

DOI: 10.34185/1991-7848.2020.01.09

УДК 621.771

С.В.Бондаренко, О.Ю.Гридін, Я.В.Фролов, О.М.Кузьміна, О.С.Бобух

### **ХОЛОДНА ПРОКАТКА ПОПЕРЕДНЬО ПРОФІЛЬОВАНИХ ШТАБ З АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ EN AW-1050**

*Виконані експериментальні дослідження з холодної прокатки штаб профільованого поперечного перерізу з алюмінієвого сплаву EN AW-1050. Показана можливість формування гетерогенних властивостей в плоскій алюмінієвій штабі шляхом холодної пластичної деформації та визначено максимальні середні значення приросту основних показників механічних властивостей на окремих елементах штаби.*

*Ключові слова: холодна прокатка, профільована штаба, гетерогенні механічні властивості, алюмінієвий сплав*

**Вступ.** Сучасні тенденції у промисловості, пов’язані з прагненням до зменшення виробничих витрат, зниження ваги різних конструкцій, економії ресурсів вимагають розробки нових видів продукції або вдосконалення технології виготовлення вже існуючих. Одним з видів продукції, що сприяють досягненню означених вище вимог, є штаби зі змінними за шириною механічними властивостями та геометричними розмірами, які носять загальну назву Tailored Blanks. До цієї групи відносяться декілька видів штаб, які класифікують за способами їх виробництва. Перші та найбільш широко розповсюджені, особливо в автомобілебудівній промисловості, є Tailor Welded Blanks. Дані штаби виготовляють шляхом зварювання встик штаб з різних матеріалів та/або різної товщини, тим самим досягаючи різних значень механічних властивостей на різних елементах готової штаби [1]. До другого виду штаб належать штаби, які в закордонних літературних джерелах носять назву Patchwork Blanks і виготовляються шляхом приварювання однієї штаби до поверхні іншої, тим самим забезпечуючи локальну зміну механічних властивостей та геометричних розмірів. Третій вид штаб Tailor Rolled Blanks – це штаби з профільованим поперечним або поздовжнім перерізом, які виготовляють за допомогою прокатки в валках або роликах. В останні роки також отримує розповсюдження четвертий вид штаб Tailor Heat Treated Blanks. Це тонкі плоскі штаби зі змінними механічними властивостями, які виготовляють шляхом локальної термообробки [2-4]. Дані види штаб знаходять своє застосування в різних сферах промисловості, зокрема в автомобільній промисловості їх використовують для виготовлення різних елементів кузовів

автомобілів. Однак існуючі способи виробництва Tailored Blanks, окрім переваг, мають і недоліки. [5]

**Виготовлення штаб з гетерогенними властивостям з алюмінієвих сплавів.** Як вже зазначалось, Tailored Blanks застосовуються в різних сферах промисловості, однак подальшому їхньому розповсюдженню заважає те, що усі існуючі способи їх виробництва спрямовані в більшості випадків на виготовлення продукції з різних сталей. Водночас вимоги щодо зменшення ваги конструкцій та збереження при цьому їх міцності та жорсткості змушують шукати матеріали, які можуть використовуватись для заміни сталі. На сьогодні з цією метою використовуються різні легкі сплави, в тому числі й алюмінієві. Однак робіт, присвячених дослідженню можливості використання алюмінієвих сплавів для виробництва Tailored Blanks, дуже мало. Одна з таких робіт присвячена дослідженню можливості використання алюмінієвих сплавів 5000 та 6000 серії для виготовлення Tailor Welded Blanks [6]. Результати даної роботи показали, що використання алюмінієвих сплавів для даного способу виробництва є небажаним через те, що внаслідок дії високих температур механічні властивості металу в зоні зварного шву погіршуються.

У зв'язку з вищезазначеним, метою даної роботи була розробка альтернативного способу формування різних за перерізом механічних властивостей в алюмінієвій штабі шляхом холодної пластичної деформації під час прокатки штаб з профільованим поперечним перерізом на гладкій бочці.

**Експериментальне дослідження.** В якості матеріалу для дослідження впливу ступеня деформації при холодній прокатці на формування гетерогенних механічних властивостей в одній штабі було обрано алюмінієвий сплав EN AW-1050, хімічний склад якого наведено у таблиці 1. Механічні властивості даного сплаву, які регламентуються міжнародним стандартом ISO 6361-2:2014, наведені у таблиці 2.

Таблиця 1

Хімічний склад алюмінієвого сплаву EN AW-1050, об.%

Al	Fe	Si	Zn	Ti	Mg	Mn	Cu	Інше
99,5	0,40	0,25	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03

Таблиця 2

Механічні властивості алюмінієвого сплаву EN AW-1050

Стан поставки	Товщина, мм	Межа міцності, МПа		Межа плинності, МПа		Подовження, %
		мін.	макс	мін.	макс.	
О	1,3 - 6,5	60,0	100,0	20,0	-	30,0

Схема експериментального дослідження холодної прокатки попередньо профільованих штаб наведена на рисунку 1.

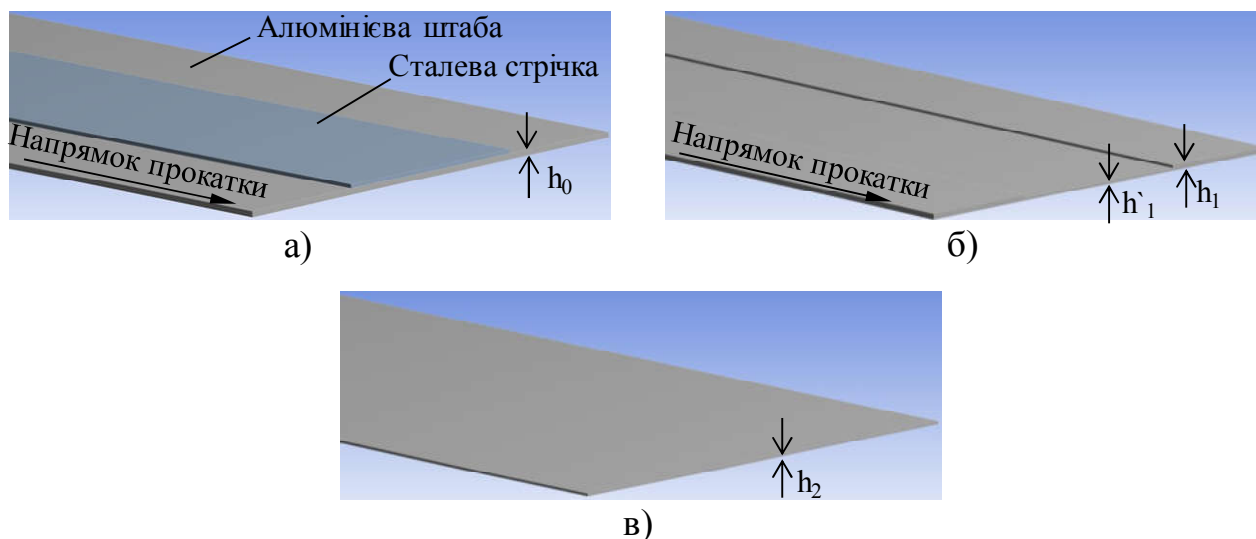


Рисунок 1 – Схематичне зображення експериментального дослідження:

- а) зразок, підготовлений до профілювання;
- б) виготовлена штаба з профільованим поперечним перерізом;
- в) плоска штаба з гетерогенними механічними властивостями

В ході підготовки до проведення експериментального дослідження з холодної прокатки було підготовлено штаби довжиною 420 мм та шириною 180 мм. Товщина штаб становила 2,9 мм. Профілювання підготовлених алюмінієвих штаб було виконано шляхом прокатування разом з цією штабою накладеної зверху сталеві профілюючої стрічки шириною 80 мм, товщиною 2 мм та довжиною, рівною довжині алюмінієвих штаб, яка в результаті спільної деформації втискала в основний метал і змінювала геометрію поперечного перерізу та властивості отримуваної штаби. Завдяки цьому була змодельована інноваційна технологія валкової розливки-прокатки профільованих штаб [7, 8]. Після прокатки була проведена термообробка отриманих профільованих штаб з метою зняття напружень, наведених в ході процесу профілювання. Режимом термообробки було обрано рекристалізаційний відпал за температури  $375^\circ$  з витримкою тривалістю 1 година. Подальше охолодження профільованих штаб виконувалося на повітрі. Після термообробки отримані штаби з профільованим поперечним перерізом були прокатані на стані дуо з гладкими бочками. Для прокатки використовувалися валки діаметром 210 мм. Довжина бочки валка становила 300 мм. Перед початком деформації кліть прокатного стану була попередньо навантажена за допомогою вбудованої гідромеханічної системи. Таким чином були вибрані усі існуючі зазори й значно зменшена пружина кліті. Під час холодної прокатки профільованих штаб усі параметри процесу залишались незмінними, окрім відстані між валками.

В цілому дослідження складалось з двох серій експериментів. Перша серія була присвячена аналізу впливу величини істинної деформації товстих елементів профільованої штаби (за умови відсутності деформації тонкого елемента профільованої штаби) на гетерогенність сформованих механічних властивостей. Друга серія мала на меті визначення впливу одночасної деформації товстого та тонкого елемента профільованої штаби на гетерогенність механічних властивостей при постійній різниці істинних деформацій даних елементів, рівній 0,232, що відповідає різниці товщин товстого та тонкого елемента 0,55 мм. Істинна деформація розраховувалась за формулою:

$$e = \ln\left(\frac{h_2}{h}\right), \quad (1)$$

де  $h_2$  – товщина штаби після холодної прокатки (кінцева товщина штаби), мм;  $h$  – початкова товщина товстого ( $h_1$ ) або тонкого ( $h_1 \cdot r$ ) елементів штаби до деформації, мм.

Параметри холодної прокатки та товщина елементів профілю штаби наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Параметри процесу холодної прокатки на гладкій бочці

№	Початкова товщина штаби		Кінцева товщина штаби	$e_1$	$e_2$	$\Delta e$
	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$h_3$ , мм			
Перша серія експериментів						
1	2,80	2,90	2,602	-0,073	-0,108	0,035
2	2,50	2,90	2,459	-0,016	-0,165	0,149
3	2,30	2,90	2,294	-0,002	-0,234	0,232
4	2,10	2,90	2,093	-0,003	-0,326	0,323
5	2,00	2,90	1,989	-0,005	-0,377	0,372
Друга серія експериментів						
6	2,10	2,65	2,100	0,000	0,232	0,232
7	2,10	2,65	2,020	0,039	0,271	0,232
8	2,10	2,65	1,700	0,211	0,443	0,232

Після прокатки з виготовлених плоских тонких штаб було відібрано зразки для оцінки механічних властивостей, зокрема були виконані випробування на розтягнення згідно стандарту ISO 6892-1:2009 [9] та випробування на твердість за Брінеллем відповідно до стандарту ISO 6506-1:2014 [10]. Отримані показники в узагальненому вигляді наведені у таблиці 4.

Таблиця 4

Узагальнені показники механічних властивостей профільованих штаб зі сплаву EN AW-1050 після прокатки на гладкій бочці

Товщина штаби, мм	Межа плинності, МПа		Межа міцності, МПа		Твердість, HBW 2.5/31.25	
	мін.	макс.	мін.	макс.	мін.	макс.
2,0 – 2,9	63,5	89,0	80,0	100,1	24,0	38,0

З метою визначення середнього приросту механічних властивостей на початково товстому елементі штаби було виконано порівняння відповідних показників механічних властивостей даного елемента та початково тонкого елемента штаби. Показники механічних властивостей для тонких елементів штаб, які зазнали меншої (друга серія експериментів) або майже нульової (перша серія експериментів) деформації, позначені як  $\sigma_{0.2}$ ,  $\sigma'$  і HBW'. Показники механічних властивостей товстих елементів штаб, які зазнали значної деформації:  $\sigma_{0.2}$ ,  $\sigma$  і HBW. Отримані в результаті співставлення показників межі плинності, межі міцності та твердості наведені в графічному вигляді на рисунку 2.

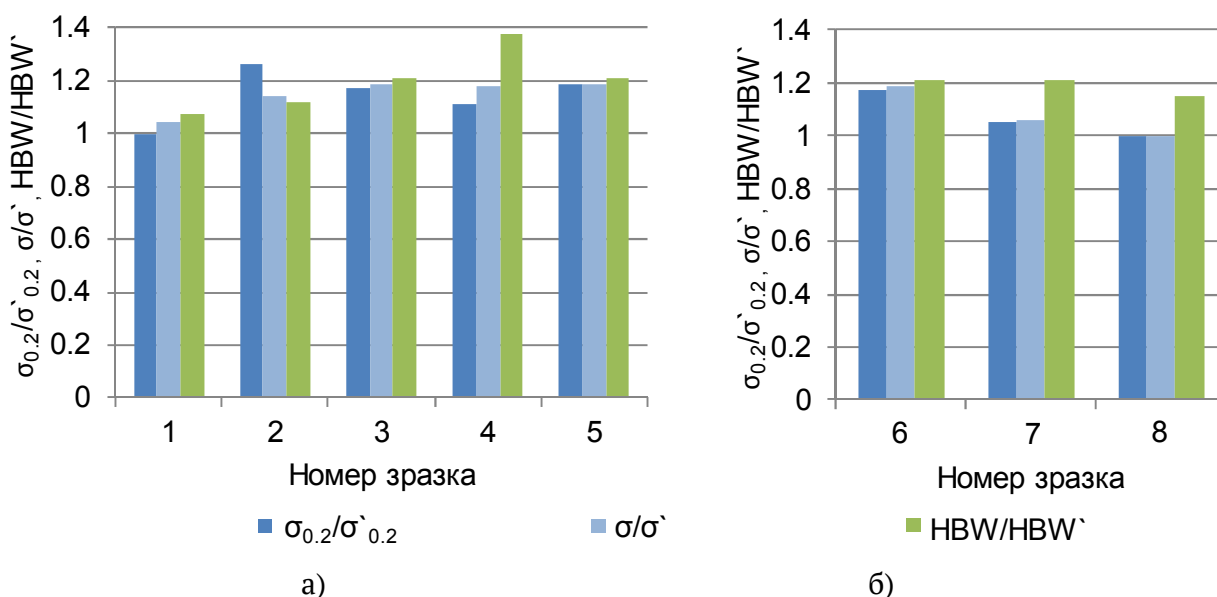


Рисунок 2 – Порівняння механічних властивостей початково товстого та початково тонкого елемента профільованої штаби після прокатки на гладкій бочці: а) — для першої серії експериментів, б) — для другої серії експериментів

**Результати досліджень.** Дані, отримані в ході проведення першої серії експериментів (рис. 2а), показали, що такий показник механічних властивостей, як межа плинності, є найбільш чутливим до умов деформації. Максимальне значення різниці усереднених показників межі плинності

товстого та тонкого елемента попередньо профільованої штаби після прокатки на гладкій бочці склала 26%. Максимальний приріст межі міцності на товстому елементі профільованої штаби, відносно тонкого елемента, в середньому становить 18%, що досягається при істинній деформації товстого елемента, рівній 0,234 і більше. Подальше збільшення ступеня деформації товстого елемента при деформації тонкого елемента, близькій до 0, призводить до вирівнювання приросту показників межі плинності та межі міцності на рівні 18%. Показник твердості на початково товстому елементі штаби після прокатки на гладкій бочці перевищує аналогічний показник тонкого елемента на 37,5%, що відповідає значенню істинної деформації товстого елемента штаби 0,326. З рисунку 2 видно основний ефект від холодної прокатки профільованих штаб, а саме – інтенсивне зміцнення початково більш товстого елемента, який під час прокатки зазнавав більшої деформації.

Друга серія експериментів (див. рис. 2б) показала, що деформація усіх елементів профільованої штаби при прокатці на гладкій бочці є небажаною. Це викликано тим, що з одночасним збільшенням деформації товстого та тонкого елемента профільованої штаби різниця в показниках міцності даних елементів знижується. Так, при значенні істинної деформації тонкого елемента профільованої штаби 0,211 різниці між характерними показниками міцності не спостерігається, проте на графіках все ще помітний приріст твердості на початково товстому елементі штаби на рівні близько 15%. Однак характер зміни даного показника свідчить про його зменшення по мірі зростання ступеня деформації тонкого та товстого елемента профільованої штаби.

**Висновки.** Проведені експериментальні дослідження з холодної прокатки профільованих штаб з алюмінієвого сплаву EN AW-1050 довели можливість формування гетерогенних механічних властивостей за рахунок нерівномірності пластичної деформації. Максимальна різниця між показниками механічних властивостей товстого та тонкого елемента профільованої штаби спостерігається у показнику твердості і досягає 37,5%. Максимальне середнє значення приросту межі плинності та межі міцності, яке було отримано, становить 26% та 18%, що досягається при істинній деформації товстого елемента профільованої штаби 0,165 та 0,234, відповідно. Подальше збільшення ступеня деформації товстого елемента профільованої штаби, при відсутності деформації тонкого елемента, призводить до вирівнювання приросту показників межі плинності та межі міцності на рівні 18%. Встановлено, що деформація усіх елементів попередньо профільованої штаби призводить до зменшення приросту механічних властивостей. При істинній деформації 0,211 для тонкого елемента та 0,443 для товстого елемента попередньо профільованої штаби приріст механічних властивостей на

товстому елементі штаби відсутній. Поза сферою досліджень залишається проблема залишкових напружень, які можуть мати вирішальний вплив на розвиток застосованого способу формування різних механічних властивостей в плоскій штабі з алюмінієвого сплаву. Дослідження напруженого стану матеріалу штаби під час холодної прокатки попередньо профільованих штаб буде виконане в подальших дослідженнях за допомогою математичного моделювання.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Pallett R. J. The use of tailored blanks in the manufacture of construction components / R. J. Pallett, R. J. Lark. // Journal of Materials Processing Technology. – 2001.- Vol.117. – С. 249–254.
2. Merklein M. Manufacturing flexibilisation of metal forming components by tailored blanks / M. Merklein, M. Lechner // Proc. Conf. Competitive Manufacturing. – 2013. – С. 165-170.
3. Hirt G. Tailored profiles made of tailor rolled strips by roll forming. Part 1 of 2 / G. Hirt, D.H. Davalos-Julca // Steel Research int. – 2012. - Vol.83 (1). – С. 100-105.
4. Kopp R. A new rolling process for strips with a defined cross section / R. Kopp, P. Böhlke // CIRP Annals Manufacturing Technology. – 2003. - Vol.52 (1). – С. 197-200.
5. A review on tailored blanks. Production, applications and evaluation / M.Merklein, M. Johannes, M. Lechner, A. Kuppert. // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol.214. – С. 151–164.
6. Naeem M. Welding aluminum tailored blanks with Nd:YAG lasers for automotive applications [Електронний ресурс] / M. Naeem, R. Jessett // Practical welding today. – 2001. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.thefabricator.com/article/automationrobotics/welding-aluminum-tailored-blanks-with-ndyag-lasers-for-automotive-applications>.
7. Бондаренко С.В. Исследование зависимости температуры и степени деформации тонких участков профилированных полос при валковой разливке-прокатке с дополнительным тепловым сопротивлением / С. В. Бондаренко, А. Ю. Гридин, М. Шапер // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА. - 2017. - № 1(44). - С. 89-95.
8. Пат. 113368 Україна, МПК (2006.01) B22D 11/06, B22D 11/10 Пристрій для валкової розливки-прокатки профільованих штаб / Гридін О.Ю. (UA), Огінський Й.К. (UA), Бондаренко С.В. (UA), Шапер М. (DE); заявник та патентовласник Національна Металургійна Академія України. – № 201600100; Заявл. 04.01.16. Опубл. 10.01.17, Бюл. №1. – 5с.: з іл.
9. EN ISO 6892-1:2009: Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature. - 08.2009. – 58 p.
10. EN ISO 6506-1:2014: Metallic materials. Brinell hardness test. Part 1: Test method.–10.2014.–16p.

#### REFERENCES

1. Pallett R. J. The use of tailored blanks in the manufacture of construction components / R. J. Pallett, R. J. Lark. // Journal of Materials Processing Technology. – 2001.- Vol.117. – С. 249–254.
2. Merklein M. Manufacturing flexibilisation of metal forming components by tailored blanks / M. Merklein, M. Lechner // Proc. Conf. Competitive Manufacturing. – 2013. – С. 165-170.
3. Hirt G. Tailored profiles made of tailor rolled strips by roll forming. Part 1 of 2 / G. Hirt, D.H. Davalos-Julca // Steel Research int. – 2012. - Vol.83 (1). – С. 100-105.
4. Kopp R. A new rolling process for strips with a defined cross section / R. Kopp, P. Böhlke // CIRP Annals Manufacturing Technology. – 2003. - Vol.52 (1). – С. 197-200.
5. A review on tailored blanks. Production, applications and evaluation / M.Merklein, M. Johannes, M. Lechner, A. Kuppert. // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol.214. – С. 151–164.

6. Naeem M. Welding aluminum tailored blanks with Nd:YAG lasers for automotive applications [Електронний ресурс] / M. Naeem, R. Jessett // Practical welding today. – 2001. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.thefabricator.com/article/automationrobotics/welding-aluminum-tailored-blanks-with-ndyag-lasers-for-automotive-applications>.
7. Bondarenko S.V. Issledovanie zavisimosti temperatury i stepeni deformatsii tonkih uchastkov profilirovannykh polos pri valkovoy razlivke-prokatke s dopolnitelnym teplovyim soprotivleniem / S. V. Bondarenko, A. Yu. Gridin, M. Shaper // Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnykh trudov. – Kramatorsk: DGMA. - 2017. - # 1(44). - S. 89-95.
8. Pat. 113368 Ukraina, MPK (2006.01) V22D 11/06, V22D 11/10 Pristriy dlya valkovoi rozlivki-prokatki profilirovanih shtab / Gridin O.Yu. (UA), Oginskiy Y.K. (UA), Bondarenko S.V. (UA), Shaper M. (DE); zayavnik ta patentovlasnik Natsionalna Metalurgiyina Akademiya Ukraini. – # 201600100; Zayavl. 04.01.16. Opubl. 10.01.17, Byul. #1. – 5s.: z il.
9. EN ISO 6892-1:2009: Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature. - 08.2009. – 58 p.
10. EN ISO 6506-1:2014: Metallic materials. Brinell hardness test. Part 1: Test method. – 10.2014. – 16p.  
Received 09.01.2020.  
Accepted 13.01.2020.

UDC 621.771

S.Bondarenko, O.Grydin, Y.Frolov, O.Kuzmina, O.Bobukh

### **COLD ROLLING OF PRE-PROFILED STRIP FROM ALUMINUM ALLOY EN AW-1050**

Specialists of metallurgy and mechanical engineering are intensively working at materials with controlled properties. In fact, at this stage we are already talking about the design of new materials for the specific tasks of the industry. One of the ways to achieve the regulated mechanical properties of metal products is to use the influence of plastic deformation with its different parameters in individual sections of the deformable material. In this study, we studied the effect of cold rolling on the properties of a strip of aluminum alloy EN AW-1050 with artificially created differences in the deformation parameters in different parts of the cross section of the profile. For this, a pre-shaped sample was prepared by conducting joint cold rolling of a strip of the specified material 420 mm long, 180 mm wide and 2.9 mm thick with a steel profiling tape 80 mm wide and 2 mm thick superimposed on it (length of an aluminum strip and steel profiling tape are the same). As a result of joint deformation, the steel strip rolled into the base metal and changed the geometry of the cross section and the properties of the obtained strip. Next, the obtained strip was subjected to heat treatment and rolled in a duo mill. After rolling, thin samples were made from fabricated flat strips to assess mechanical properties, in particular tensile tests were performed according to ISO 6892-1: 2009 and Brinell hardness tests were performed according to ISO 6506-1: 2014. Experimental studies of cold rolling of strips with profiled cross section of aluminum alloy EN AW-1050 were carried out. The possibility of forming heterogeneous properties in a flat aluminum strip by cold plastic deformation is shown and the maximum average values of the increase in the main indicators of mechanical properties on individual



elements of the strip are determined. The maximum difference between the mechanical properties of the thick and thin elements of the profiled strip is observed in the hardness index and reaches 37.5%. The maximum obtained average value of the increase in yield strength and tensile strength is 26% and 18%, which is achieved with true deformation of the thick element of the profiled strip 0.165 and 0.234.

**Key words:** cold rolling, profiled strip, heterogeneous mechanical properties, aluminum alloy.

**Бондаренко Сергій Валерійович** – асистент кафедри технології машинобудування, НМетАУ, м.Дніпро, Україна.

**Гридін Олександр Юрійович** – головний інженер кафедри матеріалознавства Університету м. Падерборн, Федеративна Республіка Німеччина.

**Фролов Ярослав Вікторович** – завідувач кафедри обробки металів тиском ім.акад.О.П.Чекмарьова, НМетАУ, м.Дніпро, Україна.

**Кузьміна Ольга Михайлівна** – доцент кафедри обробки металів тиском ім.акад.О.П.Чекмарьова, НМетАУ, м.Дніпро, Україна.

**Бобух Олександр Сергійович** – доцент кафедри обробки металів тиском ім.акад.О.П.Чекмарьова, НМетАУ, м.Дніпро, Україна.

**Бондаренко Сергей Валерьевич** – ассистент кафедры технологии машиностроения, НМетАУ, г. Днепр, Украина.

**Гридин Александр Юрьевич** – главный инженер кафедры материаловедения Университета г. Падерборн, Федеративная Республика Германия.

**Фролов Ярослав Викторович** – заведующий кафедры обработки металлов давлением им.акад.А.П.Чекмарева, НМетАУ, г. Днепр, Украина.

**Кузьмина Ольга Михайловна** – доцент кафедры обработки металлов давлением им.акад.А.П.Чекмарева, НМетАУ, г. Днепр, Украина.

**Бобух Александр Сергеевич** – доцент кафедры обработки металлов давлением им.акад.А.П.Чекмарева, НМетАУ, г. Днепр, Украина.

**Bondarenko Serhii** – assistant, Department of Engineering Technology, NMetAU, Dnipro, Ukraine.

**Grydin Olexandr** – Chief Engineer, Department of Materials Science, University of Paderborn, Federal Republic of Germany.

**Frolov Yaroslav** – Head of the Department of Metal Forming, NMetAU, Dnipro, Ukraine.

**Kuzmina Olga** – Associate Professor, Department of Metal Forming, NMetAU, Dnipro, Ukraine.

**Bobukh Oleksandr** – Associate Professor, Department of Metal Forming, NMetAU, Dnipro, Ukraine.