N., Savings D. A state of the art review of hydroforming technology. *International Journal of Material Forming*. 2020. Vol. 13. P. 789–828. <https://doi.org/10.1007/s12289-019-01507-1>.
5. Zhang S. H., Wang Z. R., Xu Y., Wang Z. T., Zhou L. X. Recent developments in sheet hydroforming technology. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 151. Iss. 1–3. P. 237–241. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.054>.
6. Alaswad A., Benyounis K. Y., Olabi A. G. Tube hydroforming process: a reference guide. *Materials & Design*. 2012. Vol. 33. P. 328–339. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.052>.
7. Zhang S. H., Danckert J. Development of hydro-mechanical deep drawing. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998. Vol. 83. Iss. 1–3. P. 14–25. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00039-9).
8. Zhang S. H. Developments in hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999. Vol. 91. Iss. 1–3. P. 236–244. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00423-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00423-3).
9. Koç M., Cora O. N. 1 – Introduction and state of the art of hydroforming. In: Koç M. (ed.) *Hydroforming for Advanced Manufacturing*. England, Cambridge: Woodhead Publishing, 2008. P. 1–29. <https://doi.org/10.1533/9781845694418.1>.
10. Zhang Q., Wu C., Zhao S. Less loading tube-hydroforming technology on eccentric shaft part by using movable die. *Materials Transactions*. 2012. Vol. 53. P. 820–825. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MF201121>.

11. Bell C., Corney J., Savings D., Storr J. Assessing the potential benefits of manufacturing gas turbine components by utilizing hydroforming technology. In: 13th International Cold Forming Congress, 2–4 September 2015, Glasgow. GBR: University of Strathclyde Publishing, 2015. P. 46–53.
12. Schmoeckel D., Hielscher C., Huber R., Geiger M. Metal forming of tubes and sheets with liquid and other flexible media. *CIRP Annals*. 1999. Vol. 48. Iss. 2. P. 497–513. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63230-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63230-2).
13. Wang Z. R., Liu G., Yuan S. J., Teng B. G., He Z. B. Progress in shell hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 167. Iss. 2–3. P. 230–236. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.045>.
14. Jeswiet J., Geiger M., Engel U., Kleiner M., Schikorra M., Duflou J., Neugebauer R., Bariani P., Bruschi S. Metal forming progress since 2000. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2008. Vol. 1. Iss. 1. P. 2–17. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2008.06.005>.
15. Zienkiewicz O. C., Morgan K. Finite Elements and Approximation. Dover Publications, 2006. 350 p.
16. Gallagher R. H. Finite Element Analysis: Fundamentals. Pearson College Div, 1975. 420 p.
17. Hontarovskiy P. P., Smetankina N. V., Garmash N. H., Melezhyk I. I. Analysis of crack growth in the wall of an electrolyser compartment. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannya*. 2020. Vol. 23. No. 4. P. 38–44. <https://doi.org/10.15407/pmach2020.04.038>.
18. Alyokhina S., Kostikov A., Smetankina N., Gontarovskiy P., Garmash N., Melezhyk I. Methodology for determining the thermal and thermal-stress states of a concrete storage container for spent nuclear fuel for assessment of its service life. *Nuclear and Radiation Safety*. 2021. Vol. 92. No. 4. P. 33–39. [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4\(92\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4(92).05).
19. Gontarovskiy P. P., Smetankina N. V., Garmash N. G., Melezhyk I. I., Protasova T. V. Assessment of stress-strain state of lightweight shell of waffle fuel tank of launch vehicle. *International Applied Mechanics*. 2024. Vol. 60. Iss. 4. P. 454–463. <https://doi.org/10.1007/s10778-024-01297-3>.
20. Hontarovskiy P. P., Smetankina N. V., Ugrimov S. V., Garmash N. H., Melezhyk I. I. Simulation of the crack resistance of ion-exchange strengthened silicate glass subject to bending strain. *International Applied Mechanics*. 2022. Vol. 58. Iss. 6. P. 715–724. <https://doi.org/10.1007/s10778-023-01195-0>.
21. Gontarovskiy P., Garmash N., Melezhyk I. Numerical modeling of dynamic processes of elastic-plastic deformation of axisymmetric structures. In: Altenbach H. et al. Advances in Mechanical and Power Engineering. CAMPE 2021. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer, 2023. P. 334–342. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18487-1_34.
22. Washizu K. Variational methods in elasticity & plasticity. Oxford – New York: Pergamon Press, 1982. 630 p.
23. Писаренко Г. С., Можаровский Н. С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести: справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1981. 496 с.

Надійшла до редакції 03.04.2025