

УДК 621.771.23:669.2

Гридин А. Ю.
Шапер М.
Данченко В. Н.

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛОС ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКОЙ-ПРОКАТКОЙ

Экологичность, качество, энергосбережение – именно этими словами можно охарактеризовать тренд развития металлургической промышленности, сложившийся за последнее десятилетие. Указанным трем требованиям удовлетворяет технология производства листа непосредственно из расплава методом валковой разливки-прокатки. Особенность данного способа получения полос заключается в кристаллизации и последующей деформации металла в пространстве между двумя вращающимися навстречу друг другу валками, куда он непрерывно подается в расплавленном состоянии. Описание данного процесса и основные особенности, необходимые для его успешной реализации, были впервые сформулированы в 1865 г. сэром Г. Бессемером [1]. На рис. 1 приведен эскиз, выполненный сэром Г. Бессемером, который дает упрощенное представление о технологии получения листа валковой разливкой-прокаткой. Следует отметить, что уже в этой ранней работе детализированы такие специфические элементы оборудования, как водоохлаждаемые валки (*a*), боковые ограничители (на рис. 1 не представлены) и прообраз устройства для очистки поверхности бандажей (*e-f*), которые в модифицированном виде присутствуют на современных установках. Из-за технической сложности организации процесса валковой разливки-прокатки его промышленная реализация отстала от идеи почти на сто лет и была осуществлена в 50-ых годах прошлого столетия. Технология впервые была опробована на чистом алюминии американской фирмой Hunter Engineering (ныне FATA Hunter) [2], а также в СССР при производстве кровельных листов из чугуна [3]. В последнем случае, однако, пластическая деформация металла в валковом кристаллизаторе условиями ведения процесса исключалась. В настоящий момент уровень развития металлургического оборудования и технологий – в первую очередь за счет усовершенствования систем автоматизации и появления новых жаропрочных материалов – позволил распространить указанный способ производства тонких листов на углеродистые, нержавеющие и электротехнические стали [4, 5 и др.], а также на деформируемые магниевые сплавы [6, 7].

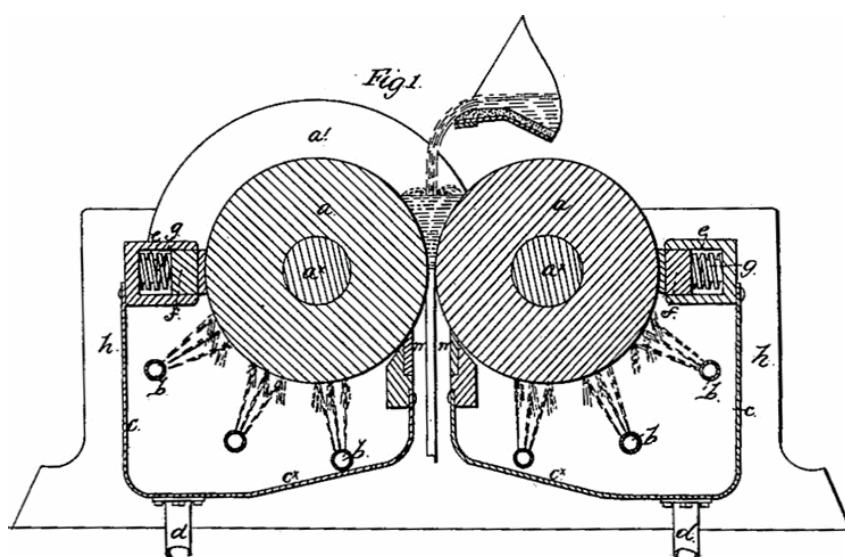


Рис. 1. Первый эскиз машины валковой разливки-прокатки (1865 г.):

a – валок; *a'* – фланец; *a** – осевое отверстие; *b* – трубы; *c* – ограждающие камеры; *c** – наклонная поверхность камеры; *d* – слив; *e* – корпус с кольцевым отверстием; *g* – винты; *f* – деревянные блоки; *h* – станина

Валковая разливка-прокатка полос из алюминиевых сплавов.

Как было отмечено выше, исторически именно алюминий стал первым материалом, на котором перспективная технология была впервые отработана, успешно внедрена в промышленных условиях и на сегодняшний день используется наиболее широко. Развитие процесса непрерывной валковой разливки-прокатки алюминия осуществлялось за последние 50 лет по направлению увеличения ширины полос, получаемых непосредственно из расплава, а также уменьшения их толщины. В настоящий момент современные промышленные литейно-прокатные установки типа SuperCasterPlus® фирмы FATHunter или Jumbo 3CM® фирмы Novelis (до слияния в 2005 году – Pechiney) обеспечивают получение листов шириной до 2300...2350 мм при минимальной толщине литого продукта 2,5 мм [8, 9]. При этом основным обрабатываемым материалом остается технически чистый алюминий, используемый в большинстве случаев для производства пищевой фольги. С другой стороны, с начала 80-х годов на двухвалковых агрегатах успешно освоена разливка термически не упрочняемых сплавов систем Al-Mn (серия 3xxx) и Al-Mg (серия 5xxx). Типичными и наиболее распространенными представителями указанных бинарных систем являются сплавы 3003 и 5052 [2, 9]. Реже для разливки тонких листов используются сплавы 3105 [10] и 5182, 5754 [11, 12]. Указанные алюминиевые сплавы имеют широкий спектр применения от кухонной утвари до автомобилей и строительства. Кроме того, в технической литературе приводятся данные о получении на установках валковой разливки-прокатки полос из термоупрочняемых сплавов средней прочности системы Al-Mg-Si (серия 6xxx), таких как 6016, 6022, 6061 и 6111 [13, 14 и др.]. Возможность повышения в результате упрочняющей термической обработки показателей прочностных свойств металла, которые по сравнению с отожженным состоянием могут достигать трехкратных величин, расширяет их применение в деталях машин и обеспечивает уменьшение веса конструкций. Указанное качество особенно актуально для автомобилестроения и авиации, поскольку способствует снижению расхода топлива и уменьшению выбросов в атмосферу продуктов его сгорания. Наибольший интерес в данном контексте представляют высокопрочные термоупрочняемые сплавы систем Al-Cu (серия 2xxx) и Al-Zn (серия 7xxx). Однако технология получения полос из указанных материалов способом валковой разливки-прокатки до сих пор не разработана, что связано с высоким, более 100 °С, интервалом кристаллизации алюминиевых сплавов этих систем. Подобная проблема характерна также для материалов системы Al-Mg-Si с большим содержанием легирующих элементов, которые по показателям своих механических свойств приближаются к высокопрочным алюминиевым сплавам [2]. Исходя из важности распространения энергосберегающих и экологически чистых технологий, к которым относится и непрерывная валковая разливка-прокатка, на производство новых высокопрочных листовых материалов, разработка режимов обработки металла и анализ их влияния на качество получаемых полос являются актуальной задачей металлургии.

Целью данной работы является экспериментальное определение технологических условий ведения процесса валковой разливки-прокатки, обеспечивающие стабильное формирование полосы из высокопрочных термоупрочняемых сплавов в валковом кристаллизаторе, а также оценка механических свойств и качества поверхности получаемого плоского продукта с учетом возможности дополнительной горячей прокатки и различной термической обработки.

Оборудование, материалы и условия проведения исследований.

В качестве оборудования для проведения исследований использовалась машина валковой разливки-прокатки Института материаловедения Ганноверского университета им. Лейбница, сконструированная и построенная в рамках совместной научной работы с кафедрой обработки металлов давлением Национальной металлургической академии Украины. Предполагается использование данной установки для прямого получения полос из сплавов на основе алюминия, магния, а также высокопрочных сталей с шириной до 200 мм в диапазоне толщин от 1 до 5 мм. Конструктивные особенности разработанного оборудования позволяют интенсифицировать теплоотбор от составного вала к охлаждающей жидкости за счет организации отвода тепла по всей внутренней поверхности бандажа, вести процесс

с высокими пластическими деформациями, а также изменять угол установки клетки в диапазоне от 0° до 90° . Следует отметить, что другие известные лабораторные установки с двухвалковым кристаллизатором подобной комбинацией свойств не обладают. С момента введения машины в эксплуатацию в марте 2010 года на примере технически чистого алюминия осуществлен подбор оптимальных параметров процесса получения полос толщиной от 1 до 5 мм при вертикальном способе подачи расплава, обеспечивающих стабильное формирование длинномерного плоского продукта непосредственно из расплава.

Установка имеет составные бандажированные валки с внутренним водным охлаждением. Внешний диаметр валков составляет 370 мм, длина бочки валка равна 200 мм. Привод клетки осуществляется от двигателя номинальной мощностью 4,4 кВт. Максимальная скорость разливки полосы составляет 8 м/мин. Основной рабочий инструмент установки – бандаж валков – выполнены из штамповой стали X38CrMoV5-3 (1.2367). Более подробно технические характеристики и конструкция лабораторной машины валковой разливки-прокатки описаны в работе [15].

Для проведения исследований был выбран алюминиевый сплав ENAW-7020 системы Al-Zn-Mg, а также сплав ENAW-6082, который имеет в своем составе наибольшее количество легирующих компонентов и обладает самой высокой прочностью из материалов системы Al-Mg-Si. Кроме того, последний сплав дополнительно легируется марганцем, содержание которого может достигать 1 %. Химический состав материалов, использованных в экспериментах, приведен в табл. 1. Результаты спектрального анализа GDOS показывают, что содержание легирующих элементов в материалах соответствует стандарту DINEN 573-3:2007.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сплавов ENAW-6082 и ENAW-7020

Легирующие элементы		Si, %	Fe, %	Cu, %	Mn, %	Mg, %	Cr, %	Zn, %	Другие, %	Al, %
6082	Стандарт	0,7–1,3	макс. 0,5	макс. 0,1	0,4–1,0	0,6–1,2	макс. 0,25	макс. 0,2	–	Остальное
	Анализ	1,12	0,391	0,084	0,51	0,77	0,03	0,068	0,073	96,954
7020	Стандарт	макс. 0,35	макс. 0,4	макс. 0,2	0,05–0,5	1,0–1,4	0,1–0,35	4,0–5,0	–	Остальное
	Анализ	0,113	0,174	0,0405	0,145	1,19	0,107	4,37	0,1605	93,70

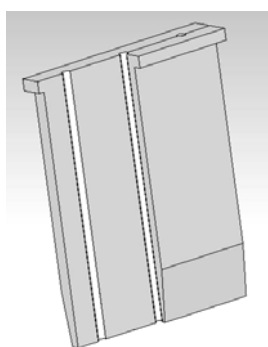


Рис. 2. Составное керамическое сопло с цилиндрическими каналами

Все эксперименты проводились при вертикальной схеме подачи расплавленного металла в межвалковый зазор (см. рис. 1), что соответствует углу наклона клетки к горизонтальной плоскости 0° . Подача материала в межвалковое пространство осуществлялась через составное керамическое сопло с несколькими цилиндрическими каналами, пример исполнения которой приведен на рис. 2. Диаметр и количество проточек варьировались в соответствии со скоростью вращения валков. Для обеспечения прогнозируемого направления выхода полосы при вертикальной схеме разливки и плавного перевода ее на горизонтальную плоскость приемного стола литейное сопло было смещено относительно оси разливки-прокатки в сторону одного из валков. За счет этого затвердевший материал после выхода из зоны кристаллизации-деформации изгибался в сторону валка, на который осуществлялась подача расплава.

Предотвращение налипания обрабатываемого металла на поверхность стальных бандажей, вызываемого высокими температурами алюминия и давлениями от действия деформирующей силы, достигалось путем нанесения на валки перед проведением экспериментов тонкого разделяющего смазочного слоя.

Теплоотбор на внутренней поверхности обеих бандажей осуществлялся за счет циркуляции через валки воды из замкнутого контура охлаждения большой емкости. Температура жидкости в нем составляет ~ 16 °С, а ее расход варьировался в малых пределах от 100 до 112 л/мин, что соответствует условиям теплообмена с максимальной интенсивностью. Охлаждение полосы после выхода ее из валков происходило на воздухе естественным путем.

Из отмеченного выше интервала возможных толщин листа, формируемых непосредственно в двухвалковом кристаллизаторе лабораторной установки, выбор был сделан в пользу среднего диапазона толщин полосы и максимально возможной ширины. Таким образом, толщина плоского продукта на выходе из машины валковой разливки-прокатки составляла около 3 мм, а ее поперечный размер равнялся 200 мм.

Валковая разливка-прокатка и последующая обработка полос из сплава EN AW-6082.

Для подбора оптимальных с точки зрения стабильности процесса получения полос без литейных и поверхностных дефектов – так называемых «горячих» трещин – условий формирования листа толщиной 3 мм из расплава исследуемого сплава было проведено 19 экспериментов, результаты которых подвергнуты анализу и обобщению. Основными варьируемыми параметрами, оказывающими преимущественное влияние на образование полосы при валковой разливке-прокатке, являются температура расплава, скорость разливки и общая высота зоны кристаллизации-деформации, уровень которой в межвалковом пространстве поддерживается постоянным в ходе всего процесса. Значения изменяемых факторов, а также их величины, соответствующие рациональному режиму получения плоского продукта средней толщины из термоупрочняемого алюминиевого сплава ENAW-6082, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Выбор рационального режима получения полос средней толщины из алюминиевого сплава EN AW-6082 в двухвалковом кристаллизаторе

Технологический параметр	Диапазон варьирования	Оптимальное значение
Температура расплава, °С	670–10	700
Скорость разливки, м/мин	2,8–4,0	3,5
Высота зоны кристаллизации-деформации, мм	35–55	45
Исполнение сопла	разн. цилиндр. каналы	3 × Ø6,5 мм
Покрытие поверхности валков	без / графит / нитрид бора	нитрид бора
Расход охлаждающей жидкости, л/мин	100–112	112

Сочетание указанных в крайнем правом столбце табл. 2 параметров валковой разливки-прокатки обеспечивает стабильное формирование полосы по всей ее ширине от начала до конца процесса разливки. При этом не наблюдается как выход незакристаллизовавшегося материала из валков, так и повышенные нагрузки на оборудование. Среднее значение зафиксированной силы деформации при рациональном режиме получения полосы составило около 150 кН. Качество поверхности полосы улучшается от ее переднего конца, содержащего большое число трещин от действия термических напряжений в металле, по мере выхода изначально холодных бандажей на рабочую температуру. После двух оборотов валков, соответствующих длине продукта около 2,4 м, видимые дефекты на поверхности листа отсутствуют. Фотографии, приведенные на рис. 3, дают представление об изменении качества поверхности полосы по ее длине.

Из плоского продукта, полученного валковой разливкой-прокаткой были отобраны образцы для проведения металлографического анализа, а также испытаний на растяжение. Поскольку механические свойства термоупрочняемых алюминиевых сплавов в состоянии поставки без дополнительной обработки «F» не регламентируются, образцы на растяжение были подвергнуты упрочняющей термической обработке по режиму «Т6», которая заключалась в растворяющем отжиге при температуре 540 °С длительностью 20 минут, закалке в воде и дальнейшем искусственном старении при 160 °С продолжительностью 8 часов. После

проведения термообработки образцы были подвергнуты испытаниям на растяжение в соответствии со стандартом EN 10002:90, результаты которых сведены в табл. 3. Каждое из значений в данной таблице приведено усредненным по итогам трех тестов.

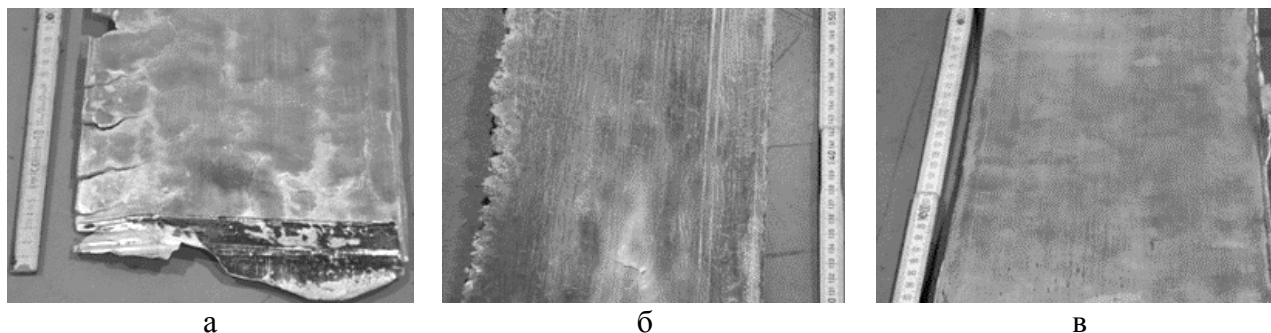


Рис. 3. Поверхность полосы из сплава ENAW-6082, полученной непосредственно из расплава, на ее переднем конце (а), на участке, соответствующем второму обороту валка (б), на заднем конце (в)

Таблица 3

Механические свойства полосы из алюминиевого сплава ENAW-6082 после валковой разливки-прокатки и термической обработки

Показатель механических свойств	В продольном направлении	В поперечном направлении	Требование DIN EN 485-2:2009
Предел текучести, МПа	324	321	> 260
Предел прочности, МПа	348	323	> 310
Относительное удлинение, %	2,5	0,3	> 7

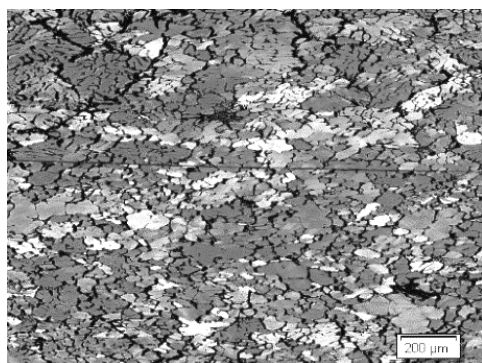


Рис. 4. Микроструктура центральной части литой полосы из сплава ENAW-6082 в направлении разливки-прокатки

Как видно из табл. 3, показатели прочности материала после валковой разливки-прокатки и последующей термической обработки удовлетворяют требованиям стандартов. Однако уровень пластических свойств металла является неприемлемо низким. Фотография микроструктуры поперечного сечения литой полосы приведенная на рис. 4, а также анализ химического состава материала позволяют дать объяснение данному эффекту. Заметно, что зеренная структура листа после валковой разливки-прокатки, по сравнению с микроструктурами технически чистого алюминия [2] или низколегированного сплава 6061 системы Al-Mg-Si [13], рекристаллизована далеко не полностью. На рис. 4 отчетливо просматриваются дендриты, характерные для не- или слабо-

деформированного состояния металла [16]. Подобное поведение материала объясняется содержанием в нем относительно высокого количества марганца, который замедляет процесс рекристаллизации алюминия и способствует формированию в листах, произведенных по традиционной технологии из тонких слябов, благоприятной мелкозернистой структуры [17]. Кроме того, на границах некоторых зерен наблюдаются зоны сегрегации, которые выглядят на фотографии травленого шлифа в виде широких темных участков, и также негативно сказываются на качестве полосы. Очевидно, что требованиям стандартов, предъявляемым к тонким катаным полосам, металл с характерной литой микроструктурой отвечать не сможет. Повысить пластические свойства материала можно за счет дальнейшего дробления дендритной и формирования рекристаллизованной структуры. Для реализации этого было принято решение подвергнуть литую полосу горячей продольной прокатке.

Дополнительная обработка проводилась на лабораторном прокатном стане «дуо» с диаметром валков 140 мм. Из-за ограничения размера по длине бочки валков обе кромки исходной литой полосы были обрезаны на 15 мм. Горячая прокатка листа осуществлялась при температуре 420 °С в четыре прохода по маршруту (мм): 3,0 → 2,1 → 1,65 → 1,35 → 1,0, что соответствует общей логарифмической деформации 1,1 и коэффициенту вытяжки 2,9. Первым визуальным впечатлением от влияния дополнительной операции обработки давлением на качество полосы стало улучшение состояния ее поверхности. Это объясняется использованием при прокатке гладких валков, в то время как при валковой разливке-прокатке для улучшения условий начальной кристаллизации поверхность бандажей выполняется профилированной. Фотографии на рис. 5 дают представление об изменении внешнего вида от исходного литого до готового катанного листа. Также операции горячей прокатки оказывают благоприятное влияние на точность плоского продукта.

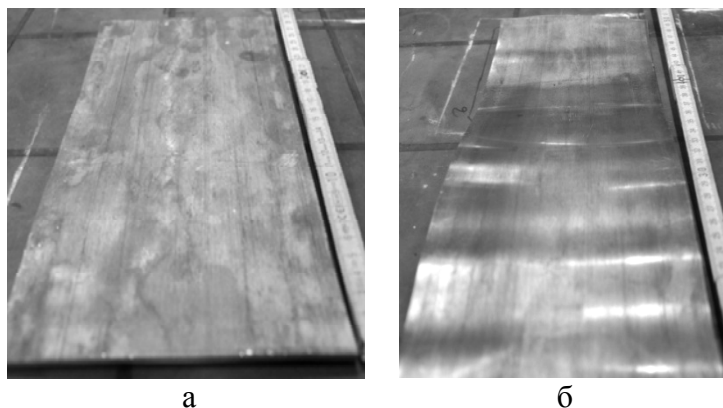


Рис. 5. Поверхность полосы из сплава ENAW-6082 в исходном литом состоянии (а) и после четырех проходов горячей прокатки (б)

и испытаний на растяжение в соответствии со стандартом ISO6892-1:2009, результаты которых в обобщенном виде приведены в табл. 4.

После пластической деформации материал был подвергнут термической обработке, заключающейся в отжиге (состояние «О» по обозначениям EN 515:1993), а также закалке с последующим искусственным старением по режиму «Т6», подробное описание которого было приведено выше. Отжиг проводился при температуре 420 °С в течение одного часа, после чего металл охлаждался вместе с печью до комнатной температуры со скоростью 27 °С/ч. После проведения двух альтернативных термообработок из полос были отобраны образцы для металлографического анализа

Таблица 4

Механические свойства полосы из алюминиевого сплава ENAW-6082 после валковой разливки-прокатки, горячей прокатки и термической обработки

Состояние материала	Показатель механических свойств	В продольном направлении	В поперечном направлении	Требование DIN EN 486
О	Предел текучести, МПа	69	71	< 85
	Предел прочности, МПа	126	131	< 150
	Относительное удлинение, %	29,05	24,23	> 14
Т6	Предел текучести, МПа	264	266	> 260
	Предел прочности, МПа	325	323	> 310
	Относительное удлинение, %	11,67	8,71	> 6

Данные табл. 4 показывают, что дополнительная пластическая деформация при высокой температуре оказывает положительное влияние на пластические свойства полосы из алюминиевого сплава ENAW-6082. Комбинация технологических операций, включающих валковую разливку-прокатку, горячую прокатку и как разупрочняющую, так и упрочняющую термообработку, позволила достичь уровня механических свойств, отвечающих требованиям европейского стандарта. Фотографии конечной микроструктуры металла, приведенные на рис. 6, демонстрируют рекристаллизованную зеренную структуру с большим количеством интерметаллических фаз, выделившихся в результате термической обработки. На шлифах также заметна межзеренная сегрегация, локализованная около поверхности полосы. Кроме того, обращает на себя внимание разноразмерность по высоте листа. Последнее, по видимому, связано с размерами исходного литого зерна, которое в центральной части полос, формируемых в двухвалковом кристаллизаторе, всегда крупнее, чем вблизи зоны контакта

металла с валком [2 и др.]. Более грубая микроструктура материала после термической обработки по режиму «Т6» по сравнению с металлом в разупрочненном состоянии объясняется воздействием высокотемпературного растворяющего отжига, способствующего более интенсивному росту алюминиевого зерна.

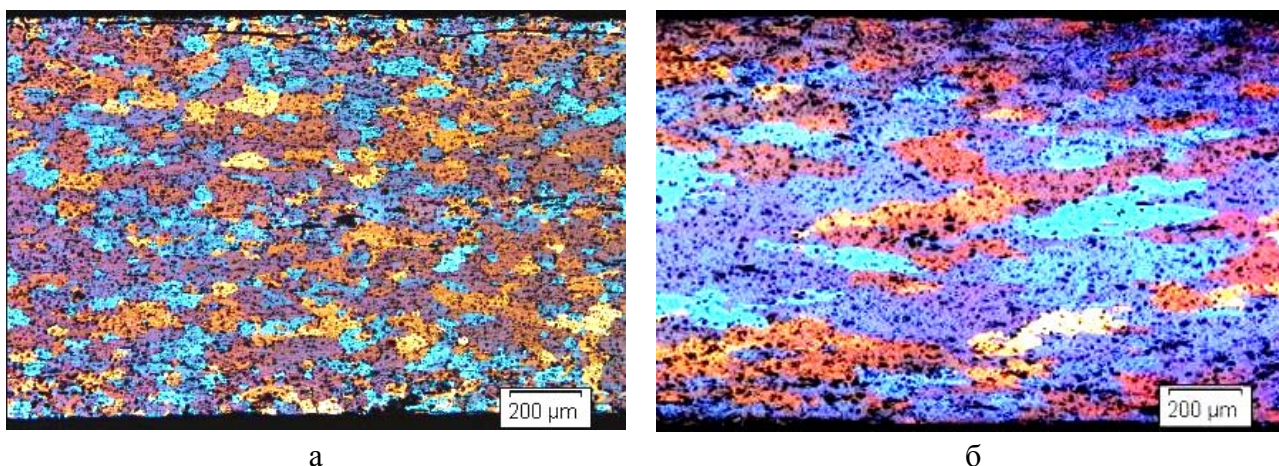


Рис. 6. Микроструктура полосы из сплава ENAW-6082, полученной в результате валковой разливки-прокатки и дополнительной обработки в виде горячей прокатки, а также разупрочняющей (а) и упрочняющей (б) термической обработки



Рис. 7. Стакан, полученный способом глубокой вытяжки из исходно литой полосы сплава ENAW-6082

Для дополнительного подтверждения улучшения пластических свойств тонкой исходно литой полосы вследствие горячей прокатки и термической обработки по режиму «О» из соответствующим образом подготовленного листового материала толщиной 1 мм было вырезано три круглых в плане образца диаметром 75 мм, 85 мм и 95 мм. Затем в условиях института обработки давлением и легких конструкций Технического Университета г. Дортмунд были проведены эксперименты по глубокой вытяжке изделий типа «стакан». Листовая штамповка осуществлялась при комнатной температуре пуансоном диаметром 50 мм. Усилие прижима кольца составляло 1,5 кН. В результате проведенных испытаний ни одна из деталей не разрушилась. Значение максимальной вытяжки 1,9 (см. рис. 7) демонстрирует возможность получения деталей процессом глубокой вытяжки из исходно литой полосы сплава ENAW-6082 после соответствующей последующей дополнительной обработки.

Валковая разливка-прокатка и последующая обработка полос из сплава EN AW-7020.

Для определения оптимального режима получения полосы толщиной 3 мм из данного высокопрочного цинкосодержащего алюминиевого сплава по критериям, аналогичным указанным ранее для ENAW-6082, на установке с двухвалковым кристаллизатором осуществлено 8 разливок. Меньшее количество экспериментов в серии, потребовавшихся для установления оптимальных условий ведения процесса, связано с опытными данными, накопленным при изучении затвердевания сплава системы Al-Mg-Si. Параметры реализации валковой разливки-прокатки, использованные при проведении исследований, сведены в табл. 5. Крайняя правая колонка данной таблицы соответствует условиям стабильного формирования полосы непосредственно из расплава по всей длине бочки валка от начала до конца непрерывного процесса при обеспечении умеренных нагрузок на оборудование. Среднее значение деформирующей силы при реализации процесса в оптимальных условиях зафиксировано на уровне 200 кН.

Таблица 5

Выбор рационального режима получения полос средней толщины из алюминиевого сплава EN AW-7020 в двухвалковом кристаллизаторе

Технологический параметр	Диапазон варьирования	Оптимальное значение
Температура расплава, °С	685–710	695
Скорость разливки, м/мин	3,4–3,9	3,6
Высота зоны кристаллизации-деформации, мм	35–50	40
Исполнение сопла	разн. цилиндр. каналы	3 × Ø6 мм
Покрытие поверхности валков	графит/нитрид бора	нитрид бора
Расход охлаждающей жидкости, л/мин	–	112

Поведение материала при его кристаллизации в межвалковом пространстве в целом отвечает закономерностям, установленным в ходе изучения сплава ENAW-6082. На начальном этапе валковой разливки-прокатки из-за действия высоких термических напряжений на поверхности полосы наблюдается большое количество трещин. Затем, по мере выхода процесса на его термически стационарную стадию, число поверхностных дефектов снижается. После трех оборотов валков, что соответствует длине литой полосы более 3,5 м, качество ее поверхности остается стабильно высоким. Следует отметить, что по сравнению с алюминиевым сплавом, исследованным ранее, материал EN AW-7020 имеет большую склонность к трещинообразованию в двухвалковом кристаллизаторе. Количество трещин и их протяженность выше, часть из них распространяется на всю толщину металла. Для достижения стадии формирования полосы без поверхностных дефектов требуется больший промежуток времени. Авторы связывают наблюдаемый эффект с наличием в алюминиевом сплаве системы Al-Zn-Mg более легкоплавких цинкосодержащих фаз, которые снижают пластичность материала при высоких температурах.

Фотографии микроструктуры полосы, полученной валковой разливкой-прокаткой из сплава EN AW-7020, на двух характерных участках показаны на рис. 8. Шлифы выполнены в направлении разливки-прокатки.

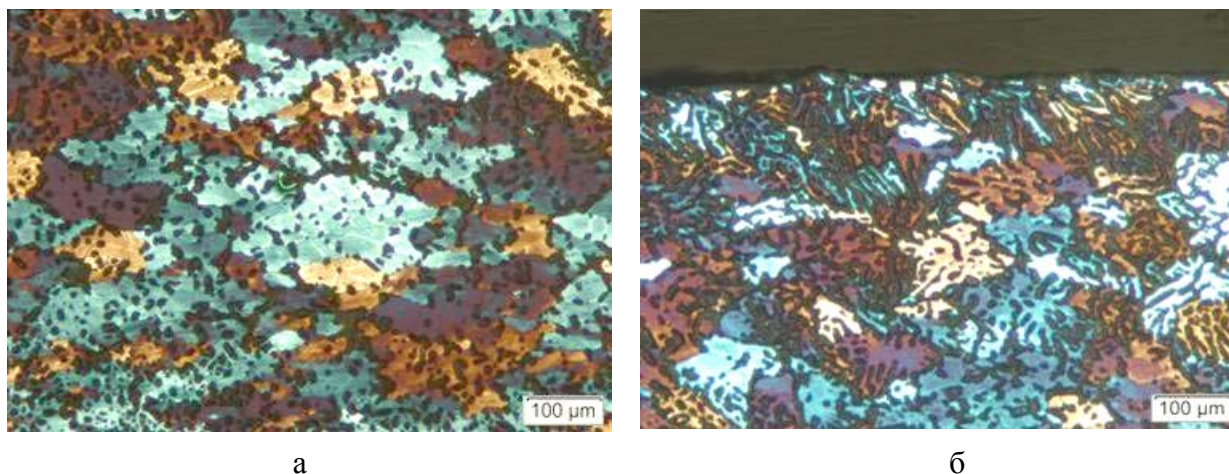


Рис. 8. Микроструктура полосы из сплава ENAW-7020, полученной в результате валковой разливки-прокатки, в ее центральной части (а) и вблизи поверхности (б)

Анализ микроструктуры материала после разливки в двухвалковом кристаллизаторе показывает, что в средней части полосы в результате локализованной пластической деформации и высокой температуры произошла рекристаллизация зеренной структуры. В районе поверхности листа из-за быстрого охлаждения металла от контакта с водоохлаждаемым валком сохранилась характерная литая структура. Также в материале наблюдаются следы сегрегации, уровень которой выше, чем при обработке сплава системы Al-Mg-Si. Последнее объясняется большим суммарным содержанием в ENAW-7020 легирующих элементов.

Для исследования влияния последующей обработки на микроструктуру и механические свойства полос средней толщины, полученных в результате валковой разливки-прокатки, часть из них была подвергнута термической обработке. Кроме того, были проведены эксперименты по горячей прокатке литого плоского продукта. Полученные в результате дополнительной пластической деформации тонкие полосы были также термически обработаны по различным режимам с целью разупрочнения или упрочнения материала.

Горячая продольная прокатка металла осуществлялась на уже упомянутом лабораторном стане «дуо». Температура нагрева материала перед пластической деформацией составила 480 °С. Прокатка проводилась в два прохода по маршруту (мм): 3,0 → 1,55 → 0,9. Как и в случае дополнительной обработки, давлением полос из алюминиевого сплава ENAW-6082, пластическая деформация между вращающимися вальками, суммарное логарифмическое значение которой составило около 1,2, положительно сказалась на качестве поверхности и точности листового материала системы Al-Zn-Mg.

Отжиг металла для достижения состояния максимальной пластичности «О» осуществлялся при температуре 420 °С в течение одного часа. Затем материал остывал вместе с печью до температуры близкой к комнатной с контролируемой скоростью охлаждения 20 °С/ч. Упрочняющая термическая обработка проводилась по режиму «Т6», заключающемуся в нагреве до температуры 480 °С и 20 минутной изотермической выдержке, обеспечивающей растворение интерметаллических фаз $Al_xMg_yZn_z$, закалке в воде до комнатной температуры, а затем в двухступенчатом искусственном старении: 100 °С, 10 часов + 175 °С, 3 часа. Кроме того, одна исходно литая полоса толщиной 3 мм была подвергнута закалке по режиму, аналогичному указанному выше, с последующим естественным старением в течение 12 недель (состояние материала «Т4»).

Затем из различным образом обработанного листового материала были отобраны образцы для проведения металлографических исследований и тестов на растяжение в соответствии со стандартом ISO6892-1:2009. Полученные в результате механических испытаний показатели прочностных и пластических свойств материала приведены в табл. 6.

Анализ данных табл. 6 показывает, что термическая обработка литой полосы из алюминиевого сплава ENAW-7020, полученной валковой разливкой-прокаткой, придает ей высокие пластические свойства. Относительное удлинение образцов в состояниях «О», «Т4» и «Т6» удовлетворяет требованиям европейского стандарта. В этом поведении данного сплава отличается от исследованного ранее ENAW-6082, что объясняется формированием в последнем случае преимущественно рекристаллизованной зеренной структуры металла. При проведении упрочняющей термической обработки по режиму «Т6» не были достигнуты показатели прочностных свойств материала полосы, указанные в стандарте. После закалки и естественного старения (состояние «Т4») предел текучести и предел прочности удовлетворили требованиям DINEN 485-2:2009, но их значения были близки к предельным.

Применение перед термической обработкой дополнительной технологической операции горячей прокатки улучшает как пластические, так и прочностные свойства материала. В ходе пластической деформации при высоких температурах происходит полная рекристаллизация зерен (см. рис. 9). Наблюдается существенная разнородность структуры по толщине полосы с формированием крупных зерен в центральной части листа, а также ориентировка их в направлении прокатки. Кроме того, обращает на себя внимание уменьшение сегрегации в материале по сравнению с литым его состоянием, что объясняется более продолжительной выдержкой материала при высоких температурах во время его нагрева перед операциями обработки давлением. Именно с уменьшением сегрегации за счет диффузии легкоплавких фаз в алюминиевую матрицу авторы связывают эффект повышения прочностных свойств горячедеформированного материала по сравнению с литым в состоянии «Т6». Подобное воздействие на металл возможно оказать также путем проведения длительного гомогенизирующего отжига. Альтернативным и более эффективным с точки зрения экономии энергии способом может служить уменьшение скорости разливки, которое по данным В. Forbord обеспечивает снижение сегрегации в полосе, формируемой в двухвалковом кристаллизаторе, непосредственно на этапе валковой разливки-прокатки [18].

Таблица 6

Механические свойства полосы из алюминиевого сплава ENAW-7020 после валковой разливки-прокатки и дополнительной обработки, включающей опциональную горячую прокатку и термическую обработку

Состояние материала	Показатель механических свойств	В продольном направлении	В поперечном направлении	Требование DIN EN 486
«О»	Предел текучести, МПа	75	71	< 140
	Предел прочности, МПа	158	159	< 220
	Относительное удлинение, %	14,68	13,70	> 13
«Т4»	Предел текучести, МПа	215	213	> 210
	Предел прочности, МПа	326	324	> 320
	Относительное удлинение, %	14,71	13,06	> 12
«Т6»	Предел текучести, МПа	274	266	> 280
	Предел прочности, МПа	325	313	> 350
	Относительное удлинение, %	9,91	8,71	> 8
«О» после прокатки	Предел текучести, МПа	57	57	< 140
	Предел прочности, МПа	165	163	< 220
	Относительное удлинение, %	16,35	13,89	> 12
«Т6» после прокатки	Предел текучести, МПа	296	288	> 280
	Предел прочности, МПа	354	357	> 350
	Относительное удлинение, %	7,80	7,49	> 7

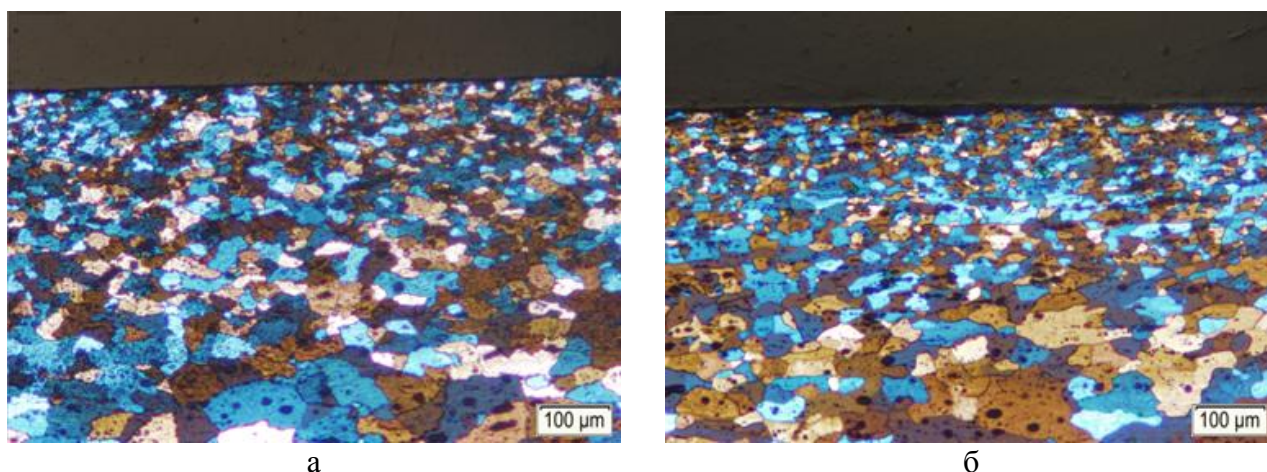


Рис. 9. Микроструктура полосы толщиной 0,9 мм из сплава ENAW-7020 после валковой разливки-прокатки, горячей прокатки и отжига по режиму «О» (а) или упрочняющей термической обработки по режиму «Т6» (б). Шлифы выполнены в направлении прокатки

ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментальных исследований по валковой разливке-прокатке высокопрочных термоупрочняемых алюминиевых сплавов EN AW-6082 и EN AW-7020 определены оптимальные режимы ведения процесса, обеспечивающие стабильное и непрерывное формирование полос средней толщины на полной длине бочки вала с хорошим качеством поверхности. Зафиксированные значения деформирующей силы, действующей в двухвалковом кристаллизаторе, а также анализ микроструктуры материала косвенно указывают на высокую пластическую деформацию металла непосредственно после затвердевания. Впервые экспериментально определено влияние валковой разливки-прокатки и последующей дополнительной обработки, включающей в себя горячую прокатку и/или термическую обработку, на качество поверхности полос, микроструктуру и механические свойства исследуемых сплавов. Установлено, что горячая деформация повышает пластические, а для сплава EN AW-7020 – и прочностные свойства материала. Однако механизмы данного влияния для металлов систем Al-Mg-Si и Al-Zn-Mg различны. Показано, что дополнительная обработка позволяет удовлетворить требования европейских стандартов.

В свете рассмотренных вопросов, актуальной представляется задача дальнейшего изучения влияния режимов валковой разливки-прокатки на межзеренную сегрегацию при обработке сплава EN AW-7020, а также горячей пластической деформации на процесс рекристаллизации исходно литой структуры в EN AW-6082. Помимо этого представляет интерес распространение технологии валковой разливки-прокатки высокопрочных термоупрочняемых алюминиевых сплавов на весь возможный диапазон толщин полос, формируемых в двухвалковом кристаллизаторе, который составляет от 1 до 5 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bessemer H. *Improvement in the manufacture iron and steel* / H. Bessemer // US Patent № 49053, July 25, 1865. – 4 p.
2. Ferry M. *Direct strip casting of metals and alloys* / M. Ferry. – Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006. – 276 p.
3. Степанов А. Н. *Производство листа из расплава* / А. Н. Степанов, Ю. В. Зильберг, А. А. Неуструев. – М.: Металлургия, 1978. – 160 с.
4. Данченко В. Н. *Непрерывная валковая разливка-прокатка стальных полос* / В. Н. Данченко // *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 5. Пластична деформація металів.* – Дніпропетровськ: «Системні технології», 2002. – С. 63–72.
5. Коновалов Ю. В. *Настоящее и будущее литейно-прокатных агрегатов. Литейно-прокатные агрегаты с валковыми кристаллизаторами. Сообщение 4* / В. Н. Данченко // *Производство проката.* – 2010. – № 1. – С. 21–38.
6. *New technology for the production of magnesium strips and sheets* / R. Kawalla, M. Oswald, C. Schmidt, M. Ullmann, H.-P. N. Vogt, D. Cuong // *Metalurgija.* – 2008. – Vol. 47 (Nr. 3). – P. 195-198.
7. Basson Fr., Letzig D. *Aluminium twin roll casting transfers benefits to magnesium* // *Aluminium International Today.* – 2010. – December (12). – P. 19–21.
8. Slamova M. *New horizons for twin-roll casting* / M. Slamova, O. Voda // *Aluminium International Today.* – 2001. – June (6). – P. 85–88.
9. *Strip Casting Technology... A Key to Product Quality* / P.-Y. Menet, F. Basson, K. Maiwald, R. Cayol // *Proc. of Melt Quality Workshop.* – Madrid, 2001. – P. 25–29.
10. *Defect formation in twin roll-cast AA 3xxx and 5xxx series aluminium alloys* / Ch. Gras, M. Meredith, K. Gatenby, J. D. Hunt // *Materials Science Forum,* 2002. – Vols. 396–402. – P. 89–94.
11. Haga T. *Strip casting of A5182 alloy using a melt drag twin-roll caster* / T. Haga, T. Nishiyama, S. Suzuki // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2003. – Vol. 133. – P. 103–107.
12. *High temperature deformation of a twin-roll cast AlMg3 alloy* / P. Malek, K. Turba, M. Slamova, I. Drbohlav // *Materials Characterization.* – 2008. – Vol. 59. – P. 1046–1050.
13. *High speed twin roll casting of 6061 alloy strips* / T. Haga, H. Sakaguchi, H. Watari, S. Kumai // *Archives of Materials Science and Engineering.* – 2008. – Vol. 31. – P. 49–52.
14. *Aluminium alloy strip casting using an unequal diameter twin roll caster* / T. Haga, M. Ikawa, H. Wtari, S. Kumai // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2006. – Vol. 172. – P. 271–276.
15. *Экспериментальная установка валковой разливки-прокатки тонких полос* / А. Ю. Гридин, И. К. Озинский, В. Н. Данченко, Фр.-В. Бах // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2010. – № 5. – С. 46–51.
16. Altenpohl D. *Aluminium von innen* / D. Altenpohl. – Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1994. – 434 s.
17. Колачев Б. А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов* / Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов. – М.: МИСус, 1999. – 416 с.
18. *The formation of surface segregates during twin roll casting of aluminium alloys* / B. Forbord, B. Andersson, F. Ingvaldsen, O. Austevik, J. A. Horst, I. Skauvik // *Materials Science and Engineering A,* 2006. – Vol. 415. – P. 12–20.

Гридин А. Ю. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ, науч. сотрудник Ганноверского университета им. Лейбница;

Шапер М. – д-р инж. наук, проф., гл. инженер Ганноверского университета им. Лейбница;

Данченко В. Н. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

Ганноверский университет им. Лейбница, г. Ганновер, Германия.

E-mail: grydin@iw.uni-hannover.de; schaper@iw.uni-hannover