

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ТРУБ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Mg-Sc**Головко А. Н., Андреев В. В., Третьяк А. Ю.**

Применение современных алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Sc в отечественной промышленности существенно затруднено, что связано с большими энергозатратами на изготовление продукции либо вообще с неосуществлением процесса деформации. Однако актуальной остается задача освоения производства широкого сортамента бесшовных труб из данных типов сплавов методами обработки давлением, например с использованием прямого горячего прессования. На основании этого в работе проведено исследование комплексного влияния деформационных и температурно-скоростных параметров процесса прямого горячего прессования труб из сплава системы Al-Mg-Sc на энергосиловые параметры, в частности силу прессования. Определено уравнение регрессии для расчета силы прессования труб, адекватность которого подтверждена экспериментальными данными. На основе полученных данных в лабораторных условиях получены бесшовные трубы, которые могут использоваться в машиностроении в качестве аналогов-заменителей стальных.

Застосування сучасних алюмінієвих сплавів системи Al-Mg-Sc у вітчизняній промисловості істотно ускладнено, що пов'язано з великими енерговитратами на виготовлення продукції або взагалі з неможливістю процесу деформації. Однак актуальною залишається задача освоєння виробництва широкого сортаменту безшовних труб з даних типів сплавів методами обробки тиском, наприклад з використанням прямого горячого пресування. На підставі цього в роботі проведено дослідження комплексного впливу деформаційних і температурно-швидкісних параметрів процесу прямого горячого пресування труб із сплаву системи Al-Mg-Sc на енергосилові параметри, зокрема силу пресування. Визначено рівняння регресії для розрахунку сили пресування труб, адекватність якої підтверджена експериментальними даними. На основі отриманих даних в лабораторних умовах отримані безшовні труби, які можуть використовуватися в машинобудуванні в якості аналогів-замінників сталевих.

The use modern aluminum alloys Al-Mg-Sc in the domestic industry significantly hampered because of the large amounts of energy to manufacture products, or even to non-implementation of the deformation process. However, topical task mastering the production of a wide assortment of seamless pipes from these types of alloys by forming, such as using direct hot pressing. On the basis of this we have investigated the combined effect of deformation, temperature and velocity parameters of the direct hot extrusion pipes from alloy of Al-Mg-Sc in the power parameters, in particular by pressing. Defined by a regression equation to calculate the extrusion force of tube, adequacy of which is confirmed by experimental data. Based on the data obtained in the laboratory seamless pipes, which can be used in mechanical engineering as a substitute of steel counterparts.

Головко А. Н.

д-р техн. наук, проф. НМетАУ

Андреев В. В.

мл. науч. сотрудник НМетАУ
vitaliiandreiev@gmail.com

Третьяк А. Ю.

аспирант НМетАУ

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

УДК 621.77.22:621.77.014

Головко А. Н., Андреев В. В., Третяк А. Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ТРУБ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Mg-Sc

Материалы, применяемые в современных конструкциях, помимо высоких прочностных характеристик должны обладать комплексом таких свойств как малая плотность и повышенная коррозионная стойкость, а также жаропрочность, теплопроводность, способность сохранять эти свойства в условиях длительной работы под нагрузками. Для обеспечения этих требований происходит постоянное совершенствование химического состава алюминиевых сплавов легирующими элементами, а также технологических процессов получения из них изделий.

Одними из наиболее перспективных сплавов, применение которых возможно в транспортном машиностроении, и авиационно-космической промышленности в частности, являются алюминиевые сплавы системы Al-Mg-Sc [1, 2]. Однако в мировой промышленности, среди которой не представлены предприятия Украины, освоено производство лишь небольшого сортамента продукции из них, таких как холоднокатаный лист, горячекатаные плиты, штамповки. Это связано с тем, что наличие высоких прочностных характеристик данных сплавов приводит к большим энергозатратам либо вообще к неосуществлению процесса. Актуальной остается задача освоения производства широкого сортамента бесшовных труб методами обработки давлением, например с использованием прямого горячего прессования. В частности это возможно на мощностях украинских предприятий, таких как: ЧАО «Донецкий завод алюминиевых профилей» (г. Донецк), Днепровский завод «Алюмаш» (г. Днепрпетровск), ООО «Алюпол» (пгт. Бородянка), ПАО «Сумское машиностроительное научно-производственное объединение им. М. В. Фрунзе» (г. Сумы) и ряда других.

Для решения поставленной задачи необходимо определение комплексного влияния технологических параметров производства на энергосиловые параметры, среди которых требуемая мощность прессового оборудования (N_{II}), которая определяется из выражения [3]:

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

где P – сила прессования, Н;

v_n – скорость перемещения пресс-штемпеля, м/с.

Силу прессования можно определить с помощью большого числа формул. Все эти формулы можно разделить на несколько групп в соответствии с основными гипотезами и упрощениями, заложенными при их выводе. Например, формулы С. И. Губкина и Е. П. Унксова основываются на решении дифференциальных уравнений равновесия в главных нормальных напряжениях, которые соединяются по плоским поперечным сечениям пластической зоны. Формулы В. В. Соколовского, А. Д. Томленова, Л. А. Шофмана выведены на основе решений общих уравнений равновесия с привлечением метода характеристик. Для практических расчетов силы прессования можно использовать формулу Л. В. Прозорова [4]:

$$P = (4...5) \cdot F_k \cdot \sigma_B \cdot (1 + f \cdot \frac{L_3}{D_k}) \ln \lambda, \quad (2)$$

где F_k – площадь поперечного сечения контейнера;

σ_B – предел прочности прессуемого материала;

f – коэффициент трения на боковой поверхности контейнера;

L_3 – длина распрессованной заготовки в контейнере;

D_k – диаметр контейнера;

λ – коэффициент вытяжки.

Наибольшее распространение получили формулы И. Л. Перлина, которые выведены путем совместного решения приближенных дифференциальных уравнений равновесия и условий пластичности [3]:

$$P = R_M + T_K + T_M + T_{II} + T_{III} + Q, \quad (3)$$

где R_M – сопротивление металла заготовки пластической деформации;

T_K – силы трения, возникающие на боковых поверхностях контейнера и иглы, если прессуются трубы;

T_M – силы трения, возникающие на поверхности конической матрицы или поверхности «мертвых» зон;

T_{II} – силы трения металла о поверхность калибрующего пояса матрицы,

T_{III} – силы трения, возникающие на поверхности контакта между металлом и пресс-шайбой;

Q – противодействие или натяжение.

Однако использование всех этих формул затруднено в случае применения для производственных расчетов, например для быстрой оптимизации технологического процесса.

Целью настоящей работы является определение закономерностей влияния деформационных и температурно-скоростных параметров процесса на энергосиловые параметры (сила и мощность) процесса прямого горячего прессования труб из алюминий-магниевого сплава, дополнительно легированных скандием.

Для достижения поставленной цели работы были сформулированы следующие задачи исследований:

- при помощи математического моделирования определить совместное влияние деформационных и температурно-скоростных параметров процесса прессования сплава системы Al-Mg-Sc на его энергосиловые параметры;
- экспериментально подтвердить результаты численного моделирования по определению влияния основных технологических параметров процесса прямого горячего прессования труб на энергосиловые параметры.

Материалом для исследований был выбран сплав системы Al-Mg-Sc, который содержит ~6 % Mg, добавки Mn, Cu, Zn и некоторых других элементов [5].

Математическое моделирование проводилось при помощи конечно-элементной программы Forge3D®, разработанной CEMEF, Ecole des Mines de Paris. Она предназначена для объемного термомеханического моделирования процесса пластической деформации как моно-, так и биметалла [6].

Расчеты в Forge® основаны на вариационном принципе Лагранжа, функционал которого сформулирован как:

$$I = \int_V (\int_0^H T dH) dV - \int_V F_i U_i dV - \int_S f_i U_i dS, \quad (4)$$

где T – интенсивность касательных напряжений;

H – интенсивность скоростей деформации смещения;

F_i, f_i, U_i – соответственно проекции векторов объемных сил, поверхностных нагрузок и скоростей течения;

S – площадь поверхности;

V – объем.

Реологические свойства материала описывали с применением уравнения Хензеля-Шпиттеля [7], в виде:

$$\sigma_T = A e^{a_1 T} T^{a_2} \varepsilon^{a_3} e^{a_4 / \varepsilon} (1 + \varepsilon)^{a_5 T} e^{a_7 \varepsilon} \dot{\varepsilon}^{a_3} \dot{\varepsilon}^{a_8 T}, \quad (5)$$

где σ_m – напряжение текучести;

ε – интенсивность деформации;

$\dot{\varepsilon}$ – интенсивность скорости деформации;

T – температура;

$A, a_1...a_9$ – коэффициенты регрессии (табл. 1), которые были получены на основе статистического анализа экспериментальных кривых упрочнения исследуемого сплава.

Таблица 1

Коэффициенты регрессии уравнения Хензеля-Шпиттеля

A	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_7	a_8	a_9
270	-0,0053	0,1755	0,03527	0,00402	0,000677	-0,36509	0,00016137	0,28085

Теоретическое исследование проводилось при использовании методики экспериментального исследования на основе полнофакторного эксперимента 2^4 [8]. Искомой функцией являлась сила, возникающая на пресс-штемпеле в процессе деформации. Основными варьируемыми факторами выбраны:

– температура T : $X_1^+ = 390$ °С, $X_1^- = 360$ °С;

– угол конусности матрицы α : $X_2^+ = 120^\circ$, $X_2^- = 90^\circ$;

– коэффициент вытяжки λ : $X_3^+ = 28$; $X_3^- = 11$;

– скорость прессования V : $X_4^+ = 5$ мм/с, $X_4^- = 1$ мм/с.

Для анализа искомой функции использовались графики распределения силы на пресс-штемпеле в зависимости от времени перемещения. Из полученных значений отбиралось максимальное значение силы, что позволило определить искомую функцию (табл. 2).

Таблица 2

Матрица ПФЭ и значения искомой функции

№ п/п	$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \text{град}$	λ	$V, \text{мм/с}$	$P_{\text{пш}}, \text{кН}$	$\sigma_{\text{пш}}, \text{Н/мм}^2$	$N, \text{кВт}$
	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2	Y_3
1	+	+	+	+	823,5	594,7	4,12
2	+	+	+	-	762,4	550,6	0,76
3	+	+	-	+	553,9	400,0	2,77
4	+	+	-	-	505,9	365,3	0,51
5	+	-	+	+	832,7	601,3	4,16
6	+	-	+	-	784,8	566,7	0,78
7	+	-	-	+	561,1	405,2	2,81
8	+	-	-	-	531,2	383,6	0,53
9	-	+	+	+	938,4	677,7	4,69
10	-	+	+	-	874,7	631,6	0,87
11	-	+	-	+	625,9	452,0	3,13
12	-	+	-	-	582,3	420,5	0,58
13	-	-	+	+	959,4	692,9	4,80
14	-	-	+	-	876,6	633,1	0,88
15	-	-	-	+	638,0	460,7	3,19
16	-	-	-	-	620,7	448,3	0,62

В результате определено полное уравнение регрессии силы на пресс-штемпеле (кН), возникающей при прессовании труб из выбранного для исследований алюминиевого сплава (3):

$$\begin{aligned}
 Y = & 73,16 - 4,8513X_1 - 0,8762X_2 + 14,25X_3 + 2,515X_4 + 0,06X_{12} - \\
 & - 0,834X_{13} - 0,131X_{14} + 0,181X_{23} + 0,246X_{24} + 0,745X_{34} - 0,17X_{123} + \\
 & + 0,153X_{124} - 0,349X_{134} - 0,321X_{234} + 0,257X_{1234}.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Для упрощения расчетов уравнение (6) можно записать в сокращенном виде (7), т. е. без учета совместного влияния факторов – это приведет к завышению результата лишь на 0,2 % по сравнению с исходным выражением:

$$Y = 73,16 - 4,8513X_1 - 0,8762X_2 + 14,25X_3 + 2,515X_4. \quad (7)$$

Анализируя уравнение (6) видно, что существенное влияние на процесс прессования оказывают три фактора – температура, вытяжка и скорость прессования. Т. к. при компьютерном моделировании невозможна проверка полученной математической зависимости на адекватность по методике, использованной при планировании исследования, оценку проводили путем сравнения значений силы, полученных при компьютерном моделировании, и при использовании уравнений регрессии. На рис. 2 приведен пример кривых распределения искомой функции в зависимости от температуры нагрева заготовки и скорости прессования при прочих равных условиях. Анализ полученных данных показал небольшое расхождение в значениях, которое находится в диапазоне относительной погрешности $\pm 2\%$.

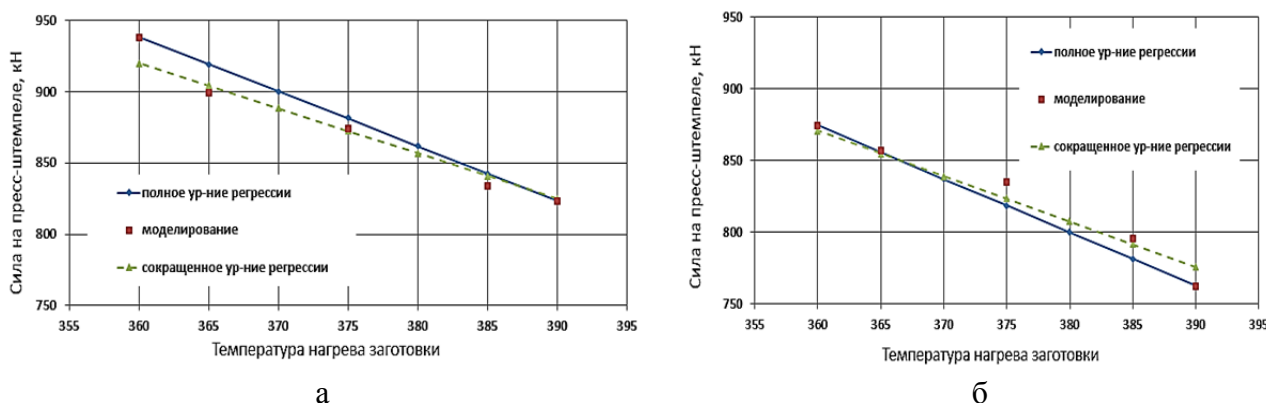


Рис. 2. Сравнение данных по силе на пресс-штемпеле, полученных при моделировании и при расчете с использованием уравнения регрессии при:

а – $X_2 = 120^\circ$, $X_3 = 28$, $X_4 = 5$ мм/с; б – $X_2 = 120^\circ$, $X_3 = 28$, $X_4 = 1$ мм/с

Параллельно с компьютерным моделированием проводилось экспериментальное исследование процесса прямого горячего прессования в условиях лаборатории кафедры ОМД Национальной металлургической академии Украины на гидравлическом прессе усилием 1,6 МН.

Для исследований использовались цилиндрические заготовки в виде прошитых гильз (рис. 3). Также на рис. 3 приведен вид готовой трубы полученной в процессе прямого горячего прессования. Температура нагрева для всех случаев прессования составляла: заготовки 390°C , контейнера 380°C , матрицы 400°C . Скорость перемещения пресс-штемпеля составляла 5 мм/с. Использовалась смазка дисульфидмолибден MoS_2 . В процессе деформации металла фиксировалась сила прессования, которая приведена в табл. 3.

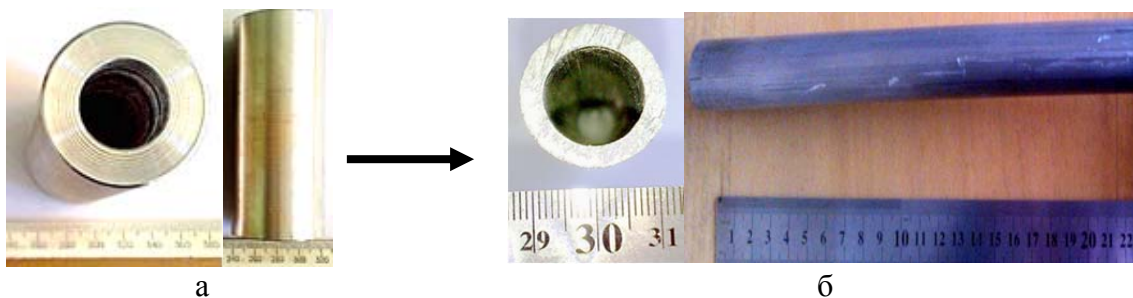


Рис. 3. Исходная заготовка для экспериментальных исследований:
а – заготовка $\text{Ø}42 \times 13$ мм; б – готовая труба $\text{Ø}22,5 \times 3,5$ мм

Таблица 3

Максимальные значения силы прессования в процессе экспериментальных исследований и их сравнение с расчетными данными

Размер трубы, мм	Коэффициент вытяжки, λ	Сила прессования (эксперимент), кН	Сила на пресс-штемпеле (расчет), кН	Отклонение δ , %
Ø26,0 × 4,0	4,0	490,0	449,2	8,3
Ø22,5 × 3,5	5,7	519,4	476,4	8,3
Ø15,5 × 1,5	18,0	705,6	672,9	4,6

Как видно из табл. 3, отклонение расчетных данных от экспериментальных находится в диапазоне 5...9 %. При этом, все результаты, полученные расчетным путем, являются заниженными по сравнению с экспериментальными. А снижение величины погрешности стремится к нулю в случае приближения исходных экспериментальных технологических параметров процесса прессования к диапазону величин, которые были заложены в ПФЭ. Тем самым, увеличив величину свободного члена до значения 76,5 в уравнениях регрессии (6 и 7 соответственно), получим практически полное совпадение результатов.

ВЫВОДЫ

Теоретически определено комплексное влияние деформационных и температурно-скоростных параметров прямого горячего прессования труб из алюминиевого сплава системы Al-Mg-Sc на энергосиловые параметры процесса.

С помощью компьютерного моделирования и методов планирования эксперимента определено уравнение регрессии для расчета силы прессования труб из алюминиевого сплава системы Al-Mg-Sc в процессе прямого горячего прессования, адекватность которого подтверждена экспериментальными данными. Экспериментально определена сила прессования и подтверждена адекватность полученных коэффициентов регрессии.

На основе теоретически полученных данных о влиянии технологических параметров процесса прямого горячего прессования труб в лабораторных условиях получены бесшовные трубы, которые могут использоваться в машиностроении в качестве аналогов-заменителей стальных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатов Ю. А. Деформируемые сплавы на основе системы Al-Mg-Sc и перспективы их применения в автомобилестроении / Ю. А. Филатов // Цветные металлы. – 1997. – № 2. – С. 60–62.
2. Автократова Е. В. Перспективный Al-Mg-Sc сплав для самолетостроения / Е. В. Автократова // Вестник уфимского государственного авиационного технического университета. – 2007. – Т. 9. – № 1. – С. 182–183.
3. Перлин И. Л. Теория прессования металлов / И. Л. Перлин, Л. Х. Райтбарт. – М. : Металлургия, 1975. – 447 с.
4. Прозоров Л. В. Прессование стали и тугоплавких сплавов / Л. В. Прозоров. – М. : Машиностроение, 1969. – 243 с.
5. Елагин В. И. Алюминиевые сплавы, легированные скандием / В. И. Елагин, В. В. Захаров, Т. Д. Ростова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1992. – № 1. – С. 24–28.
6. Forge 3 - a general tool for practical optimization of forging sequence of complex three-dimensional parts in industry / Chenot J. L., Fourment L., Coupez T, Ducloux R., Wey E. // Forging and Related Technology. – Birmingham, (UK). – 1998. – P. 113–122.
7. Thilo Spittel. Ferrous Alloys. V. 2 / Thilo Spittel, Marlene Spittel. – New York : Springer, 2009. – P. 800.
8. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 320 с.