

СЕКЦІЯ 4
ТЕХНОЛОГІЇ І ОБЛАДНАННЯ МАШИНОБУДУВАННЯ
Голова секції – Ковалевський С.В., д-р техн. наук., професор

УДК 621.73:621.983:539.4

Білосточний В.О.,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4878-9972>

Савуляк В.В., канд. техн. наук, доцент

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7178-6243>

Вінницький національний технічний університет

Ковалевський С.В., д-р техн. наук, професор

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4708-4091>

Донбаська державна машинобудівна академія

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОЇ
ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ФЛАНЦЕВИХ ДЕТАЛЕЙ ЗІ
ЗВАРНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАГОТОВОК З ЛИСТОВОЇ
СТАЛІ AISI 304 З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИРОБІВ**

Виготовлення великогабаритних фланцевих елементів великого діаметра (понад 1 метр) для обладнання харчової, хімічної та приладобудівної промисловості нерозривно пов'язане із застосуванням технології холодної пластичної деформації (ХПД). Використання ХПД дозволяє значно підвищити точність геометрії виробу, знизити кількість механічних обробок та енергоспоживання, що особливо важливо при виробництві великогабаритних фланцевих деталей.

Основні проблеми, що виникають при ХПД зварних заготовок:

1. Локальна неоднорідність пластичності: Зварювання змінює мікроструктуру сталі AISI 304 у ЗШ і ЗТВ, що проявляється підвищеною жорсткістю та зниженням пластичності. Ці локальні зміни спричиняють нерівномірний розподіл напружень і деформацій, що є критичним фактором при формоутворенні складних профілів. Більш жорстка зона ЗШ перешкоджає протіканню деформації, змушуючи сусідні ділянки базового металу зазнавати інтенсивнішого розтягнення, що підвищує ризик локальних дефектів та концентрації напружень [6].

2. Нерівномірність товщини та дефекти стійкості: Взаємодія жорстких та «м'яких» зон призводить до асиметричного перерозподілу

товщини, тоншення у зоні розтягнутого металу та потовщення поблизу жорстких зон ЗШ. Порушення стійкості поверхні (наприклад, хвилястість кромки) виникає навіть при помірних навантаженнях, що ускладнює контроль геометрії.

Класичні моделі із припущенням ізотропії та однорідності матеріалу не забезпечують точного прогнозування таких складних явищ [5]. Актуальність дослідження полягає у необхідності розробки кількісного інструменту, що дозволяє оцінити вплив локальної гетерогенності та анізотропії, а також оптимізувати параметри процесу ХПД для забезпечення високої геометричної точності.

Математичне та фізичне моделювання в цій роботі спрямоване на опис створення гібридної математичної моделі, що враховує фізичну та структурну неоднорідність заготовки товщиною 1,5–6,0 мм, та дозволяє прогнозувати локальні дефекти.

Аустенітна сталь AISI 304, що розглядається у роботі, проявляє зміцнення під час ХПД через деформаційне мартенситне перетворення (TRIP-ефект). Для опису поведінки матеріалу застосовано пружнопластичну модель з використанням степеневого закону Людвіга-Голомона:

$$\sigma = K\varepsilon^n,$$

де σ – еквівалентне напруження, ε – еквівалентна пластична деформація, K – коефіцієнт міцності (1480 МПа), n – показник деформаційного зміцнення (0.45–0.55).

Для врахування локальної неоднорідності пластичності та анізотропії ЗШ застосовано додаткові модифікації:

1. Локальні властивості ЗШ: параметри K та n для елементів сітки ЗШ коригувалися на основі експериментальних даних, що відображають підвищену жорсткість та знижену пластичність у зоні зварного шва [6].

2. Сучасний критерій плинності: класичний критерій Хілла (Hill'48) був замінений на неквадратичний критерій Барлата Yld2000-2d, який точніше описує анізотропну поведінку тонколистового матеріалу та дозволяє прогнозувати локальні дефекти на фланці [7].

Моделювання реалізоване у FEM з лагранжевою постановкою та тонколистовими Shell елементами [1]. Лагранжевий підхід дозволяє

точно відстежувати історію навантаження кожної точки та враховувати локальні зміни пластичності [5].

Порівняння розрахункових полів деформацій із експериментальними даними методом цифрової кореляції зображень (DIC) показало похибку 6–8%, що підтвердило адекватність моделі для прогнозування локальних дефектів [2].

Моделювання показало, що нерівномірність товщини виникає через взаємодію кінематичного потоншення та гетерогенного потовщення. Використання Yld2000-2d дозволило точніше прогнозувати поведінку ЗШ та сусідніх зон. Для тонколистових заготовок (1,5–2 мм) критична швидкість, при якій виникає локальна втрата стійкості, становить $\dot{\varepsilon} \approx 0.4 \text{ s}^{-1}$ [3].

Для товстолистових заготовок (5–6 мм) пружне відпружинення визначає кінцеву геометричну точність. Величина відпружинення пропорційна накопиченим деформаціям та вимагає застосування компенсаційних припусків [4].

Запропонована цільова функція J , яка мінімізує нерівномірність товщини та пружні напруження та оптимізує якість фланця:

$$J = \int_0^{2\pi} [(t(\theta) - t_0)^2 + 0.3\sigma_{rs}^2] d\theta.$$

де $t(\theta) = t_0 - \Delta t(\theta)$ – локальна товщина, θ – полярний кут.

Шляхом варіювання ε та μ отримано зменшення нерівномірності товщини на 23–28% (з 9,1% до 4,7%), зменшення зміцнення шва та локальної втрати стійкості.

Використання FEM-моделі з Yld2000-2d дозволяє зменшити похибку прогнозу товщини до 6–8%.

Промислова значимість: впровадження підходу дозволяє знизити пошкодження матеріалу, оптимізувати технологічні параметри, підвищити повторюваність геометрії великих деталей та застосовувати цифрові двійники на стадії проєктування.

Напрями подальших досліджень: багатофізичне моделювання з тепломеханічними ефектами та фазовими перетвореннями TRIP, підвищення точності FEM-моделі через адаптивні сітки у зоні ЗШ, розширення експериментальних досліджень.

Висновки та рекомендації

1. Гібридна FEM-модель з Yld2000-2d адекватно описує ХПД зварних заготовок AISI 304 (похибка 6–8%).
2. Локальна неоднорідність пластичності та нерівномірність товщини є взаємопов'язаними дефектами.
3. Технологічні рекомендації:
 - тонкі заготовки (1,5–2 мм): швидкість $< 0,4 \text{ s}^{-1}$; використання диференційованого притиску;
 - товсті заготовки ($> 5 \text{ мм}$): компенсаційний припуск на відпружинення 1,5–2,3%.
4. Подальші дослідження мають враховувати багатofізичні ефекти, включно з теплом пластичної деформації та фазовими перетвореннями TRIP.

Список використаних джерел

1. Belytschko T., Liu W.K., Moran B. *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*. New York : Wiley, 2000. 696 p.
2. Sutton M.A., Orteu J. J., Schreier H.W. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. New York : Springer, 2009. 343 p.
3. Jankowski J., Kolchan T. Optimization of the deep drawing process of stainless steel AISI 304 // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 18, № 4. P. 1146–1155.
4. Li H., Wierzbicki T. A study of springback in sheet metal forming // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 162–163. P. 442–448.
5. Савуляк В.В., Мордач М.О. Змінність пластичності матеріалу в розрахунках процесів холодної пластичної деформації // *Матеріали XLV Науково-технічної конференції ВНТУ (Вінниця, 23–24 березня 2016 р.)*.
6. Kumar A., Pandey S. Mechanical and microstructural properties of TIG-welded AISI 304 stainless steel // *Materials & Design*. 2012. Vol. 36. P. 590–597.
7. Barlat F., Brem J.C., Yoon J.W. [та ін.] Plane stress yield function for aluminum alloy sheets – Part I: Theory // *International Journal of Plasticity*. 2003. Vol. 19, № 9. P. 1297–1319.