

5. Волков А. И. Большой химический справочник. / А. И. Волков, И. М. Жарский. – Минск : Современная школа, 2005. – 608 с. – ISBN 985-6751-04-7

6. The constitution of ionic liquids. Part 1. – The electric conductivity and viscosity of the molten salt systems,  $\text{AgCl} + \text{AgBr}$ ,  $\text{PbCl}_2 + \text{PbBr}_2$ ,  $\text{AgCl} + \text{PbCl}_2$ ,  $\text{AgCl} + \text{KCl}$ ,  $\text{AgBr} + \text{KBr}$  / В. S. Harrap, E. Heymann // Transactions of the Faraday Society. – 1955. – V. 51. – P. 259.

7. Die Bestimmung der innern Reibung einiger geschmolzener Salze / R. Lorenz, H. T. Kalmus // Zeitschrift für Physikalische Chemie. – 1907. – 59. – P. 244.

УДК 669.721

## ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИЯ В МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКЕ И НЕКОТОРЫЕ ПРИЕМЫ ЕГО ОБРАБОТКИ

Замараева Ю. В.<sup>1,2</sup>, Логинов Ю. Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН,  
г. Екатеринбург, Россия

**Аннотация.** Описано применение магния и его сплавов в области медицины, в частности в качестве материала для биосовместимых и биоразлагаемых стентов. Изучены способы производства микротрубок – заготовок для стентов. Рассмотрены их достоинства и недостатки. В качестве объекта исследования выбран метод холодного обратного выдавливания. Посредством моделирования процесса холодного обратного выдавливания магниевое стакана изучены факторы, влияющие на величину силы деформирования. Расчетами установлено, что применение пуансонов со сферической рабочей поверхностью, увеличение угла конусности при применении пуансонов с конической рабочей поверхностью, уменьшение величины показателя трения, а также применение калибрующих поясков, выполненных на торце пуансона, позволит достичь ее минимальной величины.

**Ключевые слова:** магний, пластичность, обратное выдавливание, метод конечных элементов.

Магний и его сплавы привлекают большое внимание как перспективные материалы в области медицины из-за их хорошей биосовместимости и биоразлагаемости [1; 2] для создания ортопедических имплантатов и элементов крепежных конструкций, сердечно-сосудистых стентов и элементов скрепления тканей. Биоразлагаемые металлы имеют преимущества перед существующими биоразлагаемыми материалами, такими как полимеры, керамика или биоактивные стекла – в несущих конструкциях обладают более высокой прочностью на растяжение и значением модуля Юнга ближе к человеческой кости [3].

Сосудистые стенты из магния обычно служат временной опорой для суженных артериальных сосудов и постепенно разлагаются после полного ремоделирования сосудов [4]. Биоразлагаемые стенты обладают потенциалом преодоления таких побочных эффектов, как рестеноз и тромбоз внутри стента, которые часто возникают при использовании постоянных металлических стентов, например, из нержавеющей стали или сплава Ni–Ti [5]. Кроме того, некоторые тесты на животных [6] и предварительные клинические испытания на людях [7] демонстрируют, что стенты из магния безопасны для человеческого организма.

Изготовление микротрубок (заготовок для стентов) из магния и его сплавов затруднительно, в основном из-за низкой пластичности, вызванной ГПУ решеткой металла. Для изготовления таких микротрубок известно применение горячего и холодного волочения на оправке и без нее, а также применение метода обратного выдавливания. Для повышения уровня пластичности магния применялись различные методы, реализующие принцип увеличения среднего нормального напряжения [8; 9].

Следует отметить недостатки горячего волочения на оправке: сложность в производственном оборудовании, возможность образования неудовлетворительной микроструктуры и качества поверхности волоченых трубок.

Горячее безоправочное волочение ведет к отсутствию контроля равномерности толщины стенки трубки, а также, в этом случае, внутренняя поверхность изделия не будет идеальной. Для достижения более точных допусков размеров трубок, лучшей отделки поверхности, удовлетворительной микроструктуры и высоких механических свойств, холодное волочение превосходит горячее, однако, в случае обработки магния, из-за низкой пластичности металла при комнатной температуре, оно технологически сложно, кроме того ограничено обжатие трубки за один проход холодного волочения, что требует применение многопроходного волочения. Низкая пластичность и упрочнение в процессе холодной деформации влекут за собой дополнительную операцию – отжиг трубок во время серии проходов холодного волочения, что снижает производительность и повышает затраты на производство. Отсутствие стабильной технологии изготовления микротрубок из магния и его сплавов делает актуальным исследование методов их производства.

Настоящая работа посвящена исследованию метода холодного обратного выдавливания (ОВ) магниевых стенок, после удаления дна у которого возможно получить микротрубку.

В процессе холодного ОВ важным является отслеживание силы деформирования. Для повышения стойкости деформирующего инструмента и увеличения надежности работы штампов есть стремление к понижению этой величины.

Для оптимизации силового режима процесса ОБ тонкостенного магниевого стакана изучены факторы, влияющие на величину силы деформирования, а именно форма рабочей поверхности пуансона, угол конусности при применении конического пуансона, радиус закругления при применении пуансона с плоской рабочей поверхностью, длина калибрующего пояса и показатель трения.

Для выявления зависимостей проведены расчеты методом конечных элементов в программном комплексе DEFORM-2D. Постановка задачи ОБ включала в себя описание геометрии очага деформации в исходном состоянии, описание физических и пластических свойств на основе справочных данных, задание граничных условий в перемещениях.

Материал заготовки – магний марки Mg90 по стандарту ГОСТ 804-93. Использовали модель изотропной среды, кривая упрочнения для Mg90 задана вручную на основе работы [10]. Магниевый образец представлен в виде цилиндра диаметром  $D = 6$  мм и высотой  $H_0 = 4$  мм. Диаметр пуансона 5,6 мм. Перемещение пуансона по оси  $z$  равно 1 мм.

В качестве первого фактора рассмотрена форма рабочей поверхности пуансона. Как эксперимент назначена коническая, сферическая и плоская форма рабочей поверхности пуансона. На рис. 1 представлено распределение силы деформирования для вариантов обратного выдавливания с вышеуказанными формами поверхности пуансона.

Здесь видно, что сила при деформации пуансоном с плоским торцом достигает значения 1690 кН (рис. 1, в), с коническим торцом (рис. 1, а) – 1370 кН, что на 19 % меньше силы при деформации пуансоном с плоским торцом, со сферическим торцом (рис. 1, б) – 946 кН, то есть на 44 % меньше силы при деформации пуансоном с плоским торцом.

Таким образом, при деформации пуансоном со сферическим торцом выявлена наименьшая сила деформирования, а, следовательно, такой вариант пуансона оказывается наиболее предпочтительным.

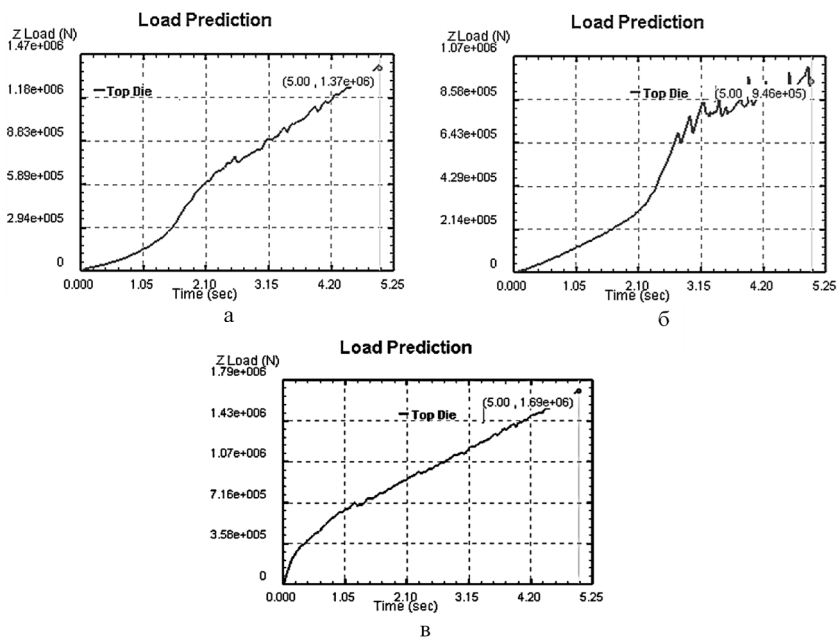


Рис. 1. Графики изменения усилия деформации в функции времени при использовании пуансона с коническим торцом (а), сферическим торцом (б), плоским торцом (в)

Расчеты показали, что снижения силы деформирования в процессе обратного выдавливания тонкостенного магниевого стакана можно достичь, применяя пуансоны со сферическим торцом, увеличивая угол конусности при применении пуансонов с конической рабочей поверхностью, уменьшая величину показателя трения, чего можно добиться улучшением шероховатости поверхности инструмента и присутствием разделительных слоев смазки, а также применяя калибрующие пояски, выполненные на торце пуансона.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90051.*

### Библиографический список

1. Witte F. The history of biodegradable magnesium implants: A review / F. Witte // Acta Biomaterialia. – 2010. – Vol. 6, Iss. 5. – P. 1680–1692.
2. Current status on clinical applications of magnesium-based orthopaedic implants: A review from clinical translational perspective / D. Zhao, F. Witte, F. Lu [et al.] // Biomaterials. – 2017. – Vol. 112. – P. 287–302.

3. Degradable biomaterials based on magnesium corrosion / F. Witte, N. Hort, C. Vogt [et al.] // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. – 2008. – Vol. 12, Iss. 5–6. – P. 63–72.

4. *Hermawan H.* Developments in metallic biodegradable stents / H. Hermawan, D. Dubé, D. Mantovani // *Acta Biomaterialia*. – 2010. – Vol. 6, Iss. 5. – P. 1693–1697.

5. Coronary stents: A materials perspective / G. Mani, M. Feldman, D. Patel [et al.] // *Biomaterials*. – 2007. – Vol. 28, Iss. 9. – P. 1689–1710.

6. Biocorrosion of magnesium alloys: A new principle in cardiovascular implant technology? / B. Heublein, R. Rohde, V. Kaese [et al.] // *Heart*. – 2003. – Vol. 89, Iss. 6. – P. 651–656.

7. First successful implantation of a biodegradable metal stent into the left pulmonary artery of a preterm baby / P. Zartner, R. Cesnjevar, H. Singer [et al.] // *Catheterization and Cardiovascular Interventions*. – 2005. – Vol. 66, Iss. 4. – P. 590–594.

8. *Логинов Ю. Н.* Инвариантные показатели напряженного состояния при кузнечной осадке магния в оболочке / Ю.Н. Логинов, Ю.В. Замараева // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 79–88.

9. *Каменецкий Б. И.* Влияние условий бокового подпора на пластичность магния при холодной осадке / Б. И. Каменецкий, Ю. Н. Логинов, Н. А. Кругликов // *Технология легких сплавов*. – 2012. – № 1. – С. 86–92.

10. *Комкова Д. А.* Структура и текстура магния после низкотемпературной мегалластической деформации / Д. А. Комкова, А. Ю. Волков // *Вектор науки ТГУ*. – 2017. – № 3(41). – С. 70–75.

УДК 669.234

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОРОШКА ПАЛЛАДИЯ

Пушкарь С. В.<sup>1</sup>, Ермаков А. В.<sup>1</sup>, Лобанов В. Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «УРАЛИНТЕХ», г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

**Аннотация.** Указаны основные требования и сферы применения порошков металлов платиновой группы. Разработана технология спекания порошков палладия в индукционной печи. Дается сравнение существующих и новой технологий.

**Ключевые слова:** порошок, палладий, индукционная печь, термическая обработка.

Порошки металлов платиновой группы в промышленности преимущественно используются при изготовлении катализаторов в автомобильной, химической и электронной промышленности. Прочие сферы (инвестиции, сплавы, биметаллы, слитки, проволока и др.) по объемам потребления менее значимы.

К порошкам металлов платиновой группы (МПП), используемым в промышленности, предъявляются достаточно жесткие требования, как