

УДК 621.777

Беляев С. М.
Головко А. Н.
Новак М.**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕССУЕМОСТИ
АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

Биметаллические и многослойные материалы нашли применение в авиа-, судостроении, энергетике, машиностроении, химической промышленности и других отраслях [1]. Перспективным направлением является использование биметаллических алюминиево-магниевых композиций, в которых наружный слой выполнен из коррозионностойкого алюминиевого сплава, а внутренний из магниевого сплава с высокой удельной прочностью. Это позволит существенно снизить массу таких пресс-изделий по сравнению с алюминием и повысить их коррозионную стойкость в сравнении с магниевыми сплавами. Наибольший эффект ожидается от применения таких изделий в транспортном машиностроении. Рассмотрим некоторые важные особенности прессования биметаллов с продольной слоистостью.

Прессование биметаллических труб и профилей из двухслойных и биметаллических заготовок – наиболее перспективный способ, позволяющий изготавливать трубы широкого сортамента (диаметрами 38–460 мм) из многих сочетаний металлов [2]. Благодаря большой степени деформации, которая обуславливает высокие давления на контактной поверхности и значительное ее обновление, а также высоким скоростям деформации этот способ обеспечивает высокую прочность сварки слоев [2]. К преимуществам этого способа следует отнести также возможность использования исходных заготовок сравнительно малой длины, простоту подготовки их контактных поверхностей и кратковременность процесса, что позволяет осуществлять деформацию в оптимальном температурном интервале.

Многослойные изделия можно получать совместным прессованием заготовок с продольной и поперечной слоистостью, прессованием пустотелых профилей с последующим заполнением пустот армирующим материалом [3], а также наложением оболочки из одного металла на сердечник из другого. Последний способ аналогичен наложению металлической оболочки на электрический кабель, однако он имеет специфические особенности, присущие только процессу прессования многослойных изделий [4]. При совместном прессовании металлов из заготовок с продольной слоистостью особое влияние оказывает различие прочностных свойств, соотношение толщин слоев и их взаимное расположение в заготовке.

Авторы [2] считают, что при производстве биметаллических труб из двухслойных и биметаллических заготовок, а также при последующем переделе биметаллических труб, в подавляющем количестве случаев, при установившемся процессе деформации происходит пропорциональная деформация металлов. Слои деформируются таким образом, что в очаге деформации сохраняется постоянным так называемый коэффициент плакирования n .

Объемный коэффициент плакирования рассчитывается по формуле (1):

$$n_V = \frac{F_{nl}}{F_{\Sigma}}, \quad (1)$$

где F_{nl} и F_{Σ} – площади поперечного сечения плакирующего и основного слоев в готовом профиле.

Коэффициент плакирования по массе определяется по формуле (2):

$$n_m = \frac{m_{nl}}{m_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где m_{nl} и m_{Σ} – масса металла плакирующего и основного слоев в готовом профиле.

По взаимному расположению металлов в заготовке процессы прессования многослойных профилей и прутков из продольно слоистых заготовок можно разбить на две группы [4]. В заготовках первой группы периферийные слои в состоянии прессования менее прочны, чем внутренние; во второй группе – наоборот.

В первом случае неравномерность деформации сосредоточена в оболочке, благодаря чему наблюдается резкое снижение сдвиговых деформаций в теле основного металла. При прессовании в мягкой оболочке заметно уменьшается градиент скоростей истечения различных слоев, а деформационная зона сосредоточивается вблизи матрицы. Кроме того, она предохраняет заготовку от взаимодействия с окружающей атмосферой и инструментом, а также снижает тепловые потери.

Известно [1], что для каждого металла или сплава существует определенный диапазон температур оптимального напряжения текучести. Это обстоятельство значительно ограничивает возможные комбинации различных материалов, так как температуры их пластического деформирования могут значительно отличаться. Согласно исследованиям М. С. Гильденгорна [5] следует, что так называемые «модули прессования» отдельных металлов при данной температуре и одинаковых условиях процесса не должны отличаться друг от друга более чем на 50 %. Указано, что в этом случае совместное истечение металлов будет более равномерным и непрерывным.

Часто оказывается, что оптимальная температура деформации одного компонента является недопустимой для деформации другого. В таких случаях целесообразно применять раздельный нагрев [1]. Совместный нагрев магниевых сплавов (например, МА2–1, МА8) с алюминием до 430–480 °С является опасным, поскольку при температуре 480 °С возможно возгорание магния в контакте с алюминием [6]. В связи с этим при плакировании магниевых сплавов алюминием появилась технологическая схема, согласно которой осуществляется раздельный нагрев заготовок из этих металлов. Планшеты алюминия марки АД00 нагреваются до 300–350 °С, а слитки из магниевых сплавов – до 420–450 °С [7]. Наложение планшета непосредственно перед деформацией позволило избежать возгорания металла. Однако, применение раздельного нагрева удорожает производство биметалла. Авторы [8] предлагают использовать промежуточный слой для образования лучшей связи между слоями.

Данных об оптимальных режимах прессования алюминиево-магниевых прутков, рекомендуемых размерах заготовки и распределении размеров сердечника по длине пресс-изделия в литературе не обнаружено.

Целью настоящей работы является исследование возможности прессования биметаллических прутков с сердечником из магниевого сплава и алюминиевой (система Al–Mg–Si) оболочкой.

На первом этапе исследований проводилось прессование на вертикальном прессе усилием 800 кН с коэффициентом вытяжки равным 10 через плоскую матрицу без форкамеры с длиной рабочего пояса 5 мм и диаметром канала 9 мм. Скорость прессования была постоянной и равной 1,2 мм/с.

Использовались двухслойные заготовки ($n_v = 0,3$) состоящие из сердечника и оболочки, оба компонента получены из прессованных прутков обточкой. Сердечники из магниевых сплавов AZ31 – MgAl3Zn1Mn0,2 (МА2 – ГОСТ 14957–76) и ZK60 – MgZn6Zr0,7 (МА14 – ГОСТ 14957–76) имели диаметр 15 мм. Оболочка заготовок изготовлена из алюминиевого сплава АА6061 (АД33 – ГОСТ 4784–74), ее наружный диаметр 28 мм, внутренний – 15 мм.

Сплавы АА6061, ZK60 и AZ31 имеют различные температуры горячей деформации (табл. 1). Причем для достижения максимальной прочности алюминиевый сплав АА6061 рекомендуется прессовать при температурах близких к верхней границе диапазона (указанного в табл. 1), а магниевые – у нижней границы. Согласно диаграмме состояния магний-алюминий при температуре 437 °С и выше происходит интенсивный рост хрупкого интерметаллического соединения Mg_4Al_3 и прочность сцепления слоев становится весьма низкой [6].

Поэтому, учитывая недопустимость перегрева магниевых сплавов и ограничения по прессуемости алюминиевого сплава при заниженных температурах, температуры нагрева составной заготовки составили 380 и 360 °С для композиций AA6061 + AZ31 и AA6061 + ZK60 соответственно.

Таблица 1

Рекомендуемые температуры для прессования сплавов и температуры при проведении эксперимента

Сплав	Литературные данные			Эксперимент	
	T_k , °С	T_z , °С	T_{max} , °С	T_k , °С	T_z , °С
AA6061	350–430	370–500	520	375	450
ZK60	300–350	300–350	410	315	330
AZ31	300–370	350–410	410	315	330
AA6061 + AZ31	350–360	370–380	410	350	380
AA6061 + ZK60	320–340	350–360	410	330	360

T_k , T_z , T_{max} – температура контейнера, заготовки и максимальная температура нагрева данного сплава, выше которой происходит интенсивный рост хрупких соединений.

Образцы для проведения испытаний на сжатие и изгиб отбирались из центральной (по длине) части прутков. Испытание на сжатие проводилось до степени деформации 74 %, в результате испытаний были получены кривые (рис. 1) для композиции AA6061 + AZ31 и AA6061 + ZK60. Участки с резким падением напряжения, очевидно, соответствуют моменту относительного сдвига слоев композиции. Следовательно, при сжатии нарушение целостности контакта наступает при деформации около 15 % для AA6061 + AZ31 и 21 % для AA6061 + ZK60. В диапазоне от 15 до 45 % напряжение сжатия меняется слабо, после чего происходит его интенсивный рост, что можно связать с увеличением влияния подпирющих сил трения на контакте.

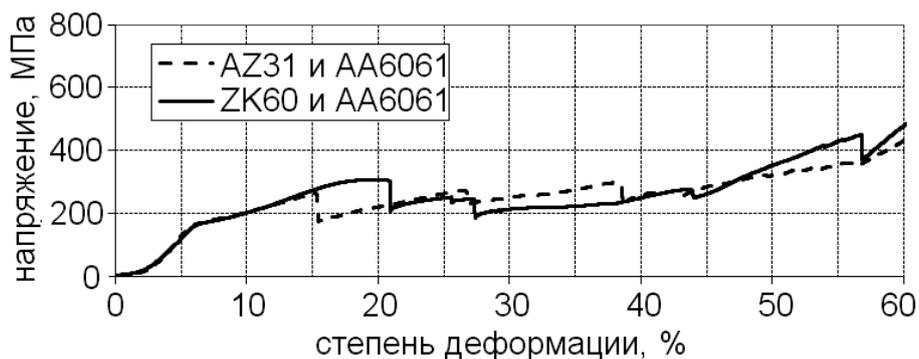


Рис. 1. Зависимость напряжения от степени деформации

Прочность рассматриваемых биметаллических композиций при сжатии не уступает прочности материалов их компонентов, а вероятное нарушение контакта слоев происходит при относительных деформациях, превышающих уровень при сжатии рассматриваемых магниевых сплавов [6].

Большой практический интерес представляют испытания на трехточечный изгиб. Испытания показали, что наибольшим сопротивлением изгибу обладает магниевый сплав ZK60, а наименьшим – алюминиевый сплав AA6061 (рис. 2). Биметаллические прутки по сравнению с прутком из алюминиевого сплава имеют сопротивление изгибу на 50–75 % выше. Композиция AA6061 + AZ31 незначительно (лишь на 7 %) уступает по прочности прутку из сплава AZ31. Такое сочетание материалов может быть рекомендовано к применению,

поскольку обеспечивает достаточно высокую прочность, коррозионную стойкость и экономичность – объемная доля более дорогого (по сравнению с алюминиевым) магниевого сплава в рассматриваемом прутке составляет всего 29 %.

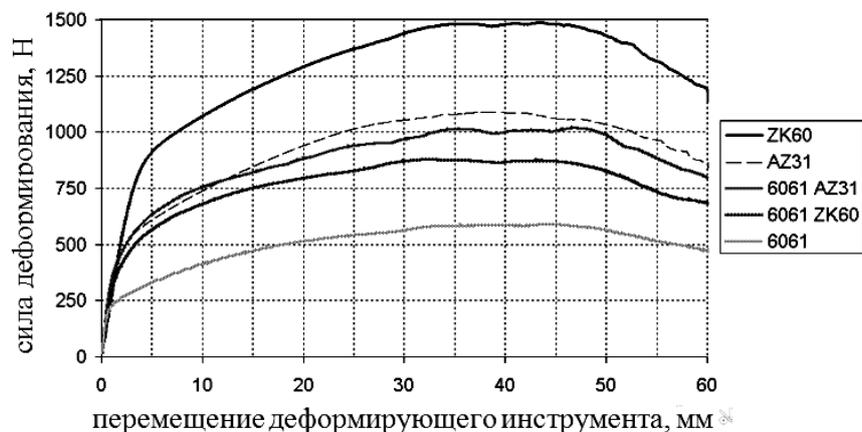


Рис. 2. Результаты испытаний на изгиб прутков из различных материалов

Однако необходимо принимать во внимание, что при прессовании многослойных заготовок может иметь место неравномерное распределение толщины оболочки по продольному сечению биметаллического изделия. С этой целью были проведены эксперименты, описанные ниже.

Исследования проводились с использованием вертикального гидравлического прессы усилием 10 МН кафедры обработки металлов давлением НМетАУ. В качестве основного рабочего инструмента использовался нагреваемый контейнер с внутренним диаметром 42 мм. Скорость прессования постоянна и равна 0,5 мм/с. Диаметр прессуемого прутка – 9 мм, коэффициент вытяжки – 22. Использовали биметаллическую заготовку в виде сверленного стакана из алюминиевого сплава АА6060 (ближайший аналог по ГОСТ 4784–74 АД31), в который помещали сердечник из магниевого сплава AZ31 (ближайший аналог по ГОСТ 14957–76 МА2). Нагрев заготовки производился в электрической печи сопротивления с точностью ± 5 °С до температуры 400 °С.

Отпрессованные прутки имели длину 1100 мм. Через каждые 100 мм образцы отбирали образцы длиной 10 мм, торцы которых подвергали травлению в 30 % растворе NaOH и на бинокулярном микроскопе проводили замеры диаметра сердечника. Зависимость распределения отношения диаметра сердечника d к наружному диаметру прутка D по длине пресс-изделия представлена на (рис. 3).

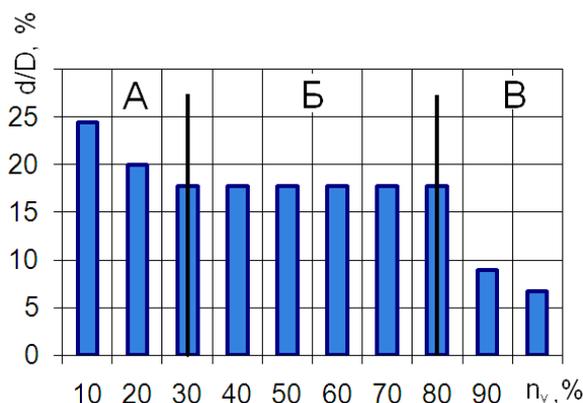


Рис. 3. Распределение относительного диаметра сердечника из магниевого сплава по длине готового прутка

Анализируя график на рис. 3 можно выделить три основных стадии процесса.

А) Начальная стадия, на которой происходит уменьшение площади сечения сердечника.

Б) Установившийся процесс, характеризующийся практически неизменным диаметром сердечника.

В) Заключительная стадия, на которой установившееся течение металла нарушается, происходит повышение толщины оболочки.

В начале первой стадии происходит истечение только алюминия из-за наличия дна стакана заготовки (этот этап на графике специально не отражен).

Существенное уменьшение относительного диаметра сердечника на третьей стадии истечения может быть объяснено теми же причинами, что приводят к образованию центральной пресс-утяжины [4]. По мере приближения пресс-шайбы к матрице скорости течения в поперечном направлении увеличиваются и часть металла, находящаяся в периферийной зоне пресс-шайбы, течет вдоль пресс-шайбы к оси заготовки. При этом даже может образовываться воронкообразная полость. Поэтому площадь сечения сердечника в конце прутка уменьшается в несколько раз.

Указанная неравномерность сечения сердечника по длине прутка связана с характером течения металла при прямом прессовании без смазки. Такая неравномерность может быть в значительной степени уменьшена применением заготовки с переменной по длине толщиной стенки оболочки, а также путем использования градиентного нагрева заготовки.

В дальнейших исследованиях планируется проведение экспериментов по определению влияния геометрии инструмента и формы многослойной заготовки на распределение слоев по продольному сечению готового пресс-изделия. Разработан инструмент для пресса усилием 1600 кН кафедры обработки металлов давлением Национальной металлургической академии Украины, который представлен на рис. 4. Данный инструмент предназначен для прессования профилей из заготовок диаметром 40 мм, а термоэлементы, находящиеся в контейнере, позволяют производить нагрев многослойных заготовок непосредственно в контейнере, что позволяет избежать охлаждения заготовки.

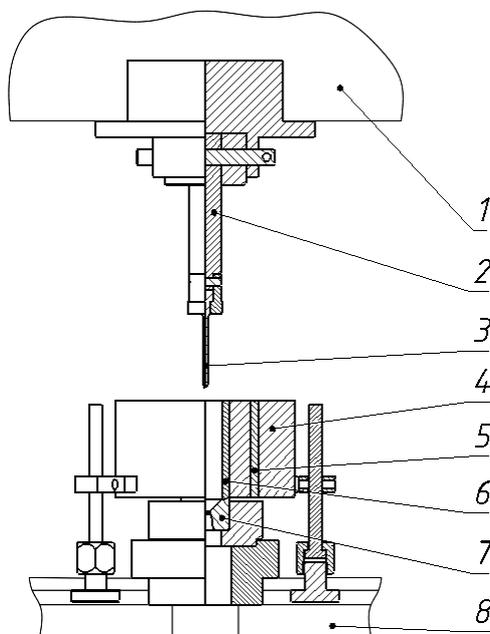


Рис. 4. Прессовая оснастка:

1 – верхняя поперечина; 2 – пресс-штемпель; 3 – оправка; 4 – контейнер; 5 – нагревательный элемент; 6 – втулка контейнера; 7 – матрица; 8 – нижняя поперечина

На первом этапе исследования касаются лишь осесимметричных биметаллических прутков, план эксперимента представлен на табл. 2. Целевыми функциями являются:

- соотношение размеров слоев в поперечном сечении и продольном направлении;
- прочность сцепления между слоями;
- механические свойства биметаллической композиции.

Таблица 2

План эксперимента

d , мм	α , °	n_V	$\ln(\mu)$	T , °C
12	45	20/50	2,5	$T_k = 360 / 380 / 400$ $T_3 = 380 / 400 / 420$
9	60		3	
	45			
	30			
7	45		3,6	

T_k, T_3 – температура контейнера и заготовки

ВЫВОДЫ

Показана возможность устойчивого проведения процесса прессования биметаллических прутков с сердечником из сплава системы Mg–Al–Zn–Mn и оболочкой из сплава системы Al–Mg–Si при отношении диаметра сердечника к наружному диаметру оболочки 0,25...0,5 и совместном печном нагреве компонентов заготовки.

Полученные биметаллические прутки композиции AA6061 + AZ31 с объемной долей магниевого сплава 29 % незначительно (на 7 %) уступают по прочности пруткам из сплава AZ31 и могут быть рекомендованы к применению.

Установлено распределение соотношения диаметров сердечника и оболочки пресс-изделия по его длине, что может служить основой для оптимизации формы заготовки. При использовании цилиндрической формы компонентов заготовки и исходном отношении их диаметров 0,25 доля пресс-изделия с постоянным отношением размеров компонентов составляет немногим более 50 % его длины.

Разработана прессовая оснастка и план дальнейших экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Король В. К. Основы технологии производства многослойных металлов / В. К. Король, М. С. Гильденгорн. – М. : Металлургия, 1970. – 227 с.
2. Биметаллические материалы / М. И. Чепурко, В. Я. Остренко [и др.]. – Л. : Судостроение, 1984. – 272 с.
3. Захаров М. Ф. Опыт получения армированных профилей непосредственно в процессе прессования / М. Ф. Захаров // Вопросы авиационной науки и техники. Технология легких сплавов. – 1986. – Выпуск 2.
4. Перлин И. Л. Теория прессования металлов / И. Л. Перлин. – М. : Металлургия, 1964. – 344 с.
5. Гильденгорн М. С. Основы теории совместного прессования разнопрочных металлов и сплавов / М. С. Гильденгорн. – М. : Металлургия, 1981. – 143 с.
6. Магниевого сплавы : справочник. Ч. 2. / под ред. И. И. Гурьева, М. В. Чухрова. – М. : Металлургия, 1978. – 296 с.
7. А. с. № 198114 / Л. И. Стоклицкий, Ю. А. Воробьев. – 1962.
8. Muller K. B. Direct Extrusion of AA 6060 Through Dies With Coated Bearing Lengths / K. B. Muller, J. Wegener // Proc. of the Sixth International Aluminum Extrusion Seminar. – Chicago : Editors Express, 1996. – Vol. 2. – P. 147–153.

Беляев С. М. – аспирант НМетАУ;

Головкин А. Н. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ;

Новак М. – науч. сотрудник Ганноверского Университета им. Лейбница.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: belyaev@3g.ua