

### РАЗДЕЛ III ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 621.771.2

Бондаренко С. В.  
Гридин А. Ю.  
Шапер М.

#### **ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ НА ГЛАДКОЙ БОЧКЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПРОФИЛИРОВАННЫХ ПОЛОС ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА EN AW-6082**

Стремление к уменьшению затрат на производство, снижению веса и оптимизации конструкций приводит современную промышленность к потребности в разработке новых видов материалов или улучшению уже существующих. Одним из видов новых материалов, которые позволяют улучшить характеристики продукции без существенных дополнительных затрат, на сегодняшний день являются полосы с различными по разным функциональным элементам характеристиками. Такие полосы уже широко используются в промышленности, в частности в автомобилестроении для изготовления различных компонентов автомобильных кузовов [1].

Существует несколько видов полос с различными по ширине или по длине специфическими характеристиками. По способу производства их условно разделяют на четыре группы. Первой и наиболее широко распространённой, в особенности в автомобильной промышленности, является группа Tailor Welded Blanks (TWB). Данные полосы получают путем сварки встык нескольких полос из различных материалов либо из одного материала, но с разной толщиной элементов. К другой группе полос – Patchwork Blanks (PB) – относятся полосы, схема производства которых похожа на получение TWB, однако, в данном случае одна полоса приваривается к поверхности другой с целью усиления определенного ее элемента. Третью группу представляют собой полосы с профилированным поперечным либо продольным сечением, получаемые путем прокатки, так называемые Tailor Rolled Blanks. В последние года также получает распространение четвертая группа подобной продукции: Tailor Heat Treated Blanks. Как видно из названия, данные полосы получают путем локального применения различных режимов термообработки на отдельных элементах одной полосы [2–4].

Все вышеназванные способы получения разных специфических характеристик в одной полосе, таких как механические свойства или толщина, обладают как достоинствами, так и недостатками. Основным недостатком существующих технологий являются высокие энергетические затраты на производственный процесс, и, как следствие, высокая себестоимость продукции, что затрудняет их широкое применение [5.]

Как уже указывалось выше, полосы и листы с различными по ширине механическими свойствами хорошо зарекомендовали себя в высокоразвитых отраслях промышленности. Вместе с тем, в настоящее время полосы с различными по элементам свойствами получают в основном путем сварки полос из различных марок сталей. Известно всего несколько работ, посвященных разработкам технологии производства подобных изделий из алюминиевых сплавов. В основном в них исследуется возможность получения полос с гетерогенными свойствами из алюминиевых сплавов 5xxx- и 6xxx-серий путем сварки встык их кромок (технология Tailor Welded Blanks) [6]. Однако на сегодняшний день данная технология остается достаточно плохо изученной. Алюминиевые полосы, произведенные по методу Tailor Welded Blanks, характеризуются более низким качеством, что вызвано негативным воздействием на элементы полос высоких температур во время стыковой сварки.

Целью данной работы является исследование возможности получения тонких плоских полос из среднепрочного алюминиевого сплава, которые обладали бы различными по элементам механическими свойствами, путем прокатки на гладкой бочке предварительно

профилированных полос, полученных валковой разливкой-прокаткой. Анализ полученных данных позволит определить оптимальную разницу между толщинами исходно разнотолщинных элементов профилированной полосы для получения максимального прироста механических свойств. Величина данного параметра позволит установить оптимальную толщину профилирующей ленты устройства валковой разливки-прокатки профилированных полос [7], которая применяется в новой энергосберегающей технологии изготовления профилированных полос, описанной ранее в работах [8–9].

В качестве модельного материала для изучения влияния степени деформации на изменение механических свойств был выбран алюминиевый сплав EN AW-6082, химический состав которого представлен в табл. 1. Механические свойства данного сплава в отожженном состоянии, регламентируемые стандартом DIN EN 485-2:2016-10 [10], представлены в табл. 2.

Таблица 1

Химический состав алюминиевого сплава EN AW-6082

Pb	Cr	Fe	Si	Zn	Ti	Mg	Mn	Cu	Другие элементы	Al
< 0,003	< 0,25	< 0,5	0,7-1,3	< 0,1	< 0,1	0,6-1,2	0,4-1,0	< 0,1	< 0,15	Остальное

Таблица 2

Механические свойства алюминиевого сплава EN AW-6082

Состояние поставки	Толщина, мм	Предел прочности, МПа		Предел текучести, МПа		Удлинение, %
		мин.	макс.	мин.	макс.	
О	1,5 - 3,0	-	150	-	85	16

В ходе подготовки к эксперименту были отобраны полосы длиной 420 мм и шириной 180 мм. Толщина полос составляла 2,9 мм. В ходе первой серии экспериментов профилирование по ширине алюминиевой полосы, полученной валковой разливкой-прокаткой, выполнялось путем вкатывания в ее центральную часть на разную глубину стальной полосы шириной 80 мм, толщиной 2 мм и длиной 420 мм. Таким образом, в данном эксперименте был замещен процесс валковой разливки-прокатки полос в профилированных валках-кристаллизаторах. Схематически экспериментальная процедура и внешний вид образцов на каждом этапе эксперимента изображены на рис. 1.

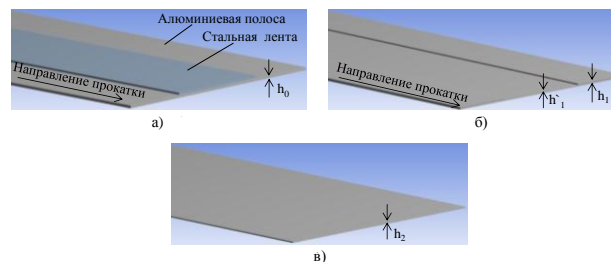


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной процедуры:

а – исходный образец, подготовленный к первому проходу прокатки; б – предварительно профилированный образец после первого прохода холодной прокатки и термической обработки; в – плоская тонкая полоса с различными по ширине механическими свойствами

В ходе первого этапа холодной прокатки, который выполнялся при комнатной температуре, стальная лента вкатывалась в алюминиевый образец, образуя в нем углубление с размерами, соответствующими габаритам стальной ленты и степени деформации за проход. При этом деформация остальных элементов алюминиевых образцов отсутствовала. Профилирование подготовленных образцов производилось за один проход. После профилирования алюминиевых образцов путем вкатывания в них стальной ленты производилась их термическая обработка с целью устранения деформационного упрочнения и снятия остаточных напряжений, наведенных холодной прокаткой с неравномерными обжатиями. В качестве термической обработки был применен отжиг с выдержкой в печи при температуре 420 °С в течение 1 часа и последующим охлаждением вместе с печью до комнатной температуры со скоростью 27 °С/ч. Затем профилированные в поперечном сечении образцы были прокатаны при комнатной температуре на гладкой бочке.

Величина обжатия для каждого из образцов в ходе второго прохода прокатки была равна величине разницы между толщинами "толстого" и "тонкого" элементов профиля  $h_1$  и  $h'_1$ . В соответствии с этим условием, в данной серии экспериментов деформации подвергались только "толстые" элементы профилированной полосы, что в последующем позволило провести сравнение механических свойств продеформированного и недеформированного элементов полосы и определить влияние разницы между степенями деформации элементов профиля профилированной полосы на гетерогенность формируемых в плоском продукте механических свойств. Параметры второго прохода холодной прокатки, выполненной на гладкой бочке, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры холодной прокатки профилированных полос из сплава EN AW-6082 на гладкой бочке

№	Исходные размеры		После прокатки	$e_1$	$e_2$	$\Delta e$
	$h'_1$ , мм	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм			
1	2,76	2,9	2,76	0	-0,042	0,042
2	2,6	2,9	2,6	0	-0,108	0,108
3	2,3	2,9	2,3	0	-0,232	0,232
4	2,1	2,9	2,1	0	-0,315	0,315

Прокатка профилированных образцов выполнялась за один проход в том же направлении, что и первый проход холодной прокатки на этапе профилирования. В ходе экспериментов все параметры процесса, кроме зазора между валками, оставались неизменными. В результате данной серии исследований были получены тонкие плоские полосы из сплава EN AW-6082 постоянной толщины.

Процесс холодной прокатки осуществлялся на прокатном стане дуо кафедры материаловедения Падерборнского Университета (г. Падерборн, Германия) с валками диаметром 210 мм и длиной бочки 300 мм [11]. Скорость прокатки была постоянной во всех экспериментах и составляла 3,5 м/мин. Привод валков реализовывался индивидуально от двух электродвигателей переменного тока суммарной мощностью 22 кВт. Для стабилизации полос в ходе прокатки использовалась система входных и выходных проводок. Перед началом прокатки клеть прокатного стана была предварительно напряжена при помощи встроенной гидромеханической системы с целью устранения всех существующих зазоров и уменьшения пружины клетки. Суммарная сила предварительного напряжения составила 200 кН.

После второго прохода холодной прокатки из различных элементов полученных плоских полос в направлении прокатки были отобраны образцы для оценки механических свойств материала. В первой серии измерений в качестве показателя механических свойств использовался показатель твердости по Бринеллю. Измерения твердости производились в соответствии с международным стандартом ISO 6506-1:2014 [12]. Затем, для более качественного оценивания разницы механических свойств полос по различным элементам, производилось измерение предела прочности и условного предела текучести. Для этого из исходно "толстого" и "тонкого" участка каждой полосы было отобрано по три образца для испытаний на растяжение. Последующие испытания на растяжение выполнялись в соответствии с международным стандартом ISO 6892-1:2016 [13].

Полученные в ходе проведенных экспериментальных исследований данные показали, что увеличение степени деформации "толстого" элемента профилированной полосы из сплава EN AW-6082 при отсутствии деформации "тонкого" элемента приводит к приросту механических свойств на исходно "толстом" элементе полосы. Эта особенность соответствует данным, полученным ранее при проведении исследований прокатки на гладкой бочке профилированных полос из технически чистого алюминия спецификации EN AW-1050 [14]. С целью определения величины прироста механических свойств на элементе полосы, который подвергся большей пластической деформации, использовалось отношение соответствующих показателей механических свойств исходно "толстого" и исходно "тонкого" элемента профилированной полосы. Для облегчения анализа полученных данных они были представлены в графическом виде (рис. 2).

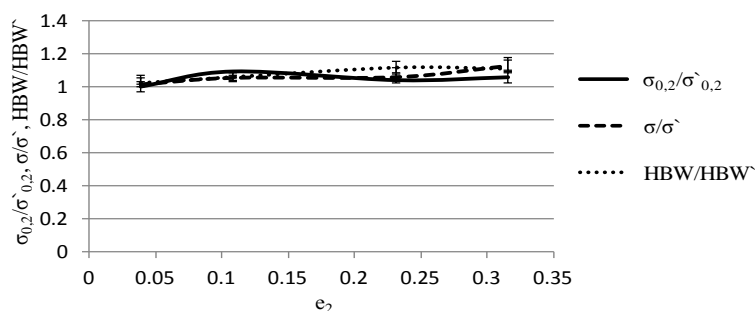


Рис. 2. Сравнение механических свойств отдельных элементов предварительно профилированной полосы после ее холодной прокатки на гладкой бочке (при условии отсутствия деформации "тонкого" элемента полосы ( $e_1 = 0$ ))

Полученные данные показали, что максимальный прирост показателя предела текучести исходно "толстого" элемента в размере 12 % наблюдается при его истинной деформации равной 0,108 и отсутствии деформации "тонкого" элемента, что соответствует разнице между толщинами элементов профилированной полосы равной 0,3 мм. При этом, по мере роста степени деформации "толстого" элемента профилированной полосы в исследуемом диапазоне, предел прочности непрерывно увеличивается от 105 МПа до 137 МПа. Максимальное значение прироста предела прочности на толстом элементе составляет 15,9 % при разнице между толщинами "толстого" и "тонкого" элемента профилированной полосы равной 0,8 мм, что соответствует значению истинной степени деформации "толстого" элемента равной 0,315. Однако следует отметить, что при данном значении истинной деформации "толстого" элемента, прирост предела текучести снижается до 5 %.

Также, в ходе экспериментальной процедуры было исследовано влияние степени деформации на изменение показателя твердости. Полученные данные показали, что прирост твердости также можно обеспечить путем неравномерности пластической деформации. Так, для сплава EN AW-6082 максимальный прирост показателя твердости составил 14 % при истинной деформации исходно "толстого" элемента 0,232 и исходно "тонкого" элемента – 0. Таким образом, максимальный прирост твердости достигается при разнице между толщиной "толстого" и "тонкого" элемента профилированной полосы равной 0,6 мм.

Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод о том, что оптимальная разница между толщиной элементов профилированной полосы находится в диапазоне от 0,3 мм до 0,6 мм. Именно такая разница между толщинами элементов профилированной полосы из алюминиевого сплава EN AW-6082 позволяет одновременно получить максимальный прирост предела прочности, предела текучести и твердости, который по некоторым механическим свойствам показателям достигает 14 %.

Следует отметить, что при прокатке профилированных полос на гладкой бочке существует риск искривления их формы из-за разных коэффициентов вытяжки "толстого" и "тонкого" элементов полосы. Визуальный осмотр образцов после второго прохода холодной прокатки позволил сделать вывод о том, что увеличение степени деформации "толстого" элемента при отсутствии пластической деформации "тонкого" элемента приводит к увеличению степени искажения формы готовой полосы. Проведенные эксперименты по прокатке профилированных полос на гладкой бочке позволили установить, что искажение формы производимой плоской полосы можно устранить путем корректной настройки вводных и выходных проводок прокатного стана. Однако, данный способ корректировки геометрии полос работоспособен только до определенного значения разницы между толщинами "толстого" и "тонкого" элементов профилированной полосы, которое соответствует определенной разнице между степенями деформации данных элементов. В условиях проведенных экспериментальных исследований по прокатке профилированных полос из алюминиевого сплава EN AW-6082 определено, что максимальная разница между толщинами элементов профилированной полосы, которая позволяет существенно снизить искажения формы результирующей плоской полосы в ходе прокатки, составляет 0,6 мм, что соответствует разнице истинных степеней деформации элементов профиля полосы, равной 0,232.

## ВЫВОДЫ

В рамках данной работы проведена серия экспериментальных исследований с целью изучения влияния неравномерности пластической деформации предварительно профилированных по ширине полос на гетерогенность их механических свойств после холодной прокатки на гладкой бочке. Выполнена серия исследований по холодной прокатке полос с профилированным поперечным сечением из алюминиевого сплава EN AW-6082 на гладкой бочке с обеспечением условия отсутствия деформации "тонкого" элемента профиля полосы. Величина разности толщин "толстого" и "тонкого" элемента варьировалась в диапазоне от 0,1 мм до 0,8 мм, что соответствует изменению истинной степени деформации исходно "толстого" элемента от 0,042 до 0,325. Полученные данные продемонстрировали возможность получения прироста механических свойств на исходно "толстом" элементе профилированной полосы и позволили определить оптимальную разницу между толщинами элементов профилированной полосы, которая может быть использована для производства плоских полос с гетерогенными механическими свойствами. Так, максимальное увеличение предела прочности в размере 15,9 % достигается при разнице толщин элементов, равной 0,8 мм, а условного предела текучести в размере 12 % – при 0,3 мм. Также установлено, что максимальный рост твердости, который составил 14 %, достигается путем холодной прокатки профилированной полосы при условии деформации "толстого" элемента полосы и отсутствии деформации "тонкого" элемента, при разнице толщин элементов профиля равной 0,6 мм.

Путем сопоставления и анализа полученных результатов исследований установлено, что оптимальная разница толщин "толстого" и "тонкого" элемента профилированной полосы должна составлять от 0,3 мм до 0,6 мм, что, в свою очередь, позволит получить одновременный максимальный прирост всех показателей механических свойств на отдельных элементах полосы предварительно профилированной полосы вследствие ее холодной прокатки на гладкой бочке. Дополнительно следует отметить, что искажения формы готовой плоской полосы при холодной прокатке на гладкой бочке профилированной полосы можно нивелировать корректной настройкой входных и выходных провадок, если максимальное значение разницы между толщинами элементов профилированной полосы не превышает 0,6 мм. Более высокая разница в степени деформации между элементами профилированной полосы приводит к существенному нарушению геометрии продукта, в частности его плоскостности.

С учетом вышесказанного, было определено, что оптимальная толщина профилирующей ленты устройства для валковой разливки-прокатки профилированных полос должна составлять от 0,3 мм до 0,6 мм, которая обеспечит оптимальные условия производства профилированных полос из расплава с целью их дальнейшего применения для изготовления плоских полос с переменными по ширине механическими свойствами.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pallet R. J. *The use of tailored blanks in the manufacture of construction components* / R. J. Lark, R. J. Pallet // *JOMPT*. – 2001. – № 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. – № 83. – 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. – № 52. – С. 197–200.
5. Merklein M. *A review on tailored blanks - Production, applications and evaluation* / M. Merklein, M. Johannes, M. Lechner, A. Kuppert // *JOMPT*. – 2014. – № 214. – С. 151–164.
6. Naeem M. *Welding aluminum tailored blanks with Nd:YAG lasers for automotive applications* / M. Naeem, R. Jessett // *Practical welding today*. – 2001. – Feb. (<http://www.thefabricator.com/article/automationrobotics/welding-aluminum-tailored-blanks-with-ndyag-lasers-for-automotive-applications>)
7. Пат. UA 113368 С2 Украина, МПК В22D 11/06, В22D 11/10. Пристрій для валкової розливки-прокатки профільованих штаб / Гридін О. Ю., Огінський Й. К., Бондаренко С. В., Шанер М. – № а201600100 ; заявл. 04.01.2016 ; опубл. 10.01.2017, Бюл. 1.
8. Бондаренко С. В. *Исследование дефектообразования при прокатке на гладкой бочке предварительно профилированных полос* / С. В. Бондаренко, А. Ю. Гридин, М. Шанер // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 169–174.*
9. 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 : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2017. – № 1 (44). – С. 89–95.*

10. DIN EN 485-2:2016-10 Aluminium und Aluminiumlegierungen. Bänder, Bleche und Platten. Teil 2 : Mechanische Eigenschaften. – 10.2016. – 104 p.

11. Гридин А. Ю. Технологический литейно-прокатный комплекс экспериментальных исследований процесса валковой разливки-прокатки Падерборнского Университета. Пластична деформация металів : кол. моногр. под ред. Я. В. Фролова / А. Ю. Гридин, И. К. Огинский, М. Шапер. – Дніпро, Акцент ПП, 2017. – С. 210-220.

12. ISO 6506-1:2014 Metallic materials. Brinell hardness test. Part 1: Test method. – 10.2014 – 16 p.

13. ISO 6892-1:2016 Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature. – 07.2016. – 79 p.

14. Rolling of flat aluminum strips with tailored mechanical properties / O. Grydin, S. Bondarenko, M. Stolbchenko, M. Schaper // *Materials Science Forum.* – 2016. – Vol. 854. – P. 87–92.

## REFERENCES

1. Pallet R. J. The use of tailored blanks in the manufacture of construction components / R. J. Lark, R. J. Pallet // *JOMPT.* – 2001. – № 117. – S. 249–254.

2. Merklein M. Manufacturing flexibilisation of metal forming components by tailored blanks / M. Merklein, M. Lechner // *Proc. Conf. Competitive Manufacturing.* – 2013. – S. 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. – № 83. – S. 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. – № 52. – S. 197–200.

5. Merklein M. A review on tailored blanks - Production, applications and evaluation / M. Merklein, M. Johannes, M. Lechner, A. Kuppert // *JOMPT.* – 2014. – № 214. – S. 151–164.

6. Naeem M. Welding aluminum tailored blanks with Nd:YAG lasers for automotive applications / M. Naeem, R. Jessett // *Practical welding today.* – 2001. – Feb. (<http://www.thefabricator.com/article/automationrobotics/welding-aluminum-tailored-blanks-with-ndyag-lasers-for-automotive-applications>).

7. Pat. UA 113368 C2 Україна, МПК V22D 11/06, V22D 11/10. Pristrij dlja valkovoї rozlivki-prokatki profil'ovanih shtab / Gridin O. Ju., Ogins'kij J. K., Bondarenko S. V., Shaper M. – № a201600100 ; zajavl. 04.01.2016 ; opubl. 10.01.2017, Bjul. 1.

8. Bondarenko S. V. Issledovanie defektoobrazovanija pri prokatke na gladkoj bochkepredvari-tel'no profilirovannyh polos / S. V. Bondarenko, A. Ju. Gridin, M. Shaper // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. trudov. – Kramatorsk : DGMA, 2016. – № 1 (42). – S. 169–174.*

9. Bondarenko S. V. Issledovanie zavisimosti temperatury i stepeni deformacii tonkih uchastkov profilirovannyh polos pri valkovoї razlivke-prokatke s dopolnitel'nym teplovym soprotivleniem / S. V. Bondarenko, A. Ju. Gridin, M. Shaper // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. trudov. – Kramatorsk : DGMA, 2017. – № 1 (44). – S. 89–95.*

10. DIN EN 485-2:2016-10 Aluminium und Aluminiumlegierungen. Bänder, Bleche und Platten. Teil 2 : Mechanische Eigenschaften. – 10.2016. – 104 p.

11. Gridin A. Ju. Tehnologicheskij litejno-prokatnyj kompleks jeksperimental'nyh issledovanij processa valkovoї razlivki-prokatki Paderbornskogo Universiteta. Plastichna deformacija metaliv : kol. monogr. pod red. Ja. V. Frolova / A. Ju. Gridin, I. K. Oginskij, M. Shaper. – Dnipro, Akcent PP, 2017. – S. 210-220.

12. ISO 6506-1:2014 Metallic materials. Brinell hardness test. Part 1: Test method. – 10.2014 – 16 p.

13. ISO 6892-1:2016 Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature. – 07.2016. – 79 p.

14. Rolling of flat aluminum strips with tailored mechanical properties / O. Grydin, S. Bondarenko, M. Stolbchenko, M. Schaper // *Materials Science Forum.* – 2016. – Vol. 854. – P. 87–92.

Бондаренко С. В. – мл. науч. сотрудник каф. ОМД НМетАУ;

Гридин А. Ю. – д-р техн. наук, гл. инженер, каф. материаловедения,  
Университет Падерборна, Германия;

Шапер Мирко – д-р техн. наук, проф., каф. материаловедения,  
Университет Падерборна, Германия.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр.

E-mail: bondarenkoserhii89@gmail.com

Статья поступила в редакцию 12.03.2018 г.