

УДК 621.771.014

Коноводов Д. В.  
Андреев В. В.  
Мартинюк М. О.

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОЗДОВЖНЬОЇ ПРОКАТКИ ШТАБ ЗІ СПЛАВУ АЛЮМІНІЮ СИСТЕМИ Al-Mg-Sc

На протязі багатьох років сплави алюмінію застосовуються в авіаційній та космічній техніці. Сплави, що деформуються, системи Al-Mg отримали широке застосування завдяки високій пластичності, корозійній стійкості у різних середовищах та гарній зварюваності. Одним з основних недоліків цих сплавів є невисокі характеристики міцності.

Постійно актуальною задачею є зниження ваги та підвищення міцності вищевказаних сплавів. Підвищення міцності переважно досягається їх легуванням додатковими хімічними елементами у складі сплаву. Одним з таких елементів є Sc, додавання якого дозволяє значно підвищити механічні характеристики виробів. Тому були створені нові сплави, зокрема – системи Al-Mg-Sc.

Практично всі нові сплави є експериментальними. В Україні виробництво таких сплавів у великих промислових обсягах відсутнє. Тому виникає проблема проведення широких експериментальних досліджень процесів пластичної деформації таких сплавів. Скорочення обсягу досліджень гарячої деформації сплавів системи Al-Mg-Sc може бути досягнуто завдяки застосуванню методів математичного моделювання процесів обробки тиском. Використання якісної моделі процесу дозволить отримати попередні дані про формозміну матеріалу, температурні, кінематичні та енергосилові параметри процесу, що дозволить зменшити кількість та вартість експериментальних досліджень в наступному.

Як зазначалося вище, підвищення міцності сплавів алюмінію переважно досягається їх легуванням. Скандій впливає на процеси рекристалізації в сталі, а саме на розмір зерна матеріалу. При цьому відбувається підвищення механічних характеристик сплаву [1].

Додавання скандію значно впливає на здатність до обробки тиском алюмінієвих сплавів. Відомо, що сплави системи Al-Mg-Sc з вмістом магнію більше 4 %, мають суттєвий недолік – низьку пластичність [2]. В роботі [2] розглянуто можливість використання ефекту надпластичності при поєднання процесів рівноканального кутового пресування, холодної та гарячої прокатки. При цьому було досліджено ряд факторів, що впливають на формування ультрадрібнодисперсної структури матеріалу для реалізації ефекту надпластичності. Це вимагало проведення низки експериментальних досліджень та витрат матеріалу.

Експериментальне дослідження процесу поздовжньої прокатки штаб зі сплаву 01570 системи Al-Mg-Sc виконано в роботі [3]. Показано, що навіть у однакових умовах деформації іноді може виникати руйнування зразка. Це потребує подальших досліджень, зокрема теоретичних.

Для проведення теоретичних досліджень процесів пластичної деформації металів та сплавів застосовують моделі, в основу яких покладено метод скінчених елементів. Такі моделі дозволяють отримати поля напружень, деформацій та швидкостей деформації для аналізу процесу [4].

Метою даної роботи є теоретичне дослідження процесу прокатки штаб зі сплаву алюмінію системи Al-Mg-Sc з використання моделі процесу, що створено у програмному комплексі QForm.

Для теоретичного дослідження параметрів при поздовжній прокатці штаб зі сплаву системи Al-Mg-Sc була створена модель процесу гарячої прокатки у програмному комплексі QForm. Застосування 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.

Програма QForm (версія VX8.2) призначена для математичного моделювання методом скінчених елементів технологічних процесів обробки металів тиском з урахуванням термомеханічних процесів нагріву та охолодження металу, в тому числі, у процесі деформації, а також взаємодії заготовки, що деформується, з технологічним інструментом та обладнанням [5].

В основу математичної постановки покладена система рівнянь, які включають рівняння рівноваги, рівняння зв'язку між полем швидкостей матеріальних точок та швидкостей деформації, рівняння зв'язку між напруженим та деформованим станом, умови нестискаємості, критерій пластичності, рівняння енергетичного балансу. Опір деформації матеріалу заготовки вважається залежним від накопленої деформації, поточної швидкості деформації і температури та задається у вихідних даних. Користувач може задавати залежність опору деформації від інших параметрів, які розраховуються у підпрограмі користувача.

Матеріал вважається ізотропним та таким, що ізотропно зміцнюється.

Тертя на контактні між інструментом та заготовкою описується законом тертя Зибеля, Леванова, Кулона або змішаним.

Для виконання розрахунку у програмі 3D-моделювання QForm необхідно створити 3D-модель процесу прокатки: штабу, що деформується, прокатні валки та їх розташування у просторі. Описані вище дії можуть виконуватися у редакторі QShape або імпортуватися у QShape з інших CAD-систем.

Програма QForm дозволяє задавати площини симетрії у 3D-моделі та вести розрахунок для  $\frac{1}{2}$  або  $\frac{1}{4}$  моделі. Цей підхід оправдує себе для моделювання симетричних процесів, наприклад, процес прокатки штаби на гладкій бочці, що дозволяє значно скоротити час розрахунку та зменшити навантаження на апаратне забезпечення персонального комп'ютера.

На рис. 1 показано приклад 3D-моделі, що використовувались при дослідженні процесу прокатки штаб зі сплаву системи Al-Mg-Sc.

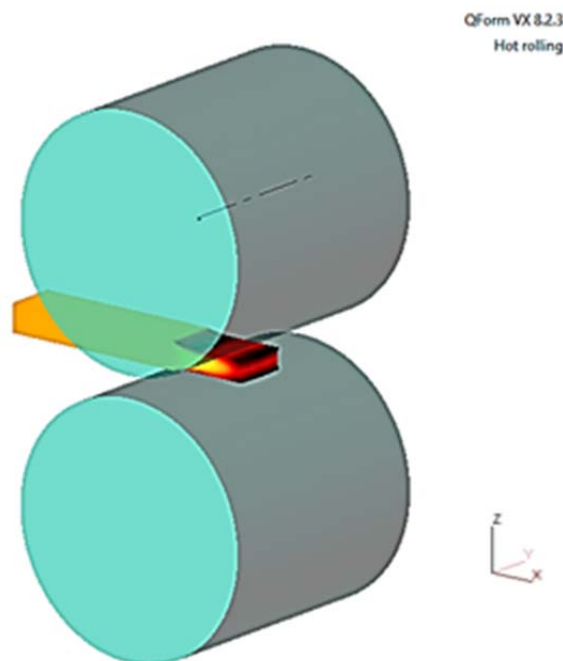


Рис. 1. Модель процесу прокатки штаби на стані дуо

Розміри бочки валків у 3D-моделі відповідають розмірам валків лабораторного стану 180 кафедри ОМТ НМетАУ. Обтиск штаб задавався зазором між робочими валками.

Вихідними даними для розрахунку були:

- матеріал заготовки – сплав Al-Mg-Sc;
- початкова температура заготовки – 360 та 420 °С;
- швидкість обертання валків – 0,26 м/с;
- накопичена ступінь деформації – відсутня,
- коефіцієнт зміни об'єму для кожної заготовки – 1,0;
- матеріал інструменту – сталь 40Х;
- температура інструменту – 20 °С;
- температура навколишнього середовища – 20 °С;
- теплообмін з заготовкою – простий;
- модель тертя задавали для умов гарячої прокатки сплавів алюмінію без мастила, яка описується законом Леванова.

Початкові розміри заготовки складали  $h_0 \times b_0 \times l_0 = 23 \times 40 \times 200$  мм та  $23 \times 60 \times 200$  мм. Ступінь деформації  $\varepsilon$  (відносний обтиск) склав 15, 25 та 35 %, що відповідає абсолютному обтиску 3,45 мм, 5,75 та 8,05 мм відповідно.

Реологічні властивості матеріалу (сплав 01570) задавали на підставі експериментальних даних для температури 360 та 420 °С та різних швидкостей деформації [6]. Також, крім значень опору деформації, були задані значення щільності, теплопровідності, теплоємності, температурного коефіцієнту лінійного розширення та хімічний склад матеріалу.

Швидкість деформації у процесі, що досліджувався, складала від 1,4 до 5,2 с<sup>-1</sup>.

З існуючих наукових публікацій відомо, що рекомендована температура гарячої деформації сплавів системи Al-Mg-Sc складає 360–420 °С [6]. Цей інтервал температур обрано із-за наявності піку максимуму пластичності матеріалу в гарячому стані. В той самий час гаряча деформація в цій області температур часто супроводжується утворенням гарячих тріщин і навіть руйнуванням зразків в процесі обробки тиском. Тому при проведенні дослідження приділяли увагу саме цьому діапазону температур деформації.

Процес прокатки не є оптимальним з точки зору схеми напружено-деформованого стану (НДС). Як відомо, загальною схемою НДС в зоні деформації при прокатці є схема всебічного стиску. Але на деяких ділянках зони деформації, у наслідок нерівномірності деформації, можуть виникати напруження розтягання. Це призводить до зміни схеми НДС і, як наслідок, може спричинити виникнення дефектів при прокатці.

Співвідношення ширини та висоти заготовки ( $b/h$ ), обумовлює величину та розподіл напружень в зоні деформації. Крім того, зміна ширини штаби призводить до зміни співвідношення напружень тертя на контактні штаби з валком у поперечному та поздовжньому напрямку. Напруження тертя, в свою чергу, обумовлюють плин металу в зоні деформації, зокрема розширення. Для моделювання процесу гарячої прокатки сплаву, що досліджується, обрали співвідношення  $b/h$  від 2 до 3.

Ступінь деформації є суттєвим фактором, який визначає енергосилові параметри процесу та формозміну металу при прокатці. Крім того, величина ступеня деформації (відносного обтиску) обумовлює структуру та механічні властивості прокатої штаби. Суттєвий науковий інтерес має визначення критичного ступеня деформації при прокатці штаб зі сплаву системи Al-Mg-Sc.

Зазвичай ступінь деформації за прохід при гарячій прокатці не перевищує 40–50 %. Для малопластичних сплавів це значення ще нижче і не перевищує 30–35 %. Для моделювання процесу прокатки, в даній роботі прийняли діапазон обтисків 15–35 %.

Підсумовуючі вищесказане, можна визначити фактори, що впливають на плин металу в зоні деформації, механічні властивості штаб та енергосилові параметри прокатки. Для визначення впливу цих факторів було реалізовано повний факторний експеримент [7]. Варіювалися три фактори на двох рівнях. В якості незалежних змінних було обрано: температуру нагріву заготовки, ступінь деформації за прохід, показник  $b/h$  для вихідної заготовки.

З використання розробленої математичної моделі, було досліджено комплексний вплив вищевказаних факторів на енергосилові параметри процесу та формозміну штаби при прокатці (розширення).

За даними розрахунку побудовані графічні залежності зміни сили та моменту в процесі прокатки. На рис. 2 показано графіки зміни сили та моменту при прокатці штаби шириною 60 мм.

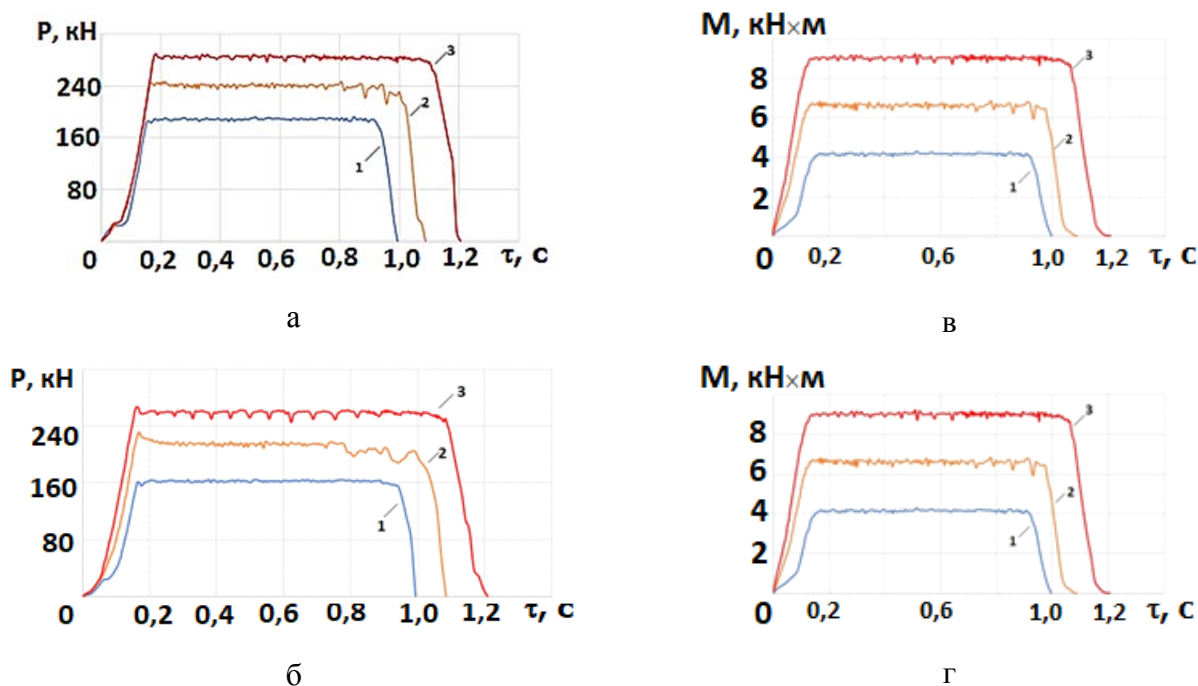


Рис. 2. Графік зміни сили (а, б) та моменту (в, г) прокатки при температурі 360 °С (а, в) та 420 °С (б, г): 1 –  $\varepsilon = 15\%$ , 2 –  $\varepsilon = 25\%$ , 3 –  $\varepsilon = 35\%$

Як слідує з рис. 2, значення сили прокатки для температури початку деформації 360 °С знаходяться у діапазоні 189–283 кН, а для випадку процесу при початковій температурі заготовки 420 °С – у діапазоні 162–258 кН, що є наслідком зниження опору деформації та відповідає існуючим уявленням теорії прокатки. З підвищенням ступеня деформації, сила прокатки збільшується. Графіки зміни моменту прокатки добре кореспондуються з кривими сили прокатки. Значення моменту прокатки знаходяться у діапазоні 4,2–9,0 кН·м для початкової температури 360 °С та 3,6–8,3 кН·м для температури початку деформації 420 °С. За результатами досліджень та статистичної обробки даних було отримано рівняння регресії впливу обраних факторів на силу прокатки ( $P$ , кН). Після переходу від символічних до дійсних змінних отримали:

$$P = 147.422 - 0.3788 \cdot T - 0.3402 \cdot \varepsilon + 34.811 \cdot \frac{b}{h} + 1.7026 \cdot \varepsilon \frac{b}{h}, \quad (1)$$

де  $T$  – початкова температура штаби, °С;

$\varepsilon$  – ступень деформації (відносний обтиск), %.

Використання вищевказаного рівняння дозволить в оперативному режимі визначати силу, що виникає при гарячій прокатці штаб зі сплаву 01570.

Крім енергосилових параметрів при прокатці, важливим є зміна геометричних розмірів заготовки з метою отримання кінцевого виробу. Програма QForm дозволяє виконати аналіз зміни геометричних розмірів штаби у процесі деформації. Можливо отримати значення розмірів штаби у будь-якому перерізі зони деформації.

Одним з основних геометричних факторів при прокатці є розширення. Як правило при прокатці реалізується вільне розширення, коли переміщенню металу в поперечному напрямку протидіють тільки сили тертя. З точки зору розширення, процес прокатки відноситься до процесів з непередписаною кінематикою. Тому точне прогнозування розширення штаби при прокатці є важливою задачею.

Для випадків прокатки, які досліджувалися, були отримані значення розширення штаби на виході із зони деформації.

Результати дослідження розширення при прокатці з різними ступенями деформації, для початкової ширини штаби 40 і 60 мм та температури початку процесу 360 і 420 °С, наведено на рис. 3.

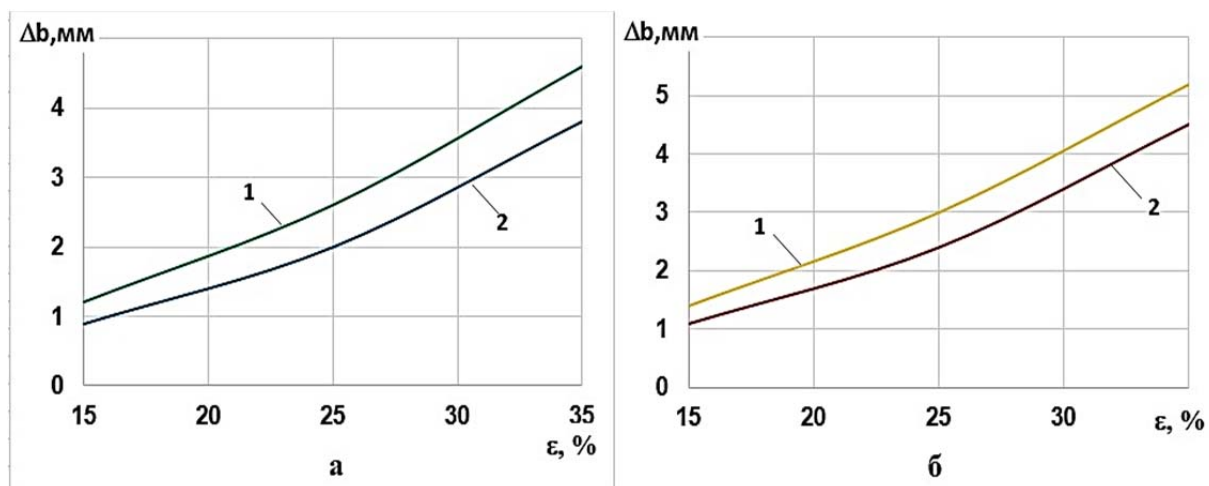


Рис. 3. Залежність розширення штаби від ступеня деформації при прокатці з початковою температурою нагріву 360 °С (а) і 420 °С (б): 1 –  $b_0 = 40$  мм; 2 –  $b_0 = 60$  мм

Як видно з рис. 3, розширення при прокатці збільшується з підвищенням ступеня деформації, що не суперечить існуючим уявленням.

Зі збільшенням початкової ширини штаби розширення зменшується, що добре відповідає існуючим експериментальним даним.

За результатами моделювання було отримано рівняння регресії (2) впливу факторів, що досліджувалися, на розширення при прокатці ( $\Delta b$ , мм):

$$\Delta b = 0.00038 \cdot T \cdot \varepsilon - 0.0226 \cdot \varepsilon \cdot \frac{b}{h} - 0.0023 \cdot T + 0.0784 \cdot \varepsilon + 0.039 \cdot \frac{b}{h} + 0.576. \quad (2)$$

З використанням даної залежності можливо прогнозувати розширення матеріалу при прокатці штаб зі сплаву системи Al-Mg-Sc з метою одержання штаб необхідних розмірів з мінімальною обрізкою.

З метою перевірки адекватності моделі, було виконано порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних значень сили прокатки.

Експериментальні дослідження були виконані на лабораторному стані дуо 180 лабораторії кафедри ОМТ НМетАУ. Сила прокатки вимірювалась за допомогою месдоз. Зразки перед прокаткою підігрівались в електричній печі. Вихідні параметри процесу прокатки, тобто розміри зразків, ступень та швидкість деформації, температура нагріву заготовки, відповідали параметрам, які були обрані для моделювання за допомогою програми QForm.

Порівняння значень сили прокатки для зразків з початковою шириною 60 мм, отриманих з експерименту, та значень, розрахованих у програмі QForm, показано у табл. 1.

Таблиця 1

Експериментальні та розрахункові значення сили прокатки та відхилення між ними

№ зразку	$\varepsilon$ , %	$P$ , кН	$P_{експ}$ , кН	$\Delta P/P_{експ}$ , %
1 (13)	15	162,4	173,6	+ 6,5
2 (15)	25	215,2	248,2	+ 13,3
3 (12)	35	258,5	294,4	+ 12,2

Як видно з табл. 1, відхилення розрахункових даних сили прокатки від експериментальних, для всього досліджуємого діапазону ступенів деформації, не перевищує 6–13 відсотків, що є задовільним. Це підтверджує можливість використання створеної моделі процесу прокатки для розрахунку енергосилових параметрів.

Аналіз формозміни металу в зоні деформації показав, що має місце розширення металу при прокатці сплаву системи Al-Mg-Sc. Розширення при прокатці розраховували як різницю між кінцевою та початковою шириною штаби. Порівняння значень розширення для зразків з початковою шириною 60 мм, отриманих з експерименту, та значень, розрахованих у програмі QForm, показано у табл. 2.

Таблиця 2

Експериментальні та розрахункові значення розширення штаби при прокатці та відхилення між ними

№ зразку	$\varepsilon$ , %	$\Delta b$ , мм	$\Delta b_{експ}$ , мм	$\frac{\Delta b_{експ} - \Delta b}{\Delta b_{експ}}$ , %
1 (13)	15	1,1	0,9	- 22,2
2 (15)	25	2,4	2,0	- 20,0
3 (12)	35	4,5	4,1	- 9,8

Менші значення розширення, які отримані при проведенні експерименту, можуть бути пов'язані з більшою початковою шириною зразків 1 та 2 (67 та 68 мм відповідно). Крім того, при прокатці зразків, спостерігалася поява бочкоподібності бокових кромek штаби, що ускладнювало вимірювання розширення. В цілому, залежність розширення від ступеня деформації та початкової ширини штаби для сплаву системи Al-Mg-Sc, відповідає існуючим закономірностям поведінки металів в зоні деформації.

## ВИСНОВКИ

Створена модель процесу гарячої прокатки штаб зі сплаву системи Al-Mg-Sc у програмному комплексі QForm, яка дозволяє прогнозувати енергосилові кінематичні та швидкісні параметри процесу прокатки, отримати дані про напруження, що виникають при пластичній деформації.

За допомогою моделі було виконано повнофакторний експеримент та отримані рівняння регресії для розрахунку сили та розширення при прокатці штаб зі сплаву системи Al-Mg-Sc для обраного діапазону вихідних даних.

Результати експериментальних досліджень процесу прокатки на лабораторному стані 180, підтвердили можливість використання запропонованої математичної моделі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Особенности рекристаллизации сплавов на основе системы Al-Mg<sub>2</sub>Si с добавками скандия и циркония / Л. Л. Рохлин, Н. Р. Бочвар // Сб. мат. конф. «Фундаментальные исследования и последние достижения в области литья, деформации, термической обработки и защиты от коррозии алюминиевых сплавов», 9 октября 2015 г., г. Москва. – 2015. – С. 69–85.

2. Сверхпластичность Al-Mg-Sc-Zr сплава после углового прессования и прокатки / О. Э. Мухаметдинова, Е. В. Автократова, О. Ш. Ситдииков, М. В. Маркушев // Вектор науки ТГУ, 2013. – № 3. – С. 227–230.
3. Андреев В. В. Экспериментальное исследование прокатываемости алюминиевого сплава системы AL-MG-SC / В. В. Андреев, А. Н. Головки, О. В. Бондаренко // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Новые решения в современных технологиях. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2010. – № 42. – С. 14–19.
4. Simulation studies on RCS processed Al-Mg-Sc alloy / Prabhakar M. Bhovi, S. H. Gururaj, R. B. Lohit, K. Venkateswarlu // International Conference on Emerging Trends in Materials and Manufacturing Engineering (IMME17), March 10–12, 2017. – Vol. 5. – Issue 2. – Part 2, 2018. P. 7525–7531.
5. QForm VX 8.2 : Руководство пользователя, версия 8.2. [Электронный ресурс]. – ООО «Квантор-Форм», 2017. – Режим доступа: <http://qform3d.com/products/tutorial>.
6. Andreiev V. V. Investigation of the deformation resistance of alloy Al-6% Mg alloyed with scandium at hot plastic deformation temperatures / V. V. Andreiev // Metallurgical and Mining Industry. – № 4. – 2017. – P. 72–76. – ISSN 20760507 (Source record id 21100197765).
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.

## REFERENCES

1. Osobennosti rekristallizacii splavov na osnove sistemy Al-Mg<sub>2</sub>Si s dobavkami skandija i cirkonija / L. L. Rohlin, N. R. Bochvar // Sb. mat. konf. «Fundamental'nye issledovanija i poslednie do-stizhenija v oblasti lit'ja, deformacii, termicheskoj obrabotki i zashhity ot korrozii aljuminievych splavov», 9 oktjabrja 2015 g., g. Moskva. – 2015. – S. 69–85.
2. Sverhplasticnost' Al-Mg-Sc-Zr splava posle uglovogo pressovanija i prokatki / O. Je. Muhametdinova, E. V. Avtokratova, O. Sh. Sitdikov, M. V. Markushev // Vektor nauki TGU, 2013. – № 3. – S. 227–230.
3. Andreev V. V. Jeksperimental'noe issledovanie prokatyvaemosti aljuminievogo splava sistemy AL-MG-SC / V. V. Andreev, A. N. Golovko, O. V. Bondarenko // Vestnik Nac. tehn. un-ta "HPI" : sb. nauch. tr. Temat. vyp. : Novye reshenija v sovremennyh tehnologijah. – Har'kov : NTU "HPI", 2010. – № 42. – S. 14–19.
4. Simulation studies on RCS processed Al-Mg-Sc alloy / Prabhakar M. Bhovi, S. H. Gururaj, R. B. Lohit, K. Venkateswarlu // International Conference on Emerging Trends in Materials and Manufacturing Engineering (IMME17), March 10–12, 2017. – Vol. 5. – Issue 2. – Part 2, 2018. P. 7525–7531.
5. QForm VX 8.2 : Rukovodstvo pol'zovatelja, versija 8.2. [Jelektronnyj resurs]. – ООО «Kvantor-Form», 2017. – Rezhim dostupa: <http://qform3d.com/products/tutorial>.
6. Andreiev V. V. Investigation of the deformation resistance of alloy Al-6% Mg alloyed with scandium at hot plastic deformation temperatures / V. V. Andreiev // Metallurgical and Mining Industry. – № 4. – 2017. – P. 72–76. – ISSN 20760507 (Source record id 21100197765).
7. Novik F. S. Optimizacija processov tehnologii metallov metodami planirovanija jeksperimentov : uchebnik dlja vuzov / F. S. Novik, Ja. B. Arsov. – M. : Mashinostroenie, 1980. – 304 s.

Коноводов Д. В. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМТ НМетАУ;

Андреев В. В. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМТ НМетАУ;

Мартинюк М. О. – студент НМетАУ.

НМетАУ – Національна металургійна академія України, м. Дніпро.

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