

## Композиционное строение магниевого шарового элемента клапана для буровой скважины

Юрий Николаевич Логинов<sup>1, 2</sup>, Юлия Валентиновна Замараева<sup>2, 3</sup>✉

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

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

<sup>3</sup> Каменск-Уральский металлургический завод, Каменск-Уральский, Россия  
Контакт для переписки: zamaraeva@imp.uran.ru ✉

**Аннотация.** В нефтяной промышленности шары применяются в процессе гидравлического разрыва пласта (ГРП). Материалом, удовлетворяющим основным требованиям к шарам для ГРП, является магний. Растворимые магниевые шары предназначены для активации муфт ГРП. При достижении седла муфты, во время прокачки жидкости ГРП, шар временно перекрывает проходное сечение внутри колонны-хвостовика, что обеспечивает возможность для создания избыточного давления и открытия окон муфты ГРП. Однако поскольку магний обладает малой плотностью, то в бурильных растворах, имеющих высокую плотность, возможен негерметичный контакт шара с седлом клапана вследствие недостаточной силы гравитации. Это может привести к утечкам рабочей жидкости. Цель работы — создание и исследование способа изготовления шара, нацеленного на его утяжеление.

Описан разработанный способ изготовления двухслойного шарового элемента клапана методом штамповки. Двухслойный шар состоит из магниевой оболочки, в которую помещен стальной шар. В магниевый цилиндрический стакан с дном опускается стальной шар, стакан закрывается крышкой из магния. Полученную композиционную сборку деформируют, подвергая сжатию двумя пуансонами с торцами в виде полусфер до плотного смыкания торцов цилиндрического стакана. В качестве варианта исполнения оболочки шара предложен магний марки Mg90. Теоретически установлено, что масса биметаллического шара в 2,74 раза больше магниевого шара. Смоделирована штамповка композиционной заготовки с целью установить возможность получения

шара по предложенному способу. Рассмотрено напряженно-деформированное состояние композиционной заготовки в процессе формоизменения. Успешное компьютерное моделирование процесса дает основание рекомендовать предложенный способ для осуществления в условиях реального эксперимента. Также установлено наименьшее значение соотношения толщины стенки цилиндра к его высоте, обеспечивающее сохранение устойчивости стенки цилиндра в процессе деформации.

**Ключевые слова:** скважина, растворяющийся металл, шаровой клапан, магний, напряжения, деформации, метод конечных элементов

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Давление» (№ АААА-А18-118020190104-3).

**Цитирование:** Логинов Ю. Н., Замараева Ю. В. 2023. Композиционное строение магниевое шарового элемента клапана для буровой скважины // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 9. № 1 (33). С. 139–152. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-1-139-152>

Поступила 22.11.2022; одобрена 20.03.2023; принята 31.03.2023

## Composite structure of the magnesium ball valve element for a drilling well

Yuriy N. Loginov<sup>1,2</sup>, Yuliya V. Zamaraeva<sup>2,3</sup>✉

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

<sup>3</sup> Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia  
Corresponding author: zamaraeva@imp.uran.ru✉

**Abstract.** In the oil industry, balls are used in the process of hydraulic fracturing (HF). The material that meets the basic requirements for HF balls is magnesium. Soluble magnesium balls are designed to activate HF couplings. When the coupling seat is reached, during the pumping of HF fluid, the ball temporarily blocks the passage section inside the shank column, which makes it possible to create excess pressure and open the windows of the HF coupling. However, since magnesium has a low density, in drilling fluids with a high density, leaky contact of the ball with the valve seat is possible due to insufficient gravity. This may lead to leakage of the working

fluid. The purpose of the work is to create and study a method of manufacturing a ball aimed at weighing it down.

The developed method of manufacturing a two-layer ball valve element by stamping is described. The two-layer ball consists of a magnesium shell, inside which a steel ball is placed. A steel ball is placed in a magnesium cylindrical glass with a bottom, the glass is closed with a magnesium lid. The resulting composite assembly is deformed by being compressed with two punches with ends in the form of hemispheres until the ends of the cylindrical cup are tightly closed. As a variant, the shell of the ball is proposed to be made of Mg90 grade magnesium. It is theoretically established that the mass of a bimetallic ball is 2.74 times larger than a magnesium ball. Modeling of stamping of a composite billet is performed in order to establish the possibility of obtaining a ball according to the proposed method. The stress-strain state of a composite billet in the process of shaping is considered. Successful computer simulation of the process gives grounds to recommend the proposed method for implementation in a real experiment. The smallest value of the ratio of the cylinder wall thickness to its height is also established, which ensures the stability of the cylinder wall during deformation.

**Keywords:** well, dissolving metal, ball valve, magnesium, stresses, deformations, finite element method

**Acknowledgements:** the research was carried out within the state assignment on the subject "Pressure" (No. AAAA-A18-118020190104-3).

**Citation:** Loginov, Yu. N., & Zamaraeva, Yu. V. (2023). Composite structure of the magnesium ball valve element for a drilling well. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 9(1), 139–152. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-1-139-152>

Received November 22, 2022; Reviewed March 20, 2023; Accepted March 31, 2023

## Введение

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) является актуальным и эффективным методом воздействия на призабойную зону скважины с помощью жидкости под давлением [Яркеева и др., 2019; Miao, Zhao, 2017; Hu и др., 2022].

Для соответствия основным эксплуатационным требованиям материал шаров для ГРП должен обладать высокими прочностными характеристиками и высокой скоростью растворения в бурительных растворах. Из-за своей низкой способности к разложению стали и алюминий не рассматриваются, в связи с чем в нефтяной промышленности актуален поиск материала, сочетающего в себе высокие механические свойства и высокую скорость деградации в химических растворах. Больше всего этим требованиям удовлетворяет магний [Fripp, Walton, 2017; Zhang и др., 2018; Zhang и др., 2019]. Химический состав сплавов магния подбирается с учетом необходимой скорости растворения [Xiao и др., 2015].

Изготавливаемые разнообразными методами [Буркин и др., 2001; Liu и др., 2017; Yu и др., 2017] растворимые магниевые шары предназначены для активации муфт ГРП. При достижении седла муфты, во время прокачки жидкости ГРП, шар временно перекрывает проходное сечение внутри колонны-хвостовика, что обеспечивает возможность для создания избыточного давления и открытия окон муфты ГРП.

Поскольку магний обладает малой плотностью, то в бурильных растворах, имеющих высокую плотность, возможен негерметичный контакт шара с седлом клапана вследствие недостаточной силы гравитации. Таким образом, актуален поиск способов, обеспечивающих возможность плотного прижатия шара к седлу клапана и сохранения герметичности. Часть исследований направлены на создание и исследование сплавов магния, обладающих высокими механическими свойствами [Tan и др., 2021; Wang и др., 2020; Zhang и др., 2017].

Сохранение герметичности также предлагается достигать посредством утяжеления шара, изготовленного в виде двухслойного тела [Junjie и др., 2015]. Так, в работе [Duogong и др., 2019] представлен шаровой элемент клапана, состоящий из полый и герметичной оболочки, выполненной из магния или магниевых сплавов. В стенке шаровой оболочки высверливается отверстие и через него помещается внутрь недеградируемый материал-утяжелитель, в рассматриваемом случае сыпучий. Затем отверстие закрывается пробкой из деградируемого материала.

У данного способа есть несколько недостатков. Материал-утяжелитель необходимо изготавливать сыпучим. Обратим внимание, что плотность материала в сыпучем виде ниже, чем в исходном состоянии, а значит, сила гравитации сыпучего материала также будет изначально понижена. Проблематичным является также создание полый оболочки, в частности внутренней сферической поверхности внутри шара. Кроме того, из-за пробки поверхность оболочки потеряет форму правильной сферы, что приведет к утечкам рабочей жидкости вследствие отсутствия герметичности между шаром и седлом клапана.

Следует отметить, что магниевые шары часто изготавливают путем отливки цилиндрической заготовки и вытачиванием шара, поэтому разрабатываемый способ должен быть направлен не только на утяжеление шара, но и на снижение стоимости его производства.

## Предлагаемый принцип и способ его реализации

Большее утяжеление шара возможно в случае заполнения оболочки не сыпучим, а компактным материалом. Нами предложен способ получения двухслойного шарового элемента клапана методом штамповки. Двухслойный шар состоит из магниевой оболочки, в которую помещен стальной шар.

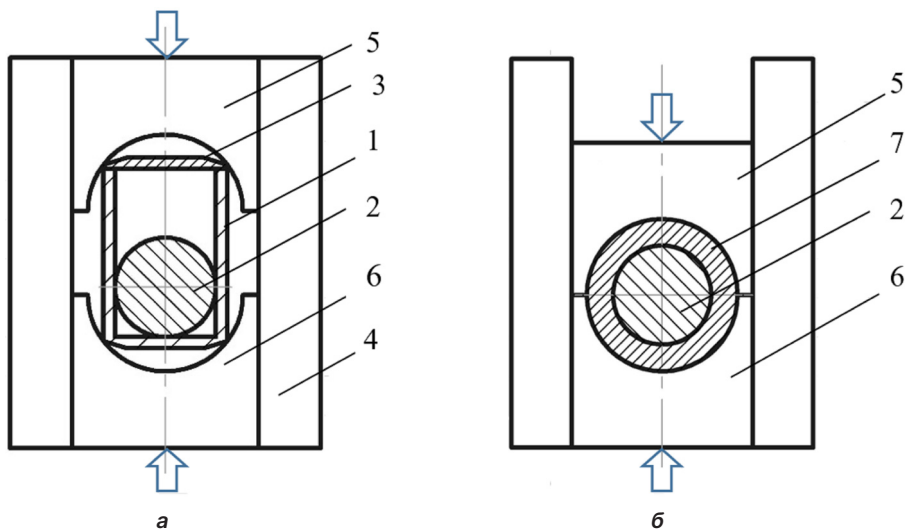
В магниевый цилиндрический стакан с дном опускается стальной шар, стакан закрывается крышкой из магния. Полученную композиционную сборку деформируют методом штамповки, подвергая сжатию двумя пуансонами с торцами в виде полусфер до плотного смыкания торцов цилиндрического стакана. Соединение крышки и стакана достигается за счет диффузионной сварки давлением, пример описания которой

представлен в статье [Логинов и др., 2012]. Отметим, что магний обладает пониженной пластичностью, и с целью ее увеличения деформация при комнатной температуре осуществляется в условиях высоких сжимающих напряжений [Логинов, Замараева, 2021a]. Поэтому стальной шар, помещенный внутрь цилиндрического стакана с дном, в исследуемом случае играет роль оправки и улучшает схему напряженного состояния, а также формирует внутреннюю поверхность магниевой оболочки.

Для изготовления крышки можно прибегнуть к вырубке из листовой заготовки, а для создания цилиндрического стакана с дном — либо к тому же методу с последующей глубокой вытяжкой, либо к обратному выдавливанию из сплошной цилиндрической заготовки.

Стальной шар можно получить методом поперечной винтовой прокатки. Высокая производительность — преимущество данного метода, но у него также есть недостаток — вероятно отклонение изделия от правильной сферической формы. В нашем случае отмеченный недочет является незначительным, т. к. стальной шар помещен в оболочку, которая создаст условия для получения необходимой сферической формы. Для получения сферической формы, близкой к идеальной, можно применить метод объемной штамповки.

Общая схема процесса штамповки композиционной сборки, состоящей из стального шара и магниевой оболочки, представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Общая схема процесса получения двухслойного шара: а — до деформации, б — после деформации при идеализированной картине трения; 1 — магниева оболочка, 2 — стальной шар, 3 — крышка, 4 — контейнер, 5 — верхний пуансон, 6 — нижний пуансон, 7 — полый шар

**Fig. 1.** The general scheme of the process of obtaining a two-layer ball: а — before deformation, б — after deformation with an idealized friction pattern; 1 — magnesium shell, 2 — steel ball, 3 — lid, 4 — container, 5 — upper punch, 6 — lower punch, 7 — hollow ball

В качестве примера рассчитаем массу шара из магния марки Mg90 (плотность  $1\,740\text{ кг/м}^3$ ) диаметром 20 мм и массу композиционной сборки, состоящей из стального шара диаметром 16,2 мм (сталь 10, плотность  $7\,856\text{ кг/м}^3$ ) и магниевой оболочки толщиной 1,9 мм (Mg90). Здесь диаметры шаровых поверхностей выбраны условно, важно только соотношение между ними. В первом случае масса равна 0,0073 кг, а во втором — 0,02 кг. Таким образом, масса композиционной сборки в 2,74 раза больше массы магниевого шара.

Чтобы проверить возможность осуществления штамповки композиционной заготовки по данной схеме, смоделировали данный процесс с помощью метода конечных элементов. Этот метод ранее уже был применен, в частности, в работе [Логоинов, Замараева, 2021б] для расчета работы шарового клапана.

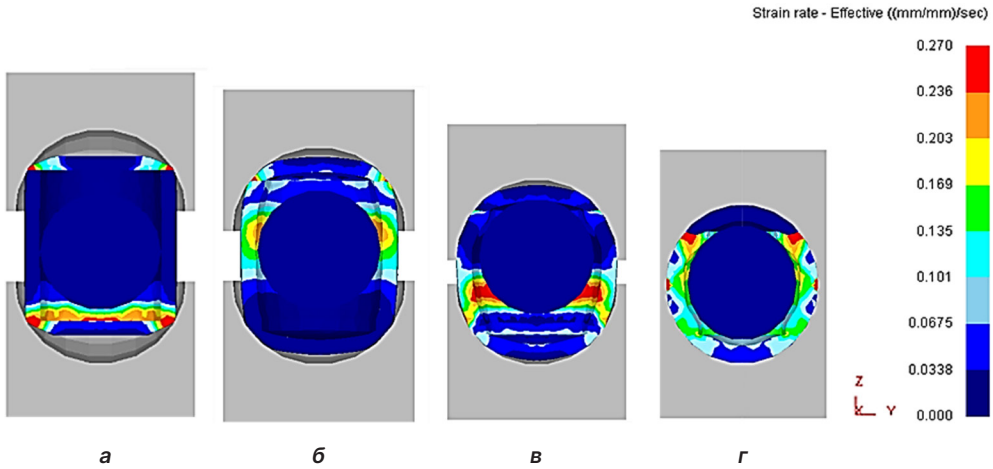
## Постановка задачи и результаты решения

Моделирование формоизменения композиционной заготовки осуществили в программном комплексе DEFORM 3D. Для вычислительного эксперимента использован магний марки Mg90 по ГОСТ 804—93. Постановка задачи включала в себя создание геометрии очага деформации в первичном состоянии, описание физических и пластических свойств на основе справочных данных.

Заготовка имеет вид цилиндрического стакана с дном. Наружный диаметр цилиндра  $d_1 = 20\text{ мм}$ , толщина стенки цилиндра  $s_1 = 1,9\text{ мм}$ , высота цилиндра  $h_1 = 22,2\text{ мм}$ , 1 фаска ( $3 \times 25^\circ$ ). Крышка имеет диаметр  $d_2$ , равный наружному диаметру цилиндра  $d_1$ , толщина крышки  $s_2$  равна толщине стенки цилиндра  $s_1$ , 1 фаска ( $3 \times 25^\circ$ ). Диаметр стального шара  $D_1$  равен внутреннему диаметру цилиндрического стакана. В задаче трение описывается законом Кулона ( $\mu = 0,2$ ). Температура инструмента, магниевой заготовки и крышки, а также стального шара равна  $20^\circ\text{C}$ . Моделирование осуществлялось при изотермических условиях. Скорость движения инструмента равна  $1,5\text{ мм/с}$ .

Распределение скорости деформации в продольном сечении композиционной заготовки с отображением четырех этапов деформации показано на рис. 2.

На первом этапе формоизменения максимум скорости деформации находится в области контакта композиционной заготовки с поверхностью верхнего и нижнего пуансона (рис. 2а). На втором этапе очаг деформации имеет две локализации — в области соединения крышки и оболочки и в зоне контакта оболочки и стального шара (рис. 2б). Далее металл заполняет верхний и нижний купол штампа (третий этап), при этом максимум скорости деформации находится в нижней области оболочки (рис. 2в). На четвертом этапе деформации внешний контур композиционной заготовки сформирован в виде правильной сферы, в результате чего получен двухслойный шар (рис. 2г). Следует отметить, что в конце деформации стальной шар сохранил свою исходную форму. На данном этапе первая локализация скорости деформации расположена в области соединения крышки и оболочки, вторая — в центральной зоне боковой поверхности оболочки на контакте с поверхностью штампа.



**Рис. 2.** Порядок изменения поля скорости деформации в продольном разрезе очага деформации в плоскости YZ и его перемещение по ходу процесса штамповки: а — первый этап; б — второй этап; в — третий этап; г — четвертый этап

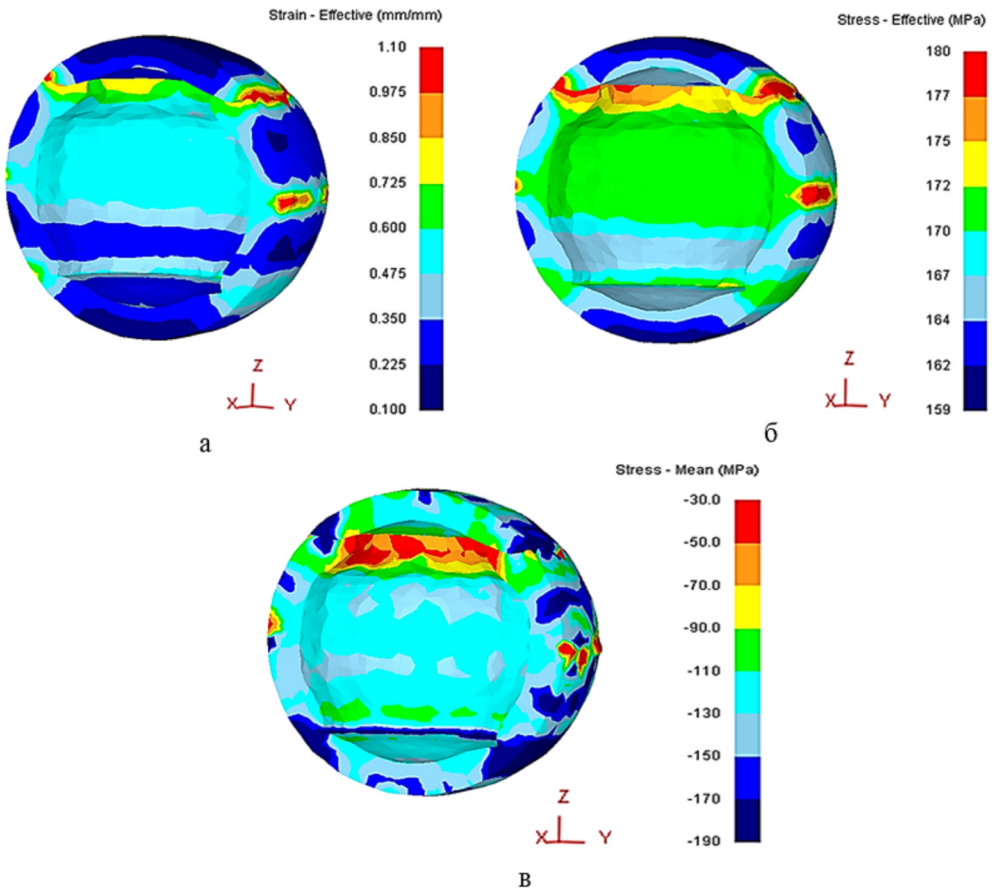
**Fig. 2.** The order of change of the deformation velocity field in the longitudinal section of the deformation focus in the YZ plane and its movement during the stamping process: а — the first stage; б — the second stage; в — the third stage; г — the fourth stage

На рис. 3 представлен продольный разрез двухслойного шара (штамп и стальной шар не показаны) с отображением поля степени деформации (рис. 3а), интенсивности напряжений (рис. 3б) и среднего напряжения (рис. 3в). Максимум степени деформации в конце процесса деформации (рис. 3а) расположен в зоне соединения крышки и оболочки и в центральной зоне боковой поверхности оболочки на контакте с поверхностью штампа. Минимум степени деформации — в зоне контакта двухслойного шара с верхним и нижним пуансоном.

Из рис. 3б видно, что локализация максимумов интенсивности напряжений двухслойного шара соответствует максимумам степени деформации, при этом свое минимальное значение интенсивность напряжений имеет в зонах затрудненной деформации, расположенных на контакте с поверхностями верхнего и нижнего пуансона.

На повышенные показатели пластичности металла в процессе штамповки указывают отрицательные значения среднего нормального напряжения (рис. 3в). Достаточно высокие по модулю значения среднего напряжения должны гарантировать минимальную вероятность разрушения композиционной заготовки.

Компьютерное моделирование композиционной сборки оказалось успешным, а значит, предложенный способ можно рекомендовать для осуществления в условиях реального эксперимента. Однако следует отметить важность подбора соотношения толщины стенки цилиндра к его высоте ( $s_1/h_1$ ). Например, в нашем случае при толщине стенки цилиндра  $s_1 = 1,3$  мм и высоте цилиндра  $h_1 = 22,2$  мм ( $s_1/h_1 = 1,3/22,2 = 0,058$ ) произошла потеря устойчивости стенки цилиндра и образование ее прогиба (рис. 4).



**Рис. 3.** Распределение степени деформации (а), интенсивности напряжений (б) и среднего напряжения (в) в конце процесса деформации в продольном разрезе двухслойного шара

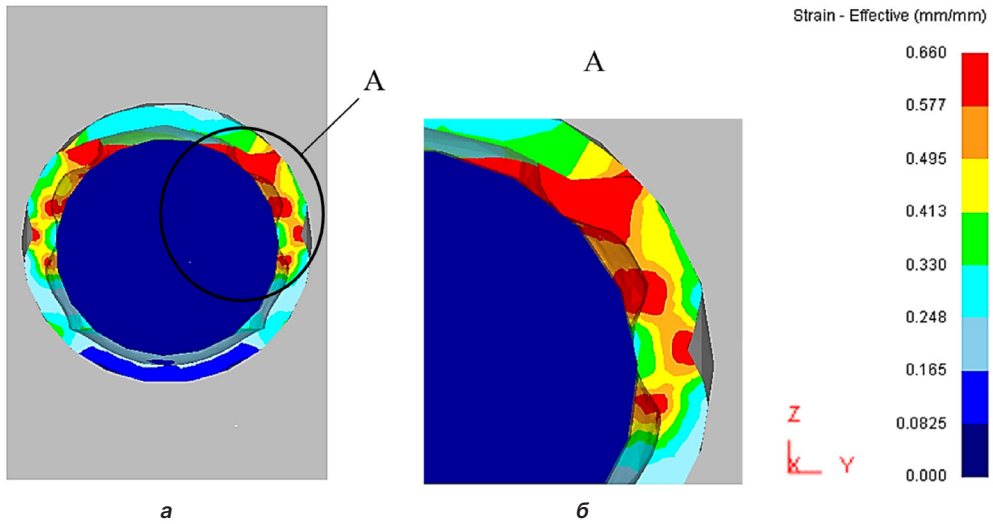
**Fig. 3.** Distribution of the degree of deformation (а), stress intensity (б) and average stress (в) at the end of the deformation process in the longitudinal section of a two-layer ball

Из рис. 4 видно, что наибольшего значения степень деформации достигает в зоне соединения крышки и оболочки. Вторая локализация — в зоне прогиба стенки оболочки (рис. 4б).

Также распределение скорости деформации в продольном сечении двухслойного шара при значении  $s_1/h_1 = 0,058$  демонстрирует состояние мгновенного очага деформации (рис. 5). Здесь видно, что очаг деформации локализован в зоне соединения крышки и оболочки.

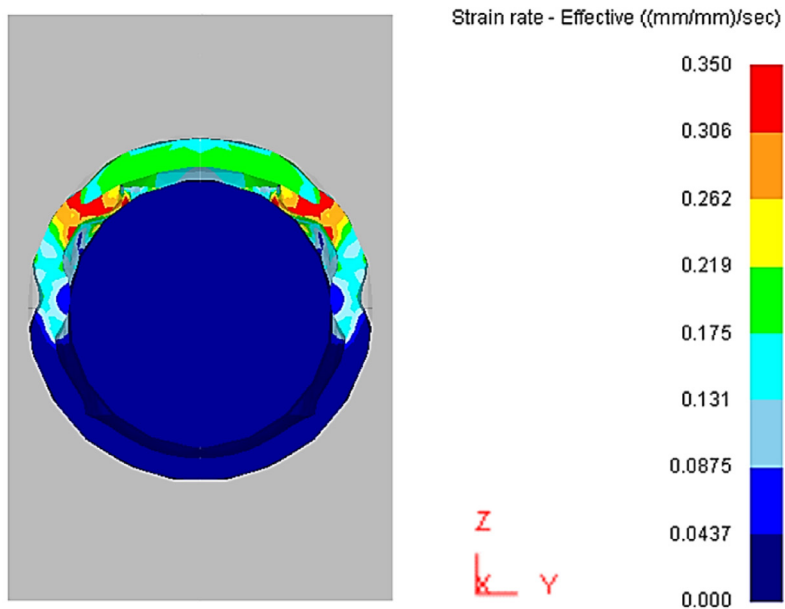
На рис. 6 отображено поле среднего напряжения в продольном разрезе двухслойного шара при значении  $s_1/h_1 = 0,058$ . Несмотря на прогиб стенки оболочки, значения среднего напряжения оболочки имеют отрицательные значения.





**Рис. 4.** Распределение степени деформации в продольном разрезе двухслойного шара в плоскости YZ при  $s_1/h_1 = 0,058$  (а), зона А (б)

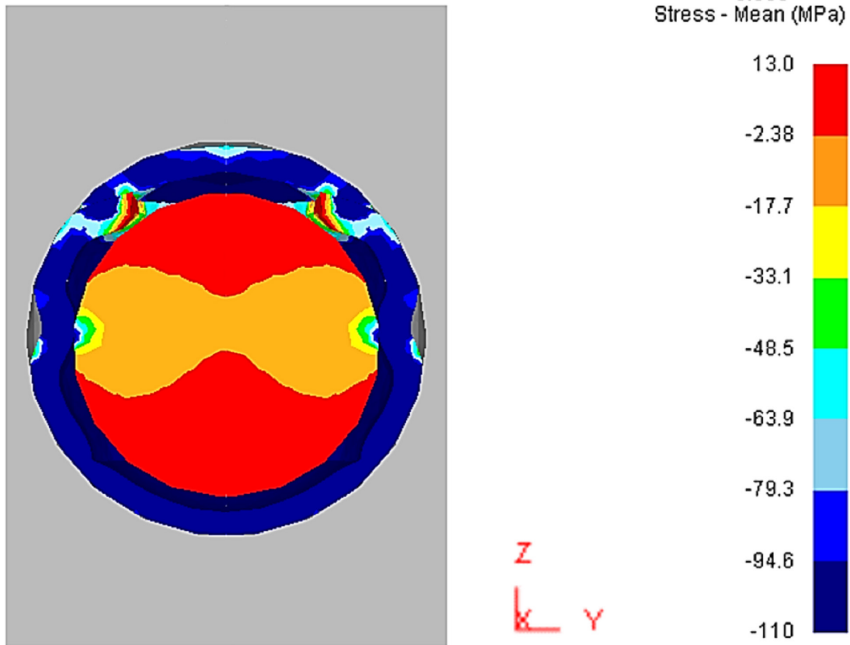
**Fig. 4.** Distribution of the degree of deformation in the longitudinal section of a two-layer ball in the YZ plane at  $s_1/h_1 = 0.058$  (a), zone A (б)



**Рис. 5.** Распределение скорости деформации в продольном разрезе двухслойного шара в плоскости YZ при  $s_1/h_1 = 0,058$

**Fig. 5.** The distribution of the strain rate in the longitudinal section of a two-layer ball in the YZ plane at  $s_1/h_1 = 0.058$

Так как сталь имеет более высокие прочностные характеристики по сравнению с магнием, прогиб стенки магниевой оболочки не повлиял на форму стального шара.



**Рис. 6.** Распределение среднего напряжения в продольном разрезе двухслойного шара в плоскости YZ при  $s_1/h_1 = 0,058$

**Fig. 6.** Distribution of the average stress in the longitudinal section of a two-layer ball in the YZ plane at  $s_1/h_1 = 0.058$

По результатам дополнительных расчетов установлено, что для получения биметаллического шара наружным диаметром 20 мм и наружной поверхностью в виде правильной сферы соотношение толщины стенки цилиндра к его высоте ( $s_1/h_1$ ) должно превышать 0,08.

## Заключение

Разработан способ, направленный на утяжеление шара. Шар предложено изготавливать методом штамповки в виде двухслойного тела — стального шара в магниевой оболочке. Стальной шар, помимо утяжеления, создает дополнительные напряжения сжатия в схеме деформации, что положительно влияет на пластичность материала оболочки. За счет замены цветного металла в центре двухслойного шара на черный, стоимость которого намного ниже цветного, достигается снижение стоимости по сравнению с шарами, полностью изготовленными из магния. Кроме того, установлено наименьшее значение соотношения толщины стенки цилиндра к его высоте, обеспечивающее сохранение устойчивости стенки цилиндра в процессе деформации.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Буркин С. П., Логинов Ю. Н., Разинкин А. В., Сапунжи В. В. 2001. Высокопроизводительная технология изготовления магниевых заготовок под закрытую штамповку // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. № 1. С. 11–15.
- Логинов Ю. Н., Замараева Ю. В. 2021а. Инвариантные показатели напряженного состояния при кузнечной осадке магния в оболочке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). Том 23. № 1. С. 79–88. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2021-23.1-79-88>
- Логинов Ю. Н., Замараева Ю. В. 2021б. Напряженно-деформированное состояние сферического клапана в буровой скважине // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. № 2 (122). С. 43–47. [https://doi.org/10.33285/1999-6934-2021-2\(122\)-43-47](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2021-2(122)-43-47)
- Логинов Ю. Н., Илларионов А. Г., Кляева С. Ю., Иванова М. А. 2012. Деформации и структура металла при холодной стыковой сварке медных заготовок // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. № 1. С. 37–44.
- Яркева Н. Р., Хусаинов Б. И., Самушкова Э. С. 2019. Анализ проведения гидравлического разрыва пласта по технологии Slug Frac // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. № 4 (120). С. 58–64. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2019-4-58-64>
- Duorong L., Lin L., Baofeng P., Bing Y., Dongmei Y., Wenyaow W., Jia T., Zhixin L. 2019. Soluble pressure building ball: pat. 208934677 CN: MPK E21B43/26 / applicant and patent holder China Petroleum & Chemical Corporation, Sinopec Southwest Oil & Gas Company. No. 201821641602U; applied 10 Oct. 2018; published 4 June 2019.
- Fripp M. L., Walton Z. W. 2017. Subterranean formation operations using degradable wellbore isolation devices: pat. 2542095 UK: MPK E21B33/12, E21B33/128, E21B34/06, C22C23/02, C22C23/04 / applicant and patent holder Halliburton Energy Services Inc. No. 20170000605; applied 13 Aug. 2015; published 8 Mar. 2017.
- Hu D., Ren L., Li Z., Zhao J., Lin R., Jiang T. 2022. Simulation of fracture control during temporary plugging at fracture openings in deep and ultra-deep shale-gas horizontal wells // Natural Gas Industry B. Vol. 9. No. 5. Pp. 487–496. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2022.10.002>
- Junjie X., Weigang Z., Tianyu X., Tianyue X., Shouquan Y., Chuanbing H., Rongli L. 2015. Self-dissolution fracturing ball for oil and gas well fracturing technology: pat. 204371293 CN: MPK E21B43/267. No. 201420813510U; applied 18 Dec. 2014; published 3 June 2015.
- Liu Y., Wang W., Li Y., Han Z., Hao M. 2017. Manufacturing method of soluble alloy fracturing ball for oil and gas exploitation: pat. 107385245 CN: MPK C22C1/03, C22C23/00, E21B43/26 / applicant and patent holder Xian University of Technology. No. 201710430332; applied 9 June 2017; published 24 Nov. 2017.
- Miao W., Zhao L. 2017. Development status and prospect of staged fracturing technology in horizontal wells // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 22. No. 13. Pp. 5107–5118.
- Tan W., Li T., Li S., Fang D., Ding X., Sun J. 2021. High strength-ductility and rapid degradation rate of as-cast Mg-Cu-Al alloys for application in fracturing balls // Journal of Materials Science & Technology. Vol. 94. Pp. 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.04.010>
- Wang J., Gao S., Liu X., Peng X., Wang K., Liu S., Jiang W., Guo S., Pan F. 2020. Enhanced mechanical properties and degradation rate of Mg–Ni–Y alloy by introducing LPSO phase

- for degradable fracturing ball applications // *Journal of Magnesium and Alloys*. Vol. 8. No. 1. Pp. 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2019.11.010>
- Xiao D. H., Geng Z. W., Chen L., Wu Z., Diao H. Y., Song M., Zhou P. F. 2015. Effects of alloying elements on microstructure and properties of magnesium alloys for tripling ball // *Metallurgical and Materials Transactions A*. Vol. 46. No. 10. Pp. 4793–4803. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3053-7>
- Yu S., Ji Z., Xiong W., Liu E., Jiang Q., Zhao Y. 2017. Soluble magnesium alloy composite fracturing ball and preparation method thereof: pat. 107099712 CN: MPK C09K8/62, C09K8/70, C22C1/06, C22C1/10, C22C23/02, C22C32/00, C25D11/30 / applicant and patent holder China University of Petroleum. No. 201710381832; applied 26 May 2017; published 29 Aug. 2017.
- Zhang C., Wu L., Huang G., Chen L., Xia D., Jiang B., Atrens A., Pan F. 2019. Effects of Fe concentration on microstructure and corrosion of Mg-6Al-1Zn-xFe alloys for fracturing balls applications // *Journal of Materials Science & Technology*. Vol. 35. No. 9. Pp. 2086–2098. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.04.012>
- Zhang Y., Wang X., Kuang Y., Liu B., Zhang K., Fang D. 2017. Enhanced mechanical properties and degradation rate of Mg-3Zn-1Y based alloy by Cu addition for degradable fracturing ball applications // *Materials Letters*. Vol. 195. Pp. 194–197. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.02.024>
- Zhang Y., Yu L., Ren Y., Yang D., Zhang Y., Feng D. 2018. A new type of degradable setting ball for fracturing packers // *Well Testing*. Vol. 27. No. 2. Pp. 53–58.

## References

- Burkin, S. P., Loginov, Yu. N., Razinkin, A. V., & Sapunzhi, V. V. (2001). High-performance technology for manufacturing magnesium blanks for closed stamping. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, (1), 11–15. [In Russian]
- Loginov, Yu. N., & Zamaraeva, Yu. V. (2021a). Invariant stress state parameters for forging upsetting of magnesium in the shell. *Metal Working and Material Science*, 23(1), 79–88. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2021-23.1-79-88> [In Russian]
- Loginov, Yu. N., & Zamaraeva, Yu. V. (2021b). Stress-strain condition of a spherical valve in a drilling well. *Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*, (2), 43–47. [https://doi.org/10.33285/1999-6934-2021-2\(122\)-43-47](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2021-2(122)-43-47) [In Russian]
- Loginov, Yu. N., Illarionov, A. G., Klyueva, S. Yu., & Ivanova, M. A. (2012). Deformations and structure of metal during cold butt-seam welding of copper blanks. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 53(1), 45–53. <https://doi.org/10.3103/S1067821212010154>
- Yarkeeva, N. R., Khusainov, B. I., & Samushkova, E. S. (2019). Analysis of hydraulic fracturing technology Slug Frac. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov*, (4), 58–64. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2019-4-58-64> [In Russian]
- Duorong, L., Lin, L., Baofeng, P., Bing, Y., Dongmei, Y., Wenyao, W., Jia, T., & Zhixin, L. (2019). *Soluble pressure building ball* (Chinese Patent No. 208934677). China Petroleum & Chemical Corporation, Sinopec Southwest Oil & Gas Company.
- Fripp, M. L., & Walton, Z. W. (2017). *Subterranean formation operations using degradable wellbore isolation devices* (U.K. Patent No. 2542095). Halliburton Energy Services Inc.

- Hu, D., Ren, L., Li, Z., Zhao, J., Lin, R., & Jiang, T. (2022). Simulation of fracture control during temporary plugging at fracture openings in deep and ultra-deep shale-gas horizontal wells. *Natural Gas Industry B*, 9(5), 487–496. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2022.10.002>
- Junjie, X., Weigang, Z., Tianyu, X., Tianyue, X., Shouquan, Y., Chuanbing, H., & Rongli, L. (2015). *Self-dissolution fracturing ball for oil and gas well fracturing technology* (Chinese Patent No. 204371293).
- Liu, Y., Wang, W., Li, Y., Han, Z., & Hao, M. (2017). *Manufacturing method of soluble alloy fracturing ball for oil and gas exploitation* (Chinese Patent No. 107385245). Xian University of Technology.
- Miao, W., & Zhao, L. (2017). Development status and prospect of staged fracturing technology in horizontal wells. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 22(13), 5107–5118.
- Tan, W., Li, T., Li, S., Fang, D., Ding, X., & Sun, J. (2021). High strength-ductility and rapid degradation rate of as-cast Mg-Cu-Al alloys for application in fracturing balls. *Journal of Materials Science & Technology*, 94, 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.04.010>
- Wang, J., Gao, S., Liu, X., Peng, X., Wang, K., Liu, S., Jiang, W., Guo, S., & Pan, F. (2020). Enhanced mechanical properties and degradation rate of Mg–Ni–Y alloy by introducing LPSO phase for degradable fracturing ball applications. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(1), 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2019.11.010>
- Xiao, D. H., Geng, Z. W., Chen, L., Wu, Z., Diao, H. Y., Song, M., & Zhou, P. F. (2015). Effects of alloying elements on microstructure and properties of magnesium alloys for tripling ball. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46(10), 4793–4803. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3053-7>
- Yu, S., Ji, Z., Xiong, W., Liu, E., Jiang, Q., & Zhao, Y. (2017). *Soluble magnesium alloy composite fracturing ball and preparation method thereof* (Chinese Patent No. 107099712). China University of Petroleum.
- Zhang, C., Wu, L., Huang, G., Chen, L., Xia, D., Jiang, B., Atrens, A., & Pan, F. (2019). Effects of Fe concentration on microstructure and corrosion of Mg-6Al-1Zn-xFe alloys for fracturing balls applications. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(9), 2086–2098. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.04.012>
- Zhang, Y., Wang, X., Kuang, Y., Liu, B., Zhang, K., & Fang, D. (2017). Enhanced mechanical properties and degradation rate of Mg-3Zn-1Y based alloy by Cu addition for degradable fracturing ball applications. *Materials Letters*, 195, 194–197. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.02.024>
- Zhang, Y., Yu, L., Ren, Y., Yang, D., Zhang, Y., & Feng, D. (2018). A new type of degradable setting ball for fracturing packers. *Well Testing*, 27(2), 53–58.

## Информация об авторах

Юрий Николаевич Логинов, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; ведущий научный сотрудник, Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия  
j.n.loginov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>

*Юлия Валентиновна Замаараева*, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия; начальник отдела, Каменск-Уральский металлургический завод, Каменск-Уральский, Россия  
zamaraeva@imp.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2620-7064>

## Information about the authors

*Yuriy N. Loginov*, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Department of Metal Working, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia; Leading Researcher, M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia  
j.n.loginov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>

*Yuliya V. Zamaraeva*, Cand. Sci. (Tech.), Researcher, M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia; Head of the Department, Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia  
zamaraeva@imp.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2620-7064>