

### РАЗДЕЛ III ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 621.771

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

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ НА ГЛАДКОЙ БОЧКЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПРОФИЛИРОВАННЫХ ПОЛОС

В последнее время стремление к уменьшению затрат на производство, снижению вредных выбросов в окружающую среду, уменьшению веса и оптимизации конструкций приводит современную промышленность к разработке новых видов продукции или улучшению уже существующей. Одним из видов продукции, который позволяет совместить низкие затраты на обработку материала и высокие механические свойства, являются полосы с переменной геометрией или различными механическими свойствами. Такие полосы широко востребованы в автомобильной промышленности, их применяют для изготовления различных элементов кузовов автомобилей [1]. Также такой вид продукции находит все большее применение и в других отраслях, где необходимо сохранить или повысить жесткость конструкций, но при этом уменьшить их вес.

Условно все полосы с переменной геометрией или различными механическими свойствами можно разделить по способу производства на 4 группы. Первой и наиболее широко распространённой, особенно для использования в автомобильной промышленности, являются так называемые Tailor Welded Blanks (TWB). Данные полосы получают путем сварки нескольких полос из различных материалов. К другой группе полос, Patchwork Blanks, относятся полосы, схема получения которых похожа на получение TWB, но в данном случае к полосе из одного материала приваривается другая полоса, в основном эти полосы делают из стальных полос и полос из различных алюминиевых сплавов. Третья группа – это полосы с профилированным поперечным сечением, полученные путем прокатки (Tailored Rolled Blanks). В последние годы также набирает распространённость четвертая группа – Tailored Heat Treated Blanks. Как видно из названия, это полосы, которые получают путем термообработки различных участков одной полосы по различным режимам (рис. 1) [2–4].

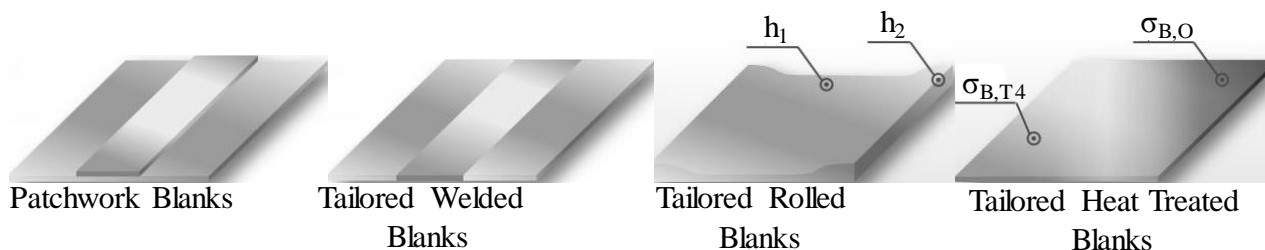


Рис. 1. Классификация полос с различными свойствами по ширине

Все вышеназванные способы получения различных характеристик в одной полосе обладают как достоинствами, так и недостатками. Основным общим недостатком являются высокие энергетические затраты и, как следствие, высокая стоимость производства [5].

В настоящее время кафедра ОМД НМетАУ совместно с Падерборнским Университетом (ФРГ) работает над разработкой альтернативного энергосберегающего способа получения полос с различными механическими свойствами по ширине, связанного с прокаткой на гладкой бочке полос с переменным поперечным сечением по ширине, предварительно по-

лученных на агрегате валковой разливки-прокатки. Как известно, идею технологии прямого получения плоских полос из расплава в двухвалковых кристаллизаторах озвучил Генри Бессемер еще в 1856 году. В последние десятилетия данная технология прямого получения полос из расплава хорошо зарекомендовала себя, поскольку она предоставляет ряд преимуществ, основными из которых являются экологичность, энергосберегающий потенциал и малые производственные площади. Все это повышает конкурентоспособность продукции, полученной на данных агрегатах за счет уменьшения финансовых затрат на производственный процесс. На данный момент на агрегатах валковой разливки-прокатки освоены технологии получения плоских полос из различных сталей и сплавов, а также алюминиевых и магниевых сплавов. Одним из возможных дальнейших путей развития данной технологии является получение полос с переменным поперечным сечением по ширине.

Возможность получения такого рода продукции обеспечивает профилирование поверхности валков-кристаллизаторов. Так, в 2011 году сотрудниками института пластической деформации металлов в г. Аахене (ФРГ) была проведена работа по разработке инструмента и технологии для получения полос с переменным поперечным сечением на агрегате валковой разливки-прокатки с профилированными валками-кристаллизаторами [6]. В данной работе в качестве материала полос использовалась сталь 1.4301, отечественным аналогом которой является сталь 08X18H10. Конструктивной особенностью технической реализации является использование никелевого слоя, напыленного на поверхность медных валков-кристаллизаторов, и подверженного механической обработке с целью придания поверхности валков-кристаллизаторов необходимого профиля. Позже, в 2014 году, данными исследователями была опубликована статья, посвященная исследованию влияния последующей прокатки в профилированных валках на механические свойства и качество получаемых полос [7]. Основным недостатком описанной выше технологии получения профилированных полос является необходимость использования парка дорогостоящих валков-кристаллизаторов, индивидуально изготавливаемых для каждого нового профиля поперечного сечения.

Авторами предлагается альтернативный способ профилирования поверхности бандажей водоохлаждаемых валков-кристаллизаторов, лишенный указанного недостатка, в котором для профилирования используется одна или несколько бесконечных стальных лент, охватывающих валок-кристаллизатор. Схематически данное решение изображено на рис. 2.

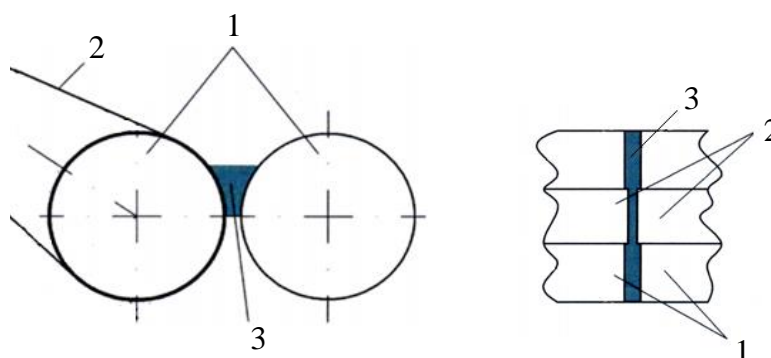


Рис. 2. Предлагаемый способ получения профилированных полос путем валковой разливки-прокатки:

1 – водоохлаждаемые валки-кристаллизаторы, 2 – стальная профилирующая лента, 3 – расплав

Предлагаемый новый способ профилирования позволяет избавиться и от других недостатков, присущих методу, описанному выше, например, снизить длительность перенастройки агрегата валковой разливки-прокатки на другой вид получаемого профиля и уменьшить время ремонта профилированной части валка-кристаллизатора.

Использование стальной ленты для профилировки поверхности валков-кристаллизаторов накладывает определенные ограничения на данный процесс. Эти ограничения следует учитывать при решении задач оптимизации данного процесса. Одним из параметров, влияющих на

качество конечной продукции, является величина угла боковой кромки стальной ленты. С одной стороны, стальную ленту с большими углами кромки, близкими к  $90^\circ$ , проще удерживать в натяжном устройстве без опасений ее повреждения, что положительно скажется на качестве получаемых полос с профилированным поперечным сечением. Однако, с другой стороны, углы кромок стальной ленты, близкие к  $90^\circ$ , могут привести к образованию дефектов на поверхности профилированных полос при последующей их прокатке в валках с гладкой бочкой.

Целью данной работы является экспериментальный анализ влияния угла сопряжения разных элементов предварительно профилированной полосы на дефектообразование при последующем переделе, а именно при прокатке в валках с гладкой бочкой, с целью получения плоского продукта с варьируемыми по ширине механическими свойствами. Полученные данные позволят определить оптимальный угол выполнения кромок стальной ленты, так как он определяет угол сопряжения элементов профилированной полосы различной толщины.

Для определения влияния величины угла между элементами профиля профилированных полос на дефектообразование при последующей прокатке были проведены следующие эксперименты. В качестве модельного материала был использован алюминиевый сплав EN AW-1050, химический состав которого представлен в табл. 1. Механические свойства данного сплава, которые регламентируются стандартом ISO 6361-2:2014, представлены в табл. 2.

Таблица 1

Химический состав алюминиевого сплава EN AW-1050

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

Таблица 2

Механические свойства алюминиевого сплава EN AW-1050

Состояние поставки	Толщина, мм	Предел прочности, МПа		Условный предел текучести, МПа		Удлинение, %
		мин.	макс	мин.	макс.	
О	1,3–6,5	60	100	20	-	30

В ходе подготовки к эксперименту были отобраны полосы длиной 420 мм и шириной 180 мм. Толщина полос составляла 2,9 мм. Схематически экспериментальная процедура и внешний вид образцов на каждом этапе эксперимента изображен на рис. 3.

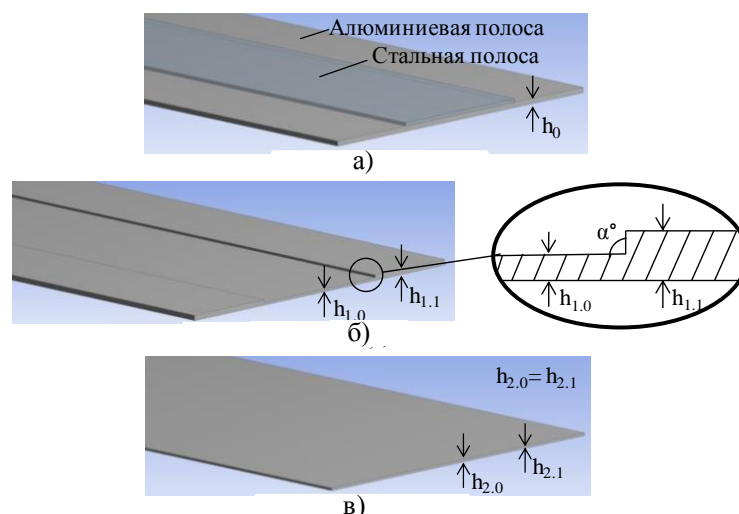


Рис. 3. Схематическое изображение экспериментальной процедуры:

а – образец, подготовленный к первой прокатке; б – образец после первой прокатки; в – плоская полоса с различными механическими свойствами по ширине, где  $\alpha$  – угол между «толстой» и «тонкой» частью полосы

В ходе первой серии экспериментов профилирование алюминиевой полосы выполнялось путем вкатывания в нее стальной полосы шириной 80 мм, толщиной 2 мм и длиной 420 мм. После первой прокатки полученные образцы были подвержены термообработке с целью снятия напряжений, полученных в ходе холодной прокатки. В качестве термообработки был выбран рекристаллизационный отжиг при температуре 375°C с выдержкой продолжительностью 60 минут. Охлаждение полос после термообработки производилось на воздухе. Затем отожженные образцы с переменным поперечным сечением были прокатаны в холодном состоянии на гладкой бочке. Параметры прокатки представлены в табл. 3.

Для исследования влияния на дефектообразование, в ходе прокатки на гладкой бочке, были выбраны такие величины угла  $\alpha$  (см. рис. 3б): 165°, 150°, 135°, 120°, 105°, 90°. Однако, в ходе подготовки образцов в действительности между элементами полосы различной толщины были выполнены углы сопряжения: 166°, 147°, 137°, 118°, 105°, 90°. После прокатки на гладкой бочке для каждого из исследованных углов были отобраны образцы на участках перехода «толстой» части полосы в «тонкую» и проведен анализ их поперечной, к направлению прокатки, поверхности в световом микроскопе.

Таблица 3

Параметры последней прокатки на гладкой бочке

№	Начальные размеры		После прокатки	$e_1$	$e_2$	$\Delta e$	$e_2/e_1$
	$h_{1,0}$ , мм	$h_{1,1}$ , мм	$h_2$ , мм				
Первая серия экспериментов							
1	2,3	2,9	2,294	-0,002	-0,234	0,232	117
2	2,1	2,9	2,093	-0,003	-0,326	0,323	108,67
3	2,0	2,9	1,989	-0,005	-0,377	0,372	75,4
Вторая серия экспериментов							
4	2,1	2,65	2,1	0	-0,232	0,232	232
5	2,1	2,65	2,02	-0,039	-0,271	0,232	6,95
6	2,1	2,65	1,7	-0,211	-0,443	0,232	2,09

Как видно из табл. 3, проведенные эксперименты можно разделить на две части. В первой серии экспериментов, при прокатке полосы с профилированным поперечным сечением на гладкой бочке, деформации подвергалась только «толстая» часть полосы. Величина разности толщин «толстой» и «тонкой» части в данном случае варьировалась от 0,6 мм до 0,9 мм. Примеры образовавшихся в ходе второй прокатки на гладкой бочке закатов и их размер представлены на рис. 4.

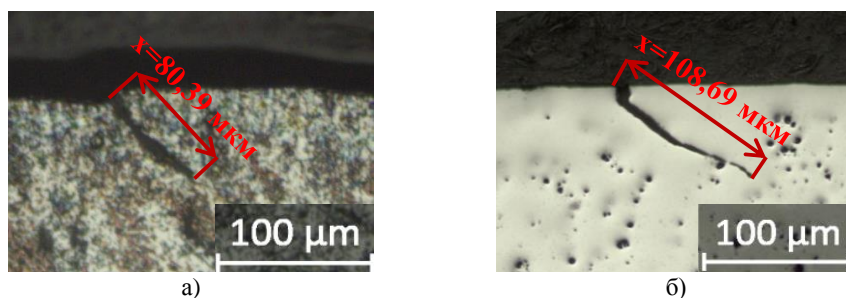


Рис. 4. Вид образцов под микроскопом после второй прокатки:  
а – образец номер 2 с углом  $\alpha=105^\circ$ ; б – образец номер 5 с углом  $\alpha=90^\circ$

Полученные данные показали, что при значениях величины угла больше  $135^\circ$  закат не образовывался. По мере уменьшения угла  $\alpha$  вышеуказанной величины, размер заката увеличивается. Обобщенные экспериментальные данные представлены в графическом виде на рис. 5, а.

Во второй серии экспериментов было исследовано влияние отношения истинной деформации «толстой» части к истинной деформации «тонкой» части ( $e_2/e_1$ ) на размер образующегося дефекта ( $x$ ) при постоянной разнице истинных деформаций, равной 0,232. Это соответствует разнице между толщиной «толстой» и «тонкой» части, равной 0,55 мм. Угол сопряжения элементов предварительно профилированной полосы, который использовался в данной серии экспериментов, составил  $90^\circ$ . Полученная в результате проведения исследований зависимость представлена на рис. 5, б.

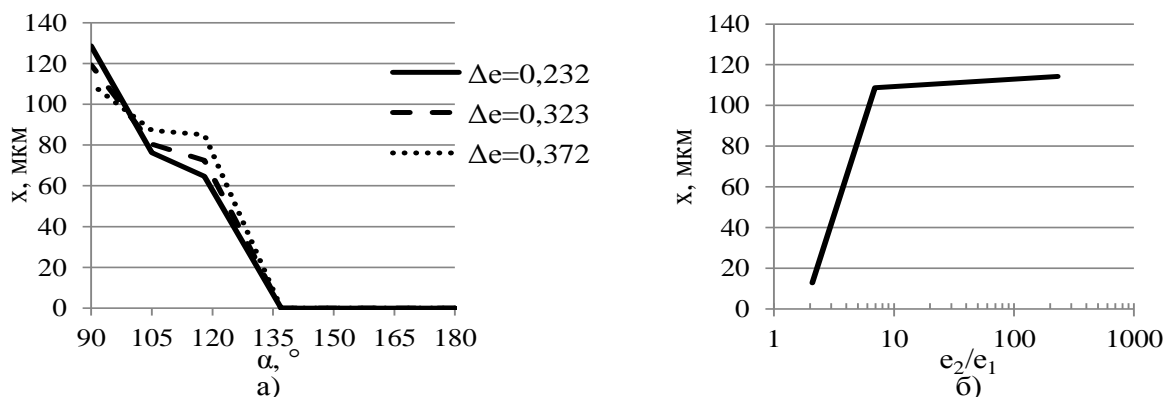


Рис. 5. Графики зависимости размера образующегося заката:

а – для первой серии экспериментов ( $e_1 \rightarrow 0$ ) в зависимости от величины угла сопряжения между элементами полосы; б – для второй серии экспериментов ( $\Delta e = \text{const} = 0,232$ ), значение величины угла ( $\alpha$ ) постоянно и равно  $90^\circ$

Из графика видно, что при принятых условиях деформации, когда деформируются и «тонкие», и «толстые» участки полосы, размер заката стремится к нулю по мере того, как отношение истинных деформаций этих участков стремится к единице. То есть при отсутствии деформации тонкой части наблюдается наибольший размер заката, который соответствует отношению  $e_2/e_1 = 0,232$ . По мере увеличения степени деформации «тонкой» части, наряду с увеличением деформации «толстой» части, размер заката уменьшается. Данная особенность зависит, по-видимому, от используемого материала. Так как в данных экспериментах использовался технически чистый алюминий, при больших значениях деформации происходит частичное заваривание заката.

## ВЫВОДЫ

В данной работе приведена новая технологическая схема производства плоских полос с варьируемыми механическими свойствами по ширине. Предлагаемый метод включает использование машины валковой разливки-прокатки с водоохлаждаемыми валками-кристаллизаторами совместно с профилирующей бесконечной стальной лентой, которая охватывает валок-кристаллизатор. Полученные подобным способом профилированные полосы предлагается подвергать прокатке на гладкой бочке с целью получения различных механических свойств по их ширине. Одним из факторов, который влияет на качество получаемой конечной продукции, а именно появление дефектов в виде закатов, является угол в месте сопряжения элементов профилированной полосы различной толщины. Данный угол определяется углом кромок стальной ленты, используемой для профилирования поверхности валков-кристаллизаторов. В данной работе проведено исследование влияния величины данного угла ( $\alpha$ ) между различными участками полосы на дефектообразование в ходе последующей обработки полосы, а именно прокатке на гладкой бочке. В ходе проведения экспериментов

было установлено, что, при конструировании машины валковой разливки-прокатки, для получения профилированных полос, необходимо избегать применения стальных лент с углом кромок менее  $135^\circ$ . Уменьшение данного угла приводит к образованию закатов в ходе последующей прокатки профилированных полос на гладкой бочке, размеры которых растут при соответствующем снижении угла. Кроме того, установлена зависимость размера заката в случае деформации «толстого» и «тонкого» элементов полосы одновременно. По мере того, как деформация «тонкой» части стремится к величине деформации «толстой» части, размер образующегося заката уменьшается из-за сваривания материала.

Полученные данные будут использованы при конструировании машины валковой разливки-прокатки профилированных полос и позволят оптимизировать процесс производства 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. Pallet, R. J. Lark // *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. Daamen M. *Experimental and numerical investigation of double roller casting of strip with profiled cross section* / M. Daamen, T. Förster, G. Hirt // *Steel research int.* 2011 – *Special Edition*. – С. 93–98.
7. Vidoni M. *Hot rolling of AISI 304 tailored strips produced by twin roll strip casting* / M. Vidoni, M. Daamen, J. Gastreich, N. Offermanns, G. Hirt // *Production Engineering* 2014. – №8(5). – С. 619–626.

#### REFERENCES

1. Pallet R. J. *The use of tailored blanks in the manufacture of construction components* / R. J. Pallet, R. J. Lark // *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. Daamen M. *Experimental and numerical investigation of double roller casting of strip with profiled cross section* / M. Daamen, T. Förster, G. Hirt // *Steel research int.* 2011 – *Special Edition*. – С. 93–98.
7. Vidoni M. *Hot rolling of AISI 304 tailored strips produced by twin roll strip casting* / M. Vidoni, M. Daamen, J. Gastreich, N. Offermanns, G. Hirt // *Production Engineering* 2014. – №8(5). – С. 619–626.

Бондаренко С. В. – асп. каф. ОМД, НМетАУ

Гридин А. Ю. – д-р техн. наук, проф., с.н.с., НМетАУ

Шапер М. – д-р техн. наук, проф., Университет г. Падерборн (ФРГ)

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: [sergey\\_bondarenko\\_89@bk.ru](mailto:sergey_bondarenko_89@bk.ru)