



УДК 621.746.58.001.57

ИЗОТРОПНОСТЬ СВОЙСТВ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Р.КАВАЛЛА¹, В.Ю.БАЖИН²

¹ Фрайбергская горная академия, Институт литейных технологий, Фрайберг, Германия

² Санкт-Петербургский горный университет, 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. В процессе получения изделий на штамповочных агрегатах наблюдаются значительные потери металла из-за образования фестонов, которые обусловлены анизотропией свойств фольговой заготовки, определяемой от макро- и микроструктуры, режимов проката и отжига. Основными причинами анизотропии механических свойств полосы, полученной методом совмещенного литья и прокатки, являются характер распределения интерметаллических соединений в полосе, ориентировка фаз дефектов металла и остаточные напряжения. Одной из задач повышения выхода годного продукта на операциях штамповки является уменьшение количества дефектов. Для снижения анизотропии механических свойств предлагаются различные способы воздействия на расплав во время литья. Разработка технологии производства листов из магниевых сплавов создает возможность их использования в автомобильной отрасли в качестве облегченных деталей кузовов вместо узлов, выполненных из стали.

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

Как цитировать эту статью: Кавалла Р. Изотропность свойств листовых заготовок из магниевых сплавов / Р.Кавалла, В.Ю.Бажин // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 828-832. DOI 10.18454/PMI.2016.6.828

Одной из проблем литья плоских заготовок для производства фольговых изделий является ликвация основных легирующих компонентов, которая приводит к анизотропии механических свойств [4]. Прокатные материалы из магниевых сплавов AZ31 и AZ61 в отожженном состоянии широко используются для производства листов под штамповку. В процессе получения изделий на штамповочных агрегатах имеют место значительные потери металла из-за образования фестонов (локального вспучивания), которые обусловлены анизотропией свойств фольговой заготовки, определяемой от макро- и микроструктуры, режимов проката и отжига [9]. Основными причинами анизотропии механических свойств полосы, полученной методом совмещенного литья и прокатки, являются характер распределения интерметаллических соединений в полосе, ориентировка фаз дефектов металла и остаточные напряжения. Одной из задач повышения выхода годного продукта на операциях штамповки является уменьшение фестонообразований. Для обеспечения требуемого качества конечного продукта необходимо получить равномерность свойств по ширине и длине отливаемой полосы на литейно-прокатных агрегатах.

Сплавы из магния AZ31 и AZ61 имеют аналогичные прочностные характеристики со свойствами алюминия, и они могут эффективно заменять его в качестве листовых материалов в виде облегченных конструкций [5]. 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 представлены 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.

Основной причиной неудовлетворительного использования фольговых заготовок, полученных непрерывным способом на литейно-прокатных агрегатах, является низкое качество поверхности, наличие литейных дефектов и высокая анизотропия механических свойств [5, 7]. Зеренная структура зарождается в «квазиравновесной двухфазной зоне» и растет при свободном выделении скрытой теплоты в окружающий расплав. Такие равноосные зерна продолжают расти до момента контакта с фронтом кристаллизации, и сразу после этого отводимое тепло передается через твердый металл к охлаждаемым водой валкам. Скорость выделения тепла затем существенно повышается, а рост кристаллической решетки происходит однонаправленно перпендикулярно фронту кристаллизации. Таким образом, формируется двойная структура отливки, состоящая из крупнозернистых дендритных областей, соединенных с граничными зонами ячеек решетки.

В настоящее время наблюдается тенденция применения высоколегированных алюминиевых сплавов для производства фольговых изделий и увеличения в них содержания основных легирующих компонентов (Al, Si, Mn, Zn), которое приводит к неоднородности химического состава по всей длине заготовки. Рентгенофазовый анализ полученных образцов показал наличие различных интер-

металлических фаз в системе Mg – Al – Zn, таких как $((\text{Al}, \text{Zn})_{49}\text{Mg}_{32})$, $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ и системе Al – Mn, таких как Al_8Mn_5 , $\text{Al}_{11}\text{Mn}_4$, Al_8Mn_5 , $\text{Al}_9\text{Mn}_{11}$ phases [1, 11, 12]. Для решения проблемы необходимо максимально снизить ликвацию в активной зоне (зоне окончательного затвердевания полосы в зазоре валков-кристаллизаторов), увеличить протяженность зоны равноосных кристаллов и уменьшить размеры дендритной ячейки [2, 3]. Снижение ликвации алюминия, марганца и кремния при получении полосы на агрегатах бесслитковой прокатки достигается за счет выбора рациональных температурно-скоростных режимов непрерывного литья, использования электромагнитного перемешивания металла в литниковой распределительной насадке, а также за счет вторичного охлаждения полосы после ее выхода из зазора валков-кристаллизаторов. Возрастающие требования к листовому прокату из магниевых сплавов, а также увеличение производительности оборудования вызывают необходимость дальнейшего совершенствования технологии литья в валковых кристаллизаторах.

Анизотропию механических свойств листового материала можно определить при помощи коэффициентов поперечной деформации образцов, вырезанных под углами 0° , 45° , 90° к направлению прокатки μ_{21} , μ_1 и μ_{12} [1, 6]. Величина этих коэффициентов и их стабильность позволяют использовать профилированную заготовку для глубокой вытяжки, форма которой выбрана с учетом анизотропии и соответствует требованиям рационального раскроя полосы. Проведенный микроэлектронный анализ различных листов из магниевых сплавов выявил влияние каждого элемента (Al, Zn, Mn) на структуру (рис.1).

Распределение элементов до и после отжига листовой заготовки из магниевых сплавов определяли при помощи рентгеноструктурного анализа. Видно (рис.2), что марганец равномерно распределяется по всему объему и толщине магниевой матрицы, при этом проявляется неоднородность для цинка после промежуточного обжига.

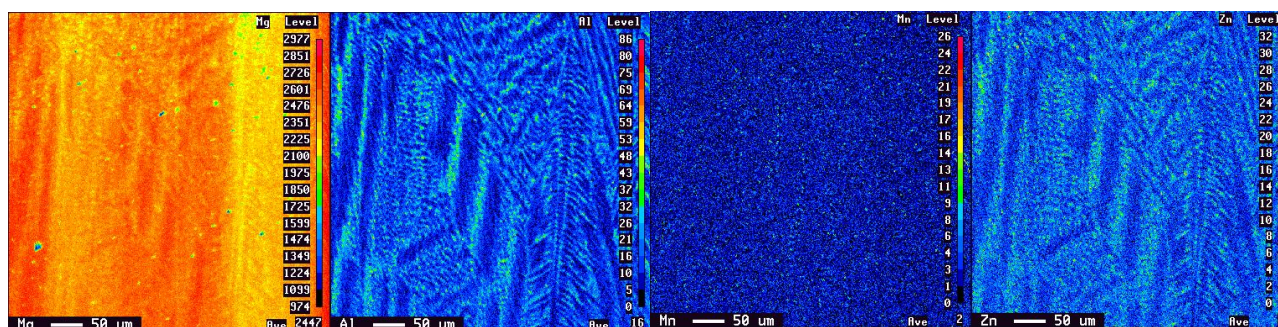


Рис.1. Влияние распределения Mg, Al, Zn, Mn в литой полосе (светлые места показывают высокое значение концентрации элементов) [8]

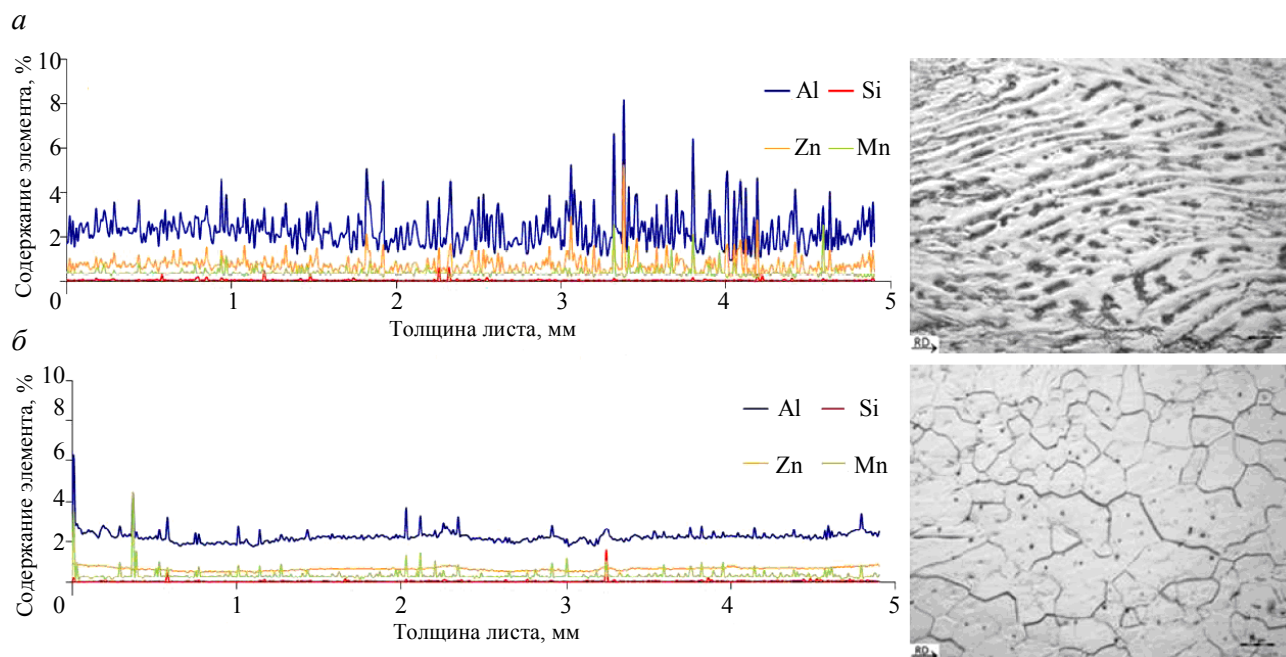


Рис.2. Результаты микроэлектронного анализа распределения элементов по толщине полосы до (а) и после (б) термообработки [14]



Для исследования влияния совокупности перечисленных факторов производства на формирование механических характеристик и анизотропии, а также для получения стабильности свойств листовой заготовки была выполнена работа по изучению свойств заготовки при различных технологических режимах магния AZ31 и AZ61 (см.таблицу). В качестве сравнения рассматривали характеристики листовых заготовок полученных до и после отжига. При рациональном режиме отжига резко улучшаются механические характеристики и снижается анизотропия свойств.

Значение механических свойств и показателей анизотропии для магниевых сплавов до и после отжига

Марка сплава	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	μ_{21} , $\alpha = 0^\circ$	μ_1 , $\alpha = 45^\circ$	μ_{12} , $\alpha = 90^\circ$
AZ31 (до отжига)	62	92	14	0,455	0,326	0,485
AZ31 (после отжига)	82	112	19	0,411	0,306	0,413
AZ61 (до отжига)	74	108	15	0,394	0,393	0,387
AZ61 (после отжига)	94	128	18	0,364	0,323	0,337

Во время литья и прокатки при внедрении комплексной системы рафинирования расплава на всех стадиях производства удалось снизить образование фестонов в направлении более низкого сопротивления деформации.

В ходе проведенного исследования определены зависимости образования фестонов от химического состава, наличия примесей и технологических параметров процесса. Установлено, что расположение фестонов относительно направления прокатки после отжига зависит от степени предварительного обжата. Так, при значениях активной зоны 30-40 мм, при которых обеспечивается 40 %-ная деформация полосы во время совмещенного процесса, наблюдалось наименьшее образование фестонов во время штамповки. При применении комплексного воздействия на расплав на всех этапах подготовки к литью (МГД-перемешивание, вибрационная обработка) за счет снижения зональной ликвации удалось добиться равномерного распределения интерметаллических включений по всем плоскостям заготовки, особенно по краям заготовки. Распределение показателей анизотропии μ_{ij} при разных углах (в градусах) находится в прямой зависимости от количества и распределения включений в заготовке [15, 16].

Основными факторами, определяющими образования фестонистости во время операции глубокой штамповки при анализе бракованной продукции в зоне образования дефектов, являются газовые включения и скопления иглообразных интерметаллических фаз $Al_{11}Mn_4$ и Al_8Mn_5 . В микроструктуре заготовок всех полученных образцов при различном содержании магния после окончательного обжига обнаружены перекристаллизованные зерна. Одновременно с изменениями, связанными с содержанием марганца, наблюдаются изменения в форме и размере зерен микроструктуры, связанных с изменением технологии производства. При микроскопическом анализе наблюдается, что наиболее маленькие зерна структуры формируются при более высоком содержании марганца. Однако при увеличении содержания кремния и марганца вместе наблюдается вытягивание зерен в направлении прокатки.

Анализ результатов показывает, что максимальные значения анизотропии свойств наблюдаются по краям листовой заготовки как до, так и после отжига. Особенно это проявляется при увеличении содержания марганца и соответствующем уменьшении соотношения Mn/Si до 2,0. Электромагнитное перемешивание не позволяет кардинально улучшить макроструктуру фольговой заготовки из-за низкого КПД индуктора, что может быть связано с большими потерями энергии в затвердевшей корочке полосы [17, 18]. Весьма затруднена установка и позиционирование индуктора около зазора валков-кристаллизаторов при изменении скорости литья, а также организация охлаждения поверхности заготовки на литейно-прокатных агрегатах с подводом расплава сбоку. В связи с этим возникает потребность в применении других методов воздействия на кристаллизующуюся заготовку.

В рамках концепции модернизации оборудования бесслитковой прокатки требуется выбрать оптимальную конструкцию агрегата и систему обжата, при этом необходимо выбрать глубину лунки и длину зоны деформации, а также изменить за счет применения бандажей из медного сплава условия кристаллизации заготовки. Величина активной зоны зависит от энергосиловых параметров деформации и диаметра валков-кристаллизаторов. Физические явления, происходящие при



формировании заготовки совместно с деформацией твердой корочки и твердожидкой фазы, весьма сложные, и неправильно выбранные параметры процесса приводят к недостаточной эффективности процесса, образованию дефектов макроструктуры, появлению внутренних трещин.

Расчеты кристаллизации магниевой полосы на агрегате бесслитковой прокатки по модели квазиравновесной кристаллизации расплава проведены с учетом граничных условий теплообмена, создаваемых в зазоре валков-кристаллизаторов усовершенствованной системы охлаждения (холодильников). Рассчитаны распределение температур по сечению и ширине полосы, а также соотношение жидкой и твердой фаз и протяженность активной зоны. На основании результатов анализа опытных данных приняли, что доля твердой фазы в твердожидкой зоне не превышает 25 %, а заканчивается в районе содержания 70 % твердой фазы. Расчетное распределение температур магниевой полосы может быть использовано для определения усадки заготовки или расчета напряжений и деформации при обжатии.

Алгоритм расчета обжатия в зазоре валков-кристаллизаторов позволяет учесть возможность деформирования сплава с изменением его объема. При заданной величине обжатия, скорости литья и температурном поле рассчитываются полосы, требуемые для обжатия мощности привода и усилия деформации в прокатной клетке. Для прогноза возможного образования трещин разработана математическая модель разрушения кристаллизующихся алюминиевых сплавов с использованием концепции непрерывного накопления рассеянных повреждений с учетом возможности их залечивания. Отличительной особенностью совмещенного способа литья и прокатки является наличие переходного многофазного слоя, находящегося в напряженном состоянии под деформационным воздействием. Твердожидкая область этого слоя, характеризующаяся сформированным кристаллическим каркасом с жидкими прослойками, способна воспринимать заданную нагрузку и испытывать деформацию. Однако деформационная способность для каждой марки магниевого сплава различна и в процессе кристаллизации возможно возникновение хрупких межкристаллитных разрушений.

При производстве листовых заготовок на агрегатах бесслитковой прокатки наиболее рационально использование простейших теорий накоплений дефектов и повреждений [6]. Процесс разрушения можно интерпретировать как процесс образования и развития микротрещин, который происходит на фоне растущих деформаций ползучести и характеризуется параметром w . Необходимо отметить различный, в общем случае, механизм рассматриваемых процессов, так как хрупкие разрушения развиваются по границам зерен, а вязкое течение происходит в зернах. С другой стороны, если имеется влияние микротрещин на ползучесть, то кривые ползучести, по которым определяются коэффициенты в уравнениях состояния, отражают суммарный эффект, поскольку они получены на образцах, вырезанных из непрерывно-литой листовой заготовки.

Выводы

Таким образом, опытные испытания и проведенные исследования полученных магниевых полос с различным содержанием алюминия, марганца и кремния, показали, что для оценки устойчивой работы литейно-прокатных агрегатов и получения листов с минимальной анизотропией механических свойств необходимо рассматривать несколько вариантов технических решений:

- высокая степень деформации твердожидкой фазы (50-60 %) и прокатка заготовки с помощью дополнительной клетки с индивидуальным управлением прижимом;
- обжатие независимыми роликами по краям заготовки;
- обжатие в дополнительной клетке с расположением ее по технологической оси, исключаящей искажения профиля заготовки.

Калибровку полосы необходимо проводить в дополнительной тянущей клетке при температуре 200-260 °С и при высокой степени деформации (100 %), что приближает всю конструкцию агрегата к объединенному разливочно-прокатному комплексу. Применение модернизированных комплексов позволит в значительной степени улучшить структуру осевой зоны заготовки при одновременном увеличении скорости литья и уменьшения толщины. В условиях совмещенного способа литья и прокатки появляется возможность освоения новых марок Mg-сплавов для получения прокатки различного назначения.



Стабильность и низкий уровень анизотропии открывает возможность активного использования при штамповке и глубокой вытяжке заготовок бесслитковой прокатки, технология получения которых позволяет исключить фестонообразование и обеспечить высокий выход годного конечного продукта. За счет увеличения диаметров рулонного проката создаются условия повышения производительности штамповочных агрегатов, что дает определенные преимущества для заготовки бесслитковой прокатки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арышенский Ю.М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / Ю.М.Арышенский, Ф.В.Гречников. М.: Металлургия, 1990. 304 с.
2. Альтман М.Б. Магниевые сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1978. Т. 2. 346 с.
3. Баранов М.В. Дефекты фольговых заготовок и фольги из алюминиевых сплавов // М.В.Баранов, В.Ю.Бажин / УГТУ-УПИ. Екатеринбург, 2006. 126 с.
4. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1979. 639 с.
5. Напалков В.Н. Модифицирование алюминиевых и магниевых сплавов / В.Н.Напалков, С.В.Махов / МИСИС. М., 2002. 366 с.
6. Патент 2252088 РФ. Способ получения горячекатаной магниевой ленты / Х.Пирхер, Р.Кавалла. Опубл. 20.05.2005. Бюл.№ 14.
7. Специальные способы литья: Справочник / Под. ред. В.А.Ефимова. М.: Машиностроение, 1991. 733 с.
8. Шур И.А. Перспективы развития бесслитковой прокатки алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. 2001. № 5-6. С. 38-41.
9. Allen R.V. Magnesium alloy sheet produced by twin roll casting // Magnesium Technology. 2001. Vol. 2. P. 75-80.
10. Beals R. An update on down-gauging the fata-hunter speedcaster at norandal, huntingdon Light metals. / R.Beals, B.Taraglio, B.Carey, C.Romanowski; Ed. R.Huglen // The minerals, metals & materials society. 1997. P. 757-764.
11. Kawalla R. Deformation behaviour and microstructure development of magnesium AZ31. Alloy during hot and semi-hot deformation / R.Kawalla, A.Stolnikov // Adv. Eng. Materials. 2004. Vol. 6. N 7. P. 525-529.
12. Haga T. Study on high-speed twin roll caster for aluminium alloys / T.Haga. S.Suzuki // Materials Processing Technology. 2003. Vol. 2. P. 895-900.
13. Kawalla R. Properties of magnesium strips produced by twin-roll-casting and hot rolling / R.Kawalla, M.Ullmann, C.Schmidt, J.Dembińska // Properties materials science forum. 2011. Vol.690. P.21-24.
14. Ullmann M. Application of Magnesium Sheets and Strips in Vehicle Construction // Freiburger Forschungshefte / M.Ullmann, F.Berge, K.Neh, R.Kawalla, H.Vogt. 2014. Vol. 358. P. 128-135.
15. Schmidt C. Influence of rolling temperature on texture and microstructure development of twin-roll-cast magnesium AZ31 / C.Schmidt, R.Kawalla // Steel Research International. 2010. Vol. 91. N 9 (special edition). P. 1239-1242.
16. 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.
17. Vangala P. The influence of casting gauge on the Hunter roll casting process. Melt-spinning and strip casting: research and implementation / P.Vangala, D.Smith, R.Duvvuri, C.Romanowski; Ed. E.F.Matthys // The Minerals, Metals & Materials Society. 1992. Vol. 1. P. 225-262.
18. Espedal A.B. Light Metals, Prospects of Thin Gauge High Speed Strip Casting Technology / A.B.Espedal, R.Roder; Ed. by U.Mannweiler // The Minerals, Metals & Materials Society. 1994. Vol. 2. P. 1197-1203.

Авторы: Р.Кавалла, д-р техн. наук, профессор, Rudolf.Kawalla@imf.tu-freiberg.de (Фрайбергская горная академия, Институт литейных технологий, Фрайберг, Германия), В.Ю.Бажин, д-р техн. наук, профессор, декан, bazhin-alfoil@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья принята к публикации 13.09.2016.