УДК 621.746.58.001.57

УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ

Р.КАВАЛЛА, *профессор, директор, Rudolf.Kawalla@imf.tu-freiberg.de*
Фрайбергская горная академия, Институт литейных технологий, Германия
В.Ю.БАЖИН, *д-р техн. наук, профессор, bazhin-alfoil@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

В статье обсуждается проблема получения высококачественных литых заготовок из магниевых сплавов, полученных на агрегатах бесслитковой прокатки. Производство листов из магниевых сплавов совмещением процессов литья и прокатки при непрерывной подаче жидкого расплава к вращающимся валкам является перспективным и более экономичным способом. Рассмотрены особенности кристаллизации магниевых сплавов AZ31 и AZ61 в зазоре валков-кристаллизаторов в зависимости от условий теплообмена при изменении технологических параметров. За счет воздействия на расплав в литниковой системе удается обеспечить формирование равноосной мелкозернистой структуры листового проката без поверхностных дефектов. Разработка технологии производства листов из магниевых сплавов создает возможность использования их в автомобильной отрасли в качестве облегченных деталей кузовов вместо узлов, выполненных из стали.

Ключевые слова: магний, расплав, бесслитковая прокатка, гомогенезация, структура, листовая заготовка, механические свойства.

Магний и его сплавы имеют аналогичные прочностные характеристики со свойствами алюминия, и они могут эффективно заменять его в качестве листовых материалов в виде облегченных конструкций. В частности, необходимым условием для широкого применения магния в качестве облегченных конструкций в автомобильной и машиностроительной отраслях является сочетание пластических и прочностных характеристик, обеспечивающих высокий уровень деформации при прокатке. В настоящее время магниевые листы имеются на рынке лишь в незначительных объемах, а их цена превосходит стальные листы. Это объясняется большими затратами, связанными с технологией горячей прокатки слитков из деформируемых магниевых сплавов.

Альтернативный способ получения листов – бесслитковая прокатка [3]. Технология совмещенного литья и прокатки достаточного полно освоена в алюминиевой промышленности для получения фольги и тонких листов [4]. В России на фольгопрокатных заводах успешно работают установки совмещенного литья и прокатки итальянской фирмы «Fata Hunter».

Совмещенный способ получения листовой заготовки из жидкого металла является одним из новых направлений в развитии производства прокатных изделий. Производство листовой заготовки на агрегатах бесслитковой прокатки (БП) имеет ряд экономических и технических преимуществ, а оборудование может быть расположено компактно на металлургических предприятиях. Этот способ позволяет организовать непрерывный автоматизированный процесс, при котором возможно получение горячекатаной структуры полосы при значительно меньшей суммарной деформации, чем при прокатке слитков. Совмещенный процесс можно представить как получение полосы из расплава, деформированной непосредственно в контактной зоне валков-кристаллизаторов с 50-60 %-ным обжатием. Только при определенной степени деформации полученная заготовка может иметь структуру с высокими механическими характеристиками для производства изделий.

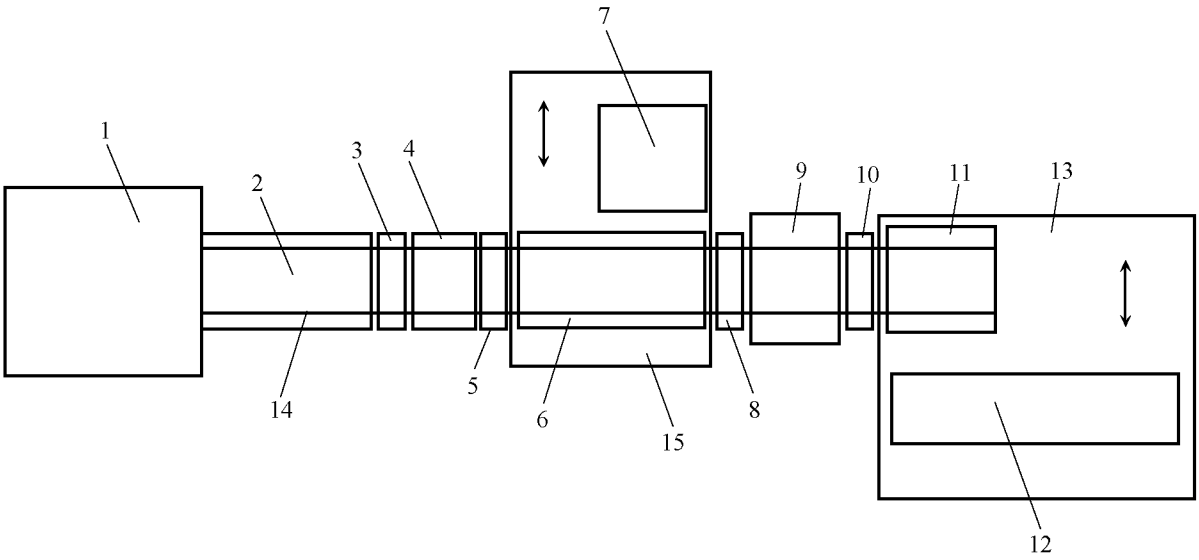


Рис.1. Линия бесслитковой прокатки магниевых лент и полос [2]

1 – плавильная печь; 2 – кристаллизатор; 3 – литниковая система; 4 – ножницы; 5 – обрезка кромок и транспортер; 6 – гомогенизация; 7 – моталка; 8, 10 – направляющее устройство; 9 – реверсивная прокатная клеть; 11 – задающее устройство; 12 – рольганг; 13 – платформа; 14 – транспортирование; 15 – станина прокатной клети

Лист заданного размера получали на опытно-промышленном агрегате (Фрайбергская горная академия, Институт литейных технологий) непрерывной разливкой и прокаткой магниевого сплава за несколько проходов через последовательно соединенные клети с получением горячекатаной ленты толщиной не более 50 мм [5]. Прокатку проводили при начальной температуре не менее 250 °С и не более 500 °С до конечной толщины ленты не более 4 мм, при этом на первом проходе при горячей прокатке обжатие составляло 15-17 % (рис.1).

Для получения листового материала использовали типичные магниевые сплавы марки AZ31 и AZ61 (табл.1) Al–Cu–Mg. Как правило, в такие сплавы предпочтительно добавлять [7] в качестве легирующих добавок до 10 % алюминия и лития, до 2 % цинка и марганца. Для формирования мелкозернистой структуры проводят модифицирование цирконием или церием до 1 % [1].

Таблица 1

Типичные деформируемые магниевые сплавы

Марка сплава	Химический состав, % по массе							
	Al	Mn	Zn	Si	Cu	Ni	Fe	Остальное Mg
AZ31	2,5	0,35	0,85	0,02	0,002	0,018	0,003	> 95
AZ61	5,91	0,22	0,84	0,022	0,005	0,001	0,002	> 92

Во время литья подвижные валковые кристаллизаторы в активной зоне агрегата проходят четыре последовательных этапа процесса: 1) охлаждение и кристаллизация расплава; 2) непрерывное литье; 3) деформация и рекристаллизация; 4) непрерывная прокатка. Нельзя обобщать эти понятия, поскольку непрерывное литье в совмещенном процессе является лишь частью процесса литья и прокатки. Для данного способа получения полосы характерны особенности горячей прокатки: опережение, скольжение, нагартовка, рекристаллизация деформируемой структуры.

Сущность процессов, происходящих в активной зоне затвердевания, состоит в том, что расплав подается в зазор вращающихся валков-кристаллизаторов и, растекаясь вдоль бочки валков, заполняет часть пространства в виде лунки клиновидной формы [3]. На рис.2 представлена схема активной зоны агрегата БП.

Глубина лунки, имеющая клиновидную форму, определяется в основном технологическими параметрами литья, силами поверхностного натяжения, расходом жидкого металла и геометрическими размерами валков-кристаллизаторов.

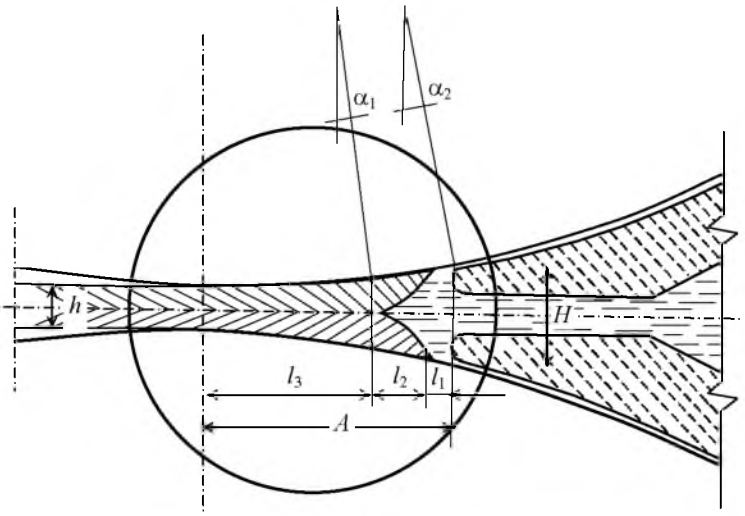


Рис.2. Активная зона литья и прокатки

Во время отливки опытно-промышленных партий изменяли параметры литья (скорость, температуру, давление металла на валки). Для металлографического и химического анализов отливаемой полосы отбирали образцы металла из активной зоны. Для выполнения этой операции производили плановую остановку агрегата БП. Структурное исследование образцов магниевых лент методами растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа на растровом электронном микроскопе JSM-6460 LV (JEOL, Япония) с аналитической приставкой INCA (Оксфорд, Великобритания) осуществлялось в ЦКП Горного университета.

Благодаря контакту с поверхностью кристаллизаторов жидкий металл в лунке интенсивно охлаждается и кристаллизуется с образованием равноосных зерен (рис.3, *б*), но на поверхности валков-кристаллизаторов намораживаются слои металла с неравномерной структурой зерен (рис.3 *а*, *в*), которые постепенно увеличиваются при движении вдоль контакта с ними, где деформируются. Следует отметить, что важным фактором является продолжительность контакта расплава с валком, которая зависит от окружной скорости вращения валков-кристаллизаторов и глубины лунки расплава. Таким образом, управлять структурой можно за счет изменения скорости литья и при регулировании температур расплава и охлаждающей жидкости в кристаллизаторах. В конечном итоге во время гомогенизирующего обжига перед окончательной прокаткой полосы происходит выравнивание кристаллов по всей толщине заготовки.

Листовая заготовка благодаря своей незначительной толщине быстро охлаждается и в результате этого приобретает улучшенную, мелкозернистую и малопористую структуру. Микро- и макроликвации сведены в таком состоянии к минимуму [5]. В первичных

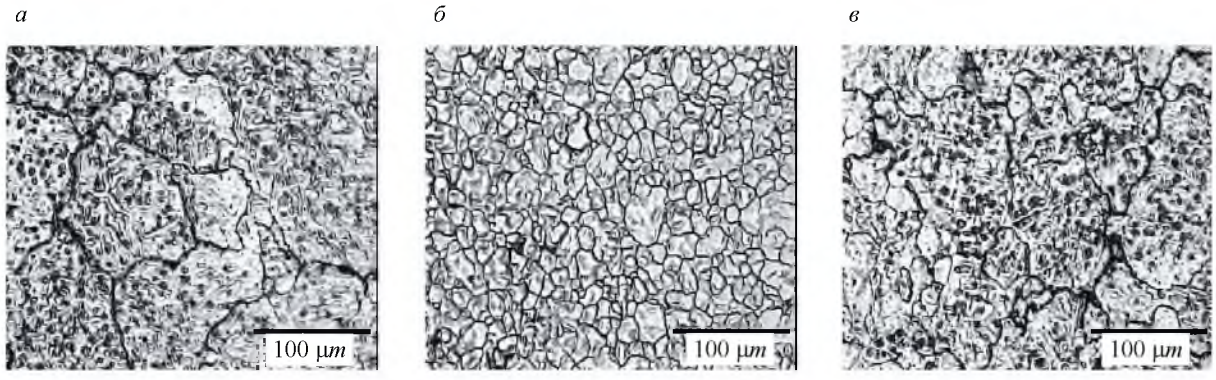


Рис.3. Микроструктура магниевой полосы: *а* – верхняя поверхность; *б* – по центральной оси; *в* – от нижнего валка

Таблица 2

Механические характеристики листовых заготовок из магниевых сплавов

Марка сплава (технология)	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ, %
AZ31 (слиток)	225	145	17
AZ31 (БП)	250	155	25
AZ71 (слиток)	220	145	12
AZ71 (БП)	270	165	20

кристаллах также при формировании полос обязательно присутствующие выделения имеют тонкую, равномерно распределенную форму, что дополнительно способствует получению мелкодисперсной микроструктуры. По мере роста кристаллов от периферии к центру активной зоны наблюдается значительный температурный градиент на внутренней границе области затвердевания между закристаллизовавшимся слоем и расплавом, поэтому ширина области кристаллизации небольшая. Таким образом возникает зона столбчатых кристаллов.

В дальнейшем с увеличением толщины образовавшейся корочки температурный градиент уменьшается и область кристаллизации расширяется, создавая возможность роста новых кристаллов в любых направлениях. При этом скорость роста столбчатых кристаллов на этом этапе уменьшается. Так возникает зона мелких кристаллов, и рост столбчатых кристаллов прекращается. Момент остановки роста столбчатых кристаллов происходит при минимальном температурном градиенте на внутренней границе области затвердевания, при котором количество столбчатых частиц уменьшается из-за их беспорядочного теплового движения, а размеры кристаллов, растущих перед фронтом кристаллизации, становятся сравнимыми с поперечными размерами столбчатых кристаллов. Такая структура способствует увеличению степени обжатия в прокатной клети в процессе последующей горячей прокатки и облегчает оптимальное для последующего деформирования разупрочнение. Благодаря уже присутствующей в отлитом состоянии и улучшаемой в последующем процессе прокатки структуре получают в итоге магниевый лист, технологические свойства которого значительно лучше по сравнению с традиционно производимыми листами из слитков. В табл.2 представлены механические характеристики листовых заготовок, полученных из слитка и при совмещенном способе литья и прокатки.

В зависимости от свойств подвергаемого обработке сплава и применяемого оборудования также может быть целесообразно перед горячей прокаткой для выравнивания температуры в полосовой заготовке ее довести до температуры начала горячей прокатки. При таком выравнивании температур достигается равномерное распределение температуры в полосовой заготовке и дополнительная гомогенизация структуры. Окисление поверхности ленты и образование нежелательных оксидов внутри структуры может быть надежно исключено в результате разливки сплава в организованном соответствующим образом рекристаллизаторе в атмосфере защитного газа [6]. Подогрев между отдельными проходами прокатки не требуется благодаря теплу, образующемуся в процессе деформирования.

Химический анализ проб металла на различных участках полосы в активной зоне показал, что первые порции расплава, переходящие в твердое состояние, содержат минимальное количество интерметаллидных фаз Mg_3Al, Mg(Al,Si), Mg(Cu,Mn). По мере дальнейшей кристаллизации остающаяся жидкая фаза расплава обогащается интерметаллидами (особенно Mg_3Al), при этом возникают неоднородные по химическому составу участки. В затвердевшей заготовке происходит неравномерное распределение интерметаллидных фаз по всему объему. Причиной ликвационной неоднородности является избирательность процесса кристаллизации, т.е. неодновременное образование кристаллов. Частично в зоне рекристаллизации при выходе полосы из валков вследствие диффузии может происходить некоторое уменьшение неоднородности и на последующих операциях обжига и холодной прокатки удается частично снизить количество очагов неравномерной структуры.

Выводы

Изложенные представления о механизме формирования зон структуры отливаемой магниевой полосы на агрегате БП подтверждаются анализом проведенных исследований. Характерным является сравнение протяженности столбчатых кристаллов на темплетах, вырезанных из заготовки БП при различных значениях градиента температур. Формирование структуры полосы начинается в условиях колебания температуры поверхности валков, и при этом сохраняется достаточно большой температурный градиент, поэтому управление технологическими параметрами в конечном итоге определяет и задает свойства будущего изделия.

На основе анализа результатов металлографических исследований механизм формирования кристаллического строения полосы из жидкого металла можно представить следующим образом. Расплав, поступая в межвалковое пространство (зазор), с некоторым перегревом находится в нем с заданным значением длины активной зоны. Вследствие большой скорости охлаждения слой металла у поверхности валка быстро переохлаждается, и в нем зарождаются многочисленные центры кристаллизации на непотерявших активность примесях, всегда присутствующих в магниевых сплавах.

Испытания подтверждают высокий уровень механических свойств магниевых листов, полученных совмещенным литьем и прокаткой по сравнению с традиционной технологией горячей прокатки слитков.

Проведенные исследования, проведенные в лабораториях Фрайбергской академии и Горного университета, являются предпосылкой развития новых технологий производства листового проката из магниевых сплавов и раскрывают широкие возможности для замены стальных изделий на облегченные узлы и детали, в частности для автомобильной и машиностроительной отраслей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Альтман М.Б.* Магниевые сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1978. Т.2. 346 с.
2. Патент РФ № 2252088. Способ получения горячекатаной магниевой ленты / Х.Пирхер, Р.Кавалла. Опубл. 20.05.2005. Бюл. № 14.
3. Специальные способы литья: Справочник / Под ред. В.А.Ефимова. М.: Машиностроение, 1991. 733 с.
4. *Шур И.А.* Перспективы развития бесслитковой прокатки алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. 2001. № 5-6. С.38-41.
5. *Kawalla R.* Properties of Magnesium Strips produced by Twin-Roll-Casting and Hot Rolling / R.Kawalla, M.Ullmann, C.Schmidt, J.Dembińska // Materials Science Forum. 2011. Vol.690. P.21-24.
6. *Ullmann M.* Application of Magnesium Sheets and Strips in Vehicle Construction Freiberger Forschungshefte / M.Ullmann, F.Berge, K.Neh, R.Kawalla, H.Vogt. 2014. Vol.358. P.128-135.
7. *Watari H.* Twin roll casting of magnesium alloys with high aluminum contents / H.Watari, T.Haga, Y.Shibue, K.Davey, N.Koga. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. September–October 2006. Vol.18. Iss.1-2. P.419-422.

REFERENCES

1. *Al'tman M.B.* Magnievye splavy (*Magnesium alloys*): Spravochnik. Moscow: Metallurgiya, 1978. Vol.2, p.346.
2. *Pirkher Kh., Kavalla R.* Patent RF № 2252088. Sposob polucheniya goryachekatanoi magnievoi lenty (*Way of receiving a hot-rolled magnesian tape*). Publ. 20.05.2005. Bul. N 14.
3. Spetsial'nye sposoby lit'ya: Spravochnik (*Special methods of metal forming*). Ed. V.A.Efimova. Moscow: Mashinostroenie, 1991, p.733.
4. *Shur I.A.* Perspektivy razvitiya besslitkovoi prokatki alyuminievykh splavov (*Prospects of development of besslitkovy rolling of aluminum alloys*). Tekhnologiya legkikh splavov. 2001. N 5-6, p.38-41.
5. *Kawalla R., Ullmann M., Schmidt C., Dembińska J.* Properties of Magnesium Strips produced by Twin-Roll-Casting and Hot Rolling. Materials Science Forum. 2011. Vol.690, p.21-24.
6. *Ullmann M., Berge F., Neh K., Kawalla R., Vogt H.* Application of Magnesium Sheets and Strips in Vehicle Construction Freiberger Forschungshefte. 2014. Vol.358, p.128-135.
7. *Watari H., Haga T., Shibue Y., Davey K., Koga N.* Twin roll casting of magnesium alloys with high aluminum contents. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. September–October 2006. Vol.18. Iss.1-2, p.419-422.

FORMIING OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF SHEET STRIPS FROM MAGNESIUM ALLOYS IN THE CONDITIONS OF TWIN ROLL CASTING PROCESS

R.KAWALLA, *Direktor, Professor, Rudolf Kawalla@imf tu-freiberg.de*
TU Bergakademie Freiberg Institute of Metal Forming, Freiberg, Germany
V.Yu.BAZHIN, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, bazhin-alfoil@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

In this article the problem of receiving high-quality cast strips from the magnesium alloys received by units of twin roll casting process in the combined methods is discussed. Production of sheets from magnesium alloys combination of casting and rolling at continuous giving of liquid melt to the rotating rolls is perspective and more economic method. Features of crystallization of magnesium alloys of AZ31 and AZ61 in a gap of rolls crystallizers depending on heat exchange conditions at change of technological parameters are considered. Due to impact on melt in forming system it is possible to provide formation of equal fine-grained structure of sheet hire without superficial defects. Development of the production technology of sheets from magnesium alloys creates possibility of their use of automobile branch as the facilitated details of bodies instead of the knots made of steel.

Key words: magnesium, melt, twin roll casting process, homogenization, structure, sheet strips, mechanical properties.