

Я. В. Фролов /д. т. н./, А. С. Макеева,  
В. Д. Коваленко  
Национальная металлургическая академия  
Украины

А. Ю. Гридин /д. т. н./, М. Шапер /д. т. н./,  
М. Ю. Столбченко, А. К. Андреев  
Падерборнский Университет (ФРГ)

## Параметры деформации при прокатке алюминиевой полосы, армированной стальной сеткой

Экспериментально исследованы параметры деформации при прокатке алюминиевых полос, армированных стальной сеткой. Приведены результаты испытаний армированной композиции на растяжение в направлении прокатки. Установлено, что накопленная в процессе прокатки деформация растяжения проволок приводит к преждевременному разрушению проволок и всего пакета при испытаниях вдоль оси прокатки. Лучшие результаты получаются при армировании сеткой, в которой проволоки расположены под углом к оси прокатки. При прокатке на качество полученного пакета оказывают влияние не только температура и степень деформации, но ещё и диаметр валков. Часть исследований, результаты которых приведены в данной статье, выполнена в рамках совместного немецко-украинского проекта «Praxispartnerschaft Metalurgie», финансируемого немецким обществом академических обменов DAAD. (Ил. 9. Табл. 4. Библиогр.: 8 назв.)

**Ключевые слова:** алюминиевая полоса, стальная сетка, армирование, прокатка, деламинация.

*The strain parameters at barrel rolling of reinforced with steel net aluminum strip were experimentally researched. For such compound also the results of tensile tests in rolling direction are shown.*

*It was found that accumulated in net wires during the rolling tensile strain leads to premature failure of the wire and whole compound. Much better is to place net wires at an angle to rolling direction. Not only temperature and strain, also diameter of rolls can change the compound characteristics. This study was supported by German Academic Exchange Service (DAAD) in the framework of German-Ukrainian project «Praxispartnerschaft Metalurgie».*

**Key words:** aluminum matrix, steel mesh, reinforcing, rolling, delamination.

### Введение

Соединение различных материалов в одном продукте направлено на передачу лучших свойств каждого из этих материалов в готовый продукт, называемый композицией. Одним из вариантов такой композиции является лист (полоса) из алюминиевого сплава, армированный(ая) стальной сеткой. В этом случае алюминиевая матрица снижает удельный вес, а стальная сетка придает композиции прочность и пластичность. Свойства и характеристики таких композиций, в том числе полученных в процессах обработки металлов давлением, описаны в книге [1]. В работах [2; 3] представлены результаты исследования прочности соединения, полученного при совместной прокатке двухслойной (Al – Al) и трехслойной (Al – сталь – Al) композиции. Показано, что скорость деформации не оказывает существенного влияния на свойства композиции, а важными параметрами являются: контактное напряжение, температура и степень деформации. Известно большое количество работ, в которых рассматриваются технологии литья и свойства алюминиевых матриц, армированных проволоками и сетками [4–7]. В этих работах уделено внимание характеристикам переходной зоны между алю-

миниевой и стальной фазами. В работе [4] также проанализирована деформация продольных и поперечных проволок сетки внутри композиции при прокатке. Показано, что проволоки испытывают деформации двух видов: сплющивание и растяжение. Комбинация этих деформаций зависит от положения проволоки внутри композиции и от параметров деформации при обработке композиции. Анализ состояния исследований в области технологии производства и свойств композитных материалов на основе алюминиевых сплавов показал, что на деформацию проволок внутри композиции оказывают влияние параметры деформации во время совместной прокатки.

### Цель работы и описание экспериментов

Цель данной работы – исследование возможности получения композиции, состоящей из двух наружных слоёв алюминиевого сплава и сетки из нержавеющей стали внутри, способом горячей прокатки. В качестве алюминиевой матрицы были выбраны такие сплавы:

1) АМг6 (аналог ENAW 5056) – сплав, упрочняемый пластической деформацией. Размеры пластины для опытной прокатки ( $h \times b \times l$ )  $4 \times 36 \times 120$  мм. Состояние поставки по EN 515 – O;

## ПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

2) АД31 (аналог ENAW 6063) – сплав, упрочняемый термообработкой. Размеры пластины для опытной прокатки ( $h \times b \times l$ )  $3 \times 36 \times 120$  мм. Составление поставки по EN 515 – О.

В качестве армирующего материала использовалась плетеная проволочная сетка двух типов из нержавеющей стали типа X18H9:

- 1) тип А – диаметр проволоки – 0,5 мм, размеры ячейки  $3 \times 3$  мм;
- 2) тип В – диаметр проволоки – 0,25 мм, размеры ячейки  $1 \times 1$  мм.

В качестве заготовки для прокатки были приготовлены т. н. пакеты трех типов, скрепленные алюминиевыми заклепками:

- 1) тип 90 – сетка ориентирована таким образом, чтобы проволочки располагались вдоль и поперек направления прокатки;
- 2) тип 45 – проволочки сетки ориентированы под углом  $45^\circ$  к направлению прокатки;
- 3) тип 0 – без сетки.

Прокатка проводилась в один или два прохода с нагревом деформацией до температур (табл. 1) на следующих станах:

- 1) стан 180 – двухвалковый листопрокатный стан с диаметром валков 250 мм и длиной бочки валка, равной 180 мм (рис. 1);
- 2) стан 280 – двухвалковый листопрокатный стан с диаметром валков 210 мм и длиной бочки валка, равной 280 мм (рис. 2).

Таблица 1

Варианты обработки композиций

Варианты обработки	Сплав	
	5056	6063
Стан 180		
Стан 280		
Температура прокатки – 200 °С		
Температура прокатки – 450 °С		
Температура прокатки – 500 °С		
Степень деформации – 30 %		
Два прохода со степенью деформации 30 % каждый и промежуточным нагревом до 450 °С		
Обозначения в таблице:		
	– эксперименты проводились;	
	– эксперименты проводились для части образцов;	
	– эксперименты не проводились.	

При определении степени деформации в качестве исходной толщины полосы ( $h_0$ ) принималась сумма толщин алюминиевых матриц без учета толщины сетки. Коэффициент вытяжки пакета определялся как отношение поперечных сечений до и после деформации. Деформация проволочек для пакетов типа 90 определялась по площади их проекции на продольную (вдоль



Рис. 1. Стан 180



Рис. 2. Стан 280

оси прокатки) и поперечную плоскости сечения с учетом оваллизации (рис. 3). Для пакетов типа 45 коэффициент вытяжки проволочек и их оваллизация определялись как среднее значение площадей их проекций на продольную и поперечную плоскости сечения. При этом в качестве начальной площади поперечного сечения исходной проволоки также использовалась проекция на эти плоскости.

### Результаты исследования показателей деформации

**Общие результаты.** Во всех случаях прокатка проходила удовлетворительно. Расслоения пакетов на выходе из стана обнаружено не было. Также после прокатки сетка относительно равномерно заполняла все пакеты. Видимых обрывов или отставания сетки от матрицы обнаружено не было. Механическое и химическое удаление одного слоя матрицы показало, что сетка внутри пакета деформируется неравномерно. Так, для пакетов типа 90 заметен существенный изгиб поперечных сеток в центральной части пакета, а также неравномерное увеличение расстояния между ними (рис. 4 и 5).

Анализ искажения формы поперечных проволочек показал, что более толстая сетка типа А

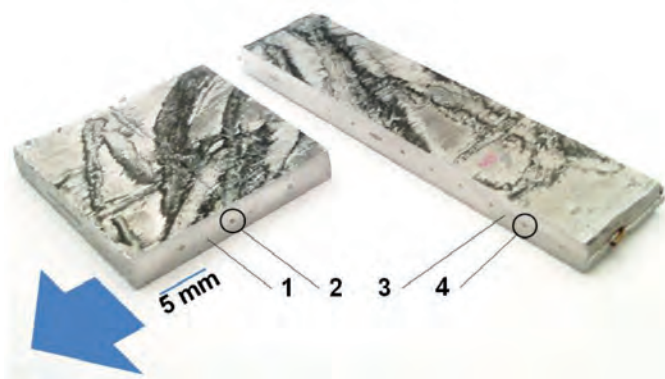


Рис. 3. Пример образцов для определения деформации проволоки внутри прокатанного пакета типа 90 (стрелкой обозначено направление прокатки):

- 1 – продольная плоскость сечения пакета;
- 2 – проекция поперечной проволоки (Q) на продольную плоскость сечения пакета;
- 3 – поперечная плоскость сечения пакета;
- 4 – проекция продольной проволоки (L) на поперечную плоскость сечения пакета



Рис. 4. Пакеты из сплава 5056:

- 1 – тип сетки А, 90°; 2 – тип сетки А, 45°;
- 3 – тип сетки В, 90°; 4 – тип сетки В, 45°;
- 5, 6 – без сетки

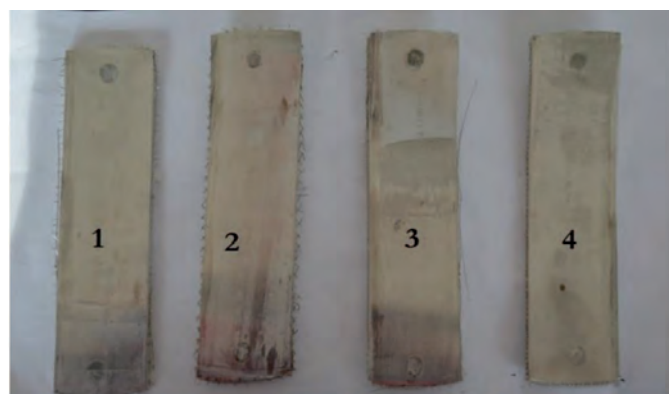


Рис. 5. Пакеты из сплава 6063:

- 1 – тип сетки А, 90°; 2 – тип сетки А, 45°;
- 3 – тип сетки В, 90°; 4 – тип сетки В, 45°

больше склонна к изгибу, чем сетка типа В. В тоже время, прокатка сплава 5056 при температуре 500 °С приводит к меньшему изгибу проволоки, чем прокатка сплава 6063 при температуре 200 °С. Увеличение степени деформации в исследованном диапазоне прогнозировано приводит к усилению изгиба поперечных проволок.

В пакетах типа 45 вследствие деформации изменился угол между проволоками (рис. 6б), а сами проволоки утонились меньше, чем при прокатке пакетов типа 90.

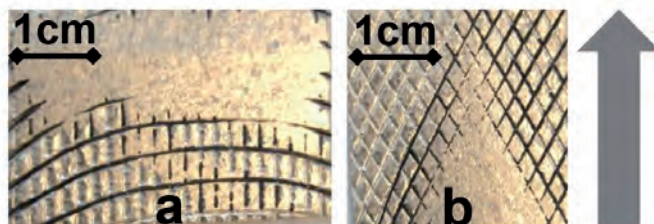


Рис. 6. Примеры искажения формы сетки после прокатки пакетов (стрелкой обозначено направление прокатки):

- а – пакет типа 90; б – пакет типа 45

Так, при прокатке с расчетной степенью деформации 30 % для сплавов 5056 и 6063 отклонение угла пересечения проволок в сетке типа А составило, соответственно, 12 и 13°. Для сетки типа В значение отклонения угла пересечения проволок для обоих материалов составило 16°. При прокатке сплава 6063 в два прохода с расчетной суммарной степенью 60 % (30 + 30 %) деформации отклонение угла пересечения проволок было одинаковым для двух типов сетки и составило 32°.

*Прокатка пакетов на основе сплава 5056.* Прокатка проводилась на стане 280 кафедры обработки металлов давлением Национальной металлургической академии Украины. Расчетная степень деформации по высоте образца была 30 %. Температура металла перед прокаткой – 500 °С. Фактические показатели деформации представлены в табл. 2.

Анализ результатов прокатки показывает, что для пакетов типа 90 деформация поперечных проволок практически не происходит, а деформация продольных проходит очень интенсивно. В случае если коэффициент вытяжки продольной проволоки превышает коэффициент вытяжки пакета, это говорит о том, что в нем происходили дополнительные локальные деформации в месте контакта с поперечной проволокой. Если же коэффициент вытяжки продольных проволок значительно меньше деформации пакета, например, для случая 5056-В-90-30, то это свидетельствует о разрыве проволок в местах их пересечения. Это было подтверждено

Показатели деформации при прокатке сплава 5056

Код эксперимента*	$\epsilon_h$	$\epsilon_b$	$\epsilon_l$	$\mu_\Sigma$	$\mu_w(45)$	$\mu_{wL}(90)$	$\mu_{wQ}(90)$	$b_w/h_w(45)$	$b_{wL}/h_{wL}(90)$	$b_{wQ}/h_{wQ}(90)$	$F_w, \%$
5056-A-90-30	-0,32	0,03	0,28	1,28	-	1,44	1,08	-	1,13	1,07	2,90
5056-A-45-30	-0,38	0,07	0,34	1,37	1,36	-	-	1,15	-	-	3,29
5056-B-90-30	-0,37	0,07	0,31	1,35	-	1,13	1,02	-	1,1	1,04	1,14
5056-B-45-30	-0,38	0,09	0,33	1,37	1,21	-	-	1,08	-	-	2,73
5056-0-30	-0,37	0,06	0,35	1,35	-	-	-	-	-	-	-

\*Код эксперимента обозначает последовательно: тип сплава матрицы, тип сетки, тип пакета и расчетную степень деформации.

$\epsilon_h, \epsilon_b, \epsilon_l$  – истинные логарифмические деформации соответственно по длине, ширине и высоте образца;  $\mu_\Sigma$  – коэффициент вытяжки пакета при прокатке;  $\mu_w(45)$  – коэффициент вытяжки проволок в пакетах типа 45;  $\mu_{wL}(90)$  – коэффициент вытяжки продольных проволок в пакетах типа 90;  $\mu_{wQ}(90)$  – коэффициент вытяжки поперечных проволок в пакетах типа 90;  $b_w/h_w(45)$  – оваллизация проволок после прокатки в пакетах типа 45;  $b_{wL}/h_{wL}(90)$  – оваллизация продольных проволок после прокатки в пакетах типа 90;  $b_{wQ}/h_{wQ}(90)$  – оваллизация поперечных проволок после прокатки в пакетах типа 90;  $F_w, \%$  – доля площади поперечного сечения пакета, занимаемая проволоками.

Значения коэффициента вытяжки для поперечных проволок на 2–4 % занижены, а значения оваллизации, соответственно, завышены, потому что проволоки изгибаются в процессе прокатки и пересекают продольную плоскость не под прямым углом (см. рис. 6а).

при последующем травлении образцов. Причиной этого может быть охрупчивание проволоки при температуре 500 °С.

Меньшие значения коэффициентов вытяжки проволоки для пакетов типа 45 компенсируются изменением угла пересечения проволок. Так, для эксперимента 5056-A-45-30 изменение угла составило 12°, что позволило при коэффициенте вытяжки проволок 1,36 получить коэффициент удлинения сетки, равный 1,49, что больше, чем коэффициент вытяжки пакета (1,37). Для эксперимента 5056-B-45-30 коэффициент удлинения сетки составил 1,38, что также больше, чем у пакета. Это свидетельствует о том, что вероятность обрыва проволок в пакете невысока. Причем в первом случае она меньше, чем во втором. Доля проволоки в поперечном сечении пакета типа 45 выше. Причем при прокатке пакета на основе сплава 5056 при температуре 500 °С она практически не зависит от типа проволоки. То, что коэффициент удлинения ячейки сетки (1,38) был выше, чем суммарный коэффициент вытяжки пакета (1,37), свидетельствует о разрыве значительного количества проволок при прокатке даже при более благоприятном расположении проволок в пакете типа 45.

При одинаковом зазоре между валками, наименьшая высотная деформация была достигнута при прокатке пакетов типа 90 и типа 0, а наибольшая – при прокатке пакетов типа 45. Это свидетельствует о том, что диагональная ориентация сетки облегчает течение металла за счет снижения внутреннего трения. Причем для мелкой сетки этот эффект выражен больше. Наибольшее уширение также показал пакет с мелкой сеткой, ориентированной диагонально, а наименьшее – пакет с крупной сеткой, ориентированной продольно. Хотя следует отметить, что в данном эксперименте в целом уширение развивалось незначительно.

*Прокатка пакетов на основе сплава 6063.* Пакеты на основе сплава 6063 также прокатывали на стане 280 НМетАУ. Температура прокатки была 200 °С. Пакет типа 0 был испорчен при прокатке. При анализе результатов прокатки (табл. 3) обращает на себя внимание небольшой разброс значений высотной деформации.

По сравнению с прокаткой при той же степени деформации пакетов из сплава 5056 заметным является более интенсивная деформация проволок, как в продольном направлении, так и их сплющивание. Во всех случаях коэффициент

Таблица 3

Показатели деформации при прокатке сплава 6063 с расчетной степенью деформации 30 %

Код эксперимента*	$\epsilon_h$	$\epsilon_b$	$\epsilon_l$	$\mu_\Sigma$	$\mu_w(45)$	$\mu_{wL}(90)$	$\mu_{wQ}(90)$	$b_w/h_w(45)$	$b_{wL}/h_{wL}(90)$	$b_{wQ}/h_{wQ}(90)$	$F_w, \%$
6063-A-90-30	-0,36	0,04	0,32	1,37	-	1,68	1,3	-	1,25	1,04	2,51
6063-A-45-30	-0,35	0,05	0,33	1,35	1,35	-	-	1,11	-	-	4,35
6063-B-90-30	-0,36	0,03	0,34	1,39	-	1,24	1,05	-	1,08	1,09	0,91
6063-B-45-30	-0,36	0,04	0,34	1,38	1,27	-	-	1,1	-	-	3,51

\* Обозначения см. в табл. 2.

вытяжки проволоки, с учетом удлинения ячейки для пакетов типа 45, был больше, чем суммарный коэффициент вытяжки пакета. Это свидетельствует о том, что проволоки в пакете не порвались. Достижение больших по сравнению с пакетами из сплава 5056 деформаций проволоки можно объяснить благоприятным температурным интервалом деформации аустенитной нержавеющей стали, называемым иногда «эффектом теплой прокатки» [8]. В пакетах типа 45 при трансформации из квадрата в ромб диагональ увеличилась в 1,49 и 1,45 раза для проволок типа А и типа В соответственно. Вероятность разрыва проволок в этом случае минимальна. Тем не менее обращает на себя внимание не очень большая разница между долей проволок А и В в площади поперечного сечения. Количественное определение разницы в коэффициентах вытяжки и доли проволок различного диаметра в площади поперечного сечения пакета пока, к сожалению, развито недостаточно.

*Прокатка пакетов на основе сплава 6063 в два прохода.* Прокатку пакетов на основе сплава 6063 проводили в два прохода с суммарной расчетной деформацией 60 % для каждого на стане 280 кафедры материаловедения Университета Падерборна. Температура нагрева перед прокаткой составила 450 °С. Показатели деформации для этого эксперимента представлены в табл. 4.

Прокатка этого пакета показала, что сетка типа В не выдержала такой степени деформации и порвалась. Об этом свидетельствует соотношение коэффициентов вытяжки сетки и пакета, а также доля проволоки в поперечном сечении пакета. Двухпроходная прокатка показала значительную разницу в фактических конечных размерах образцов, прокатанных с одинаковым зазором между валками. Лучше всего продеформировались пакеты без сетки. Так, разница в конечной толщине пакетов без сетки и пакетов с сеткой типа А составила 13 %. При этом пакеты с сеткой типа В вели себя похоже на пакеты без сетки, это говорит о том, что разорвавшаяся сетка не препятствовала деформации.

Таким образом, с повышением степени деформации влияние сетки на сопротивление деформации при прокатке возрастает.

**Результаты статических испытаний на растяжение**

После прокатки пакетов из них с помощью электроэрозионной резки были вырезаны пятикратные образцы для статических испытаний на растяжение вдоль направления прокатки.

Образцы с шириной рабочей части 12 мм и шириной части под захваты машины, равной 18 мм, размещались по два на ширине пакета. Во время испытаний проводилось фотографирование рабочей части.

*Результаты испытаний на растяжение пакетов на основе сплава на основе 5056.* Испытания на растяжение пакетов на основе сплава ENAW 5056 показали, что в пакетах без сетки был достигнут такой уровень механических свойств:  $R_{0,2} = 183(\pm 2)$  МПа,  $R_m = 353(\pm 2)$  МПа, Относительное удлинение ( $A_5$ ), полученное путем сравнения длин рабочей части образца до и после испытания, составило  $18,2 (\pm 0,5) \%$ , а рассчитанное относительное удлинение ( $A_{5(Rm)}$ ), соответствующее максимальной силе при испытаниях, –  $14,5 (\pm 1,5) \%$ .

Такой уровень механических свойств по прочности соответствует состоянию Н14, по пределу текучести – состоянию 0, а по относительному удлинению – состоянию Н12 по DINEN 1301 – 2.

Наилучший результат при испытаниях пакетов с сеткой показали пакеты 5056-А-45, в которых  $R_{0,2} = 211...229$  МПа,  $R_m = 358...377$  МПа. Однако относительное удлинение в этих пакетах оказалось ниже:  $A_5 = 15,4 (\pm 1,2) \%$ ,  $A_{5(Rm)} = 11 (\pm 1,5) \%$ . Пакеты типа 5056-В-45 показали при испытаниях несколько меньшие значения предела текучести ( $R_{0,2} = 201...205$  МПа) и предела прочности ( $R_m = 362...365$  МПа), однако выиграла по пластичности. Значения  $A_5$  и  $A_{5(Rm)}$  составили  $17,8 (\pm 1)$  и  $14,5 (\pm 0,5) \%$  соответственно, что практически совпадает с результатами испытаний пакетов без сетки. Обращает на себя внимание то, что такие результаты, полу-

Таблица 4

**Показатели деформации при прокатке сплава 6063 в два прохода с суммарной расчетной деформацией 60 %**

Код эксперимента*	$e_h$	$e_b$	$e_l$	$\mu_\Sigma$	$\mu_w (45)$	$\mu_{wL} (90)$	$\mu_{wQ} (90)$	$b_w/h_w (45)$	$b_{wL}/h_{wL} (90)$	$b_{wQ}/h_{wQ} (90)$	$F_w, \%$
6063-А-90-60	-0,74	0,10	0,69	1,90	-	2,38	1,06	-	1,58	1,28	4,91
6063-А-45-60	-0,73	0,09	0,68	1,89	2,07	-	-	1,47	-	-	4,00
6063-В-90-60	-0,81	0,09	0,74	2,06	-	1,65	1,03	-	1,29	1,04	1,80
6063-В-45-60	-0,81	0,10	0,75	2,04	1,13	-	-	1,26	-	-	5,79
6063-0-60	-0,88	0,10	0,81	2,19	-	-	-	-	-	-	-

\* Обозначения см. в табл. 2.

## ПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

ченные для проволоки типа В, были достигнуты при разорванных во время прокатки проволоках (см. табл. 2). Вероятно, если бы проволоки не разорвались во время прокатки, показатели механических свойств были бы выше.

Пакеты типа 90 показали при испытаниях неудовлетворительные результаты: показатели механических свойств и пластичности находились на уровне 30–70 % от результатов пакетов типа 0.

Наблюдение за динамикой разрушения образцов при испытаниях позволило установить механизм разрушения пакетов, развивающийся в такой последовательности: «разрушение одного слоя пакета → деламинация → разрушение второго слоя пакета». При этом деламинация может ограничиваться одной или несколькими ячейками и не происходит на всей длине образца. На рис. 7 представлены последовательности кадров, предшествующих разрушению образца.

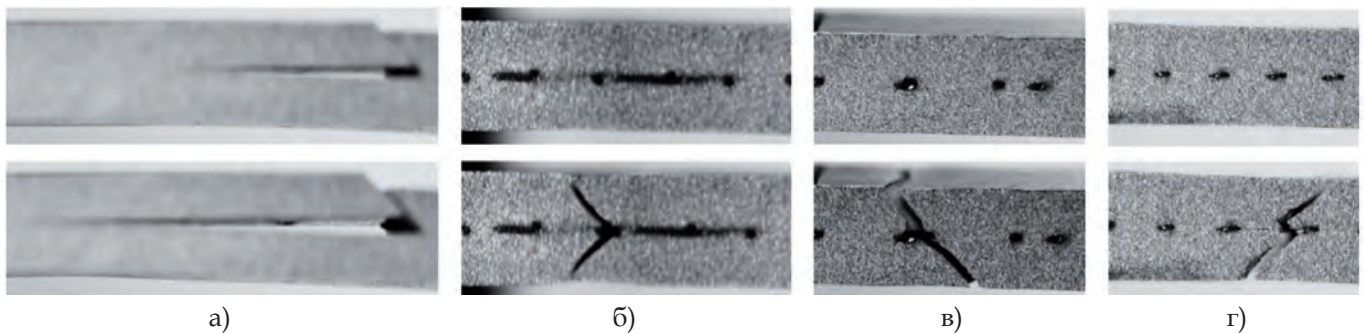
*Результаты испытаний на растяжение пакетов на основе сплава на основе 6063.* Испытания пакетов на основе сплава 6063, прокатанных в один

проход показали, что механические свойства и пластичность не сильно зависят от типа и ориентации проволоки:  $R_{0,2} = 105 (-7 / +13)$  МПа,  $R_m = 140 (-3 / +5)$  МПа,  $A_5 = 13 (-2 / +3)$  %,  $A_{5(Rm)} = 5,5 (-1,5 / +2)$  %.

Анализ механизма разрушения образцов из пакетов на основе сплава 6063, прокатанных в один проход показал, что при испытаниях на растяжение, в отличие от пакетов на основе сплава 5056, сначала происходит деламинация пакета, а затем поочередное разрушение слоёв (рис. 8).

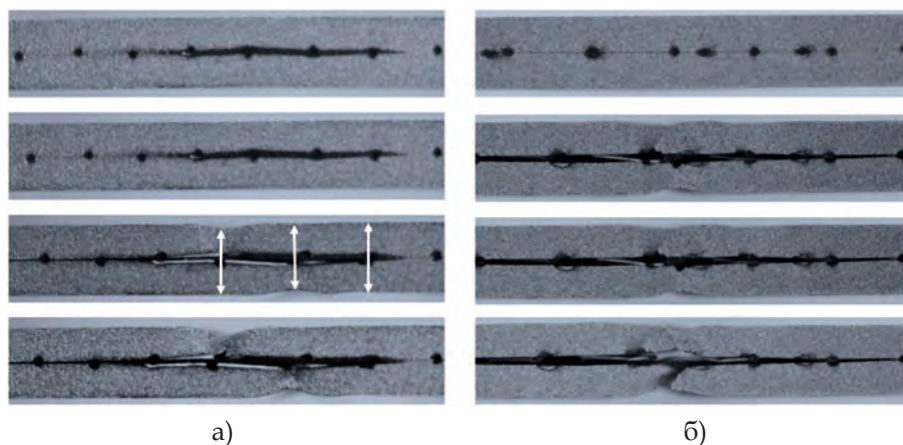
При этом утонение алюминиевой матрицы в пакетах типа 90 происходит в местах расположения поперечных проволок, которые являются концентраторами напряжений, особенно после деламинации. В пакетах типа 45 такими концентраторами напряжений являются узлы сетки.

Испытания пакетов на основе сплава 6063, прокатанных в два прохода, показали, что все пакеты, армированные сеткой, имеют худшие показатели прочности и пластичности по сравнению с пакетами, прокатанными без сетки (типа 0). Так, в пакетах типа 0: предел текучести



**Рис. 7. Последовательность кадров, предшествующих разрушению пакетов при испытаниях на растяжение:**

а – пакет типа 0; б – пакет типа 90, проволока типа А; в – пакет типа 45, проволока типа А; г – пакет типа 45, проволока типа В



**Рис. 8. Пример последовательности фотокадров, предшествующих разрушению образца из пакета на основе сплава 6063, прокатанного в один проход при испытаниях на растяжение:**

а – пакет типа 90, проволока типа А (стрелками показаны места утонения алюминиевой матрицы); б – пакет типа 45, проволока типа А

$R_{0,2} = 128 (-5 / +4)$  МПа, предел прочности  $R_m = 140 (\pm 3)$  МПа,  $A_5 = 15(-3 / +1)\%$ ,  $A_{5(Rm)} = 5,5(\pm 1)\%$ . Среди армированных пакетов ближе всех к этим значениям находятся пакеты типа 45:

- армированные проволокой типа А:  $R_{0,2} = 125(\pm 3)$  МПа;  $R_m = 151(\pm 3)$  МПа,  $A_5 = 12,7(\pm 0,7)\%$ ,  $A_{5(Rm)} = 4(\pm 0,5)\%$ ;

- армированные сеткой типа В:  $R_{0,2} = 120,5(\pm 1,5)$  МПа;  $R_m = 148,5(\pm 0,5)$  МПа,  $A_5 = 15(\pm 1,5)\%$ ,  $A_{5(Rm)} = 6(\pm 0,5)\%$ .

Механические свойства у пакетов типа 90 на 10-15 %, а пластичность - на 35-50 % ниже этого уровня.

Анализ результатов испытаний на растяжение показал, что все армированные пакеты типа 45 имеют незначительно меньшие по сравнению с пакетами типа 0 значения предела прочности. Если сравнивать армированные пакеты типа 45 по типам проволоки, то в пакетах, армированных проволокой типа А, выше предел текучести, а в пакетах, армированных проволокой типа В, - показатели пластичности.

Фотокадры, предшествующие разрушению образцов (рис. 9) показывают, что прокатка в два прохода обеспечила прочное соединение слоёв алюминиевой матрицы. Во всех случаях значительной деламинации не наблюдалось.

Основным отличием разрушения пакетов типа 45, прокатанных в два прохода, является то, что утонение образца развивается в зоне между узлами проволоки. При этом проволоки за счет возможного диффузионного соединения с матрицей являются ограничителями развития деформации. Кроме того, важным является то, что, если в пакете типа 0 наблюдалась ограни-

ченная деламинация, то в армированных пакетах типа 45 деламинации не было замечено.

### Обсуждение полученных результатов

1. Видимого расслоения после деформации не наблюдалось, что говорит о возможности получения пакетов из исследованных сплавов прокаткой при температурах 200-500 и степени деформации около 30 % по соотношению высот матриц. Исключение составляет пакет без проволоки из сплава 6063, прокатанный при температуре 200 °С с расчетной степенью деформации 30 %. Этот пакет расслоился после прокатки.

2. Ограничением деформации при таких экспериментах является прочность проволоки.

3. Погрешность при определении логарифмических показателей деформации составила +0,04...4,63 %. Она связана с неточностью определения длины пакетов после прокатки.

4. Погрешность при определении коэффициента вытяжки и овализации проволоки по изменению площади их поперечного сечения оценивается как  $\pm 3\%$ .

5. Определяющая деформация проволоки для большинства проведенных экспериментов - растяжение. Однако, в узлах пересечения проволоки, особенно для проволоки типа А, наблюдается локальное сдавливание поперечного сечения. Соотношение деформаций овализации (сплющивания) и растяжения утонения проволоки, по всей видимости, зависит от параметров очага деформации при прокатке. В частности от степени деформации и диаметра валков.

6. В пакетах типа 45 более интенсивно деформируется проволока типа А. Для оценки цело-

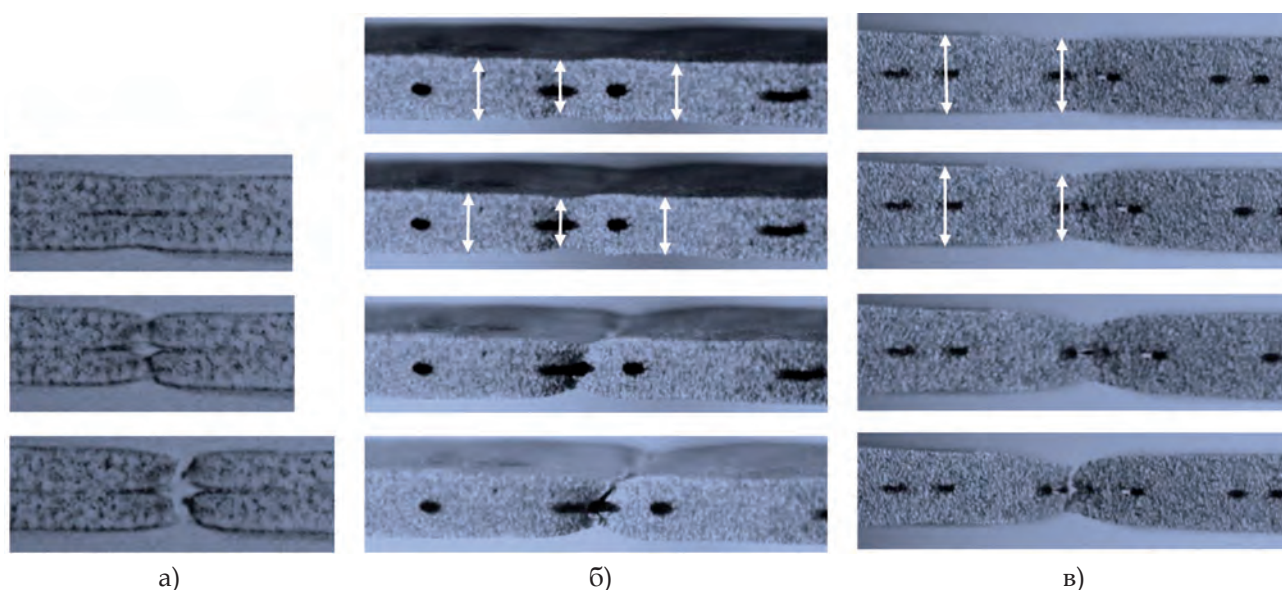


Рис. 9. Примеры последовательности фотокадров, предшествующих разрушению образцов из пакетов типа 45 на основе сплава 6063 при испытаниях на растяжение:

а - пакет типа 0; б - пакет типа 45, проволока типа А; в - пакет типа 45, проволока типа В

сности проволок в пакете после прокатки следует соотносить коэффициент удлинения диагонали ячейки с общим коэффициентом вытяжки пакета. Если он меньше, то вероятность обрыва очень высока. Однако, даже в случае, если коэффициент удлинения ячейки больше, то вероятность обрыва сохраняется. Безопасное соотношение этих коэффициентов требует уточнения.

7. В пакетах типа 90 основную деформацию принимают на себя продольные проволоки. Для оценки возможного обрыва этих проволок следует напрямую соотносить коэффициент вытяжки проволоки с коэффициентом вытяжки пакета.

8. Для пакетов типа 90 деформация продольных проволок в сетке типа А на 29–33 % больше деформации поперечных, и в проведенных опытах не зависит от материала матрицы и степени деформации. В то же время для сетки типа В эта разница составляет 10–60 %.

9. Овальзация проволок в большей степени прямо зависит от степени деформации. Овальзация поперечных проволок в пакетах типа 90 минимальна. Среднюю позицию по этому критерию занимают проволоки в пакетах типа 45, а максимальную овальзацию показывают продольные проволоки в пакетах типа 90.

10. Деформация поперечных проволок происходит в основном за счет их изгиба в направлении прокатки. Овальзация поперечных проволок для большинства опытов была незначительной.

11. Вероятность обрыва проволок по проведенным исследованиям может оцениваться как по соотношению коэффициентов вытяжки пакета и проволок, так и по максимальному возможному для данной проволоки удлинению.

12. При испытаниях на растяжение пакеты типа 90 показали неудовлетворительные результаты. Они связаны с исчерпанием запаса пластических свойств продольных проволок при прокатке, а также с тем, что поперечные проволоки играют роль концентраторов напряжений при испытаниях.

13. Пакеты типа 45 при испытаниях показали лучшие результаты, что связано с меньшим растяжением проволок в процессе прокатки.

14. Разрыв проволок в процессе прокатки снижает механические свойства пакетов. Однако в некоторых случаях позволяет получить улучшение по сравнению с пакетами без сетки. Это говорит о том, что армирование пакета происходит как за счет собственной прочности сетки, так и за счет упрочнения матрицы путем образования препятствий развитию деформации.

15. В зависимости от доли проволок в поперечном сечении пакета, а также от прочностей соединения матрица-матрица и матрица-арматура разрушение пакета происходит по следующим механизмам.

*Разрыв первого слоя → деламинация → разрыв второго слоя.* Такой механизм характерен для пакетов, у которых доля проволок в поперечном (по отношению к оси испытаний) сечении невелика, а прочность соединения «матрица – арматура» выше, чем соединения матрица-матрица. В этом случае при упругом возврате лопнувшего первого слоя арматура «разрывает слою».

*Разрыв слоёв без деламинации.* Такой механизм характерен для высокой прочности соединений как матрица-матрица, так и матрица-арматура в пакетах со значительной долей проволок в поперечном сечении.

*Деламинация → последовательное разрушение слоёв.* Такое разрушение характерно для невысокой прочности соединения матрица-матрица, а также относительно малой доли проволок в поперечном сечении пакета.

### Выводы

Ограничением для улучшения свойств пакетов путем армирования проволокой является накопленная в процессе прокатки деформация растяжения проволок, которая приводит к преждевременному разрушению проволок и всего пакета при испытаниях вдоль оси прокатки. При этом возникает противоречие между требуемой для сварки слоёв матрицы степенью деформации (при данной температуре) и растяжением вследствие этой деформации армирующих проволок. Лучшие результаты получают при армировании сеткой, в которой проволоки расположены под углом к оси прокатки. На механические свойства пакета, армированного проволокой, основное влияние оказывают такие факторы: ориентация проволок, температура прокатки, степень деформации и диаметр валков стана. Негативным результатом экспериментов является то, что во всех случаях недостаточное объемное содержание проволоки в композиции не позволило существенно повысить её прочность.

### Библиографический список

1. Структура и свойства композиционных материалов / К. И. Портной, С. Е. Салибеков, И. Л. Светлов, В. М. Чубаров. – М. : Машиностроение, 1979. – 255.
2. Eizadjou M. Investigation of roll bonding between aluminum alloy strips / M. Eizadjou, Manesh H. Danesh, K. Janghorban // Materials and Design 29. – 2008. – P. 909-913.



3. Danesh Manesh H. Effective parameters on bonding strength of roll bonded Al/St/Al multilayer strips / Manesh H. Danesh, H. Sh. Shahabi // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – Vol. 476, iss. 1–2, 12 May. – P. 292–299.

4. Nakamura R. Casting of Net Inserted Aluminum Alloy Composite Strip Advanced Materials / R. Nakamura, T. Haga, K. Takahashi, S. Kumai and H. Watari // Research 06/2011; 264-265:1899-1904. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.1899.

5. Haga T. Casting of composite strip using a twin roll caster / T. Haga, K. Takahashi // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – 157–158. – P. 701–705.

6. Haga T. Casting of wire-inserted composite aluminum alloy strip using a twin roll caster /

T. Haga, K. Takahashi, H. Watari, S. Kumai // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 192–193, 1 October. – P. 108–113. – Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.015>

7. Haga T. Casting of a wire inserted strip using a twin roll caster equipped with two nozzles / T. Haga, K. Takahashi, S. Kumai, H. Watari // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 337. – P. 556–559.

8. Frolov Ya. V. The heat conditions of the pilger rolling / Ya. V. Frolov, I. Mamuzic, V. N. Danchenko // Metallurgia. – 2006. – № 3. – P. 179–184.

Поступила 08.02.2016



УДК621.771

Наука

**В. А. Николаев /д. т. н./, А. Г. Васильев,  
С. В. Жученко**

Запорожская государственная инженерная академия

## Новые технологии и устройства при прокатке полос. Сообщение 1

*Предложен способ подготовки поверхности металла перед обработкой давлением, обеспечивающий сокращение отходов металла в окалину и повышение качества поверхности готовой продукции. Предварительный подогрев горячекатаного подката до температуры 90...120 °С позволит уменьшить энергосиловые параметры и расход электроэнергии при прокатке. Предлагаемый способ локального теплового воздействия на прокатываемую полосу перед или за клетку может быть использован для регулирования межвалкового зазора. (Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 16 назв.)*

**Ключевые слова:** очистка, поверхность, заготовка, нагрев, оплавление, рулоны, холодная прокатка, полоса, межвалковый зазор, локальное охлаждение, валки.

*Offered method of preparation of surface of metal before treatment pressure, providing reduction of wastes of metal in a dross and upgrading of surface of the prepared products. The preheat of hot-rolled stripe to the temperature of 90...120 °С will allow to decrease energy power parameters and expense of electric power at rolling. Offered method of the local thermal affecting the rolled stripe before or after a cage can be used for adjusting of interrolling gap.*

**Key words:** cleaning, surface, purveyance, heating, burn-off, rolls, cold rolling, stripe, interrolling gap, local cooling, felling.

В работах [1–3] предложены варианты новых технологических процессов производства полос в горячем и холодном состояниях, показаны их преимущества по сравнению с традиционными технологиями. В материале данной статьи рассматриваются новые технические разработки, позволяющие, на наш взгляд, повысить каче-

ство поверхности и профиля полосы, улучшить условия работы прокатного стана.

**Очистка поверхности полосы от окалины.** После горячей прокатки на поверхности полосы образуется окалина толщиной 0,1...0,15 мм, которую перед дальнейшей обработкой необходимо удалять. По данным [4] количество удаля-