

УДК 621.7

Федотьев А. М.  
Шкель С. В.  
Бейгельзимер Я. Ю.

## ЗАСТОСУВАННЯ ГВИНТОВОЇ ЕКСТРУЗІЇ З МЕТОЮ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ПРОФІЛІВ

Довгомірні екструдовані вироби із алюмінієвих сплавів широко використовуються в таких галузях, як машинобудування, авіаційна промисловість, ракетно-космічна галузь, будівництво, приладобудування, верстатобудування, харчова промисловість, медицина, радіотехнічна, електротехнічна та електронна промисловість.

Алюмінієві сплави підлягають трьом видам термічної обробки: відпалу, загартуванню та старінню. Основними видами відпалу є: дифузний (гомогенізація), рекристалізаційний і термічне зміцнення сплавів.

Після розливання злитки піддають відпалу в печі гомогенізації для підвищення однорідності структури і, як наслідок, підвищення пластичності металу. Гомогенізація представляє собою процес дифузії в твердому стані, який забезпечує розподіл дисперсних частинок і зменшує залишкові напруження. Гомогенізація є обов'язковою і необхідною операцією перед пресуванням через особливості способу отримання циліндричних заготовок. Деякі компоненти при охолодженні поверхневого шару сегрегують через спосіб охолодження (швидкого охолодження зовнішніх шарів і більш повільного – внутрішніх).

Ці ефекти можуть бути частково або повністю ліквідовані при гомогенізації відлитих заготовок. При гомогенізації температура заготовок досягає точки, при якій досягається однорідність розподілу компонентів сплаву в структурі металу.

Гомогенізацію алюмінієвих сплавів традиційно проводять при температурі 450–560 °С. Після того, як ця температура встановиться в усіх заготовках, необхідно ще близько 2,5 годин для отримання однорідної структури.

При підвищених температурах дифузія протікає більш інтенсивно і всі відхилення в концентрації нівелюються. Чим вище температура гомогенізації, тим швидше досягається гомогенність (однорідність), і, отже, більш ефективно протікає процес. Однак температура гомогенізації не повинна перевищувати найменшу точку плавлення фази конкретного сплаву, це може призвести до локального плавлення. Контроль температури в печі дуже важливий, відхилення не повинні перевищувати  $\pm 5$  °С. Досягається це постійною циркуляцією нагрітого повітря або продуктів згоряння, температура яких вимірюється, а результати фіксуються і коригуються.

Охолодження заготовок після гомогенізації дуже важливе для отримання хорошої мікроструктури, а також кінцевих механічних властивостей профілю.

Отримання гомогенного алюмінію – це довготривалий та затратний процес, який має забезпечувати підтримання постійної температури, рівномірності нагріву та охолодження заготовок [1]. Проте є дані щодо отримання гомогенних матеріалів методом гвинтової екструзії (ГЕ) [2].

Ефект гомогенізації при ГЕ досягається завдяки вихровим рухам, що відбуваються у деформованому матеріалі на початку і в кінці гвинтової ділянки матриці [3]. У певному сенсі, ці рухи нагадують турбулентні течії рідини, але мають іншу природу. Пов'язані вони з простим зсувом, що відбувається в вузьких перехідних зонах, які поділяють області прямолінійної і гвинтової течії при ГЕ. Саме в цьому, а не в гвинтовому русі матеріалу, полягає головна відмінність ГЕ від прямого пресування.

У роботах [4, 5] висловлена і обґрунтована гіпотеза щодо фізичних причин, які призводять до «турбулентних» течій в металах при простому зсуві. Останнім часом з'являється все більше публікацій з результатами досліджень по спостереженню випадкових вихрових рухів, що призводять до інтенсивного масопереносу в матеріалах при простому зсуві (див., наприклад [6–9]).

До теперішнього часу, гомогенізація алюмінієвих сплавів методом ГЕ здійснювалася лише в лабораторних умовах, шляхом багатократного продавлювання заготовки прямокутного (або овального) перерізу через гвинтову матрицю [2]. Спроби застосування цього підходу в екструзійному виробництві довгомірних профілів стикаються з цілою низкою серйозних проблем: (1) профіль перерізу заготовок (болванок) круглий, а не прямокутний або овальний; (2) характерний розмір перерізу заготовок в рази перевищує розмір лабораторних зразків; (3) на стандартному прес-екструдері неможливо організувати протитиск за допомогою окремого гідроциліндра, як це робиться в лабораторних умовах; (4) операція ГЕ повинна бути вбудована в технологічну лінію виробництва профілів і т. д.

В роботі [10] запропоновано помістити гвинтову матрицю безпосередньо перед формотворною, в один матрицетримач. Такий підхід дозволяє вирішити деякі проблеми (наприклад, 1, 3 із зазначеного вище переліку), але при цьому виникають нові, такі як: обмеження у виборі температурних режимів деформаційної гомогенізації, які виявляються пов'язаними з температурою пресування; обмеженим простором матрицетримача; істотним зростанням сили пресування.

У даній роботі ми пропонуємо інший підхід, згідно з яким ГЕ здійснюється на окремому прес-екструдері. Це дозволяє розв'язати між собою температурні режими гомогенізації і пресування, збільшити довжину каналу гвинтової матриці, а також знизити силу пресування, в порівнянні з підходом [10].

Метою роботи є теоретичне обґрунтування конструкції гвинтової матриці, що реалізує запропонований підхід в умовах Броварського алюмінієвого Заводу (ТОВ БРАЗ).

На ТОВ БРАЗ є прес-екструдер силою 2500 т, що дозволяє пресувати болванки, діаметром 150 мм. Передбачається на ньому отримувати гомогенізовані заготовки, діаметром 127 мм, для подальшого пресування профілів на 5 " прес-екструдері. З цією метою необхідно запропонувати і теоретично обґрунтувати конструкцію каналу гвинтової матриці, який би забезпечив простий зсув із сумарною еквівалентною деформацією не менше 2 по усього поперечному перерізу заготовки. Згідно [2], така деформація достатня для гомогенізації алюмінієвих сплавів.

При проектуванні матриці необхідно вирішити дві основні проблеми. Перша пов'язана з тим, що на прес-екструдері не можна здійснити протитиск окремим гідроциліндром. З цієї причини, матриця повинна взяти цю функцію на себе, тому що протитиск при ГЕ є обов'язковою умовою для заповнення каналу матриці деформованим металом і для запобігання його руйнування.

Друга проблема полягає в тому, що при ГЕ деформація істотно неоднорідна за перерізом заготовки, з мінімумом в зоні осі. Згідно [11], для досягнення еквівалентної деформації 2 на периферії заготовки зазвичай досить одного-двох проходів ГЕ, але та ж деформація в приосевій зоні накопичується за 4–5 проходів.

Для того, щоб здійснити необхідну деформацію зсуву за один прохід ГЕ, ми пропонуємо канал, що складається з декількох ділянок, що чергуються між собою: гвинтових і прямолінійних. Це дозволить отримати кілька зон простого зсуву на кордонах між ділянками. Для вирівнювання деформації за перерізом заготовки ми пропонуємо, відповідно до [12], зміщувати вісь каналу щодо центру симетрії заготовки. Передбачається також, що довгий канал з редукацією від початкового до кінцевого діаметру дозволить створити необхідний протитиск на кожній із гвинтових ділянок.

За допомогою моделювання в пакеті Deform 3D V11 ми проаналізували цілий ряд гвинтових каналів. Один із них представлений на рис. 1.

Канал складається із декількох ділянок: 1 – зона входження матеріалу із контейнера в матрицю; 2 – перша гвинтова ділянка (ГД) у формі восьмикутника; 3 – ділянка створення протитиску для першого ГК; 4 – прямолінійна ділянка; 5 – друга ГД; 6 – ділянка створення протитиску для другої ГД; 7 – прямолінійна ділянка, перехід від восьмигранної до кругової ГД; 8 – калібрувальна ділянка.

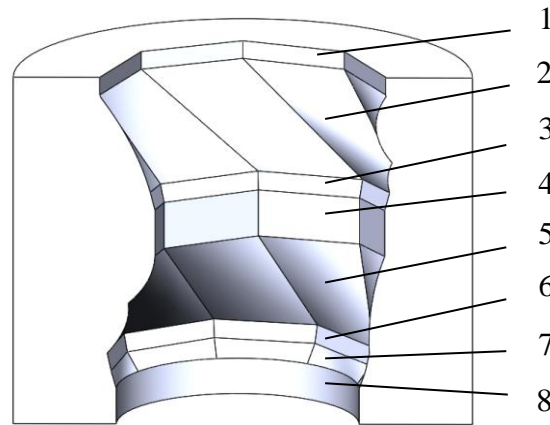


Рис. 1. Початкова модель матриці з восьмигранним ГК (позначення див. у тексті)

Габаритні розміри матриці зумовлені розмірами обойми, штоку та контейнера (рис. 2). На виході потрібно отримати гомогенізовану заготовку  $\varnothing 127$  мм для можливості використання у подальших операціях в умовах існуючого виробництва.

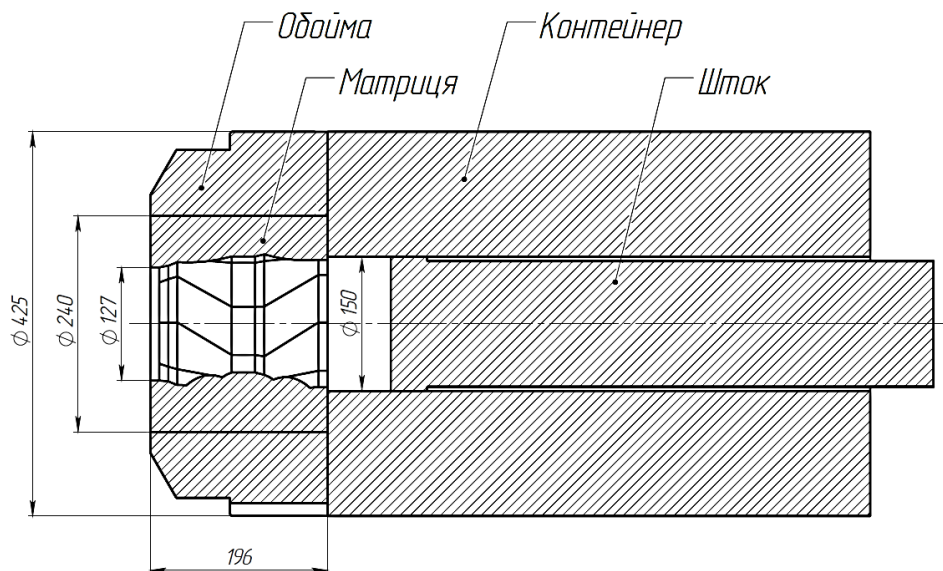


Рис. 2. Набір елементів для моделювання ГЕ

Було проведено комп'ютерне моделювання процесу гомогенізації алюмінієвих сплавів методом ГЕ. Заготовкою був обраний матеріал Aluminium 6063 ГОСТ 22233-2001 з параметрами, наведеними в табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Хімічний склад сплаву Aluminium 6063

Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Домішок
0,15–0,35	0,3–0,6	до 0,15	до 0,05	до 0,1	97,6 – 98,9	до 0,1	0,6 – 0,9	до 0,15	інші, кожної по 0,05; всього 0,15

За допомогою прикладного програмного забезпечення Deform 3D V11 методом скінчених елементів було проведено комп'ютерне моделювання процесу ГЕ матриць з шести- та восьмигранними каналами зі зміщенням осі.

Таблиця 2

## Механічні властивості сплаву Aluminium 6063

Модуль пружності при розтягуванні, E	Модуль пружності при зсуві, G	Модуль пружності при стисканні, K	Щільність, ρ при 20°C	Коефіцієнти термічного розширення		Ліквідус °C	Солідус °C
				лінійний, α	об'ємний, β		
				від 20 до 100°C (10 <sup>-6</sup> /°C)			
68300	25800	69700	2,69	23,4	67	655	615

Вихідні дані моделювання наступні (табл. 3).

Таблиця 3

## Вихідні дані моделювання

Тип моделі заготовки	Пластична
Коефіцієнт тертя алюмінію по сталі	0,4
Початкова температура заготовки, °C	500
Швидкість переміщення штоку, мм/с	10
Коефіцієнт передачі тепла	50000

Реологічні властивості матеріалу описані з використанням рівняння Хензеля-Шпиттеля [5]:

$$\sigma_T = A e^{a_1 T} T^{a_9} \varepsilon^{a_2} e^{a_4/\varepsilon} (1 + \varepsilon)^{a_5 T} e^{a_7 \varepsilon} \dot{\varepsilon}^{a_3} \dot{\varepsilon}^{a_8 T} \quad (1)$$

де  $\sigma_T$  – напруга текучості;

$A = 265$ ;  $a_1 = -0,00458$ ;  $a_2 = -0,12712$ ;  $a_3 = 0,12$ ;  $a_4 = -0,0161$ ;  $a_5 = 0,00026$ ;  $a_7, a_8, a_9 = 0$  – коефіцієнти регресії;

$e$  – основа натурального логарифма = 2,71828;

$T$  – температура заготовки, °C = 350 – 550;

$\varepsilon$  – інтенсивність деформації = 0,05–5;

$\dot{\varepsilon}$  – інтенсивність швидкості деформації, 1/c = 0,01 – 500.

Моделювання процесу ГЕ початкової матриці (рис. 1) дали наступні результати (рис. 3): досить рівномірне накопичення деформацій за перерізом заготовки, ступінь деформації сягає 11. Проте наявні значні відхилення вихідної заготовки від циліндричності. Це привело до викривлення заготовки при екструзії, що неприпустимо для використання в умовах реального виробництва. Тому почали пошук раціональної геометрії ГК для збільшення рівномірності розподілу ступеня деформації за перерізом ВЗ та зменшення відхилень від циліндричності.

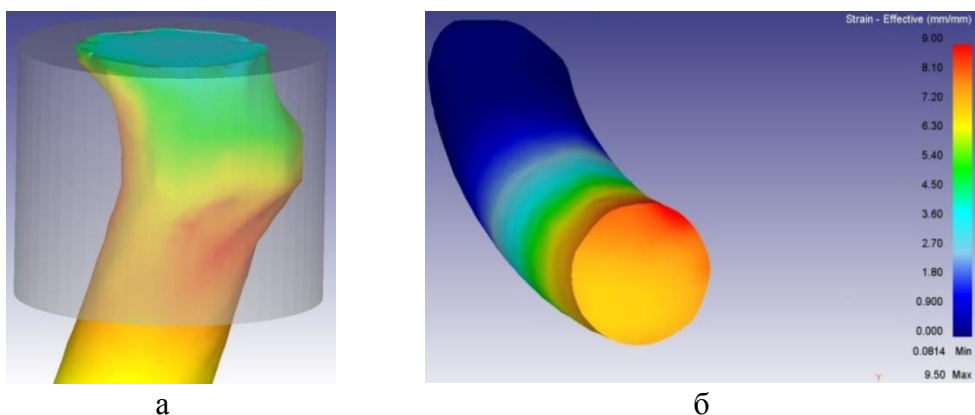


Рис. 3. Результати комп'ютерного моделювання процесу ГЕ початкової матриці:  
а – заповнена матриця; б – переріз заготовки на виході із матриці

Щоб уникнути цього ефекту було змінено модель гвинтового каналу матриці (рис. 4). Із двох розділених ГК утворили чотири послідовно розміщених (2). З'єднали канал створення протитиску з каналом заспокоєння потоку та переходом від восьмигранного до кругового ГК (6). Калібрувальну ділянку розділили на дві частини (8).

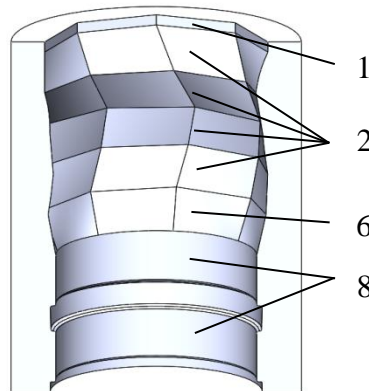


Рис. 4. Тривимірна модель вдосконаленої матриці з восьмигранним ГК

Моделювання процесу ГЕ вдосконаленої матриці (рис. 4) дали наступні результати (рис. 5): досить рівномірне накопичення деформацій за перерізом заготовки. Мінімальна величина деформації за перерізом перевищує 2. Значно зменшені відхилення вихідної заготовки від циліндричності, що дає можливість для подальшого використання в умовах реального виробництва.

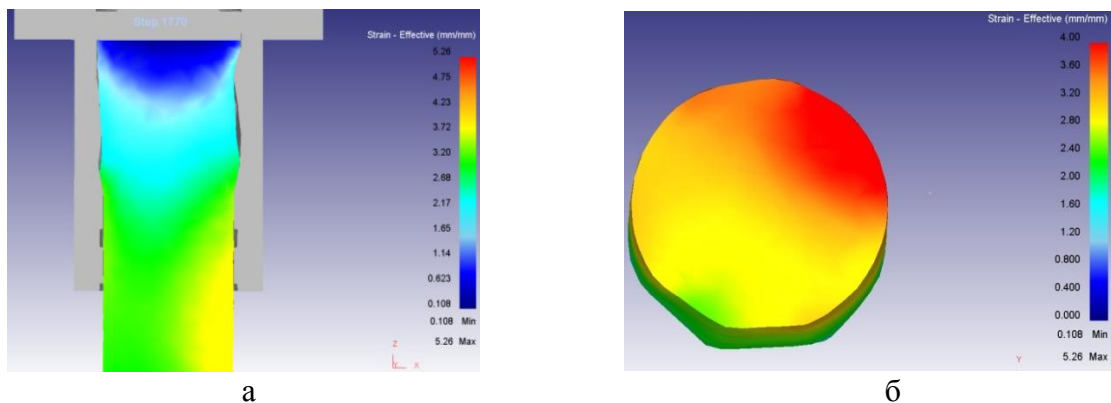


Рис. 5. Результати комп'ютерного моделювання процесу ГЕ кінцевої матриці:  
а – повздовжній переріз матриці із деформованим матеріалом; б – переріз заготовки на виході із матриці

## ВИСНОВКИ

Шляхом моделювання в пакеті Deform 3D V11 показана можливість виконання гвинтової екструзії циліндричної заготовки від діаметра 150 мм до діаметра 127 мм. При цьому, заготовка на виході не має викривлень, а еквівалентна деформація, по всьому її поперечному перерізу, перевищує 2. Отриманий результат дає серйозні сподівання на те, що при виробництві профілів на Броварському алюмінієвому заводі (ТОВ «БРАЗ») можлива гомогенізація алюмінієвих сплавів методом гвинтової екструзії.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Данченко В. Н. Производство профилей из алюминиевых сплавов. Теория и технология / В. Н. Данченко, А. А. Миленин, А. Н. Головки. – Днепропетровск : ДНВП «Системные технологии», 2001. – С. 40–43.
2. Деформационная обработка вторичного алюминия и алюминий содержащих отходов / Шевелев А. И., Бейгельзимер Я. Е., Варюхин В. Н., Сынков С. Г., Рябичева Л. А., Решетов А. В. – Донецк : ДонФТИ НАН Украины, 2011. – 327 с.

3. *Twist Extrusion as a Potent Tool for Obtaining Advanced Engineering Materials [Электронный ресурс] / Yan Beygelzimer, Roman Kulagin, Yuri Estrin, Laszlo S. Toth, Hyoung Seop Kim, Marat I. Latypov // A Review, Advanced Engineering Materials. – 2017. – Volume 19, Issue 8. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1002/adem.201600873>.*
4. *Beygelzimer Y. Vortices and Mixing in Metals during Severe Plastic Deformation / Y. Beygelzimer // Materials Science Forum. – 2011. – Vol. 683. – P. 213–224.*
5. *Beygelzimer Y. Simple Shear: Double-Stage Deformation / Y. Beygelzimer, Ruslan Z. Valiev, V. Varyukhin // Materials Science Forum. – 2011. – Vols. 667–669. – P. 97–102.*
6. *M. Pouryazdan Panah, PhD Thesis, Darmstadt University, 2015.*
7. *J.-K. Han, H.-Joo Lee, J. Jang, M. Kawasaki, T. G. Langdon // Mater. Sci. Eng. – 2017. – A 684. – P. 318.*
8. *Mixing instabilities during shearing of metals / Mohsen Pouryazdan, Boris J.P. Kaus, Alexander Rack, Alexey Ershov, Horst Hahn // NATURE COMMUNICATIONS. – 2018. – 8 : 1611. – doi : 10.1038/s41467-017-01879-5.*
9. *High Pressure Torsion: from Laminar Flow to Turbulence / R. Kulagin, Y. Beygelzimer, Y. Ivanisenko, A Mazilkin, H. Hahn // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 194 (2017) 012045. – doi : 10.1088/1757-899X/194/1/012045.*
10. *А. с. 92301. Спосіб пресування профілів із металевих сплавів / Я. Ю. Бейгельзімер, Д. В. Варюхін, Р. Ю. Кулагін. – № а201007101 ; заявл. 08.06.2010 ; опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19.*
11. *Кулагін Р. Ю. Особенности разработки технологии винтовой экструзии / Р. Ю. Кулагин // Физика и техника высоких давлений. – 2010. – Т. 20, № 3. – С. 93–100.*
12. *Off-Axis Twist Extrusion for Uniform Processing of Round Bars / Yan Beygelzimer, Roman Kulagin, Marat I. Latypov, Viktor Varyukhin, and Hyoung Seop Kim // Met. Mater. Int. – Vol. 21. – No. 4 (2015). – P. 734–740.*

## REFERENCES

1. *Danchenko V. N. Proizvodstvo profilej iz aljuminievyh splavov. Teorija i tehnologija / V. N. Danchenko, A. A. Milenin, A. N. Golovko. – Dnepropetrovsk : DNVP «Sistemnye tehnologii», 2001. – S. 40–43.*
2. *Deformacionnaja obrabotka vtorichnogo aljuminija i aljuminij soderzhashhih othodov / Sheve-lev A. I., Beygelzimer Ja. E., Varjuhin V. N., Synkov S. G., Rjabicheva L. A., Reshetov A. V. – Doneck : DonFTI NAN Ukrainy, 2011. – 327 s.*
3. *Twist Extrusion as a Potent Tool for Obtaining Advanced Engineering Materials [Elektronnyj resurs] / Yan Beygelzimer, Roman Kulagin, Yuri Estrin, Laszlo S. Toth, Hyoung Seop Kim, Marat I. Latypov // A Review, Advanced Engineering Materials. – 2017. – Volume 19, Issue 8. – Rezhim dostupa: <http://dx.doi.org/10.1002/adem.201600873>.*
4. *Beygelzimer Y. Vortices and Mixing in Metals during Severe Plastic Deformation / Y. Beygelzimer // Materials Science Forum. – 2011. – Vol. 683. – P. 213–224.*
5. *Beygelzimer Y. Simple Shear: Double-Stage Deformation / Y. Beygelzimer, Ruslan Z. Valiev, V. Varyukhin // Materials Science Forum. – 2011. – Vols. 667–669. – P. 97–102.*
6. *M. Pouryazdan Panah, PhD Thesis, Darmstadt University, 2015.*
7. *J.-K. Han, H.-Joo Lee, J. Jang, M. Kawasaki, T. G. Langdon // Mater. Sci. Eng. – 2017. – A 684. – P. 318.*
8. *Mixing instabilities during shearing of metals / Mohsen Pouryazdan, Boris J.P. Kaus, Alexander Rack, Alexey Ershov, Horst Hahn // NATURE COMMUNICATIONS. – 2018. – 8 : 1611. – doi : 10.1038/s41467-017-01879-5.*
9. *High Pressure Torsion: from Laminar Flow to Turbulence / R. Kulagin, Y. Beygelzimer, Y. Ivanisenko, A Mazilkin, H. Hahn // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 194 (2017) 012045. – doi : 10.1088/1757-899X/194/1/012045.*
10. *А. с. 92301. Спосіб пресування профілів із металевих сплавів / Я. Ю. Бейгельзімер, Д. В. Варюхін, Р. Ю. Кулагін. – № а201007101 ; заявл. 08.06.2010 ; опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19.*
11. *Кулагін Р. Ю. Особенности разработки технологии винтовой экструзии / Р. Ю. Кулагин // Физика и техника высоких давлений. – 2010. – Т. 20, № 3. – С. 93–100.*
12. *Off-Axis Twist Extrusion for Uniform Processing of Round Bars / Yan Beygelzimer, Roman Kulagin, Marat I. Latypov, Viktor Varyukhin, and Hyoung Seop Kim // Met. Mater. Int. – Vol. 21. – No. 4 (2015). – P. 734–740.*

Федотьев А. М. – канд. техн. наук, доц., нач. від. інновацій Alumeta gr., м. Бровари;

Шкель С. В. – інж.-дослід. від. інновацій Alumeta gr., м. Бровари;

Бейгельзімер Я. Ю. – д-р техн. наук, проф., голов. наук. спів роб. ДонФТІ НАН України.

ДонФТІ НАН України – Донецький фізико-технічний інститут ім. О. О. Галкіна Національної академії наук України, м. Київ.

E-mail: [yanbeygel@gmail.com](mailto:yanbeygel@gmail.com); [a.fed450@gmail.com](mailto:a.fed450@gmail.com); [s.shkel@braz.com.ua](mailto:s.shkel@braz.com.ua)

Стаття надійшла до редакції 25.03.2018 р.