

УДК 621.777.01:621.774.38

Лагута Т. С.  
Андреев В. В.  
Бобух О. С.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРЯМОГО ГАРЯЧОГО ПРЕСУВАННЯ ТРУБ ІЗ ВИСОКОМІЦНОГО АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ ЛЕГОВАНОГО СКАНДІЄМ

Останнім часом у світі найбільш розповсюдженою тенденцією, з точки зору заміни традиційних (чорних) матеріалів, є використання в машинобудуванні та авіаційно-космічній техніці більш легких сплавів, наприклад – алюмінієвих, таких як сплави системи Al-Mg, Al-Mn та більш складні – Al-Mg-Sc, Al-Li та ін. [1, 2]. Висока питома міцність алюмінієвих сплавів збільшує вантажопідйомність і зменшує експлуатаційні витрати пересувного транспорту. Висока корозійна стійкість матеріалу подовжує терміни експлуатації, розширює асортимент товарів, що перевозяться, включаючи рідини і гази з високою агресивною концентрацією.

На даний час на практиці існують лише обмежені технології та рекомендації щодо проведення процесу пластичної деформації сплавів системи Al-Mg-Sc. Однак, в літературі є велика кількість способів і рекомендацій по технологіям виробництва продукції з важкодеформованих алюмінієвих сплавів, які не зміцнюються термічною обробкою.

Авторами ряду робіт, такі як В. Н. Щерба, Я. М. Охріменко та ін. експериментально встановлено, що на розвиток зміцнюючих та знеміцнюючих процесів суттєво впливає спосіб пресування. Так, при швидкісному процесі пресування з активним тертям (СПАТ-процес) забезпечується більш високий рівень механічних властивостей [3]. Автор стверджує, що при підвищенні інтенсивності периферійної течії металу істотно зростає рівень межі міцності матеріалу. Однак обладнання для СПАТ-процесу складне і в світовій практиці є всього кілька таких пресових установок, але на українських підприємствах повністю відсутнє.

У своїй роботі автор досліджував різні режими гомогенізації заготовок і загартування у воді готових листів після прокатки [4]. На підставі отриманих параметрів були рекомендовані технологічні режими обробки, однак, як і показав попередній аналіз, наявність великої кількості проміжних операцій зумовлює багатоциклічність операцій та не ефективність використання енергоресурсів.

Також в літературі присутні дані про суміщені технології пресування і прокатки високоміцних алюмінієвих сплавів [5–6]. Однак із вказаних робіт залишаються невідомими раціональні технологічні режими деформування розглянутих сплавів.

Метою даної роботи є аналіз та дослідження залежностей впливу температурно-деформаційних параметрів процесу прямого гарячого пресування заготовок із Al-Mg-Sc сплаву, з урахуванням режимів попередньої деформаційної обробки, на напружено-деформований стан металу та енергосилові параметри, а також розробка рекомендацій щодо технології виробництва труб.

Оцінку впливу основних технологічних параметрів процесу пресування труб, серед яких температура нагріву заготовки, геометричні характеристики матриці (кут конусності), коефіцієнт витяжки і швидкість пресування, на напружений стан металу і енергосилові параметри виконували шляхом проведення чисельного експерименту. Теоретичне дослідження проводилося з використанням методики експериментального дослідження на основі повнофакторного експерименту  $2^4$  [7]. Основними факторами, що варіювалися обрано:

- температура ( $X_1$ )  $T$ , °C :  $X_1^+ = 410$  °C,  $X_1^- = 360$  °C;
- кут конусності матриці ( $X_2$ )  $\alpha$ :  $X_2^+ = 130^\circ$ ,  $X_2^- = 90^\circ$ ;
- коефіцієнт витяжки ( $X_3$ )  $\lambda$ :  $X_3^+ = 100$ ;  $X_3^- = 20$ ;
- швидкість пресування ( $X_4$ )  $V$ , мм/с:  $X_4^+ = 8$  мм/с,  $X_4^- = 2$  мм/с.

Схематичне зображення збірки інструменту і заготовки показано на рис. 1. Геометричні розміри обрані згідно технологічного інструменту, що використовується в промисловості ( $D_k = 159$  мм;  $D_3 = 153$  мм). Для моделювання використовували заготовку, що була отримана в процесі математичного моделювання операцій вільного кування «осадка» та «протяжка» за режимом № 9, який наведений в роботі [8].

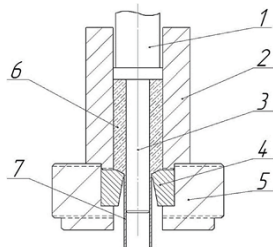


Рис. 1. Схема збірки інструменту для пресування:

1 – прес-штемпель; 2 – контейнер; 3 – оправка; 4 – матриця; 5 – матрицетримач; 6 – заготовка з алюмінієвого сплаву; 7 – алюмінієва труба

У процесі дослідження визначали максимальну силу пресування, максимальну температуру металу в осередку деформації, інтенсивність деформації, а також розподіл полів швидкостей течії металу, а саме висоту «мертвої зони» металу.

Аналіз напруженого стану металу під час пресування. Аналізуючи отримані дані при пресуванні труб з різними кутами конусності матриці, найбільш рівномірний розподіл інтенсивності нормальних напружень – середніх напружень (виражено в МПа і розрахованих за формулою (1) [9]) спостерігається при кутах рівних  $130^\circ$ , що може бути рекомендовано при розробці технологічного режиму процесу пресування труб.

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (1)$$

При цьому, з наведених результатів видно, що величини розтягуючих напружень знаходяться в діапазоні від 80 МПа до 120 МПа. В одиничних випадках, а саме в обтискній зоні пластичної деформації металу (ОЗПД) (на контакті металу з пояском матриці), спостерігається незначне збільшення даних напружень до величини 160–200 МПа. Однак вказане збільшення розтягуючих напружень не повинно призводити до виникнення будь-яких дефектів пластичного походження і пов'язано це в першу чергу з тим, що величина межі міцності матеріалу для даних умов знаходиться на рівні 250 МПа.

Подальший аналіз наведених даних показав також те, що на контакті між матрицею і контейнером в металі виникає зона з істотно малими напруженнями, що знаходяться в діапазоні від 0 МПа до 20 МПа. Зазначене явище пов'язане з виникненням так званої зони важкої деформації або «мертвої зони» при пресуванні. З літератури відомо [10], що одним з факторів, який в істотній мірі впливає на величину сили пресування і є той обсяг металу, який утворює «мертву зону». У зв'язку з цим в роботі проведено аналіз величини «мертвої зони» металу під час пресування труб з обраного сплаву.

Аналіз величини «мертвої зони» під час пресування. Аналіз величини, а саме максимальної висоти розглядаємої зони будемо за схемою, яка наведена на рис. 2.

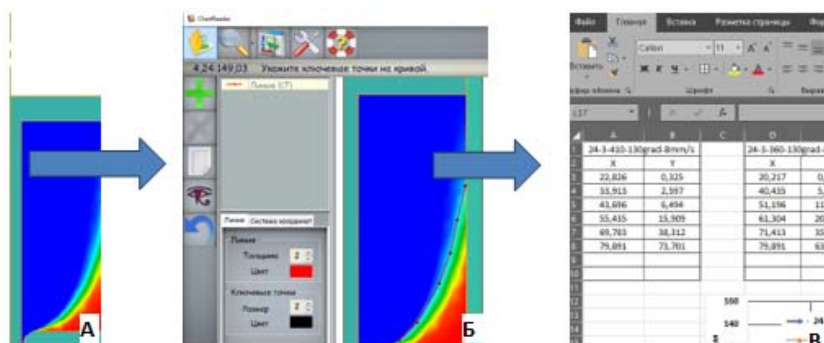


Рис. 2. Схема обробки результатів оцінки «мертвих зон» при пресуванні

Згідно до наведеної схеми, обробка полягала в перенесенні графічних даних з ПП QForm® (рис. 2, а) в ПП EXCEL® (рис. 2, в). Проміжною програмою в процесі перенесення даних виступав ПП ChartReader® (рис. 2, б). Програма ChartReader призначена для отримання даних з графіків в полярних або декартових координатах, представлених у вигляді графічних растрових файлів (jpeg, bmp). Зображення графіка може бути зорієнтоване під будь-яким кутом. Отримані дані можна зберегти в текстовий файл, передати їх в будь-який табличний редактор (Excel, Origin і т. д.).

В результаті обробки отримані графіки змінення висоти «мертвої зони» в залежності від обраних умов деформації (рис. 3). Аналіз наведених даних показав, що максимальна висота «мертвої зони» спостерігається при низьких швидкостях пресування (2 мм/с) для обох випадків кута нахилу матриці ( $\alpha_m = 90^\circ$  та  $\alpha_m = 130^\circ$ ), що в свою чергу буде служити фактором, який в істотному ступені збільшить силу пресування і величину прес-залишку. Збільшення ж обсягу металу, який припадає на прес-залишок, призведе до зниження виходу придатного готового металу і зниження загальної продуктивності агрегату.

Також як і передбачалося, зміна коефіцієнта витяжки не приводить до істотної зміни висоти «мертвої зони» (за інших рівних умов), що робить даний фактор не значущим при можливій розробці технології пресування.

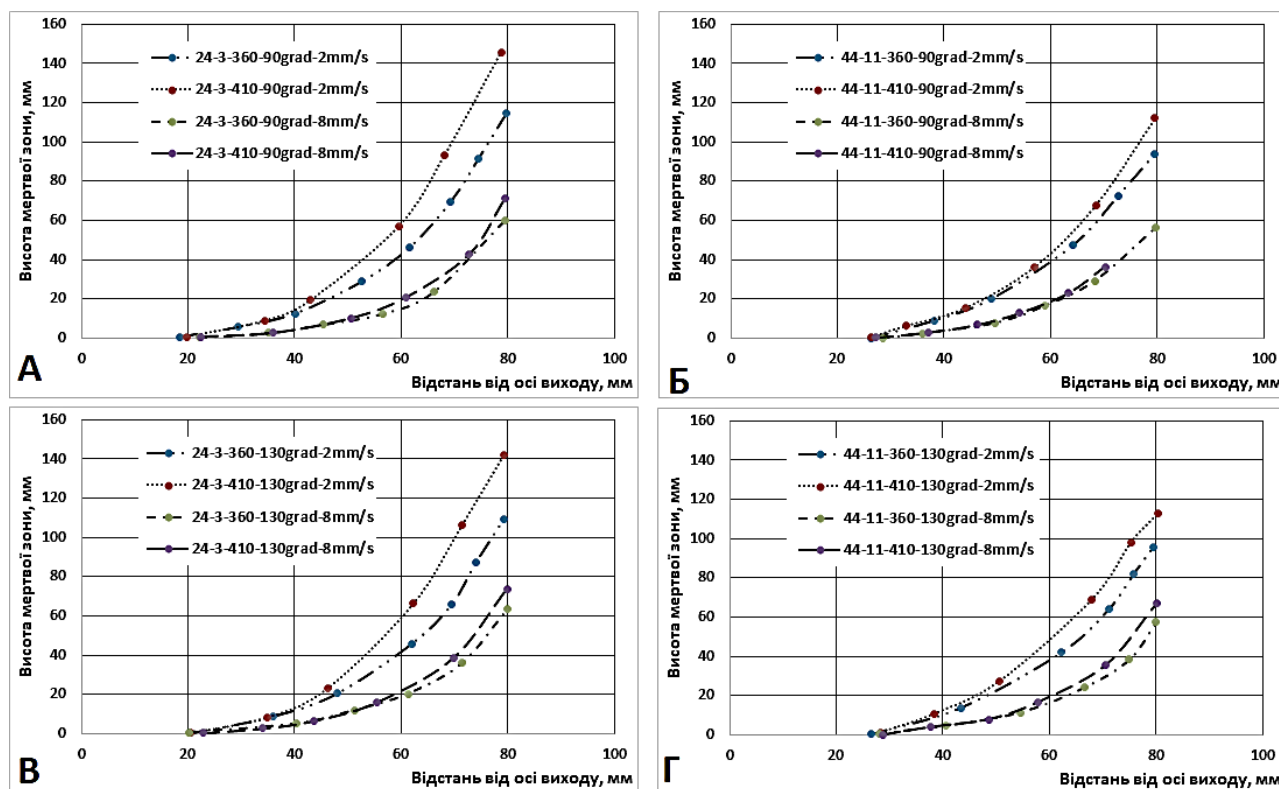


Рис. 3. Графічне зображення зміни висоти «мертвої зони» по перетину заготовки в процесі пресування

Аналіз температурного режиму пресування. Як бачимо з літератури [10–12], критична температура деформації обраного сплаву для дослідження знаходиться вище температури  $440^\circ\text{C}$ . З метою оцінки впливу обраних факторів на зміну максимальної температури в процесі пресування проведено аналіз математичного моделювання (рис. 4).

Як видно з наведених даних, в більшості випадків максимальна температура пресування перевищує критичну величину. Найбільш рекомендованими режимами можуть виступати режими № 4, № 8, № 10–12, № 14–16, температура яких знаходиться в межах  $380\text{--}420^\circ\text{C}$  і залежить, в основному, від деформаційно-швидкісних параметрів процесу.

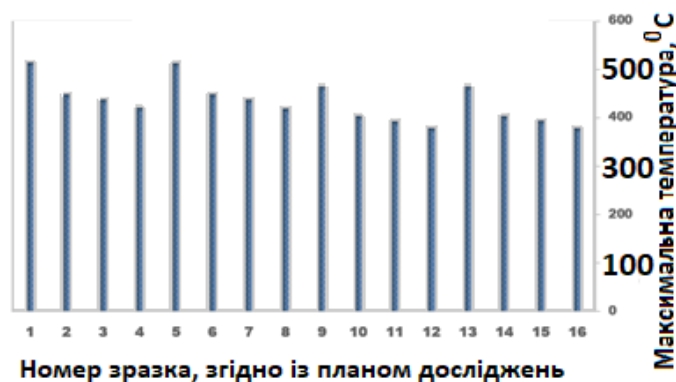


Рис. 4. Зміна максимальної температури пресування згідно плану дослідження

У процесі статистичної обробки отриманих даних визначено скорочене рівняння регресії для заданих умов деформації (2):

$$Y (^{\circ}\text{C}) = 432,6 + 22,5X_1 + 25,25X_3 + 20X_4 + 1,1X_{13} + 11,7X_{34}. \quad (2)$$

Дослідження сили пресування. Найбільш важливим для технолога, фахівця в області пресування металів, є питання визначення зусилля і напруги пресування. За зусиллям пресування проводять вибір преса, придатного для виробництва даного виду виробу, а за напруженням пресування судять про можливість використання маючого в наявності пресового інструменту.

Однак урахування комплексного впливу наведених факторів при оцінці сили пресування є скрутним, а більшість факторів, які входять в відомі рівняння, можуть бути визначені лише під час експериментальних досліджень. У зв'язку з цим в роботі проведено дослідження сили пресування труб з алюмінієвого сплаву системи Al-Mg-Sc в процесі математичного моделювання в ПП QForm. Використання програмного продукту QForm забезпечене в рамках угоди про використання пробної навчальної ліцензії програми QForm 8 між Micas Simulations Limited (м. Оксфорд, Великобританія) та кафедрою обробки металів тиском ім. акад. О. П. Чекмарьова НМетАУ (м. Дніпро, Україна) – agreement No. MSL2015\_10\_5 від 28.10.2015 р.

Визначення максимальної сили пресування відбувалося шляхом аналізу графіка сили в візуалізаторі програми (рис. 5). Висота піка на графіку відповідає максимальній силі ( $P_{\text{макс}}$ ), що і було шуканою функцією для подальшого статистичного аналізу (табл. 1).

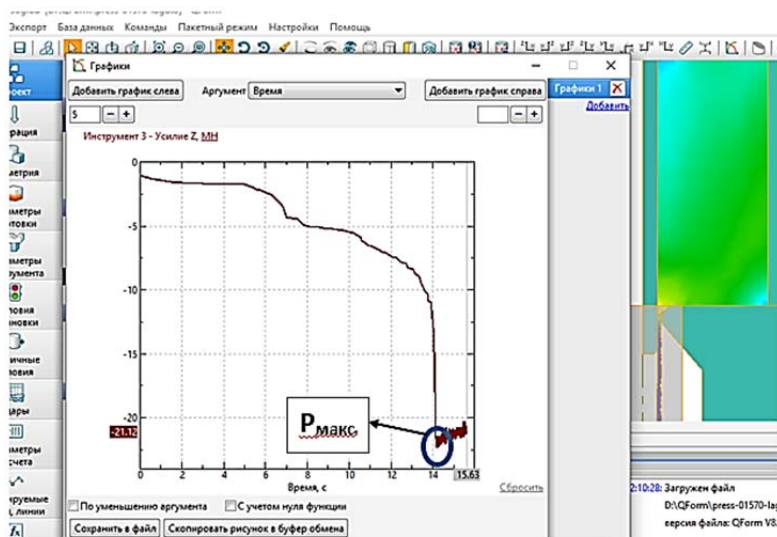


Рис. 5. Візуалізація графіку зміни сили пресування

Таблиця 1

Значення функції пошуку – сили пресування

№ досл.	$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha$ , град	$l$	$V$ , мм/с	$P_{\text{макс}}$ , МН	Розмір труб
	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$	$Y$	–
1	410	130	100	8	24,3	Ø24 × 3
2	410	130	100	2	18,27	Ø24 × 3
3	410	130	20	8	12,12	Ø40 × 11
4	410	130	20	2	9,94	Ø40 × 11
5	410	90	100	8	24,7	Ø24 × 3
6	410	90	100	2	18,1	Ø24 × 3
7	410	90	20	8	12,55	Ø40 × 11
8	410	90	20	2	9,62	Ø40 × 11
9	360	130	100	8	26,4	Ø24 × 3
10	360	130	100	2	21,4	Ø24 × 3
11	360	130	20	8	16,01	Ø40 × 11
12	360	130	20	2	13,96	Ø40 × 11
13	360	90	100	8	25,93	Ø24 × 3
14	360	90	100	2	22,3	Ø24 × 3
15	360	90	20	8	16,03	Ø40 × 11
16	360	90	20	2	13,8	Ø40 × 11

В результаті статистичного аналізу визначені коефіцієнти рівняння регресії сили на прес-штемплі (МН), що виникає при пресуванні труб з обраного для досліджень алюмінієвого сплаву. Однак у зв'язку з тим, що неможливо провести оцінку значущості певних факторів за відомими методиками, тому що відсутнє дублювання експериментів, скористаємося графічним зображенням величини факторів (рис. 6).

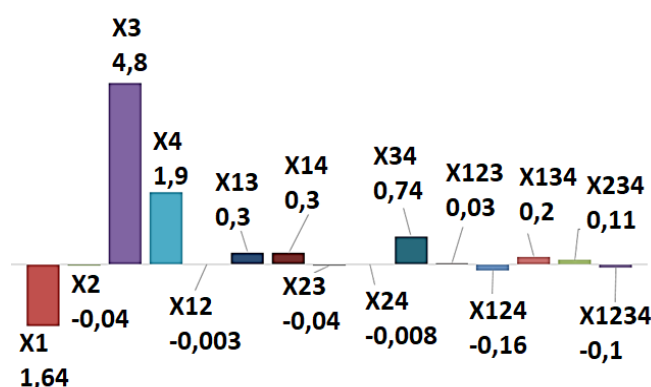


Рис. 6. Схема до визначення значущості коефіцієнтів рівняння регресії

Для спрощення розрахунків сили пресування згідно зі схемою, яка наведена на рис. 6, рівняння регресії можна записати в скороченому вигляді (3), тобто без урахування спільного впливу чинників – це у свою чергу призведе до завищення результату лише на 5 % в порівнянні з вихідним виразом:

$$Y \text{ (МН)} = 17,84 - 1,64X_1 + 4,84X_3 + 1,92X_4. \quad (3)$$

З метою комплексного аналізу температурно-силових параметрів процесу пресування побудовані гістограми зміни максимальної сили і пікової температури (рис. 7) для обраних умов досліджень.

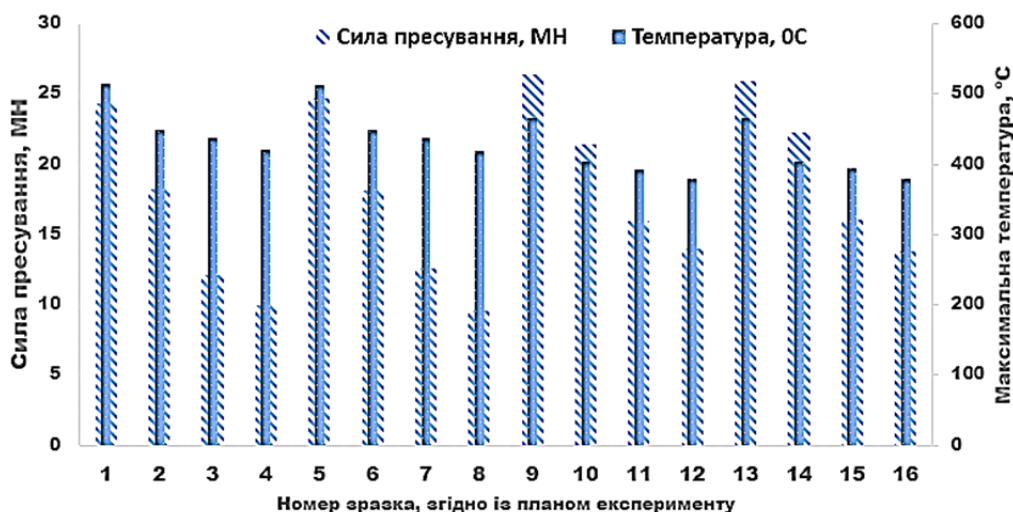


Рис. 7. Графічне зображення максимальної сили і температури в процесі пресування

### ВИСНОВКИ

Встановлено, що максимальна висота «мертвої зони» спостерігається при низьких швидкостях пресування (2 мм/с) для обох випадків кута нахилу матриці ( $\alpha_m = 90^\circ$  та  $\alpha_m = 130^\circ$ ), що в свою чергу буде служити фактором, який в істотному ступені збільшить силу пресування і величину прес-залишку. Збільшення ж обсягу металу, який припадає на прес-залишок, призведе до зниження виходу придатного готового металу і зниження загальної продуктивності агрегату.

Величини розтягуючих напружень знаходяться в діапазоні від 80 МПа до 120 МПа. В одиничних випадках, а саме в обтискній зоні пластичної деформації металу (ОЗПД), спостерігається незначне збільшення даних напружень до величини 160–200 МПа. Подальший аналіз наведених даних показав також те, що на контакті між матрицею і контейнером в металі виникає зона з істотно малими напруженнями, що знаходяться в діапазоні від 0 МПа до 20 МПа.

З отриманих даних видно, що найбільш рекомендованими режимами пресування можуть виступати:

- для гідравлічних пресів зусиллям до 10 МН – режим № 4 та № 8, що відповідає пресуванню труб  $\varnothing 40 \times 11$  мм при максимальній температурі нагріву вихідної заготовки ( $T = 410^\circ\text{C}$ ). Зазначений типорозмір труб може бути використаний в якості вихідної заготовки для подальшого оправочного і безопрочночного волочіння;

- для гідравлічних пресів зусиллям до 20 МН – режим № 2 і № 6, що відповідає пресуванню труб  $\varnothing 24 \times 3$  мм при максимальній температурі нагріву вихідної заготовки ( $T = 410^\circ\text{C}$ ). Однак, з метою зменшення максимальної температури, яка виникає в процесі пресування, температуру нагрівання слід зменшити на  $20^\circ\text{C}$ , що спричинить незначне збільшення сили. Зазначений типорозмір труб може бути використаний в якості готового виробу в машинобудуванні та авіаційно-космічній техніці.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Авіаційно-космічні матеріали та технології* / [Богуслав В. О., Качан О. Я., Калініна Н. С. та ін.]. – Запоріжжя : ВАТ «Мотор-Січ», 2009. – 383 с.
2. Елагин В. И. Конструкционные наноструктурные сплавы на алюминиевой основе / В. И. Елагин // *Цветные металлы*. – 2009. – № 6. – С. 103–111.
3. Щерба В. Н. *Технология прессования металлов* : учебник / В. Н. Щерба, Л. Х. Райтбарг. – М. : Металлургия, 1995. – 336 с.
4. US Patent 4,806,174 C22F 1/04. Chul W. Cho. *Aluminum-Lithium Alloys and method of making the same*. Date of Patent: Feb. 21, 1989.
5. Davydov V. G. *Semiproducts from new perspective aluminium alloys with scandium additions, the structure, properties, applications* / V. G. Davydov, V. I. Yelagin, V. V. Zakharov [and other] // *Proc. of Int. Conf. on Engineering and Technological Sciences 2000 (ICETS 2000). Advanced Materials, vol. 2, Oct. 11, 2000. – Beijing, China. – P. 1162–1168.*

6. Пат. РФ 2395356 B21B23/00. Способ изготовления труб из алюминиевых сплавов / Митберг Б. Я. и др.; заявитель и патентообладатель ОАО "Чепецкий механический завод" (RU). – № 2009132921/02 ; заявл. 01.09.2009 ; опубл. 23.10.2010.
7. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов : учебник для вузов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение, 1980. – 304 с.
8. Андреев В. В. Исследование условий деформации сплава системы Al-Mg-Sc в процессе свободнойковки и горячего прессования / [В. В. Андреев, Д. В. Коноводов, А. В. Ашкелянец, Н. Дыжа] // *New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering.* – Częstochowa: Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów Politechniki Częstochowskiej. – 2017. – № 57. – P. 114–123. – ISSN 2391-632X.
9. QForm VX 8.2 : Руководство пользователя, версия 8.2. [Электронный ресурс]. – ООО «Квантор-Форм», 2017. – Режим доступа: <http://qform3d.com/products/tutorial>.
10. Данченко В. Н. Производство профилей из алюминиевых сплавов. Теория и технология: учебник / В. Н. Данченко, А. А. Миленин, А. Н. Головки. – Днепрпетровск : Системные технологии, 2002. – 448 с.
11. Sitdikov O. Sh. Effect of temperature on the formation of a microstructure upon equal-channel angular pressing of the Al-Mg-Sc 1570 alloy / O. Sh. Sitdikov, E. V. Avtokratova, R. I. Babicheva // *The Physics of Metals and Metallography.* – 2010. – Vol. 110. – Issue 2. – PP. 153–161.
12. Андреев В. В. Дослідження граничних умов деформації сплаву системи Al-Mg-Sc / В. В. Андреев, О. М. Головки, О. В. Бондаренко // *Металургическая и горнорудная промышленность.* – 2011. – № 7(272). – С. 74–78.

## REFERENCES

1. Aviacijno-kosmichni materiali ta tehnologij / [Boguslaev V. O., Kachan O. Ja., Kalinina N. E. ta in.]. – Zaporizhzhja : VAT «Motor-Sich», 2009. – 383 s.
2. Elagin V. I. Konstrukcionnye nanostrukturnye splavy na aljuminievoj osnove / V. I. Elagin // *Cvetnye metally.* – 2009. – № 6. – S. 103–111.
3. Shherba V. N. Tehnologija pressovanija metallov : uchebnik / V. N. Shherba, L. H. Rajt barg. – M. : Metallurgija, 1995. – 336 s.
4. US Patent 4,806,174 C22F 1/04. Chul W. Cho. Aluminum-Lithium Alloys and method of making the same. Date of Patent: Feb. 21, 1989.
5. Davydov V. G. Semiproducts from new perspective aluminium alloys with scandium additions, the structure, properties, applications / V. G. Davydov, V. I. Yelagin, V. V. Zakharov [and other] // *Proc. of Int. Conf. on Engineering and Technological Sciences 2000 (ICETS 2000). Advanced Materials, vol. 2, Oct. 11, 2000. – Beijing, China. – P. 1162–1168.*
6. Pat. RF 2395356 B21B23/00. Sposob izgotovlenija trub iz aljuminievyh splavov / Mitberg B. Ja. i dr.; zavitel' i patentoobladatel' OAO "Chepeckij mehanicheskij zavod" (RU). – № 2009132921/02 ; zajavl. 01.09.2009 ; opubl. 23.10.2010.
7. Novik F. S. Optimizacija processov tehnologij metallov metodami planirovanija jeksperimentov : uchebnik dlja vuzov / F. S. Novik, Ja. B. Arsov. – M. : Mashinostroenie, 1980. – 304 s.
8. Andreev V. V. Issledovanie uslovij deformacii splava sistemy Al-Mg-Sc v processe svobodnoj kovki i garcheogo pressovanija / [V. V. Andreev, D. V. Konovodov, A. V. Ashkeljanec', H. Dycja] // *New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering.* – Częstochowa: Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów Politechniki Częstochowskiej. – 2017. – № 57. – P. 114–123. – ISSN 2391-632X.
9. QForm VX 8.2 : Rukovodstvo pol'zovatelja, versija 8.2. [Jelektronnyj resurs]. – ООО «Квантор-Форм», 2017. – Rezhim dostupa: <http://qform3d.com/products/tutorial>.
10. Danchenko V. N. Proizvodstvo profilej iz aljuminievyh splavov. Teorija i tehnologija: uchebnik / V. N. Danchenko, A. A. Milenin, A. N. Golovko. – Dnepropetrovsk : Sistemnye tehnologii, 2002. – 448 s.
11. Sitdikov O. Sh. Effect of temperature on the formation of a microstructure upon equal-channel angular pressing of the Al-Mg-Sc 1570 alloy / O. Sh. Sitdikov, E. V. Avtokratova, R. I. Babicheva // *The Physics of Metals and Metallography.* – 2010. – Vol. 110. – Issue 2. – PP. 153–161.
12. Andreev V. V. Doslidzhennja granichnih umov deformacii splavu sistemi Al-Mg-Sc / V. V. Andreev, O. M. Golovko, O. V. Bondarenko // *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'.* – 2011. – № 7(272). – S. 74–78.

Лагута Т. С. – магістр НМетАУ;  
Андреев В. В. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ;  
Бобух О. С. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ.

НМетАУ – Національна металургійна академія України, м. Дніпро.

E-mail: [andreiev@metal-forming.org](mailto:andreiev@metal-forming.org)

Стаття надійшла до редакції 13.10.2017 р.