

УДК 621.777

Беляев С. М.
Головко А. Н.
Фролов Я. В.
Бояркин В. В.
Берски Ш.

МЕТОД РАСЧЕТА СИЛЫ ПРЕССОВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ И МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В последнее время в мире растет потребность в изделиях из биметаллов, которые помимо высоких механических свойств и малого веса обладают высокой коррозионной стойкостью. Перспективным видом такой продукции являются изделия из алюминий-магниевого композиций. Областью применения данных изделий является в основном машиностроение, где необходимо применение легких и прочных конструкций [1]. Получение биметаллических изделий прессованием имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами производства [2]. Также следует отметить, что мелкосерийное производство профилей с малым и средним диаметром описанной окружности целесообразно проводить на прессовых установках из-за более широкого сортамента, меньшего количества подготовительных операций и лучшего качества полученного изделия по сравнению с прокаткой.

На сегодняшний день на территории Украины имеется ряд предприятий, на которых, при условии незначительной реконструкции, возможно, производить биметаллические изделия. При разработке технологических инструкций процесса прессования таких изделий на существующем оборудовании возникает задача определения требуемой мощности прессового оборудования.

Мощность прессования N_{II} определяется выражением [3]:

$$N_{II} = P \cdot v_n, \quad (1)$$

где P – сила прессования, Н; v_n – скорость перемещения пресс-штемпеля, м/с.

При прессовании биметаллических изделий, в данном случае алюминий-магниевого композиций, важно правильно определить скорость перемещения пресс-штемпеля. Заданная скорость не должна приводить к дополнительному перегреву слоя из магниевого сплава, и, как следствие, появлению трещин. Также условия течения при этой скорости должны обеспечить необходимое соотношение площадей поперечного сечения композитов по длине профиля.

Сила прессования (P) является суммой сил, необходимых для преодоления сил трения на контакте с инструментом и сил, затрачиваемых на деформацию металла в обжимной части пластической зоны (ОЧПЗ). На рис. 1 приведена диаграмма изменения силы при прямом прессовании. Работа, выполняемая за один цикл, может быть разделена на 3 составляющих: $A_{распр}$ – работа, затрачиваемая при распрессовке заготовки; $A_{тр}$ – работа, затрачиваемая на трение на границе инструмента и заготовки; $A_{деф}$ – работа, затрачиваемая на деформацию в ОЧПЗ [4].

В технической литературе чрезвычайно мало представлены методы расчета усилия прессования биметаллических профилей. В случае прессования биметаллических труб с тонким плакирующим слоем, а также при одинаковых или близких величинах сопротивления деформации металлов наружного и внутреннего слоев, сила прессования рассчитывается как для монометаллических труб.

В работе [5] предложена следующая формула для определения силы прессования биметаллического пресс-изделия:

$$P = \left[n_V \frac{\sigma_T}{\sigma_M} + (1 - n_V) \right] \cdot K_M, \quad (2)$$

где n_V – относительное объемное содержание плакирующего слоя в прутке; σ_T и σ_M – истинное сопротивление деформации в условиях прессования соответственно твердой и мягкой составляющей биметалла; K_M – среднее удельное давление прессования прутков равновеликого сечения из мягкой составляющей биметалла.

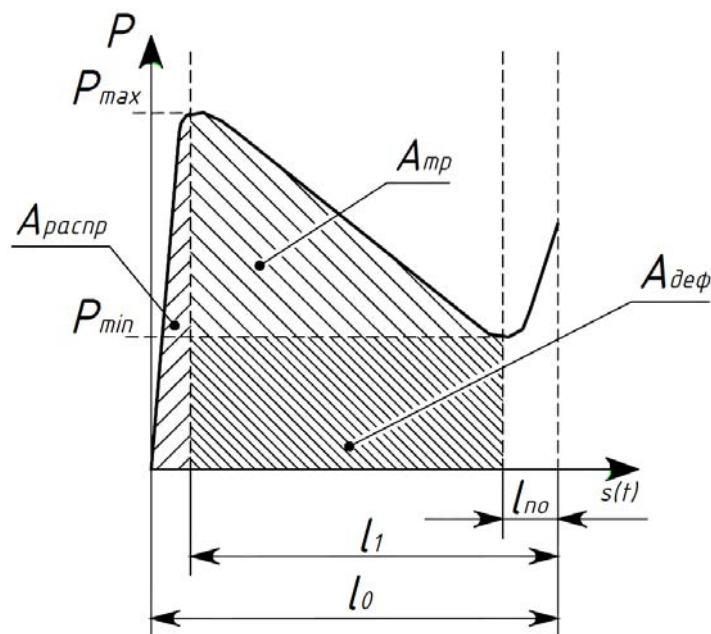


Рис. 1. Диаграмма изменения силы при прямом прессовании (l_0 – начальная длина заготовки; l_1 – длина заготовки после распрессовки; $l_{но}$ – длина пресс-остатка)

Зависимость (2) получена для случая, когда материал наружного слоя имеет больший предел прочности. При обратном соотношении прочностных свойств компонентов биметалла указанная зависимость принимает вид:

$$P = \left[(1 - n_V) \frac{\sigma_T}{\sigma_M} + n_V \right] \cdot K_M. \quad (3)$$

Зависимости (2) и (3) не являются точными, поскольку не учитывают влияние дополнительной неравномерности деформации компонентов биметалла в очаге деформации, вызванной различием их прочностных свойств, а также неоднородностью температурного поля по поперечному сечению биметаллической заготовки.

В работе [6] представлено выражение для определения силы при прессовании биметаллических труб учитывающее геометрические характеристики инструмента и заготовки, а также напряжение текучести:

$$P = 1,25\pi\sigma_{T1}(R_3^2 - R_1^2)(1 - n) \ln \mu + 1,25\pi\sigma_{T2}(R_3^2 - R_1^2)n \ln \mu + 1,16\pi\sigma_{T1}(R_3^2 - R_1^2) \times \\ \left[\frac{\psi_{ab}}{\sin 2\alpha_1} \ln \mu + \frac{\psi_{bc}R_2l_1}{R_2^2 - R_1^2} \right] + 0,58\pi\sigma_{T2} \left\{ \psi_{de} \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_0} \left[(R_3^2 - R_1^2) \left(\ln \mu + 2 \ln \frac{R_2 + R_1}{R_3 + R_1} \right) - 2R_1(R_3 - R_2) \right] + \right. \\ \left. + 2\psi_{ef}\mu R_1l_1 \right\} + 1,16\pi\psi_K\sigma_{T1}R_3L + \\ 0,4\pi\operatorname{tg} \alpha_0 \frac{R_3}{R_3^2 - R_1^2} \left\{ \sigma_{T1} \left[(R_3^3 - R_{p1}^3) - 3R_1^2(R_3 - R_{p1}) \right] + \sigma_{T2} \left[(R_{p1}^3 - R_1^3) - 3R_1^2(R_{p1} - R_1) \right] \right\}, \quad (4)$$

где σ_{T1} , σ_{T2} – пределы текучести внутреннего и наружного слоев; R_1 , R_2 , R_3 – радиус оправки, наружный радиус трубы, внутренний радиус втулки контейнера; R_{P1} , R_{P2} – радиусы раздельной поверхности двухслойной заготовки в распрессованном состоянии и биметаллической трубы; $2\alpha_0$ – угол конусности матрицы; α_1 – отношение наружного радиуса к внутреннему во внутреннем слое; ψ – коэффициент, зависящий от коэффициента трения, формы и размеров очага деформации; l_1 , L – высота пояска матрицы и двухслойной заготовки в распрессованном состоянии; μ – коэффициент вытяжки.

Недостатком выражения (4) является невозможность использовать его при расчете силы прессования профиля сложного поперечного сечения.

Целью настоящей работы является разработка метода расчета силы прессования биметаллических профилей из алюминиевых и магниевых сплавов. Это позволит разработать или оптимизировать процесс производства таких пресс-изделий.

Метод основан на использовании модуля рабочих напряжений [7]; формула для определения силы прессования имеет следующий вид:

$$P = \tau_{KP} \cdot F_3 + M \cdot \ln \mu \cdot F_K, \quad (5)$$

где τ_k – среднее значение напряжения трения на боковой поверхности контейнера; F_3 – площадь поверхности трения заготовки о стенки контейнера; M – модуль рабочего напряжения; μ – коэффициент вытяжки; F_K – площадь поперечного сечения контейнера

При прессовании биметаллических изделий выражение (5) представим в следующем виде:

$$P = \tau_{Al} \cdot F_3 + (M_{Al} \cdot n_V + M_{Mg} \cdot (1 - n_V)) \cdot \ln \mu \cdot F_K, \quad (6)$$

где τ_{Al} – среднее напряжение трения оболочки из алюминиевого сплава о поверхность контейнера (в работе [3] было показано, что для случая горячего прессования алюминиевых сплавов наиболее физически обоснованной является комбинированная модель, основанная на законе Кулона и модели Треска); M_{Al} , M_{Mg} – модули рабочих напряжений компонентов заготовки, являющиеся величинами напряжений на единицу интегральной деформации [3].

Представим значением M в виде:

$$M = m_\sigma \cdot \sigma_T, \quad (7)$$

где σ_T – сопротивление деформации металла при данных температурно-скоростных параметрах; m_σ – коэффициент напряженного состояния, который показывает насколько M больше σ_T при данных условия прессования.

Сопротивление деформации может быть определено по уравнению Хензеля-Шпителя:

$$\sigma_T = A e^{a_1 T} T^{a_9} \varepsilon^{a_2} e^{a_4 / \varepsilon} (1 + \varepsilon)^{a_5 T} e^{a_7 \varepsilon} \dot{\varepsilon}^{a_3} \varepsilon^{a_8 T}, \quad (8)$$

ε – интенсивность деформации (как было показано в работе [8] при интенсивности деформации более 0,35...0,4, σ_T достигает своего максимального значения и далее остается практически постоянным); T – температура; A , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 , a_7 , a_8 , a_9 – коэффициенты регрессии ([9–10]); $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации может быть определена по формуле, приведенной в работе [11]:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V \cdot \ln \mu (1 + \mu) \sqrt{\pi} \sin(\alpha / 2)}{2(\sqrt{F_0} - \sqrt{F_1})}, \quad (9)$$

где F_0 и F_1 – площади сечения контейнера и пресс-изделия, α – угол между осью прессования и мертвой зоной принимается равным 60°, согласно работам [3, 12].

Использование представленного метода позволяет рассчитывать силу прессования биметаллической заготовки на установившемся этапе прессования, характеризующимся равномерным распределением слоев по длине пресс-изделия при незначительных изменениях температуры металла в ОЧПЗ.

Путем обработки диаграмм силы прессов усилием 10 МН Института материаловедения Ганноверского университета им. Лейбница и 13,5 МН ЗАО «Днепропетровский завод «АЛЮМАШ» (примеры вида диаграмм показаны на рис. 2) определены средние значения M и m_σ для данных условий прессования табл. 1.

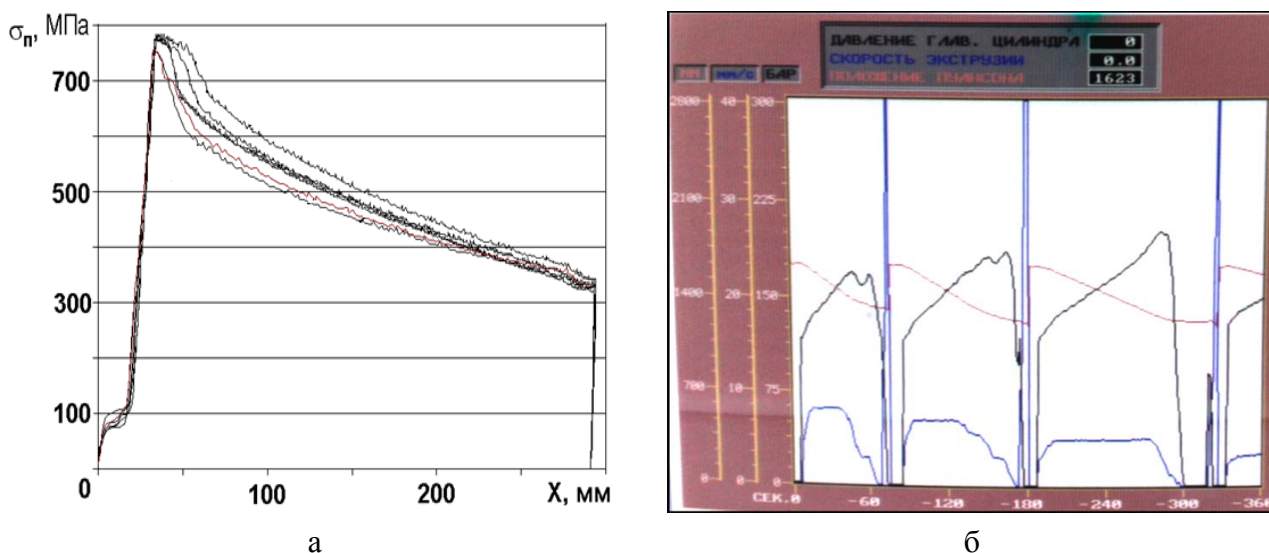


Рис. 2. Прессовые диаграммы при изготовлении профилей из сплава АА6082:

а – изменение среднего напряжения на пресс-шайбе по ходу пресс-штемпеля при прессовании полосы 80×6 ($\mu = 25,5$) на прессе усилием 10 МН при различных температурно-скоростных параметрах; б – вид индикаторных диаграммы на прессе усилием 13,5 МН при прессовании швеллера ($\mu = 45,5$)

Таблица 1

Средние значения M и m_σ

Сплав ¹	μ	$\dot{\varepsilon}$	$T_{\text{вых}}^2 \pm 10, \text{ }^\circ\text{C}$	M	$\sigma_m, \text{ МПа}$	m_σ
АА7005	36,5	3,8	450	114,9	68	1,69
	45,5	4,0	450	119,3	69	1,73
	65,3	5,2	460	123,8	72	1,72
АА6082	25,5	2,6	420	100,7	56	1,80
	36,5	3,8	510	71,8	39	1,84
	45,5	4,0	530	63,6	36	1,77
	65,3	5,2	530	73,8	35	2,11
АА6061	36,5	3,8	520	57,4	33	1,74
	45,5	4,0	490	62,1	36	1,73
	65,3	5,2	510	72,5	40	1,81
АА6005	36,5	3,8	520	52,7	30	1,76
	45,5	4,0	510	66,9	36	1,86
	65,3	5,2	490	70,8	40	1,77
ZK60	39,1	0,53	400	84,9	52	1,63
	39,1	1,07	450	76,7	45	1,70
AZ31	25,5	0,65	350	101,5	56	1,81
	25,5	1,31	350	104,3	61	1,71

Примечания:

1. Аналоги исследуемых сплавов согласно ГОСТ: AA7005 – 1916; AA6082 – АД35; AA6061 – АД33; AA6005 – АД31, ZK60 – МА14, AZ31 – МА2.
2. $T_{\text{вых}}$ – температура профиля на выходе из канала, °С.

Как видно из полученных данных, значение m_σ находится в диапазоне 1,70–2,11 для рассмотренных алюминиевых и магниевых сплавов. Значение m_σ повышается при снижении температуры и повышении скорости деформации при данных условиях. При отсутствии экспериментальных данных в первом приближении можно считать $m_\sigma = 1,8$ в случае прессования сплавов систем Al-Zn-Mg, Al-Mg-Si, Mg-Zn-Zr и Mg-Al-Zn-Mn при $\mu = 25\text{--}65$.

С целью проверки применимости предложенного метода было проведено прессование биметаллического прутка на вертикальном прессе усилием 800 кН из контейнера Ø30 мм через конусную матрицу с длиной рабочего пояса 5 мм и диаметром канала 9 мм. Скорость прессования была постоянной и равной 1,2 мм/с.

Использовалась двухслойная заготовка ($n_v = 0,3$), состоящая из сердечника и оболочки, оба компонента получены из прессованных прутков обточкой. Сердечник из магниевого сплава имел диаметр 15 мм. Оболочка заготовок изготовлена из алюминиевого сплава AA6061, ее наружный диаметр 28 мм, внутренний – 15 мм. Прессование проводилось при температуре заготовки 380 °С и контейнера 400 °С соответственно. На рис. 3 показаны экспериментальные диаграммы силы прессования биметаллической и монометаллических заготовок (температура заготовок из сплавов AZ31 и AA6061 – 330 °С и 450 °С соответственно), а также сила на участке установившегося течения определенная расчетным путем. Разница между экспериментальным и расчетным значениями не превышала 9 %.

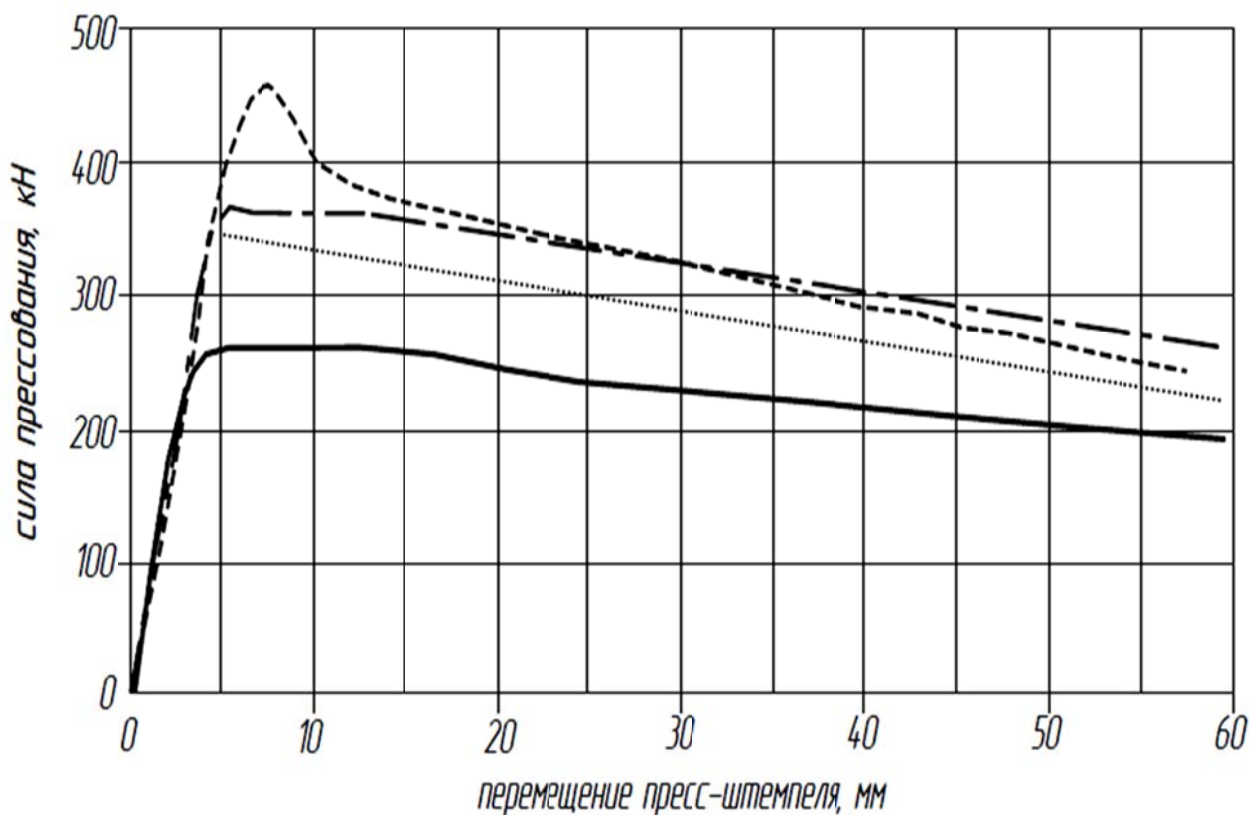


Рис. 3. Диаграммы изменения силы прессования при прессовании двухслойной и однослойных заготовок (--- AZ31; - · - · - AZ31 + AA6061; ···· AZ31 + AA6061 (расчетные значения); — AA6061)

ВЫВОДЫ

Предложен метод расчета силы прессования биметаллических изделий с сердечником из магниевого или алюминиевого сплава и оболочкой из алюминиевого сплава. Метод отличается учетом неоднородного распределения напряжения текучести по слоям заготовки на основании новых экспериментальных данных о реологических свойствах магниевого сплава AZ31 и условиях трения на контакте с контейнером сплавов системы Al-Mg-Si, которые предлагается использовать в качестве наружного слоя. Проведенные экспериментальные исследования показали применимость предлагаемого метода для определения силы прессования биметаллических пресс-изделий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование процесса прессования биметаллических алюминиево-магневых труб / Беляев С. М., Головки А. Н., Воробьев К. Г., Берски Ш. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – № 7. – С. 104–109.
2. Исследование влияния геометрических характеристик заготовки и матрицы на формоизменение при прессовании биметаллических алюминиево-магневых прутков / Данченко В. Н., Дья Х., Головки А. Н. и др. // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (22). – С. 107–112.
3. Перлин И. Л. *Теория прессования металлов* / И. Л. Перлин, Л. Х. Райтбарг. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : *Металлургия*, 1975. – 448 с.
4. Bauser M. *Strangpressen* / M. Bauser, G. Sauer, K. Siegert. – Düsseldorf : Aluminium Verlag, 2001. – 908 s.
5. Голованенко С. А. *Производство биметаллов* / С. А. Голованенко, Л. В. Меандров. – М. : *Металлургия*, 1966. – 304 с.
6. *Биметаллические трубы* / М. И. Чепурко, В. Я. Остренко, Е. А. Резников и др. – М. : *Металлургия*, 1974. – 224 с.
7. Данченко В. Н. *Средняя скорость деформации* / В. Н. Данченко, В. А. Гринкевич, А. Н. Головки // *Теория процессов обработки металлов давлением : учебник*. – Днепропетровськ, 2010. – С. 85–87.
8. *Определение реологических свойств алюминиевого сплава АД31 при горячей деформации* / А. Н. Головки, А. А. Миленин, А. Ю. Гридин, В. А. Коюда // *Металл и литье Украины*. – 2005. – № 6. – С. 50–52.
9. *Численное моделирование процесса прессования прутков с сердечником из магниевого сплава AZ31 и оболочкой из алюминиевых сплавов* / В. Н. Данченко, А. Н. Головки, А. Ю. Гридин, С. М. Беляев // *Вісник НТУУ «КПІ»*. – 2011. – № 62. – С. 141–145. – (Серія «Машинобудування»).
10. Хензель А. *Расчёт энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением : справочник* / А. Хензель, Т. Шпиттель. – М. : *Металлургия*, 1982. – 360 с.
11. Головки А. Н. *Научное обоснование и разработка методов расчета инструмента и режимов прессования специальных профилей высокого качества из алюминиевых и магниевых сплавов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.05* / А. Н. Головки. – Днепропетровск, 2008. – 371 с.
12. Щерба В. Н. *Прессование алюминиевых сплавов* / В. Н. Щерба. – М. : *Интернет инжиниринг*, 2001. – 768 с.

Беляев С. М. – магистр, ассистент НМетАУ;

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

Фролов Я. В. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ;

Бояркин В. В. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ;

Берски Ш. – канд. техн. наук, сотрудник Ченстоховской политехники.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.
Ченстоховская политехника, г. Ченстохов, Польша.

E-mail: belyaev@i.ua

Статья поступила в редакцию 22.12.2011 г.