

ЛИТЬЕ И ПРОКАТКА МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

CASTING AND ROLLING MAGNESIUM ALLOYS

Рудольф Кавалла^{1,2)}, Мадлен Уллманн¹⁾, Кристиан Шмидт¹⁾, Кристина Нэ¹⁾

¹⁾Институт Обработки Металлов Давлением Технического Университета "Фрайбергская Горная Академия"

²⁾Кафедра Пластической Деформации Специальных сплавов НИТУ «МИСиС», Москва, Российская Федерация

Abstract

The paper is concerned on the production of magnesium alloy strips by Twin-Roll-Casting and their subsequent hot rolling to a final thickness of ≥ 1 mm. In this connection, specific characteristics of magnesium and of the used alloys are discussed. Subsequently, the deformation behavior and the possibilities to its increase are introduced. Additionally, the production technology of hot strips and the properties obtainable are presented on the example of the alloys AZ31. Mechanical properties and the development of microstructure as well as their change during the way of production clarify the development process. Special attention is paid to the thermal pretreatment of the casting condition with local deformation.

1. Введение

При уменьшении массы через применение новых подходов кроме дальнейшего развития техники и технологии производства важную роль играет комбинация оптимальных свойств материалов. Среди основных конкурирующих между собой материалов в автомобилестроении необходимо назвать стали, пластмассы, сплавы на основе алюминия и магния. Увеличение использования в последние годы сплавов на основе магния в качестве конструкционного материала обуславливается его широким применением в строительстве облегченных конструкций. Ожидаемый годовой рост производства только литых заготовок из магния составляет около 15% в течение следующих 10 лет. Кроме того,

изготовление деталей из листовых заготовок в последнее время получает широкий интерес, т.к. обработка давлением среди других прочих видов технологических процессов производства позволяет осуществить широкий спектр конструктивных решений с оптимальными свойствами материалов.

В табл. 1 приведен пример из области производства кузовов автомобилей, где сравниваются значения основных параметров для магния, стали и алюминия. Соотношения показывают, что все свойства магния и сплавов на его основе, за исключением модуля упругости, находятся на более высоком уровне в сравнении со сталью и алюминием.

Таблица 1: Некоторые основные параметры для магния в сравнении со сталью и алюминием

Параметр	Критерий	Сталь	Алюминий повышенной прочнос ти	Магний
Сопротивление листовому изгибу	$\sqrt[3]{E}/\rho$	1,0	2,0	2,7
Сопротивление продольному изгибу	\sqrt{E}/ρ	1,0	1,7	2,1
Жесткость при растяжении/сжатии	E/ρ	1,0	1,0	1,0
Жесткость при кручении	\sqrt{G}/ρ ¹⁾	1,0	1,0	1,0
	$\sqrt[3]{G}/\rho$ ²⁾	1,0	2,0	2,7
Прочность при растяжении/сжатии	R_p/ρ	1,0	1,1	1,1
Сопротивление продольному изгибу	$\sqrt{R_p}/\rho$	1,0	1,8	2,3
Сопротивление трещинообразованию при изгибе	R_m/ρ	1,0	1,2	1,1
Сопротивление образованию вмятин	$\sqrt[5]{E^3 R_p}/\rho$	1,0	1,7	2,1

Дальнейшие преимущества магния по сравнению со сталью или алюминием заключаются в высокой теплопроводности, низком коэффициенте теплового расширения, высокой защитной электромагнитной способностью и высоких демпфирующих свойствах. Также необходимо отметить отличную возможность повторного применения. Недостатком магния являются низкая устойчивость коррозии; в будущем требуются дальнейшие исследования в

областях поверхностной обработки и защиты от коррозионного износа.

При фиксируемом повышении количества производства с помощью комбинации литья и обработки давлением, в особенности для листовых изделий, промышленное применение сплавов на основе магния ограничивается в настоящее время лишь литьем. Основная причина состоит в высокой цене на листовые изделия из магния, и выгодное соотношение механических свойств к единице

плотности магния не могут компенсировать этот недостаток. Также, отсутствующий опыт дальнейшей обработки заготовок и открытый вопрос оптимальной коррозионной защиты представляют собой помехи для широкого применения этого интересного материала, применение которого в Германии почти неограниченно. Последнее имеет стратегическое значение для страны с ограниченными природными ресурсами.

Институт Обработки Металлов Давлением Технического Университета "Фрайбергская Горная Академия" (нем. Institut für Metallformung, TUBergakademie Freiberg) совместно с ООО "Магниевого листового Прокат" (нем. MgFMagnesiumFlachprodukte GmbH) системно разработала полноценную технологическую линию для производства рулонной стали из магния, состоящей из литейно-прокатного комплекса и последующей горячей прокатки [1]-[4]. Процесс с малым количеством стадий, включающий непрерывное литье заготовки с размерами поперечного сечения, близких к конечным, и эффективный процесс обработки давлением предлагает новые возможности поставки материалов из сплавов на основе магния с высокими эксплуатационными характеристиками. Это позволит удовлетворить сегодняшний и будущий спрос на заготовки и компоненты в соответствующих объемах и качестве.

Ниже будут представлены текущее состояние производства листа и полос из сплавов на основе магния. Возможности оптимизации механических свойств и технологических параметров будут описаны на примере сплава AZ31, нашедшего широкое применение в автомобилестроении. Приведенные выводы основаны на обзоре литературы и собственных результатах исследований.

2. Развитие технологии производства магниевых листов и полос на сегодняшний день

Высокая цена на листовый материал из магния обусловлена множеством причин. С одной стороны, обработка металлов с гексагональной кристаллической решеткой является трудоемким процессом, и осуществление высоких степеней деформации возможно только в конкретном температурном окне, зависящем от химического состава. С другой стороны, соответствующее производственное оборудование имеется в распоряжении лишь у ограниченного числа производителей. Кроме того, оно рассчитано для

производства по общепринятым высоко затратным технологиям.

Дальнейшая проблема состоит в ограниченном наличии непрерывно-литых заготовок на рынке металла. Также необходимо отметить отсутствие заводов с высокими производственными мощностями, способными поставлять непрерывно-литые заготовки высокого качества. К заготовкам, используемым для последующей прокатки листового материала, применяются более жесткие требования, касательно однородности микроструктуры, в отличие от заготовок в случае обработки прессованием.

2.1. Требования к исходным заготовкам

Главная проблема при производстве магниевого листа зачастую связана с некачественным состоянием литой структуры. К этому относится высокая доля пор и пустот, высокое макро- и микро-зейгерование, а также стабильные в твердом состоянии выделения -фазы Al_3Mg_8 или соединений типа $AlMg$. Две последние названные особенности связаны с условиями кристаллизации при гравитационном литье слябов и слитков и их последующем медленном охлаждении. Процессы сегрегации при кристаллизации и в твердом состоянии, которые приводят к насыщению алюминия и марганца, являются следствием образования выделений вышеупомянутого типа. Сетка выделений на границах зерен или на скоплениях в областях зейгерования является отличительной чертой структуры литых слябов и слитков. Большая степень усадки при кристаллизации, свидетельствующая о количестве кислорода и водорода, способствует образованию пор и пустот при медленном охлаждении. Поры, пустоты, расслоения и недеформируемые выделения существенно уменьшают способность магния к деформации. Процессы образования трещины и корки по краям и на поверхности заготовок постоянно сопровождают производство магния. С помощью последующего гомогенизационного отжига имеется возможность повысить формуемость литого материала.

Заметно улучшить качество литья касательно однородности структуры возможно с помощью осуществления высоких скоростей охлаждения. В [11] было исследовано влияние скорости охлаждения на образование структуры после кристаллизации в интервале от 1,3 до 300 К/с на примере сплава AZ31 (Рис. 1).

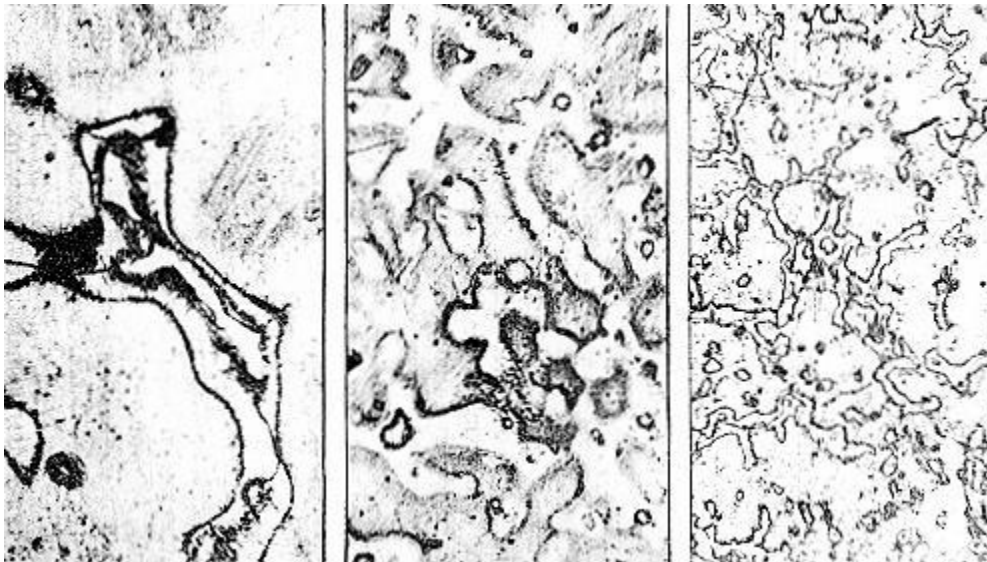


Рис. 1: Влияние скорости охлаждения на микроструктуру сплава МА2-1: (а) 1,3 К/с, (б) 2,7 К/с и (в) 300 К/с, (200-кратное увеличение)

Повышение скорости охлаждения с 1,3 до 2,7 К/с влечет заметное улучшение литой структуры касательно образования дендритов и проявления выделений α -фазы. Среднее расстояние между осями вторичных дендритов при этом уменьшилось с 33,3 до 14,3 $\mu\text{м}$. При высоких скоростях охлаждения до 300 К/с, которые осуществимы на литейно-прокатных комплексах, среднее расстояние составляет 7,1 $\mu\text{м}$. Подобная структура отличается мелкодисперсными выделениями α -фазы, которые способны к быстрому растворению при повторном нагреве или предшествующем гомогенизирующем отжиге.

2.2. Традиционные способы производства листа

Традиционное производство листового материала практикуется в течение предыдущих 80 лет. Известными были такие производители как Electron в Биттерфэлде, Dow, Alcoa и др. На сегодняшний день среди прочих предлагается листовая материал от компании M&VMAGToronto. Эти компании используют непрерывно-литые заготовки для прокатки листов различной толщины (от 0,5 до 150 мм).

Технология листового производства состоит из следующих стадий:

- Литье слябов
- Гомогенизирующий отжиг
- Механическая поверхностная обработка (шлифование)
- Многоэтапная прокатка с обрезанием боковой кромки и промежуточным отжигом
- Конечная термическая обработка

Процесс прокатки происходит на клетях различного типа. В зависимости от возраста стана используются клетки трио и кварто. Современные клетки кварто оснащены внешним или внутренним подогревом и устройством очистки рабочих валков.

Также подобные клетки оборудованы системой смазки и противоизгибом рабочих валков для воздействия на профиль полосы.

Непрерывно-литые заготовки подвергаются реверсивной прокатке. Число проходов при этом зависит от исходной толщины сляба. Вследствие низкой теплоемкости прокат быстро остывает ниже критической температуры прокатки, что приводит к резкому снижению пластичности материала и образованию трещин на кромке листа. Для продолжения процесса прокатки в подобном случае необходима обрезка кромок и промежуточный отжиг. Быстрое охлаждение проката при малых толщинах приводит к режимам прокатки, состоящих иногда из комбинации одного прохода и последующем промежуточном отжиге. Во избежание быстрого охлаждения прокатку можно осуществлять пакетами [5]. Разумеется, прокатка пакетами является очень затратной в связи с дополнительной технологической операцией по подготовке пакетов, разницей в толщинах отдельных листов и всеми вытекающими последствиями. В связи с этим, подобная технология применяется очень редко. Конечная термическая обработка происходит в температурных интервалах между 300 и 400 $^{\circ}\text{C}$.

В стратегических целях осуществляется прокатка листов с шириной 4 м и более. В подобных случаях процесс состоит из прессования труб большого диаметра, разреза их по образующей, правки и последующей прокатки на клетях типа кварто. Такая технология, включающая промежуточный и конечный отжиг, естественно, не подходит для производства листов в больших объемах.

Разработки в области выгодной технологии для производства листа из магния сконцентрированы на методах, которые, с одной стороны, снижают трудоемкость процессов прокатки и отжига, увеличивая тем самым выход

годного материала, и, с другой стороны, улучшают однородность литой структуры. Таким образом, удастся осуществить повышение пластичности листового материала.

Новые возможности открываются при использовании литейно-прокатных комплексов. Эта технология позволяет существенно сократить производственные издержки и поэтому привлекает огромный интерес по всему миру. Значительные преимущества отражены в использовании исходного материала. Здесь, в отличие от технологии с применением непрерывно-литых заготовок, отсутствуют операции механической обработки поверхности слябов, промежуточного

отжига при черновой прокатке, а также уменьшено количества проходов. Еще одно преимущество совмещения литья и прокатки состоит в быстром охлаждении (до 10 раз) и одновременной частичной деформации. Это приводит, помимо получения мелкозернистой структуры, к предотвращению зейгерования и образования пор, пустот и хрупких выделений. Таким образом, существенно повышается пластичность и качество материала. Гомогенизирующий отжиг при этом, как правило, не требуется.

На рис. 2 производство магниевого листа на литейно-прокатном комплексе схематично противопоставлено традиционному способу.

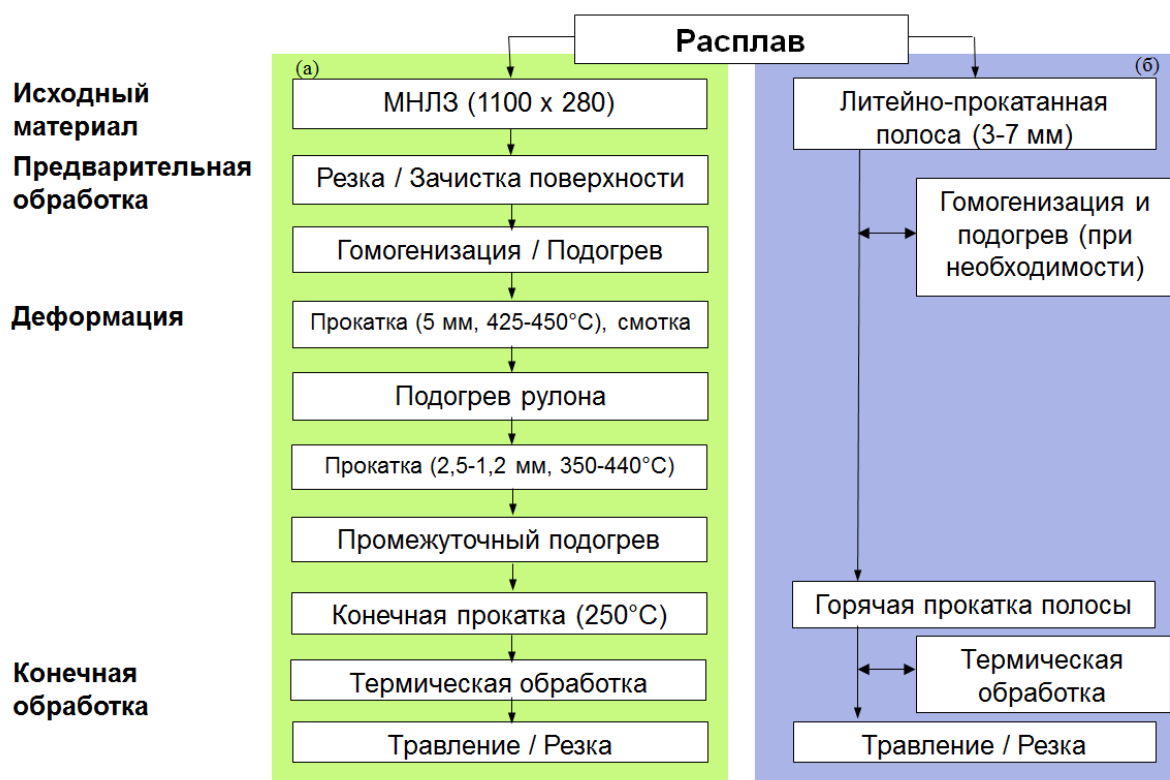


Рис. 2: Технология производства листа из магния: (а) традиционным способом и (б) с использованием литейно-прокатного агрегата

При использовании новой технологии происходит значительное уменьшение этапов производства за счет замещения трудоемкой черновой прокатки с механической обработкой поверхности слябов одновременным литьем и прокаткой черновой полосы с поперечными сечениями, близким к конечным, и чистовой прокаткой с меньшим числом проходов. В рамках финансируемых банком развития Саксонии (нем. SAB) совместных исследовательских проектов, компания ООО "Магнийлистовой Прокат" (нем. MgFMagnesiumFlachprodukteGmbH, дочерняя компания ThyssenKrupp Steel AG), осенью 2002 года поставила в Фрайберг комплекс технологического оборудования [12]. Первый совместный проект по тестированию технологии литья магниевой черновой полосы успешно

завершился в 2005 году. Полученные данные подтверждают выгоду использования этого оборудования, однако показывают необходимость дальнейших исследований, в особенности в области технологии оборудования для последующей обработки литой черновой полосы в тонкий лист для глубокой вытяжки должного качества. В 2009 оборудование было дополнено станом горячей прокатки (рис. 3). При нынешнем техническом оснащении целью работы является разработка технологии, позволяющая изготовить магниевые полосы с повышенными свойствами из литейно-прокатной полосы путем горячей прокатки. Минимально осуществляемая толщина конечного листа составляет 1,0 мм. На рис. 4 схематично представлена технологическая схема оборудования.

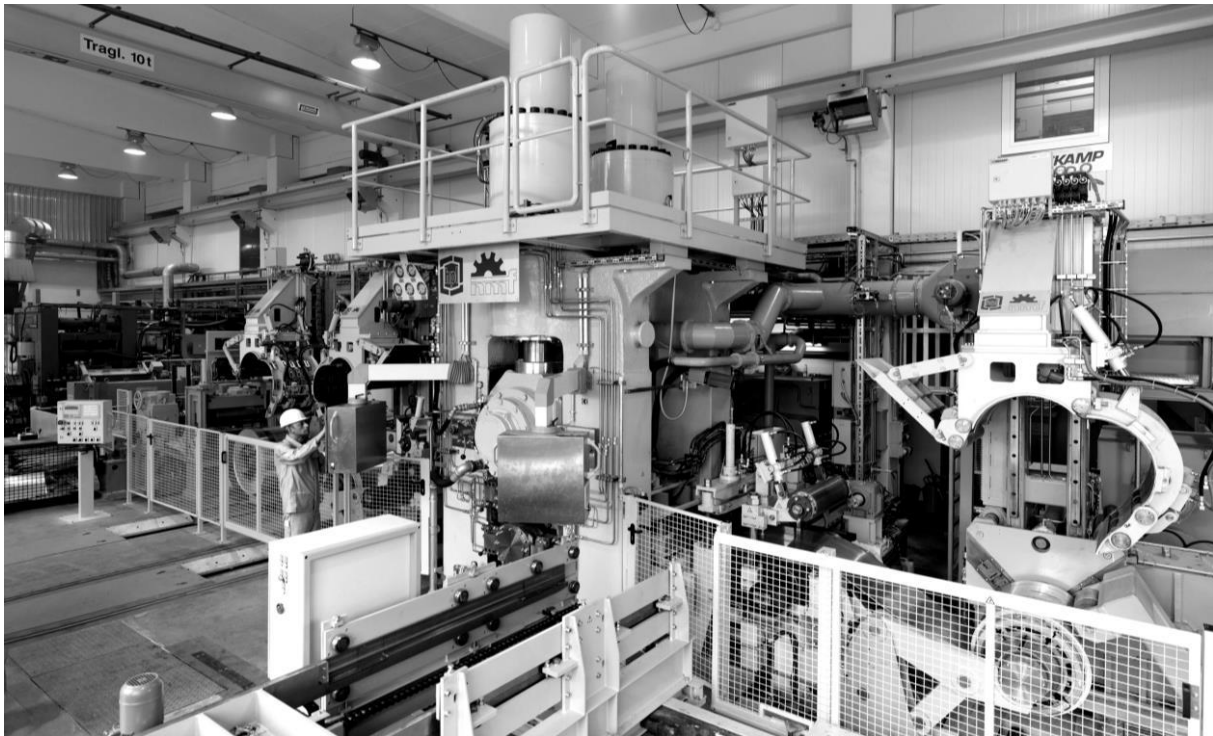


Рис. 3: Прокатка магниевых полос с конечной толщиной листа 1,5 мм на линии Института Обработки Металлов Давлением, Фрайберг

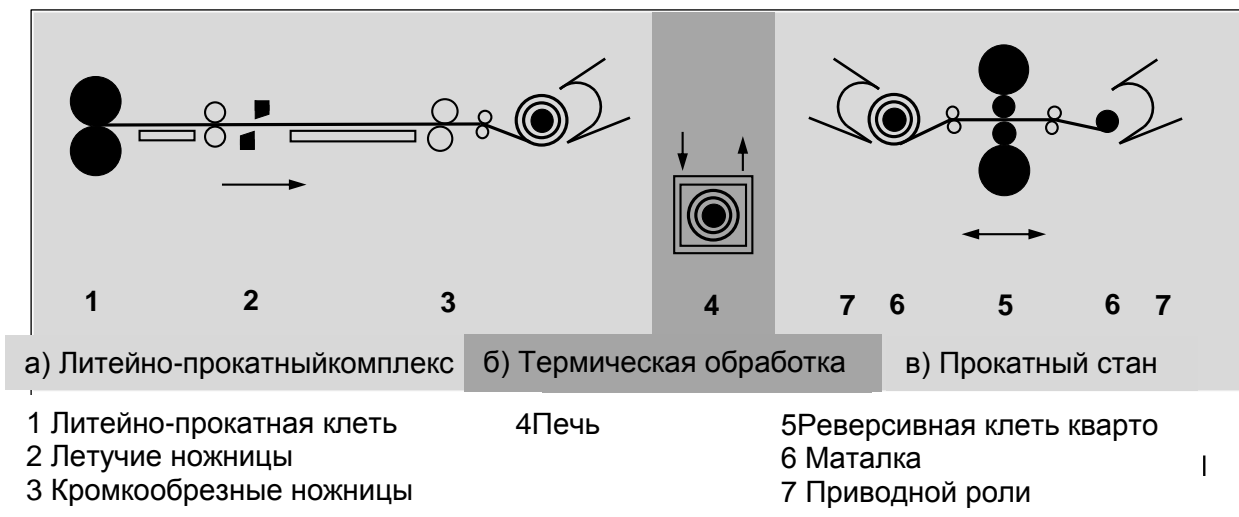


Рис.4: Процесс производства магниевой полосы на опытной линии Института Обработки Металлов Давлением, Фрайберг

Технологический процесс можно кратко описать следующим образом. В непрерывном литейно-прокатном процессе формируется черновая полоса в диапазоне толщин от 3 до 7 мм. Магниевые сплавы выплавляется в защитной атмосфере и транспортируется в литейный желоб. В конце литейного желоба находится форсунка, с

помощью которой расплав направляется в зазор между валкам, где он быстро кристаллизуется и частично деформируется между охлажденными валками. Технические данные непрерывного литейно-прокатного комплекса приведены в табл. 2.

Таблица 2: Основные технические данные литейно-прокатной и обжимной клетки на опытной линии Института Обработки Металлов Давлением, Фрайберг

	Литейно- прокатная клеть	Реверсивная клеть кварто
Макс. усилие прокатки	7 МН	12 МН
Ном. момент прокатки	200 кНм	130 кНм
Макс. скорость	3 м/мин	225 м/мин
Макс. Ширина полосы	780 мм	720 мм
Ширина полосы	3 – 7 мм	до 1,0 мм
Диаметр рабочих валков	840 мм	400 мм

Экономическая выгода этого метода в сравнении с традиционным способом производства листа заключается в малой толщине черновой полосы (менее 6 мм). В результате требуется меньшее число проходов при горячей прокатке для получения конечной толщины полосы (менее 1,5 мм). Кроме того, по причине хорошей деформируемости можно увеличить до 50% обжатие за проход, тем самым сократить производственный процесс. Также, эффективность технологии еще более возрастает благодаря горячей прокатки полосы из тепла кристаллизации.

Литейно-прокатанная полоса после обрезки кромок сматывается и направляется либо в клеть, либо в печь. В печи черновая полоса подогревается до температуры прокатки. Одновременно, печь может использоваться для заключительной термической обработки рулона. После обработки в печи происходит непосредственная передача горячего рулона на прокатную линию. На реверсивном стане кварто литейно-прокатная полоса будет прокатана без промежуточного подогрева в один или пять проходов до требуемой конечной толщины. В процессе прокатки необходимо соблюдать узкий температурный коридор с учетом деформируемости и образования поверхности.

3. Достижения в области оптимизации процесса и материала для литой черновой полосы и производства полосы

Пластические свойства тонкого листа сорта AZ31 литой черновой полосы находятся на высоком уровне. Предельное удлинение A_{80} в диапазоне от 20% до 25%, предел текучести на 200 МПа и предел выносливости на 270 МПа превышают свойства листа, полученного

традиционным способом производства. Кроме того, технологические характеристики, такие как перпендикулярная анизотропия ($r=1,6$) и показатель деформационного упрочнения ($n=0,2$) позволяют ожидать хорошей дальнейшей обрабатываемости. Однако интерпретация двух значений гексагональных материалов предоставляется не в достаточной степени.

Потенциал оптимизации относительно механических свойств еще не исчерпан и будет в дальнейшем изучен с использованием численных и экспериментальных методов.

Численное моделирование в настоящее время используется в области отвердевания (кристаллизации) и горячей деформации. Кинетика кристаллизации жидкого магния в зеве валков зависит от состояния зейгерования отлитой полосы. С этой целью можно опираться на исследования с алюминием [13]. Результаты указывают на зависимость между скоростью разлива полосы, расстоянием между форсунками и перпендикулярной осью прокатки и состоянием зейгерования. Эти исследования основаны на расчетах методом конечных элементов (МКЭ) с моделями, которые описывают исключительно вязкое поведение магния. Они не разделяют жидкие области и затвердевшие между валками. Пластические процессы в зоне твердого состояния, которые оказывают влияние на течение выходящего из форсунок жидкого магния, при этом не учитываются. Таким образом, модели должны дальше разрабатываться. Все же можно с помощью моделей оценить влияние условий процесса на течение и распределение температуры (кристаллизация) в зеве валков литейно-прокатного агрегата. Примеры условий течения и распределение температуры показаны на рис. 5.

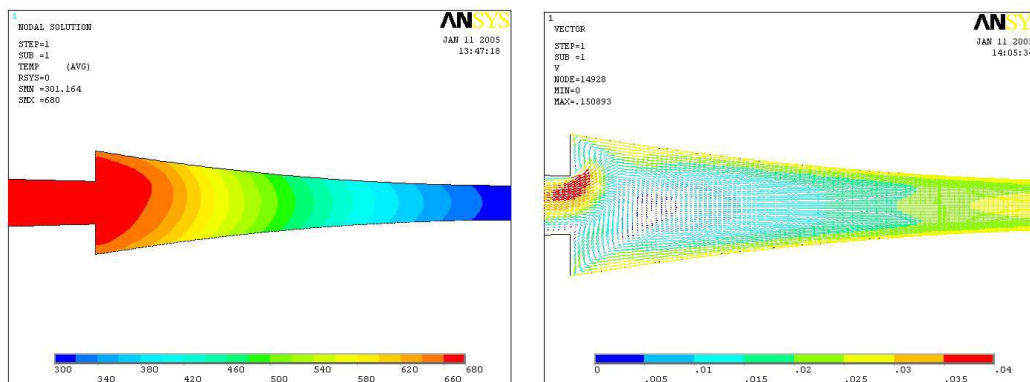


Рис.5: Распределение температуры (слева) и условий течения (справа) в зазоре между валками литейно-прокатного агрегата

Оба результата иллюстрируют сложность процессов в зеве валков литейно-прокатного агрегата. Изменения формы форсунки, температуры расплава, зазора между валками литейно-прокатного агрегата и температуры прокатки имеют серьезные последствия для состояния отливки, касательно макро-зейгерования. Положение форсунки и разница температур между верхним и нижним валком влияют на процесс кристаллизации. Все эффекты могут быть оценены с помощью расчетов МКЭ, чтобы целенаправленно регулировать влияние на полосу.

Объективные факторы для готовых полос, которые производятся при полосовой прокатке на испытательной линии, определяются требованиями дальнейшей обработки магниевого листа. При разработке соответствующих программ прокатки в сочетании с программами термообработки процесс прокатки должен осуществляться в соответствии с характеристиками литейно-прокатанной черновой полосы таким образом, чтобы были обеспечены

минимальное допустимое отклонение толщины листа, однородная, мелкозернистая структура, низкая анизотропия механических свойств, минимизация трещин полосы, и высокое качество поверхности (рис. 6). Исходя из лабораторных экспериментов и испытаний на промышленных заводах, идет поиск ответов на вопросы о надлежащих условиях для производства полос. При этом имеются отличия, в особенности, для контроля температуры, качества поверхности и выбор смазки в отличие от производства листового металла, которые должны быть приспособлены к процессу полосовой прокатки и требуют отдельного исследования. В первую очередь исследуется влияние различных условий прокатки, термообработки и различных смазочных материалов. Первые испытания по прокатке со специальной смазкой уже показывают многообещающие результаты. Что касается количества и распределения смазки в зазоре между валками, необходимы дальнейшие исследования.

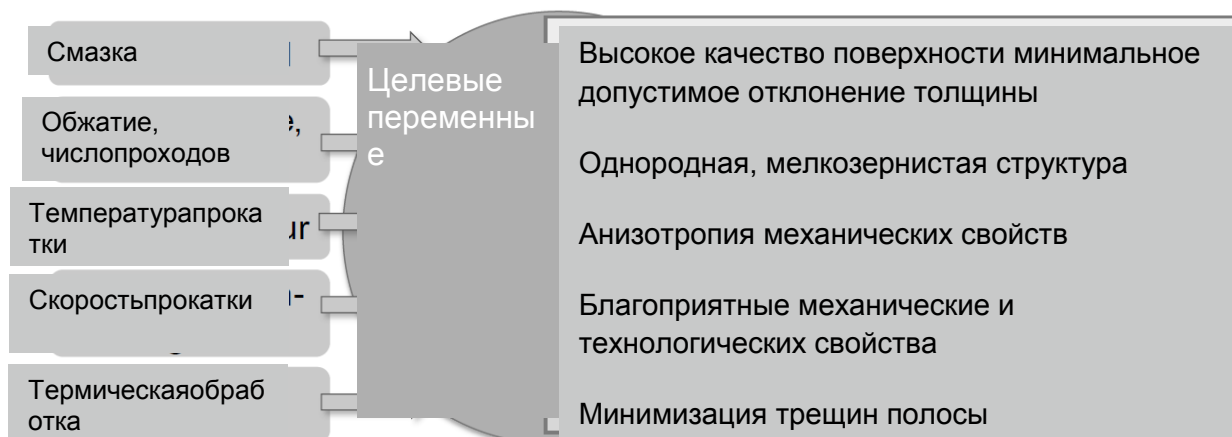


Рис. 6: Целевые переменные при прокатке магневых полос и их влияние

В рамках проведенных экспериментов с прокаткой литейно-прокатанной полосы сплава AZ31 было показано, что реверсивный процесс прокатки полос благодаря однородной, мелкозернистой структуре (рис. 7) позволяет получить благоприятные сочетания эксплуатационных свойств. Как упоминалось

выше, магневые полосы имеют высокие механические свойства при комнатной температуре с пределом текучести выше 200 МПа и предел прочности выше 270 МПа. Предельное удлинение (A_{80}) продольных образцов составляет от 20% до 25%.

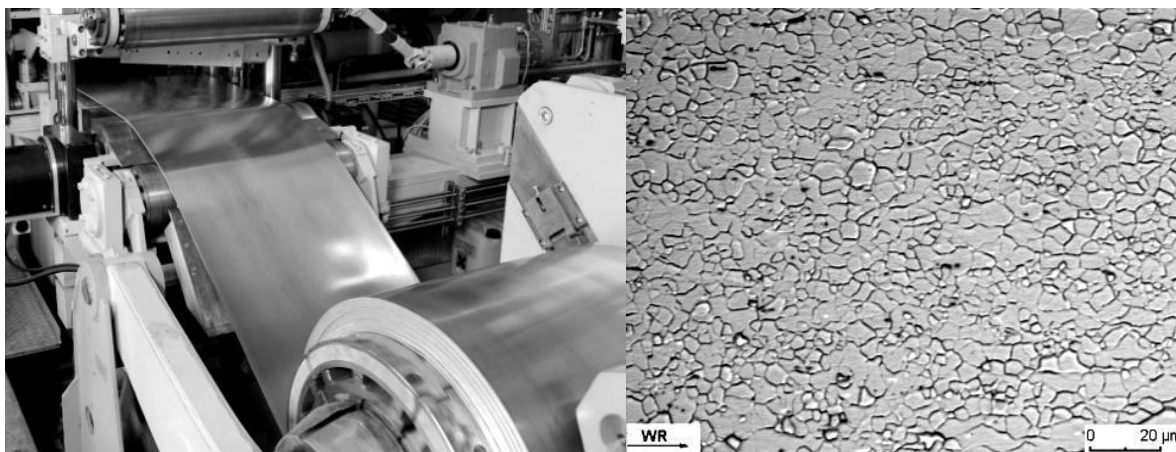


Рис. 7: Смотка магниевой полосы конечной толщиной прокатки 1,5 мм на опытной линии Института Обработки Металлов Давлением, Фрайберг и текстура полученной полосы

Развитие микроструктуры и условия прокатки по отдельным проходам показано на рис. 8. Уже после второго прохода структура в

значительной степени рекристаллизована. Однородная структура зерна наблюдается после третьего прохода.

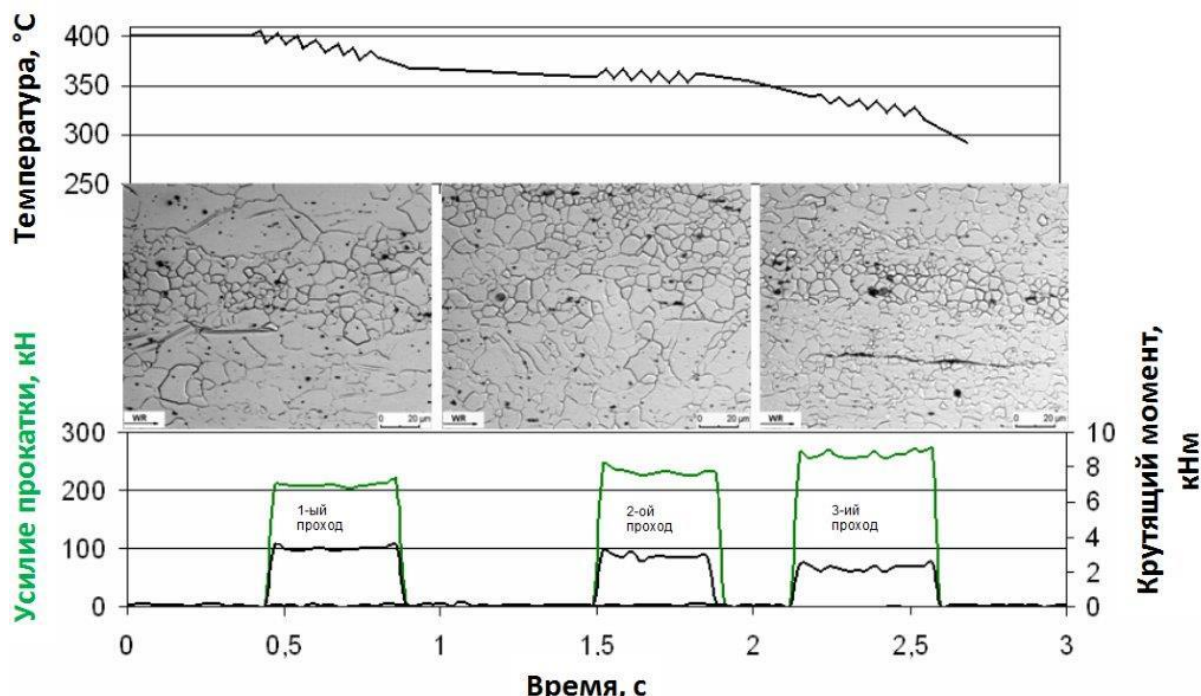


Рис. 8: Развитие микроструктуры в процессе горячей прокатки с высокой скоростью прокатки на непрерывном полосовом стане горячей прокатки от 6 мм до 1,6 мм

Другая потенциальная оптимизация магниевых сплавов может быть достигнута путем регулирования развития текстуры, в которой интенсивность базальных компонентов текстуры сведено к минимуму. Этому, например, может быть осуществлено благодаря содействию так называемой текстуры вращения, которая связана с распределением интенсивности до 10° к полюсу плоскостей $\{0001\}$. Таким образом, пластические свойства магниевых сплавов могут быть улучшены. Повышение температуры деформации автоматически связаны с этим. Специфическое влияние текстуры является частью исследований в институте обработки металлов давлением. Рассматриваются взаимосвязи между

деформационными параметрами и развитием текстуры на примере сплава магния AZ31. Часть исследований касается связи между образованием двойников, условиями деформации и размером исходных зерен. Образование двойников, которое является обязательным при низких температурах для процессов обработки металлов давлением, встречается также и при высоких температурах выше 280°C в области малых степеней деформации (рис.9). При этих температурах двойникование приводит к ослаблению базальной текстуры. Таким образом, учет этого для процессов обработки металлов давлением с малой степенью деформации имеет важное значение [14].

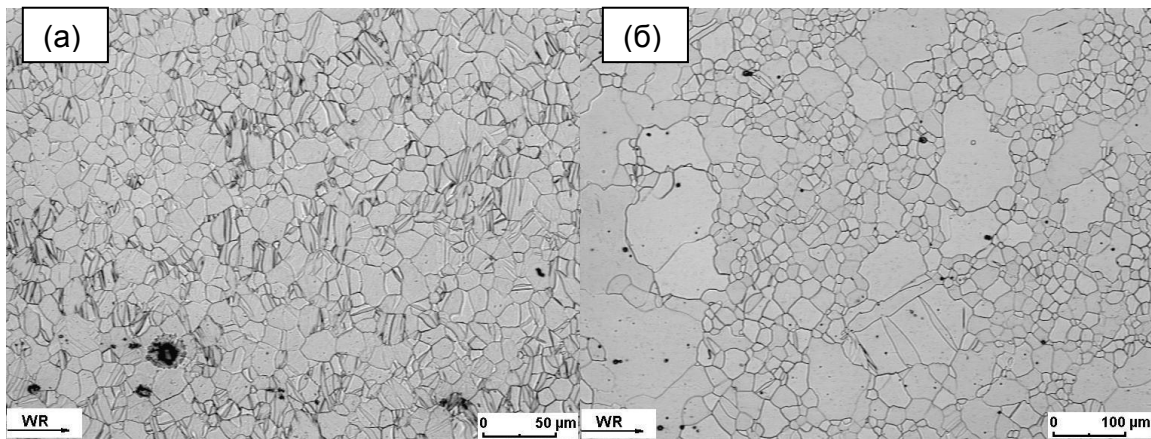


Рис. 9: Двойникование в AZ31 при скорости деформации 10 с-1: (а) 280°C, $\dot{\varphi}=0,05$, (б) 400°C, $\dot{\varphi}=0,05$

4. Заключение

Производство тонких листов или полос магния по традиционным технологиям является дорогим. Хотя разовые применения в автомобильной промышленности были уже исследованы, но не существует серийного применения листов магния в этом секторе по причинам высокой стоимости. Для того, чтобы добиться здесь изменений, должна быть разработана технология производства, не требующая больших затрат. Литейно-деформационный процесс предлагает такое решение. Институт обработки металлов давлением в ТУ Фрайберг и MgF Magnesiumflachprodukte GmbH в рамках совместного проекта, который финансировался банком развития Саксонии SAB, разработали литейно-деформационный процесс для производства черновой полосы. По всему миру была начата подобная научно-исследовательская деятельность в области литейно-прокатного процесса и литья черновой полосы. Исходный материал может быть экономически выгодно переработан в тонкие листы с хорошими технологическими свойствами. Это было проверено несколько раз, в частности на примере сплава AZ31. Главной целью при прокатке полос является достижение точных геометрических размеров конечного продукта. Для достижения этой цели, а также для оптимизации свойств поверхности и воспроизводимости механическо-технологических свойств, необходимо продолжать работу в области литейно-деформационных процессов и прокатки черновой полосы. Другая цель заключается в достижении толщины полосы менее 1 мм.

Дальнейшее развитие связано с использованием оптимизации относительно мелкозернистой структуры, увеличением выхода годного материала благодаря предотвращению трещинообразования по краям, использованием численных методов моделирования для повышения качества тонких листов.

Авторы выражают благодарность Министерству экономики, труда, науки и искусства Саксонии за технологическую поддержку. Также благодарность немецкому фонду исследований за поддержку фундаментальных исследований в области развития текстуры.

Список литературы

- [1] R. Kawalla; G. Lehmann, H. Pircher; M. Weber.: Magnesiumblechherstellung Stand und Perspektiven, 8. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, 2001, Freiberg, S. 236-246
- [2] B. Engl, R. Kawalla.: Entwicklung eines neuartigen kostengünstigen Verfahrens zur Herstellung von Magnesiumband; MEFORM 2006, Freiberg, S. 96-117
- [3] R. Kawalla, M. Ullmann, M. Oswald; C. Schmidt: Properties of Strips and Sheets of Magnesium Alloy Produced by Casting-Rolling Technology, Pro-ceedings of the 7th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications, K. U. Kainer, Magnesium Dresden S. 364-369
- [4] M. Oswald; C. Schmidt, S. Waengler; N.-D. Cuong.: Einfluss der Umformbedingungen beim Walzen von Magnesiumgießwalzband aus der Gießhitze auf die Feinblech- und Bandqualität; MEFORM 2006, Freiberg, S.128-143
- [5] W. Lehnert; L. Chabbi: Besonderheiten beim Umformen von Magnesiumwerkstoffen, MEFORM 99, Freiberg, 24. und 25. März, 1999, Proceedings
- [6] L. Chabbi; W. Lehnert: Hot and Cold Forming Behaviour of Mg-Materials, International Conference and Exhibition Magnesium Alloys and their Applications, April 28-30, 1998, Wolfsburg, Germany, Conference Book, p. 313-317
- [7] G. Lehmann; R. Lange; L. Chabbi: Bleche aus Magnesiumlegierungen MEFORM 2000, Freiberg, 30. und 31. März 2000, Tagungsband
- [8] L. Chabbi; W. Lehnert; R. Kawalla; F. Lehnert: Hot and Cold Forming Behaviour of Magnesium Alloys AZ31 and AZ61; Magnesium Alloys and their Applications; DGM, Wiley-VCH Verlag GmbH 2000, p. 621-627
- [9] H.-W. Wagener: Deep Drawing of Magnesium Sheet Metal at Room Temperature; Magnesium Alloys and their Applications; DGM, Wiley-VCH Verlag GmbH 2000, p. 614- 620
- [10] R. Kawalla; W. Lehnert: Beitrag der Werkstoffentwicklung zum Leichtbau im Automobil;

6. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Dresden, 02. und 03. Dezember 1999, S. 46-68

[11] B.I. Bondarev; O.W. Detekova; Obrazovanie intermetallidov b splawach Mg-Al-Zn-Mn, Mg-Mn-RZM b zawisimosti ot chimicheskogo sostawa i tehnologicheskich parametrow prigotowlenija splawa i otliwkislitkow; Technologia obrabotki legkich i specialnych splawow; Moskva, Metallurgija 1994, S. 124-136

, 2005

[12] B. Engl: Potential uses and new production technology for magnesium sheet. Steel Grips 1 (2003), S. 413-418

[13] O. Daalandet al.: Thin gauge twin-roll casting, process capabilities and product quality. Light metals 1997, S. 745-752

[14] R. Kawalla, M. Oswald, C. Schmidt, N.D. Cuong.: 12. Sächsische Fachtagung Umformtechnik SFU, Leichtbau durch Umformtechnik. Tagungsband, S. 231-243, Dresden