

Ю. В. ПОРОХОВСЬКИЙ, к.т.н., ст. викл. НУ «ЛП»; Львів;
Б. І. КІНДРАЦЬКИЙ, д.т.н., проф., зав. каф. ЕРАТ НУ «ЛП», Львів

РОЗПОДІЛ ЗАЛИШКОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ У ЗОНІ КІЛЬЦЕВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ КУСКОВО-ОДНОРІДНИХ ОБОЛОНКОВИХ МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ

На основі уточненої теорії оболонок побудовано математичну модель розрахунково-експериментального методу визначення залишкових напружень в зонах зварних швів кусково-однорідних оболонок у машинобудівних конструкціях та проведено числовий аналіз задачі.

Ключові слова: Кусково-однорідна оболонка, машинобудівна конструкція, зварний шов, залишкові напруження, уточнена теорія оболонок.

Вступ. У машинобудівних конструкціях (МК) приходиться зварювати деталі, які виготовлені з різних за фізичними характеристиками матеріалів. Зварні з'єднання займають особливе місце при проведенні діагностування технічного стану таких конструкцій, оскільки на концентрацію напружень, крім експлуатаційних навантажень, впливають ще і знакомінні та нерівномірно розподілені по довжині конструкції залишкові зварювальні напруження. Для їх визначення існують розрахункові, експериментальні та розрахунково-експериментальні методи, які базуються на поєднанні математичного моделювання з експериментальними даними. Результати визначення залишкових напружень для зварного з'єднання постійної товщини висвітлені у роботах [1, 2], а для різнотовщинного зварного з'єднання подані у статтях [3-5].

Нижче для оцінки розподілу залишкових напружень в зоні кусково-однорідного зварного з'єднання запропоновано математичну модель, побудовану на основі уточненої теорії оболонок, що враховує скінченну жорсткість на зсув в напрямку нормалі до серединної поверхні оболонки.

Постановка задачі. Розглянемо стикове зварне з'єднання двох різнорідних труб однакової товщини. Їх пружні характеристики E_1, μ_1 та E_2, μ_2 (рис. 1), а $2h$ – товщина оболонки. Віднесемо таку оболонку до безрозмірної триортogonalної системи координат α, β, γ , де $\alpha = z/R$, z – координата вздовж осі оболонки, R – радіус серединної поверхні кусково-однорідної оболонки, β – кутова координата, γ – координата вздовж зовнішньої нормалі до серединної поверхні труби. Позначимо прогин серединної поверхні лівої частини від зварного шва оболонки з пружними характеристиками E_1, μ_1 через $W_1(\alpha)$ та правої частини зварного з'єднання з пружними параметрами E_2, μ_2 – через $W_2(\alpha)$.

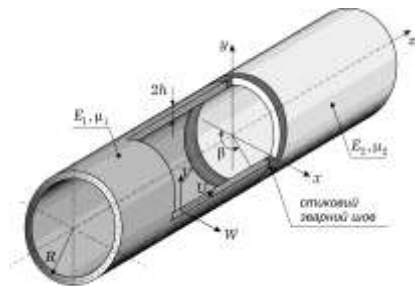


Рисунок 1 – Схема зварного з'єднання

На основі уточненої теорії оболонок з власними напруженнями [6, 7] ключові рівняння для визначення функцій $W_i(\alpha)$ ($i = 1, 2$) подамо у вигляді:

$$\frac{d^4 W_i}{d\alpha^4} - 2g_i^2 \frac{d^2 W_i}{d\alpha^2} + 4\lambda_i^4 W_i = F_i(\alpha), \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

Тут

$$F_i(\alpha) = 4\lambda_i^4 R \mathbf{E}_{\beta\beta}^{0i} - R^2 \frac{d^2}{d\alpha^2} (\kappa_{\alpha\alpha}^{0i} + \mu_i \kappa_{\beta\beta}^{0i}) - 2g_i^2 R \frac{d^2 \mathbf{E}_{\beta\beta}^{0i}}{d\alpha^2} + R \frac{d^3 \mathbf{E}_{\alpha\gamma}^{0i}}{d\alpha^3} - 4 \frac{\mu_i R^3}{D_{1i}} N_1^0, \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_{jj}^{0i}(\alpha) = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h e_{jj}^{0i}(\alpha, \gamma) d\gamma, \quad \kappa_{jj}^{0i}(\alpha) = \frac{3}{2h^3} \int_{-h}^h e_{jj}^{0i}(\alpha, \gamma) \gamma d\gamma,$$

$$\mathbf{E}_{\alpha\gamma}^{0i}(\alpha) = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h e_{\alpha\gamma}^{0i}(\alpha, \gamma) d\gamma, \quad j = \alpha, \beta; \quad i = 1, 2,$$

$2g_i^2 = \frac{E_i}{K_i' G_i'}$; $D_{1i} = \frac{2E_i h^3}{3(1-\mu_i^2)}$; $\lambda_i^4 = \frac{3R^2(1-\mu_i^2)}{4h^2}$; E_i – модуль Юнга лівої ($i = 1$) та правої ($i = 2$) частин кусково-однорідної зварної конструкції; μ_i – коефіцієнти Пуассона матеріалів цих частин; G_i' – модуль зсуву на площадках, перпендикулярних до серединних поверхонь; K_i' – коефіцієнт зсуву.

На основі проведеного аналізу розподілу залишкових напружень і залишкових термопластичних деформацій в зоні зварних швів і наведених результатів досліджень [7-9] розподіл несумісних залишкових деформацій в зоні зварного шва e_{ij}^0 апроксимуємо виразами

$$e_{\beta\beta}^{0i}(\alpha, \gamma) = -\mathbf{E}_{1i}^* f_{1i}(\gamma) \varphi_{\beta i}(\alpha), \quad e_{\alpha\alpha}^{0i}(\alpha, \gamma) = -\mathbf{E}_{2i}^* f_{2i}(\gamma) \varphi_{\alpha i}(\alpha), \\ e_{\alpha\gamma}^{0i}(\alpha, \gamma) = -\mathbf{E}_{0i}^* f_{0i}(\gamma) \varphi_{0i}(\alpha), \quad (3)$$

де функції $\varphi_{\beta i}(\alpha)$, $\varphi_{\alpha i}(\alpha)$, $\varphi_{0i}(\alpha)$, $f_{mi}(\gamma)$ ($i = 1, 2$; $m = 0, 1, 2$) описують залишкові пластичні деформації у зварному з'єднанні [4]

Метод розв'язування. Розв'язки рівнянь (1) зобразимо у вигляді сум розв'язків однорідного рівняння $W_i^{(1)}$ і часткових розв'язків неоднорідного $W_i^{(2)}$, тобто

$$W_i(\alpha) = W_i^{(1)}(\alpha) + W_i^{(2)}(\alpha). \quad (4)$$

Розв'язок однорідного рівняння запишемо у вигляді:

$$W_i^{(1)}(\alpha) = A_{1i} \omega_{1i}(\alpha) + A_{2i} \omega_{2i}(\alpha). \quad (5)$$

Тут A_{ji} – сталі інтегрування;

$$\omega_{11}(\alpha) = e^{s_1 \alpha} \cos r_1 \alpha, \quad \omega_{21}(\alpha) = e^{s_1 \alpha} \sin r_1 \alpha, \\ \omega_{12}(\alpha) = e^{-s_2 \alpha} \cos r_2 \alpha, \quad \omega_{22}(\alpha) = e^{-s_2 \alpha} \sin r_2 \alpha, \quad (6)$$

$$\text{де } s_i = \lambda_i \sqrt{1 + \frac{g_i^2}{2\lambda_i^2}}, \quad r_i = \lambda_i \sqrt{1 - \frac{g_i^2}{2\lambda_i^2}}, \quad (7)$$

Часткові розв'язки $\bar{W}_i^{(2)}(\alpha)$ зобразимо як згортку фундаментальних розв'язків рівнянь (1) з правими частинами $\bar{F}_i(\alpha) = F_i(\alpha) / (\mathbf{E}_i^* R)$. Для цього використаємо фундаментальний розв'язок рівняння

$$\frac{d^4 W_i^*}{d\alpha^4} - 2g_i^2 \frac{d^2 W_i^*}{d\alpha^2} + 4\lambda_i^4 W_i^* = \delta(\alpha - \zeta), \quad (8)$$

де $\delta(x)$ – дельта-функція Дірака.

Підставивши тепер вищенаведені співвідношення у відомі загальні вирази для напружень [7] і здійснивши відповідні перетворення, формули для обчислення осевих $\sigma_{\alpha\alpha}$, колових (кільцевих) $\sigma_{\beta\beta}$ і зсувних $\sigma_{\alpha\gamma}$ залишкових напружень в зоні зварного з'єднання оболонок неоднакової товщини подамо у вигляді:

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma) &= k_{1i} \sigma_T^* \bar{\sigma}_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma), \quad \sigma_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha, \gamma) = k_{1i} \sigma_T^* \bar{\sigma}_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha, \gamma), \\ \sigma_{\alpha\gamma}^{(i)}(\alpha, \gamma) &= k_{1i} \sigma_T^* \bar{\sigma}_{\alpha\gamma}^{(i)}(\alpha, \gamma), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{де } \bar{\sigma}_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma) &= -\sqrt{\frac{3}{1-\mu_i^2}} \frac{\gamma}{h} \left[\Omega_i(\alpha) + \frac{1}{2\lambda_i^2} \bar{L}_{2i}(\alpha) - v_{3i} \bar{W}_{0i}(\alpha) \right] + \\ &+ \frac{1}{1-\mu_i^2} \left(\frac{1}{3} - \frac{\gamma^2}{h^2} \right) \left[\mu_i p_{1i} \Phi_{\beta i}(\alpha) + k p_{2i} \Phi_{\alpha i}(\alpha) \right], \end{aligned} \quad (10)$$

$$\bar{\sigma}_{\beta\beta}^{(i)}(\alpha, \gamma) = \bar{W}_i(\alpha) + \mu_i \bar{\sigma}_{\alpha\alpha}^{(i)}(\alpha, \gamma) + f_{1i}(\gamma) \Phi_{\beta i}(\alpha, \gamma),$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{\alpha\gamma}^{(i)}(\alpha, \gamma) &= -\frac{1}{2K_i'} \left[\frac{1}{\lambda_i} \Omega_i^0(\alpha) + \frac{1}{2\lambda_i^4} \bar{L}_{3i}(\alpha) - \right. \\ &\left. - \frac{v_{3i}}{\lambda_i^2} \frac{d\bar{W}_{0i}(\alpha)}{d\alpha} \right] + \frac{G_i' k_0}{E_i} \left[p_{0i} \left(\frac{1}{3} - \frac{\gamma^2}{h^2} \right) + q_{0i} \frac{\gamma}{h} \right] \Phi_{0i}(\alpha), \end{aligned}$$

$$\Omega_i^0(\alpha) = -A_{1i} \left[(-1)^{i-1} \mu_{1i} \omega_{1i}(\alpha) + \mu_{2i} \omega_{2i}(\alpha) \right] +$$

$$+ A_{2i} \left[\mu_{2i} \omega_{1i}(\alpha) - (-1)^{i-1} \mu_{1i} \omega_{2i}(\alpha) \right], \quad k_{1i} = \mathbf{E}_i^* E_i / \sigma_T^*,$$

$$\sigma_T^* = (\sigma_T^{(1)} + \sigma_T^{(2)})/2 - \text{усереднена границя плинності матеріалів.}$$

У вирази для обчислення напружень входять числові параметри, які характеризують залишкові несумісні деформації e_{lm}^0 . Щоб їх знайти для конкретних зварних з'єднань, використовують експериментальні дані про залишкові напруження в таких з'єднаннях, які можна отримати неруйнівними експериментальними методами, як це показано, зокрема, в роботі [10].

Числовий аналіз. Для відтворення картини розподілу технологічних залиш-

кових напружень у зварному з'єднанні кусково-однорідних труб, аналогічно як і у випадку однорідних труб, важливим є аналіз розподілу напружень на основі розв'язку прямої задачі. Нижче такий аналіз проведено для зварених багатопаровим кільцевим зварним швом труб діаметром 219 мм, товщина труби $2h = 7$ мм для заданих залишкових термопластичних деформацій $e_{\beta\beta}^0$ і $e_{\alpha\alpha}^0$, які апроксимуються виразами [4]. При цьому величини параметрів α_{mi} , b_{ni} , q_{mi} ($p_{mi} = q_{mi}/2$; $i = 1, 2$; $n = 1, 2, 3$; $m = 0, 1, 2$) наведені на рисунках, а параметр $E_1^* = 8 \cdot 10^{-4}$. Матеріал лівої частини труби – сталь марки 10Г2ФБЮ ($E_1 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $\mu_1 = 0,3$; $\sigma_T^{(1)} = 470$ МПа), а правій – сталь марки 17ГС ($E_2 = 1,9 \cdot 10^5$ МПа; $\mu_2 = 0,28$; $\sigma_T^{(2)} = 360$ МПа).

На рис. 2-4 графічно зображено результати розподілу колових $\sigma_{\beta\beta}$ (рис. 2), осьових $\sigma_{\alpha\alpha}$ (рис. 3) та зсувних (рис. 4) залишкових напружень в зоні зварного шва на зовнішній ($\gamma = h$) та внутрішній ($\gamma = -h$) поверхнях труби. З метою оцінки впливу уточненої теорії оболонок на розподіл залишкових напружень на рисунках штриховими лініями нанесено відповідні напруження, отримані за теорією оболонок Кірхгофа–Лява. Так як теорія оболонок Кірхгофа–Лява не враховує зсувних напружень (у цій теорії ними нехтують), то на рис. 4 такі лінії не нанесені.

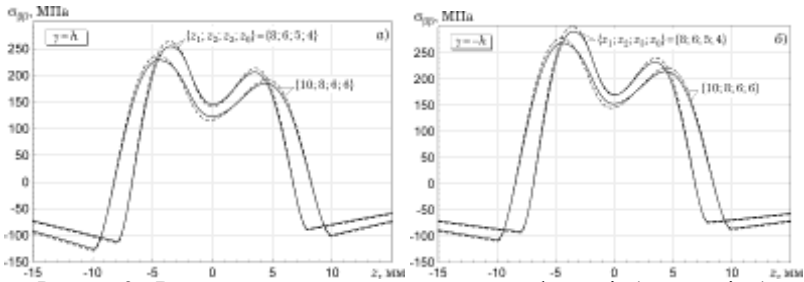


Рисунок 2 – Вплив ширини зон термопластичних деформацій (параметрів z_i), розподілам яким відповідають вказані значення параметрів z_i , на рівень і зміну вздовж труб колових залишкових напружень: а – на зовнішніх їхніх поверхнях; б – на внутрішніх їхніх поверхнях

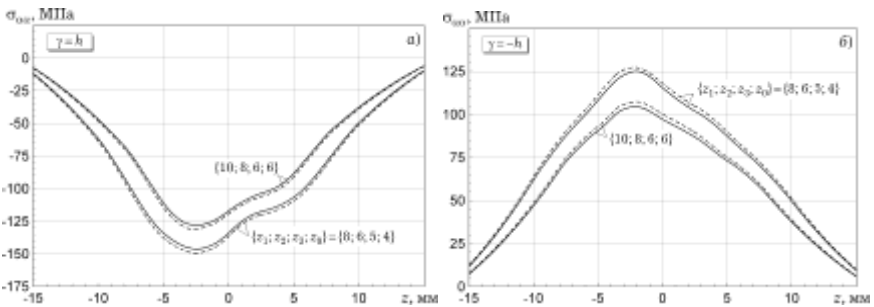


Рисунок 3 – Вплив ширини зон залишкових деформацій (зміна параметрів z_i), розподілу яких характеризуються вказаними значеннями параметрів z_i , на рівень і зміну осьових залишкових напружень: а – на зовнішніх поверхнях труб; б – на внутрішніх поверхнях труб

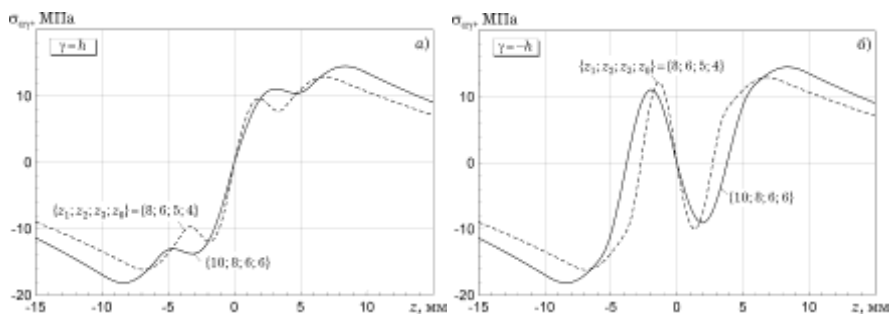


Рисунок 4 – Вплив ширини зон залишкових деформацій (зміна параметрів z_i), розподіли яких характеризуються вказаними значеннями параметрів z_i , на рівень і зміну зсувних залишкових напружень:
 а – на зовнішніх поверхнях труб; б – на внутрішніх поверхнях труб

Аналіз результатів та висновки. Порівняння результатів обчислених залишкових напружень на рис. 2, 3 при $g^2 = 1,56$ (уточнена теорія оболонок) і $g^2 = 0$ (класична теорія оболонок) показало, що максимальні відхилення між ними не перевищують 3,5–8%. Це обґрунтовує достовірність застосування отриманих на базі уточненої теорії оболонок результатів для розрахунку залишкових технологічних напружень в зоні кільцевого зварного з'єднання труб. Крім цього, видно, що рівень залишкових напружень, обчислених за уточненою теорією, нижчий від числових значень, отриманих за теорією оболонок Кірхгофа–Лява.

Із наведених на рис. 2-4 графіків розподілу залишкових напружень по різні сторони від зварного шва видно, що для частини труби, виготовленої із сталі марки 10Г2ФБЮ, напруження мають вищий рівень. З цього можна зробити висновок, що чим більші за числовим значенням пружні характеристики матеріалу, тим вищі залишкові напруження у трубі, виготовленої з цього матеріалу.

Список літератури: 1. *Осадчук В. А.* Діагностування залишкових технологічних напружень в елементах конструкцій розрахунково-експериментальним методом // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* – 2003. – 46, № 1. – С. 88–104. 2. *Кир'ян В. І., Осадчук В. А., Николішин М. М.* Механіка руйнування зварних з'єднань металоконструкцій. – Львів: СПОЛОМ, 2007. – 320 с. 3. *Осадчук В., Пороховський Ю., Банахевич Ю.* Математична модель розрахунково-експериментального визначення залишкових напружень в кільцевих зварних з'єднаннях труб на основі уточненої теорії оболонок // *Машинознавство.* – 2010. – № 3-4 (153–154). – С. 15–22. 4. *Осадчук В. А., Пороховський Ю. В., Іванчук О. О.* Діагностування залишкових напружень і оцінка їх впливу на статичну міцність зварних з'єднань різновисотних труб з дефектами типу тріщин // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* – 2008. – 51, № 2. – С. 133–146. 5. *Пороховський Ю., Кіндрацький Б., Осадчук В.* Визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях різновисотних трубчастих елементів машинобудівних конструкцій на основі уточненої теорії оболонок // *Машинознавство.* – 2011. – № 3-4 (165–166). – С. 8–15. 6. *Пелеш Б. Л.* Теория оболочек с конечной сдвиговой жесткостью. – Киев: Наука думка, 1973. – 248 с. 7. *Подстригац Я. С., Осадчук В. А., Марголин А. М.* Остаточные напряжения, длительная прочность и надежность стеклоконструкций. – Киев: Наука думка, 1991. – 296 с. 8. *Винокуров В. А., Григорянц А. Г.* Теория сварочных деформаций и напряжений. – Москва: Машиностроение, 1984. – 280 с. 9. *Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностики сварных соединений. – Киев: Изд-во ИНДПРОМ, 1998. – 640 с. 10. *Осадчук В. А., Банахевич Ю. В., Іванчук О. О.* Визначення напруженого стану магістральних трубопроводів в зоні кільцевих зварних швів // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2006. – 42, № 2. – С. 99–105.

Надійшла до редакції 28.05.2014

УДК 539.3

Розподіл залишкових технологічних напружень у зоні кільцевих зварних з'єднань кусково-однорідних оболочкових машинобудівних конструкцій / **Ю. В. Пороховський, Б. І. Кіндрацький** // *Вісник НТУ «ХП».* Серія: *Машинознавство та САПР.* – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 29 (1072). – С. 133-

138. – Бібліогр.: 10 назв. ISSN 2079-0075.

На основе уточненной теории оболочек построена математическая модель расчетно-экспериментального метода определения остаточных напряжений в зонах сварных швов кусочно-однородных оболочек в машиностроительных конструкциях и проведен численный анализ задачи.

Ключевые слова: Кусочно-однородная оболочка, машиностроительная конструкция, сварной шов, остаточные напряжения, уточнена теория оболочек

Based on the refined theory of shells a mathematical model of calculation-experimental method is constructed for measuring of residual stresses in welded zones of piecewise-homogeneous shells in machine building structures. We construct solutions of the governing equations of refined theory of shells and obtained expressions for calculation of residual stresses at any point of weld. The parametric analysis of the problem has been made.

Keywords: piecewise-homogeneous shell, machine building structure, weld, residual stresses, refined theory of shells

УДК 623.4.016

П.О. РУСИЛО, к.т.н., доц., пр.н.с. наук.-досл. лаб. розвитку бронетанк. озброєння та техніки наук.-дослід. від. механіз. і танк. військ Наук. центру Сухопутних військ Академії сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, Львів;

Р.Г. БУДЯНУ, к.т.н., нач. наук.-досл. лаб. розвитку бронетанк. озброєння та техніки наук.-дослід. від. механіз. і танк. військ Наук. центру Сухопутних військ Академії сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, Львів;

О.М. КАЛІНІН, н.с. наук.-досл. лаб. розвитку бронетанк. озброєння та техніки наук.-дослід. від. механіз. і танк. військ Наук. центру Сухопутних військ Академії сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, Львів;

В.В. КОСТЮК, с.н.с. наук.-досл. лаб. розвитку бронетанкового озброєння та техніки наук.-дослід. від. механізованих і танкових військ Наук. центру Сухопутних військ Академії сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, Львів;

Ю.В. ВАРВАНЕЦЬ, н.с. наук.-досл. від. механіз. і танк. військ Наук. центру Сухопутних військ Академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

ОБҐРУНТУВАННЯ ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ РОЗРОБЛЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ЗРАЗКІВ І ПОДАЛЬШОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ ВІТЧИЗНЯНИХ ТАНКІВ

Проведена оцінка рівня технічної досконалості сучасних зразків основних бойових танків, які знаходяться на озброєнні армій передових країн світу, та обґрунтовані тактико-технічні характеристики для модернізації та розроблення перспективних зразків. Порівняльний аналіз рівня технічної досконалості свідчить, що до трійки кращих світових зразків належать танк Т-90А, БМ «Оплот-М» і АМХ-56 «Леклерк». Вітчизняний танк БМ «Оплот-М» займає провідне місце серед перспективних зразків.

Ключові слова: зразок, модернізація, оцінка, рівень технічної досконалості, танк, тактико-технічні характеристики

Вступ. Постановка проблеми. Аналіз бойового застосування бронетанкового озброєння і техніки у наземних та повітряних операціях в умовах сучасних збройних конфліктів, регіональних війн та миротворчих місій показує, що вони не тільки не втратили своєї ролі на сучасному полі бою, а й у найближчій перспективі

© П.О. Русіло, Р.Г. Будяну, О.М. Калінін,
В.В. Костюк, Ю.В. Варванець, 2014