

УДК 669.716: 621.77.016.2

Макєва Г. С.
Фролов Я. В.
Панюшкін М. Є.

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОКАТКИ АЛЮМІНІЄВИХ ПОЛОС

Освоєння нових процесів обробки металів тиском чи удосконалення існуючих технологій потребує експериментальних досліджень для виявлення їх особливостей. Експериментальні дослідження таких процесів можуть бути трудомісткими та потребувати багато різних ресурсів. Сучасні технології дозволяють виконувати математичне моделювання процесів обробки металів тиском методом скінчених елементів, що дозволяє заощаджувати час та ресурси.

Спільна повздовжня прокатка двох алюмінієвих полос цікава для вивчення, оскільки вона є основою для подальших досліджень прокатки біметалів та композицій на основі алюмінію [1–3], а також прокатки алюмінієвих полос армованих сталеву сіткою [4, 5] для отримання комбінації міцності та легкості біметалевого матеріалу. При спільній прокатці двох алюмінієвих полос важливо досягти зварювання полос в зоні деформації.

Задачею даного дослідження є верифікація математичної моделі для спільної прокатки двох алюмінієвих полос за умови двох початкових температур: 200 та 530 °С. Критерієм верифікації є параметри формозміни та фактична ступінь деформації. В цій роботі наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень прокатки алюмінієвих полос.

Теоретичне дослідження проводилося за допомогою програмного середовища QForm. Експериментальне дослідження – в лабораторії кафедри обробки металів тиском Національної металургійної академії України

Відомо, що сучасні програмні системи FEM-моделювання, такі як DEFORM та QForm, дозволяють оцінювати розрив деформованого стану в зоні деформації при прокатці пластин [6, 7], в той час як гіпотеза о плоских перетинах, що використовуються в класичній теорії прокатки, не дозволяє дати точної оцінки формозміни металу. Аналіз напруженого стану, який виконано за допомогою програмного забезпечення DEFORM-3D, показав, що FEM-моделювання листової прокатки не дає достовірних даних про індекс напруженого стану, з огляду на те, що граничні умови на вході та виході зони деформації не виконуються.

Отже для порівняння результатів FEM-моделювання листової прокатки та експерименту обрано програмне забезпечення QForm, оскільки дослідження [6, 7] показали більш достовірні індекси напруженого стану при моделюванні процесу прокатки.

Завдяки вивченню процесу прокатки пластин за допомогою сучасних програмних систем математичного моделювання можна більш точно розрахувати розмір зони деформації та поле швидкостей під час прокатки. Це, у свою чергу є важливим з точки зору утворення зчеплення між шарами металу під час спільної прокатки.

При проведенні математичного моделювання прокатки алюмінієвих штаб було використано програмне забезпечення QForm версії 8.0.7, розроблене виробником QFX Simulations Ltd.

За допомогою САПР SolidWorks 2014 створено геометрію заготовки та прокатного інструменту, які імпортовано до компонента системи QForm – QShape та використано під час моделювання процесу листової прокатки. Компонент системи QForm – QShape використовується для призначення типу складових створеної геометрії – заготовка, інструмент та т. і. Також за допомогою QShape створюється тривимірна сітка (рис. 1), та отриманий файл із геометрією експортується до QForm.

Параметри процесу для проведення теоретичних та експериментальних досліджень були обрані спираючись на попередні дослідження [8, 9], а саме:

- тип алюмінієвого сплаву EN AW 6063;
- діаметр валків $D_6 = 180$ мм;

- швидкість обертання валків $W_e = 23,5$ об/хв;
- розміри одного шару заготовки $h_0 \times b_0 \times l_0 = 3$ мм \times 36 мм \times 120 мм;
- номінальний ступінь деформації $\varepsilon = 35$ %.

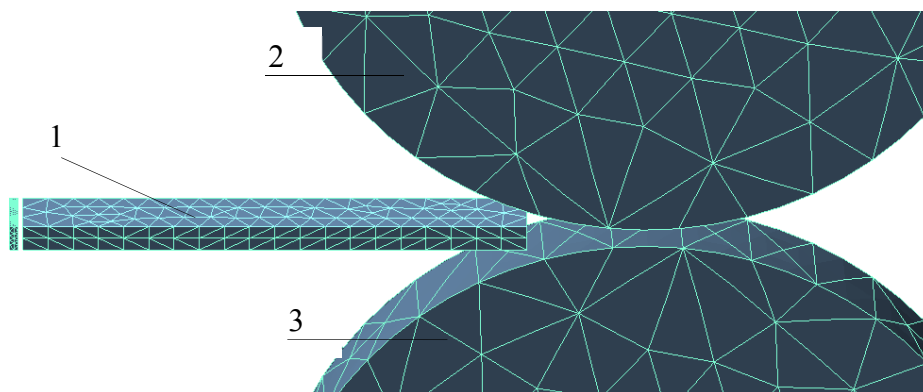


Рис. 1. Приклад геометрії процесу прокатки штаби в QShape:
1 – полоса до прокатки; 2 і 3 – верхній та нижній валки, відповідно

Температура нагріву заготовки (T) перед прокаткою при проведенні першого експерименту складала 200 °С, при другому експерименті – 530 °С.

Під час підготовки кожен зразок був очищений за допомогою спирту. Зразки були скріплені за допомогою алюмінієвих заклепок з обох кінців для уникнення зсуву зразка один відносно одного. В результаті отримано наступні результати: При прокатці з початковою температурою 200 °С та ступенем деформації 35 % зчеплення між шарами не було утворене. У той же час, комбінація температури нагріву 530 °С та ступеню деформації 35 % дозволила отримати з'єднання шарів. Однак, слід зазначити, що у подальшому це з'єднання виявилось нестабільним. Композиція була схильна до розшарування під час гнуття.

При моделюванні були прийняті наступні граничні умови. Коефіцієнт тертя на поверхні метал-валки – $0,47$ за системою Кулона, коефіцієнт тертя між шарами композиції – за законом Зібеля (-10). Коефіцієнт теплопередачі між полосою та валками у програмній системі визначений як простий – температура інструменту розраховується лише на контактній поверхні з заготовкою. При цьому температура валків приймається 20 °С. Критичним параметром для успішного моделювання виявився коефіцієнт тертя між шарами металу. Шляхом підбору, за умови відповідності параметрів процесу експериментальним даним, його значення було прийняте з діапазону, що лежить за межами фізичного сенсу закону Зібеля. Однак саме таке значення дозволило отримати адекватні результати розрахунків.

На рис. 2 зображено композицію з двох полос, яку було отримано в результаті спільної прокатки. Слід також враховувати, що в реальному експерименті, листи скріплюються між собою заклепками вплив наявності котрих на розширення та видовження не було визначено.



Рис. 2. Приклад вимірювання розмірів заготовки

У табл. 1 вказані геометричні розміри заготовки та параметри деформації зразка після проведення першого моделювання.

Критерієм верифікації є фактична ступінь деформації ε , яка розраховується як:

$$\varepsilon = \frac{2h_1 - 2h_0}{2h_0},$$

де ε – ступінь деформації;

$2h_0$ – початкова товщина заготовки;

$2h_1$ – кінцева товщина заготовки.

Таблиця 1

Параметри деформації після проведення першого дослідження

	Початковий розмір, мм	Моделювання		Експеримент	
		Кінцевий розмір, мм	Відносна деформація %	Кінцевий розмір, мм	Відносна деформація, %
Товщина ($2 \times h_0$)	6	3,90	35,00	3,88	35,33
Довжина	120	168,29	40,24	167,07	39,23
Ширина	36	37,16	3,22	37,3	3,61

Відносна деформація по товщині, яка отримана під час математичного моделювання, відрізняється від отриманої під час проведення фізичного експерименту на 0,33 %. Відносна деформація по довжині, яка отримана під час математичного моделювання, відрізняється від отриманої під час проведення фізичного експерименту на 1,22 %. Відносна деформація по ширині, яка отримана під час математичного моделювання, відрізняється від отриманої під час проведення фізичного експерименту на 0,39 %.

У табл. 2 порівняно отриману геометрію при другому експерименті та при моделюванні. Для верифікації моделі порівняно величини відносних деформацій. Розбіжності у отриманих величинах відносних деформацій, за результатами натурального експерименту та математичного моделювання, по товщині, довжині та ширині зразків складають 0,33 %, 11,91 % та 0,54 % відповідно.

Таблиця 2

Параметри деформації після проведення другого дослідження

	Початковий розмір, мм	Моделювання		Експеримент	
		Кінцевий розмір, мм	Відносна деформація %	Кінцевий розмір, мм	Відносна деформація, %
Товщина ($2 \times h_0$)	6	3,87	35,50	3,89	35,17
Довжина	120	181,69	51,41	167,4	39,50
Ширина	36	36,57	1,60	36,77	2,14

На нашу думку, висока розбіжність величин відносних деформацій по довжині при моделюванні та при проведенні відповідного натурального експерименту може бути пов'язана з рядом факторів, а саме:

1. Вплив наявності заклепок при проведенні відповідного натурального експерименту, присутність яких може впливати на подовження металу при прокатці.

2. Вплив коефіцієнту теплопередачі від полоси до валків [10].

3. Вплив коефіцієнту тертя між полосами при прокатці. Цей коефіцієнт складно визначити при експериментальних дослідженнях. Для найбільшої збіжності результатів моделювання з експериментом у математичній моделі застосовують коефіцієнт тертя по Зібелю, який дорівнює «-10».

4. Вплив форми переднього та заднього кінців прокатаних алюмінієвих полос. На рис. 3 показана різниця між геометричними формами переднього та заднього кінців зразків, які отримано у результаті проведення натурних експериментів (а) та математичного

модельовання (б). Математичне моделювання не відображає контактне тертя поверхні валків та зразку. Тому форма переднього краю зразку після натурального експерименту має округлу форму на відміну від форми зразку після моделювання.

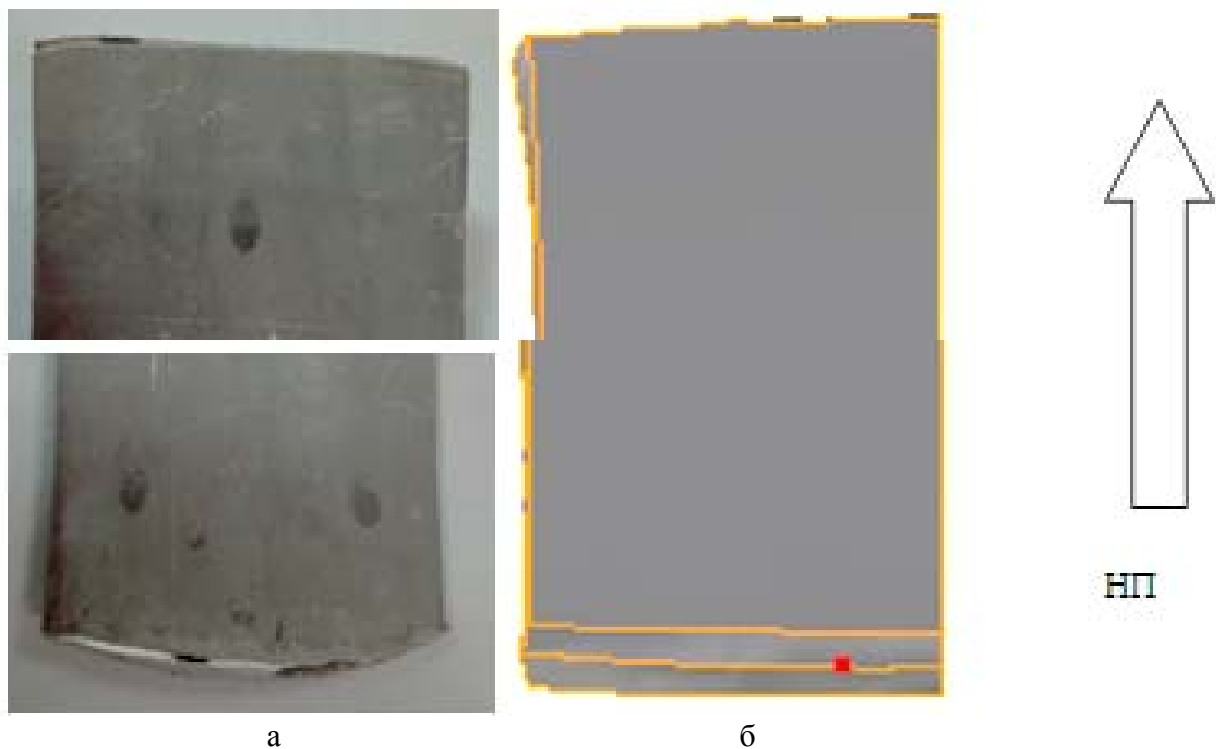


Рис. 3. Форма переднього та заднього кінців прокатаних алюмінієвих полос після натурального експерименту (а) та після математичного моделюванні (б) (НП – напрямок прокатки)

ВИСНОВКИ

Аналіз літературних джерел в області моделювання процесу прокатки показав, що математичне моделювання в програмному забезпеченні QForm дозволяє отримувати результати, які відповідають натурному експерименту з меншими розбіжностями, ніж при використанні іншого програмного забезпечення. Аналіз проведених теоретичних та експериментальних досліджень свідчить про те, що математична модель процесу прокатки алюмінієвих полос адекватно відображає реальний експеримент, оскільки критерій верифікації по величинам деформації виконано з розбіжністю в межах 1 %. При спільній прокатці двох алюмінієвих полос з початкової температури 200 °С отримані розбіжності в показниках формозміни металу знаходяться в межах 1 %. Але в експериментальному дослідженні наявне розшарування зразків (відсутнє зчеплення між шарами після прокатки). При прокатці з температурою 530 °С розбіжність відносних деформацій по товщині та ширині зразків знаходиться в межах 1 %. Але відносна деформація по довжині для теоретичного та експериментального дослідження відрізняється на 11,91 %. Це пояснюється наявністю факторів, які не враховуються при математичному моделюванні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Manesh H. D. *Effective parameters on bonding strength of roll bonded Al/St/Al multilayer strips* / H. D. Manesh, HSh. Shahabi // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2009. – № 476. – P. 292–299.
2. Chaudhari P. *Cold roll bonding of multi-layered bi-metal laminate composites* / P. Chaudhari, V. Acoff // *Composites Science and Technology*. – 2009. – № 69(10). – P. 1667–1675.
3. Yan H. *A study of warm and cold roll-bonding of an aluminum alloy* / H. Yan, G. Lenard // *Materials Science and Engineering*. – 2004. – № 385(12). – P. 419–428.
4. Patent US3201862 USA. *Process for making steel-reinforced aluminum members – a new method* / K. Gotoh. – 1965.

5. Patent US3551996.USA. Process for the production of aluminum-steel composite – a new method / Cole D. Q., Davis L. R. W., Sumner E. V. – 1971.
6. Bogatov A. Deformation, stress and fracturing of steel in the process of flat rolling / H. Dyja, D. Nukhov // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2016. – № 51(4). – P. 379–384.
7. Bogatov A. FEM-simulation of plate rolling process, analysis of inhomogeneous deformation and indexes of stress state in the deformation zone / A. Bogatov, D. Nukhov, K. Pyankov // *International Scientific Journal published monthly by the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering*. – 2014. – Volume 66. – Issue 1. – P. 31–38.
8. Li L. Progress in cold roll bonding of metals / L. Li, K. Nagai, F. Yin // *Sci. Technol. Adv. Mater.* – 2008 ; 9 : 11 pp – doi:10.1088/1468-6996/9/2/023001.
9. Evaluation of inside heat transfer coefficient of roll bond evaporator for room air conditioner / Ravi P. S., Krishnaiah A., Akella S., Azizuddin Md. // *International Journal of innovative research in science, engineering and technology*. – 2015. – Vol. 4. – Issue 5. – P. 3378–3384.
10. Тришевский О. И. Математическая модель теплового состояния системы валок – полоса и её использование для реконструкции станков горячей прокатки / О. И. Тришевский, Н. В. Салтавец // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С. 53–58.*

REFERENCES

1. Manesh H. D. Effective parameters on bonding strength of roll bonded Al/St/Al multilayer strips / H. D. Manesh, HSh. Shahabi // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2009. – № 476. – P. 292–299.
2. Chaudhari P. Cold roll bonding of multi-layered bi-metal laminate composites / P. Chaudhari, V. Acoff // *Composites Science and Technology*. – 2009. – № 69(10). – P. 1667–1675.
3. Yan H. A study of warm and cold roll-bonding of an aluminum alloy / H. Yan, G. Lenard // *Materials Science and Engineering*. – 2004. – № 385(12). – P. 419–428.
4. Patent US3201862 USA. Process for making steel-reinforced aluminum members – a new method / K. Gotoh. – 1965.
5. Patent US3551996.USA. Process for the production of aluminum-steel composite – a new method / Cole D. Q., Davis L. R. W., Sumner E. V. – 1971.
6. Bogatov A. Deformation, stress and fracturing of steel in the process of flat rolling / H. Dyja, D. Nukhov // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2016. – № 51(4). – P. 379–384.
7. Bogatov A. FEM-simulation of plate rolling process, analysis of inhomogeneous deformation and indexes of stress state in the deformation zone / A. Bogatov, D. Nukhov, K. Pyankov // *International Scientific Journal published monthly by the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering*. – 2014. – Volume 66. – Issue 1. – P. 31–38.
8. Li L. Progress in cold roll bonding of metals / L. Li, K. Nagai, F. Yin // *Sci. Technol. Adv. Mater.* – 2008 ; 9 : 11 pp – doi:10.1088/1468-6996/9/2/023001.
9. Evaluation of inside heat transfer coefficient of roll bond evaporator for room air conditioner / Ravi P. S., Krishnaiah A., Akella S., Azizuddin Md. // *International Journal of innovative research in science, engineering and technology*. – 2015. – Vol. 4. – Issue 5. – P. 3378–3384.
10. Trishevskij O. I. Matematicheskaja model' teplovogo sostojanija sistemy valok – polosa i ejo ispol'zovanie dlja rekonstrukcii stanov gorjachej prokatki / O. I. Trishevskij, N. V. Saltavec // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. trudov. – Kramatorsk : DGMA, 2010. – № 2 (23). – S. 53–58.*

Макеєва Г. С. – аспірант НМетАУ;

Фролов Я. В. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ;

Панюшкін М. Є. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ.

НМетАУ – Національна металургійна академія України, м. Дніпро.

E-mail: makeeva@metal-forming.org; frolov@metal-forming.org; panushkin@metal-forming.org

Стаття надійшла до редакції 11.09.2017 р.