

В.Н. Данченко¹, д-р.техн.наук, проф., А.Н. Головки¹, д-р.техн.наук, проф., Ш. Берски², канд.техн.наук, С.М. Беляев¹, маг.

1 - Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

2 - Ченстоховская политехника

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ПРУТКОВ С СЕРДЕЧНИКОМ ИЗ МАГНИЕВОГО СПЛАВА AZ31 И ОБОЛОЧКОЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

У роботі розглядається формозмінення в обтискній частині пластичної зони (ОЧПЗ) біметалевої заготовки, яка складається з осердя з магнієвого сплаву системи Mg-Al-Zn-Mn і оболонки з алюмінієвих сплавів систем Al, Al-Mg-Si та Al-Zn-Cu-Mg, за допомогою програмного пакету Forge3D®. Обґрунтовано застосування даної композиції в машинобудуванні та розроблено план експерименту. Досліджено вплив температурно-швидкісних параметрів пресування і співвідношення механічних властивостей осердя і оболонки на формозмінення заготовки та якість прес-виробів.

The forming in deformation zone of bimetallic billet that consists of Mg-Al-Zn-Mn magnesium alloy core and Al, Al-Mg-Si, Al-Zn-Cu-Mg aluminum alloys shell using the software package Forge 3D® was investigated in the present paper. The application of this composition in machine building was substantiated and the plan of the numerical experiment was developed. The influence of temperature-speed parameters and ratio of mechanical properties of the core and the shell on forming of billet and quality of press-product was investigated.

В последнее десятилетие в машиностроении растет потребление конструкций, которые наряду с высокой прочностью обладают малой массой. Перспективным решением поставленной задачи является использование биметаллических алюминий-магниевого композиций, в которых наружный слой выполнен из коррозионностойкого алюминиевого сплава, а внутренний – из магниевого сплава, основываясь на том, что среди конструкционных сплавов магниевого сплавы имеют высокую удельную прочность при высоких значениях относительного удлинения (рис. 1) [1]. Применение указанной композиции позволит снизить массу пресс-изделий по сравнению с алюминием и повысить их коррозионную стойкость в сравнении с магниевыми сплавами. Рассмотрим некоторые важные особенности прессования биметаллов с продольной слоистостью.

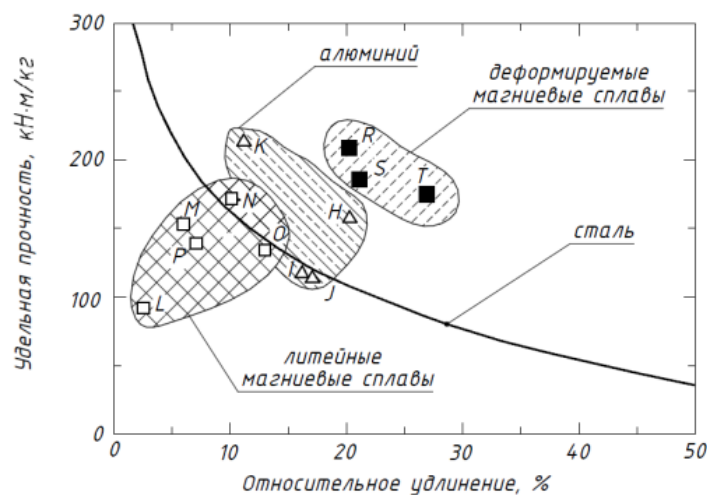


Рис. 1. Связь между удельной прочностью и относительным удлинением стали, алюминиевых и магниевых сплавов (Алюминий: Н – 2024 (Т4); I – 5083 (Н32); J – 6061 (Т6); К – 7075 (Т6). Магнієві сплави: L – AZ91С-F; М – AZ91С-Т6; N – ZK61А-Т6; O – AM60А; P – AZ91А; R – ZK60А; S – ZK60; T – AZ31)

Прессование биметаллических профилей из двухслойных и биметаллических заготовок – наиболее перспективный способ, позволяющий изготавливать трубы широкого сортамента из многих сочетаний металлов [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.

Скорость прессования магниевых сплавов ограничена деформационным разогревом и низкой температурой солидуса – диапазон температур и скорости прессования магниевых сплавов значительно меньше, чем алюминиевых сплавов. В работе [3] указано, что температура прессования магниевых сплавов находится в диапазоне 280–410°C, а скорость – в диапазоне 9–15 м/мин (для сплава AZ31).

При совместном прессовании вышеуказанных сплавов необходимо обратить внимание на то, что при данных условиях активно протекает диффузия на контакте двух слоев, что может привести к образованию хрупкой интерметаллической β-фазы Al_2Mg_3 при температуре 437°C, наличие которой на контакте двух слоев может привести к ухудшению связи между ними. В работе [4] исследовано влияние технологических факторов на микроструктуру контактного слоя полученных биметаллических пресс-изделий. Однако, вопросы влияния технологических параметров процесса прессования биметаллических заготовок на формоизменение и качество пресс-изделия практически не освещены.

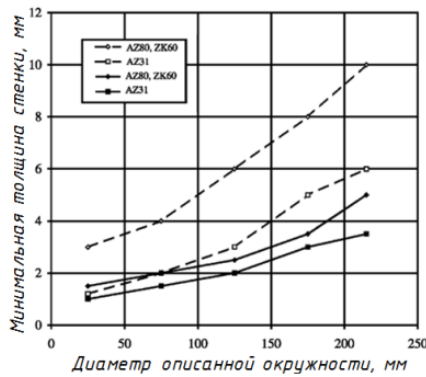


Рис. 2. Минимальная толщина стенки профилей из магниевых сплавов в зависимости от марки сплава и типа профиля (— сплошные профили, --- полые профили)

Целью настоящей работы является исследование температурно-скоростных параметров прессования и соотношения механических свойств сердечника и оболочки на формоизменение заготовки в ОЧПЗ и качество пресс-изделий.

В качестве исследуемого магниевое сплава был выбран сплав AZ31 (ближайший аналог согласно ГОСТ – сплав МА2), так этот сплав характеризуется высокими механическими свойствами (табл. 1) и высокой пластичностью в горячем состоянии по сравнению с другими магниевыми сплавами (рис. 2), что позволяет изготавливать из него пресс-изделия с малой толщиной стенки [5].

В качестве алюминиевой оболочки в базовом варианте выбран алюминиевый сплав 606035 (табл. 1) (по классификации Hydro Aluminium, ближайшим аналогом которого по ГОСТ 4784–97 является сплав АД31). Это – термически упрочняемый сплав системы Al–Mg–Si, пресс-изделия из которого имеют хорошее качество поверхности, свариваемость, сопротивление коррозии и пластичность при горячей деформации. Рекомендуемые параметры прессования данного сплава: температура нагрева контейнера 400°C, температура нагрева заготовки 430–470°C, скорость прессования 40 м/мин [6].

Таблица 1

Свойства магниевых и алюминиевых сплавов, используемых при проведении моделирования

Сплав	Состояние	Модуль упругости, ГПа	Плотность, г/см ³	Кэфф. Пуассона	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Сопротивление коррозии	
								Общее	коррозии под напряжением
AZ31	F	45	1,77	0,35	250	180	7	-	-
606035	T4	69	2,70–2,71	0,33	150	70	23	A	A
1100	O	69	2,71	0,33	75–105	20	25	A	A
7075	O	71	2,8	0,33	275	–	10	C	C

Примечания: F – без специальной обработки; T4 – закалка и естественное старение; O – в отожженном состоянии. Нумерация от А до С при оценке сопротивления коррозии является относительной в порядке ухудшения свойств.

На основании приведенного выше были выбраны следующие значения варьируемых параметров (табл. 2, рис. 3):

Таблица 2

Значения варьируемых параметров

Варируемые параметры	Единица измерения	Значения
Скорость прессования	мм/с	1; 4
Температура заготовки	°C	380; 400; 420
Марка сплава оболочки (EN AW)		1100; 606035; 7075

С целью оценки влияния соотношения механических свойств оболочки и сердечника на формоизменение в ОЧПЗ использовались различные алюминиевые сплавы (табл. 2), имеющие различный характер деформационного упрочнения при исследуемых условиях прессования (рис. 4).

Исследование формоизменения и изменения температуры металла при прессовании проводилось при помощи конечноэлементной программы Forge 3D®, разработанной SEMEF, Ecole des Mines de Paris. Она предназначена для объемного термомеханического моделирования процесса пластической деформации как моно-, так и биметалла [7].

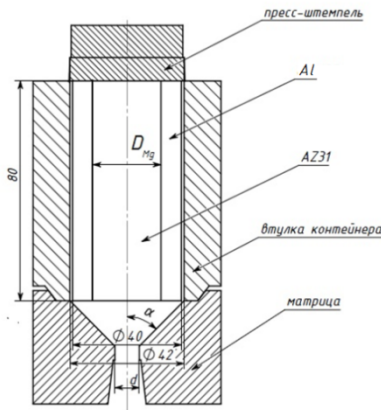


Рис. 3. Схематическое изображение сборки инструмента и заготовки

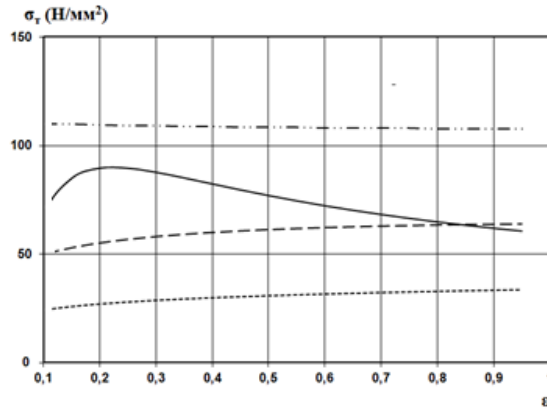


Рис. 4. Кривые деформационного упрочнения при 400°C и 1 с⁻¹ (---7075, — AZ31, -- 606035 и -1100)

Геометрия инструмента и заготовки, которая использовалась при моделировании, задана с использованием САПР SolidWorks 2010. С целью снижения времени моделирования рассматривалась 1/4 часть заготовки относительно оси прессования, после чего в препроцессоре были заданы плоскости симметрии. Для контроля перестройки сетки в ОЧПЗ использован так называемый “mesh-box”, который позволяет контролировать размер элементов в рассматриваемом объеме.

Расчет в Forge 3D® основан на вариационном принципе Лагранжа, функционал которого сформулирован следующим образом:

$$I = \int_V \left(\int_0^H T dH \right) dV - \int_V F_i U_i dV - \int_S f_i U_i dS \quad (1)$$

где T – интенсивность касательных напряжений; H – интенсивность скоростей деформации сдвига; 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 использованием уравнения Хензеля-Шпиттеля [8]:

$$\sigma_T = A e^{a_1 T} T^{a_9} \varepsilon^{a_2} e^{a_4/\varepsilon} (1 + \varepsilon)^{a_5 T} e^{a_7 \varepsilon} \dot{\varepsilon}^{a_3} \dot{\varepsilon}^{a_8 T} \quad (2)$$

где σ_T – напряжение текучести, ε – интенсивность деформации; $\dot{\varepsilon}$ – интенсивность скорости деформации, T – температура, $A, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_7, a_8, a_9$ – коэффициенты регрессии.

Для сплава 606035 используемого в качестве оболочки, коэффициенты регрессии были получены путем обработки данных работы [9] (результаты приведены в табл. 3). Для определения значений коэффициентов регрессии для магниевого сплава AZ31 были проведены испытания на пластометре Ганноверского университета им. Лейбница диапазон варьирования $\varepsilon = 0 \dots 0,9$, $\dot{\varepsilon} = 0,25 \dots 2 \text{ с}^{-1}$. После обработки кривых упрочнения (рис. 5) получены коэффициенты регрессии (табл. 3). Для моделирования алюминиевых сплавов 1100 и 7075 коэффициенты регрессии были взяты из базы данных FPDBASE Forge.

Таблица 3

Коэффициенты регрессии, уравнения Хензеля–Шпиттеля используемых сплавов

Сплав	Коэффициенты регрессии									R
	A	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_7	a_8	a_9	
AZ31	148	-0,003745	-0,700926	-0,048908	-0,149686	-0,000226	0,206468	0,000354	0,098741	0,99
606035	100	-0,005416	0,185519	0,188488	0,000060	-0,000682	-0,011027	-0,000106	0,320715	0,97
1100	250,67891	-0,00499	0,12638	0,13513	-0,00525	–	–	–	–	
7075	731,55463	-0,00479	-0,01383	0,09964	-0,0011	–	–	–	–	

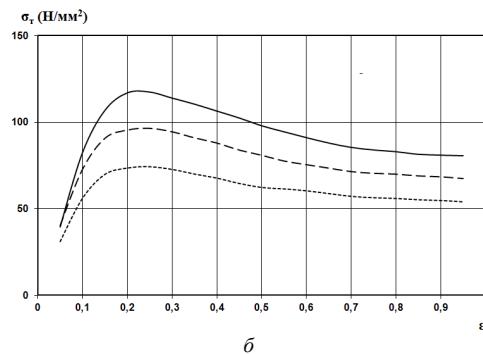
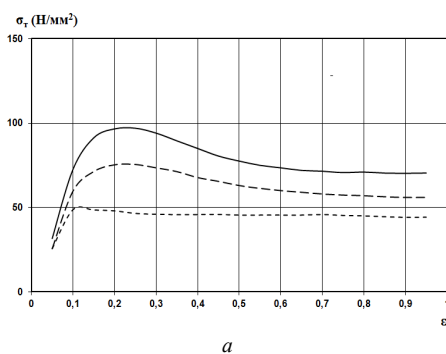


Рис. 5. Зависимость напряжения текучести от степени деформации, скорости деформации ($a - \dot{\varepsilon} = 0,25 \text{ с}^{-1}$; $b - \dot{\varepsilon} = 2 \text{ с}^{-1}$) и температуры ($- T=350^\circ\text{C}$; $-- T=400^\circ\text{C}$; $— T=450^\circ\text{C}$) магниевого сплава AZ31

Важной составляющей определения граничных условий при моделировании в конечноэлементной программе является задание контактного трения на границе между сердечником и оболочкой, а также между заготовкой и инструментом. Согласно данным, приведенным в работе [10] на контакте сердечника и оболочки было принято полное прилипание. На контакте оболочки и сердечника использовалась комбинированная модель закона Кулона и модели Треска:

$$\tau = -f\sigma_n \frac{\Delta V}{|\Delta V|} \text{ при } f\sigma_n < \frac{\sigma_t}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

$$\tau = -\bar{m} \frac{\sigma_t}{\sqrt{3}} \frac{\Delta V}{|\Delta V|} \text{ при } f\sigma_n > \bar{m} \frac{\sigma_t}{\sqrt{3}}, \quad (4)$$

где f – коэффициент трения; σ_n – нормальные напряжения на контакте; σ_t – напряжение текучести; ΔV – разница скоростей контактных поверхностей; \bar{m} – так называемый фактор среза или фактор трения, который может варьироваться от 0 до 1.

Согласно работе [10] расчет контактного трения между втулкой контейнера и оболочкой заготовки производится по закону Кулона, когда контактное напряжение не велико, что соответствует началу распрессовки с коэффициентом трения $f=0,25$; после распрессовки расчет ведется согласно модели Треска со значением $\bar{m} = 0,85$. На конусе матрицы использовалась смазка – дисульфид молибдена (MoS_2), коэффициент трения для которой находится в диапазоне 0,05–0,13 согласно работе [11]; т.к. при прессовании достигаются высокие значения контактного напряжения было принято значение 0,13.

Моделирование проводилось до этапа, когда длина прутка составляла 10% от максимальной длины, после чего формоизменение металла в ОЧПЗ можно считать установившимся. Определяли максимальную силу прессования, максимальную температуру металла, интенсивность деформации, распределение полей скоростей, длину переднего монометаллического конца (рис. 2) и разницу между значением диаметра сердечника полученным в результате моделирования и расчетным значением диаметра:

$$d_{Mg} = \sqrt{\left(\frac{D_{Mg}^2 \cdot d^2}{D_k^2} \right)}, \quad (5)$$

где d_{Mg} – расчетное значение диаметра сердечника из магниевого сплава в прутке; D_{Mg} – диаметр сердечника из магниевого сплава в заготовке; d – диаметр канала; D_k – внутренний диаметр втулки контейнера.

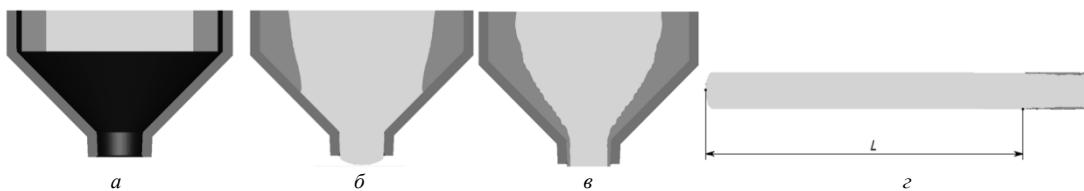


Рис. 6. Стадии процесса прессования биметаллической заготовки и вид переднего монометаллического конца (L – длина переднего монометаллического конца): a – начало прессования; b – окончание распрессовки заготовки; c – установившийся процесс прессования биметаллической заготовки; d – вид переднего конца

Как видно на рис. 7 при прессовании заготовок с различными алюминиевыми сплавами в качестве оболочки наибольшее значение интенсивности деформации имеет место в оболочке из алюминиевого сплава 1100 и в области контакта между слоями с оболочкой из сплава 7075. При прессовании с оболочкой из сплава 606035 интенсивность деформации по слоям заготовки распределена наиболее равномерно, что объясняется малой разницей в напряжении текучести материалов слоев при температуре деформирования. Диаметр сердечника во всех трех случаях превышал расчетное значение на 10%. Минимальная сила прессования наблюдалась при использовании оболочки из сплава 1100, а максимальная – при использовании сплава 7075 (как наиболее прочного).

Длина переднего монометаллического конца максимальна в случае прессовании заготовки с оболочкой из сплава 7075. Это может быть объяснено разницей в скоростях в ОЧПЗ (рис. 8). Наиболее равномерное распределение скоростей на выходе из ОЧПЗ наблюдается при использовании оболочки из более мягкого (в условиях деформирования) металла (1100).

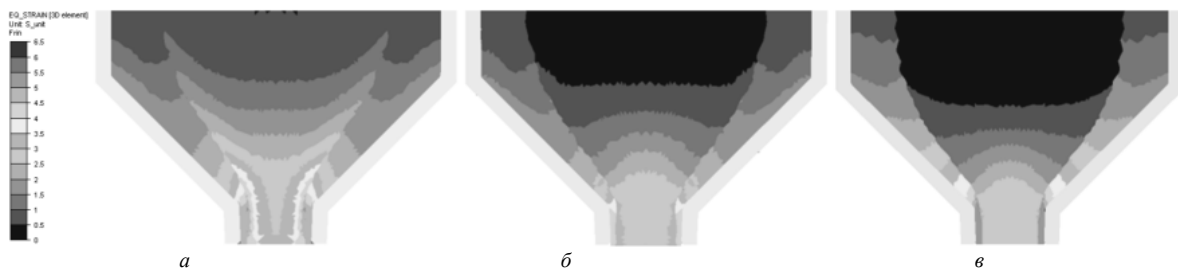


Рис. 8. Распределение скорости течения металла при использовании различных алюминиевых сплавов в качестве оболочки: a – 7075; b – 606035; c – 1100

С повышением температуры и/или скорости прессования при прессовании с оболочкой из сплава 606035 изменяется сила прессования и температура прутка на выходе (рис. 9). Распределение интенсивности деформации в ОЧПЗ не изменяется, что может быть объяснено тем, что механические свойства магниевого и алюминиевого сплавов не имеют значительных отличий с повышением значений температурно-деформационных параметров.

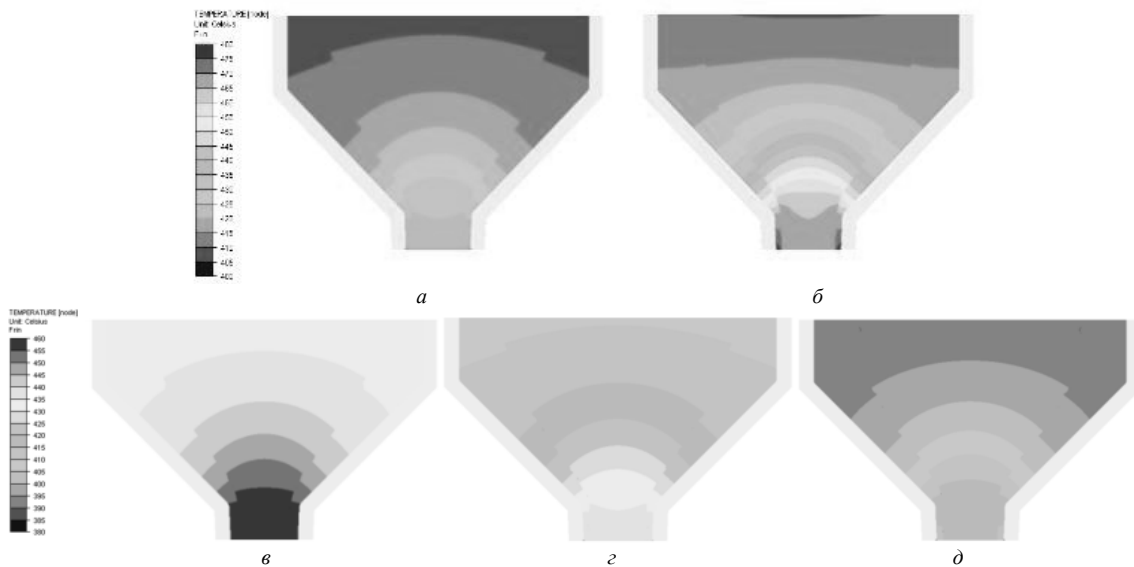


Рис. 9 – Распределение температуры при прессовании с разными скоростями перемещения пресс-штемпля и температурами нагрева заготовки: а и б – $V=1$ м/с и $V=4$ м/с; в, г, д – $T_3=380^\circ\text{C}$; 400°C ; 420°C

Выводы.

Проведены теоретические исследования процесса прессования биметаллического прутка состоящего из сердечника из магниевого сплава системы Mg-Al-Zn-Mn и оболочек из алюминиевых сплавов систем Al, Al-Mg-Si и Al-Zn-Cu-Mg согласно плану эксперимента с использованием конечноэлементной программы Forge 3D®. При проведении численного исследования варьировались: температурно-скоростные параметры прессования и соотношения механических свойств сердечника и оболочки на формоизменение заготовки в обжимной части пластической зоны.

Показано, что с повышением температуры заготовки и скорости прессования повышается температура биметаллической композиции на выходе при практически неизменном распределении интенсивности деформации. При максимальных значениях температурно-скоростных параметров прессования диапазона исследования, температура превышала критическую. С повышением прочностных свойств оболочки из алюминиевого сплава по сравнению с сердечником из магниевого сплава растет неравномерность распределения полей скорости течения заготовки в ОЧПЗ, что может привести к возникновению дефектов.

Список литературы

1. Application of superplasticity in commercial magnesium alloy for fabrication of structural components / Mukai T., Watanabe H., Higashi K. // *Materials Science and Technology*. – Vol. 16. – № 11-12. – P. 1314-1319.
2. Биметаллические материалы / М.И. Чепурко, В.Я. Остренко и др. – Л.: Судостроение, 1984. – 272 с.
3. Головки А.Н. Влияние условий прессования и геометрии комбинированных матриц на качество труб из магниевого сплава // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2007. – №5. – С.73 – 78.
4. Co-Extrusion von Aluminium Magnesium Verbundwerkstoffen / F. Riemelose, H. Kilian, P. Widlicki, W. W. Thedja // *Strangpressen: Tagungsband des Symposiums Strangpressen des Fachausschusses Strangpressen der DGM*. – 2007. P. 248-257.
5. Manufacturing and Potential of Extruded and Forged Magnesium Products / K. U. Kainer O. Becker, G. Fischer // *Magnesium – Alloys and Technology*. – 2004. P. 90-105.
6. Technical Data Sheet AlMgSi alloy 606035 HydroAluminium
7. Numerical modeling of self-pierce riveting – from riveting process modeling down to structural analysis / P.O. Bouchard, T. Laurent, L. Tollier // *Journal of Material Processing Technology*. – Vol. 202. – № 1-3. – P. 290-30.
8. Thilo Spittel. *Ferrous Alloys*. V. 2 / Thilo Spittel, Marlene Spittel – New York: Springer, 2009. – P. 800.
9. 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.
10. Данченко В.Н., Дья Х., Головки А.Н., Берски Ш., Беляев С.М. Исследование влияния геометрических характеристик заготовки и матрицы на формоизменение при прессовании биметаллических алюминиево-магневых прутков // *Обработка материалов давлением*. – 2011. – №1 (22)
11. Клименко П.Л., Данченко В.Н. Контактные напряжения при прокатке.-Днепропетровск: Пороги, 2007.-292 с.