

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ВЕСТНИК

Санкт-Петербургского
государственного университета
технологии и дизайна



Серия 1

Естественные
и технические науки

№ 1/2021

С. Л. Горобченко, Д. А. Ковалёв, Г. Д. Семенов

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
191186 РФ, Санкт-Петербург, Большая Морская, 18

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНОСТИ НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ СЕДЕЛ ШАРОВЫХ КРАНОВ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ 3D-ПЕЧАТИ

© С. Л. Горобченко, Д. А. Ковалёв, Г. Д. Семенов, 2021

Рассмотрены вопросы повышения эффективности применения полимерных седел шаровых кранов с использованием численного моделирования и оценена перспективность изготовления седел новой конструкции методом 3D-печати. Определены основные проблемы выбора полимерных седел шаровых кранов большого диаметра с учетом выбора материала, конструктивного исполнения и стоимостных показателей. Выявлено, что конструкции седел на основе конструкций с ребрами жесткости из более дешевых пластиков, применяемых в 3D-печати, не уступают седлам сплошного сечения из дорогих фторопластов при моделируемых условиях эксплуатации шаровых кранов большого диаметра магистральных водоводов. Показаны основные направления совершенствования применения полимерных седел кранов при помощи комплексного подхода, учитывающего использование перспективных материалов, используемых в 3D-печати, разработку новых конструкций седел, моделирование напряженно-деформированного и термонапряженного состояния и анализ технико-экономической целесообразности применения седел в конкретных видах запорной арматуры.

Ключевые слова: полимерные седла, запорные шаровые краны большого диаметра, ПЭТ, фторопласт, конструкции сплошного сечения и конструкции с ребрами жесткости, 3D-печать, технико-экономическая целесообразность применения седел.

Современный подход к выбору и изготовлению седел шаровых кранов и дисковых затворов предполагает хорошее знание материалов, типов затворов арматуры, технологий изготовления и проблем, которые могут возникнуть в связи с неправильным выбором оптимального типа материала седла, отсутствием соответствующих расчетов нагрузок, отклонений качества уплотнения в связи с несовершенством технологии.

Большую роль в развитии использования полимерных седел начинают играть 3D-технологии моделирования и изготовления уплотнений методами 3D-печати. Традиционные виды технологии, такие как изготовление седел методами механической обработки из трубной заготовки, спекание на горячих прессах, литье на термопластавтоматах — капиталоемкие, рассчитаны на высокую серийность и массовость потребления, длительны по срокам изготовления, трудоемки в технологической подготовке производства и способны создавать только ограниченный ассортимент уплотнений достаточно простых форм.

Этих трудностей лишена технология 3D-печати. 3D-печать — это процесс создания цельных трехмерных объектов практически любой геометрической формы на основе цифровой модели. 3D-печать основана на концепции построения объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры модели, и не требует сложной оснастки. Фактически 3D-печать является полной противоположностью таких традиционных методов механического производства и обработки, как фрезеровка или резка, где формирование облика изделия происходит за счет удаления лишнего материала, т. е. каким и является производство деталей из фторопласта.

На сегодняшний момент считается, что 3D-печать с использованием фторопласта невозможна из-за низкой адгезии и тугоплавкости материала, т. к. слои при печати не слипаются. Однако в 2016 году американская компания 3M заявила о разработке 3D-печати с возможностью использования фторопласта, а в 2019 году запатентовала и приступила к производству 3D-принтеров для печати фторопластовых изделий. Сейчас эта технология находится на стадии внедрения. Перечень используемых при 3D-печати материалов превышает перечень пластиков, применяемых при литье, и близок к перечню материалов, применяемых при спекании.

На данный момент существует множество программ по 3D-моделированию (Solidworks, Ansys и т. д.), которые могут не только создать будущую модель уплотнения, но также помогут провести необходимые исследования для выявления слабых мест детали, рассчитать время изготовления детали, расход и цену материала и т. д.

Исходя из вышесказанного, можно сделать предположение, что старые методы изготовления уплотнительных колец и седел могут уступать методу изготовления уплотнений с помощью 3D-технологий и материалов, используемых при 3D-печати.

Роль новых способов изготовления уплотнений возрастает с ростом используемых номинальных диаметров поворотной арматуры. Уже сейчас средние диаметры на многих непрерывных крупнотоннажных производствах превышают DN 300–500 мм. Размеры в 1500 мм уже не являются редкостью, а некоторые виды шаровых кранов уже работают на диаметре 1640 мм. Для дисковых затво-

ров такие размеры только самое начало. На крупных металлургических производствах можно встретить поворотные дисковые затворы с номинальными диаметрами 2000 и даже 4000 мм. Здесь традиционная технология изготовления полимерных уплотнений и седел начинает сдавать свои позиции.

Важность проблемы для уплотнений большого диаметра можно проиллюстрировать следующим примером. Традиционно фторопластовые уплотнения делают методом спекания на горячих прессах с температурой выдержки под давлением пресс-формы свыше 360°C. При этом во многом не удается создать одинаковые условия для уплотнения и равноплотности материала. Результатом этого становится неодинаковая усадка при охлаждении изделия, приводящая к некруглости, короблению, скручиванию, непараллельности торцов и неравномерности линейных размеров по периметру кольцевых заготовок. Для их устранения на последующую механическую обработку приходится задавать припуск до 50%, а в отдельных случаях и до 90% от расчетного веса изделия, что, безусловно, влияет на цену фторопластового уплотнения [1]–[2].

Другой важной проблемой изготовления уплотнений больших диаметров являются особенности выбора способа герметизации. Так, согласно [3] герметичность может достигаться как повышением контактного давления между уплотняемыми поверхностями, так и удлинением пути тока протечек и увеличением ширины контакта уплотнения с шаром. При этом к пластику будут применяться различные требования по свойствам. Если в первом случае — это большая твердость поверхности уплотнения и прочность, то во втором — это антифрикционность и достаточная прочность.

Возможные решения по выбору пластмасс для уплотнений при этом также могут различаться. В первом случае — это повышение твердости и прочности, особенно при смятии, и модуля упругости при сжатии, то во втором случае — это может быть конструктивное обеспечение герметичности за счет увеличения пути тока протечек при достаточной прочности и упругости. При этом как первый, так и второй путь открывает двери для использования более дешевых пластиков, не обладающих высокой антифрикционностью, но обладающих достаточно высокими свойствами, и, в первую очередь, могут быть применены для шаровых кранов с плавающим шаром.

При использовании технологий 3D-печати становится достижимым не только использование новых видов пластиков, которые ранее не применялись для уплотнений, но возможно и создание самых разных конструктивных исполнений седел, которые ранее были не доступны из-за ограничений технологии. Например, это могут быть и биматериалы с повышенной антифрикционностью поверхностного слоя, соприкасающегося с шаром (фторопласт), и конструктивная часть, работающая за счет использования ребер, сформированных из более дешевого пластика (РЕТ).

Таким образом, проблема применения пластмасс в седлах шаровых кранов охватывает ряд вопросов по выбору материалов, типу конструкции, выбору

способа изготовления, оборудованию, разработке технологии изготовления, испытаниям и расчету экономической эффективности.

Подход к выбору применения пластмасс в уплотнениях и седлах арматуры должен быть системным, охватывающим все этапы от выбора пластмасс до изготовления уплотнений. К примеру, во многом прослеживается тенденция к использованию более дешевых и более перерабатываемых пластиков с увеличением диаметра арматуры, рис. 1.

Проблема применимости полимерных уплотнений становится особенно выраженной, когда речь идет о цене, поскольку наиболее применяемые и рекомендуемые марки являются наиболее дорогими. Как можно видеть из рис. 2, цена суперконструкционных пластиков (с высокими эксплуатационными свойствами) превышает более чем в 5 раз стоимость конструкционных пластиков и стандартных пластиков массового потребления.

Особенно остро стоит проблема материалоемкости уплотнений. Использование специальных пластиков, рассчитанных на создание высоких свойств изделия, таких как РТФЕ и РЕЕК, с ростом использования шаровых кранов больших диаметров должны будут заменяться на более дешевые с применением конструктивных приемов повышения свойств изделий.

Задача удешевления и повышения весовой и конструкционной эффективности использования пластмасс может быть в большой степени решена, если использовать, кроме более дешевого пластика, более прогрессивные конструкции седел, способные обеспечить требуемые характеристики изделий. В частности, известно, что сплошные конструкции могут с легкостью заменяться на конструкции с ребрами жесткости, в которых прочность основного рабочего слоя будет обеспечиваться поддерживающими ребрами, рис. 3.

В работе поставлена задача поиска экономичных решений в области полимерных седел шаровых кранов большого диаметра, сочетающих в себе возможности применения более дешевых пластиков для конкретных условий применения, изменения конструкции на основе анализа напряженно-деформированного и термонапряженного состояния и использования возможностей 3D-печати.

Выбор материала для 3d-печати

Выберем материал для 3D-печати, который мог бы стать заменой фторопласту РТФЕ. На сегодняшний день дешевым и доступным материалом является РЕТ и его разновидности, такие как конструкционные пластики РЕТГ и РЕТР, которые мы будем использовать в исследовании. Характеристики материалов приведены в табл. 1.

Выбор РЕТ обусловлен тем, что обладает достаточно подходящим комплексом свойств, требуемых для уплотнений кранов: высокую прочность и жесткость, гибкость, долговечность, износостойкость, нерастворимость, малую усадку при охлаждении после 3D-печати. Помимо этого, параметры упругости,

Valve Series	Type	Ball Valves Seat Materials														
		Size		Seat Material												
		Inches	DN	T	X	M	W	R	L	U	F	V	B			
2000	Screwed End	1/4 - 2"	6 - 50	*	*	*										
3A/3C	Screwed/Socket End	1/4 - 2"	6 - 50	*		*										
3000	Screwed End	1/4 - 2"	6 - 50	*		*										
4000	Screwed, Socket, Butt Weld End	1/2 - 2" Std. Port	13 - 50 Std. Port	*	*			*	*	*				OA	*	
4000	Screwed, Socket, Butt Weld End	1/2 - 1-1/2" Full Port	13 - 40 Full Port	*	*									OA	*	
4000	Screwed, Socket, Butt Weld End	2" Full Port 2-1/2" Std. Port	50 Full Port 65 Std. Port	*	*									OA	OA	OA
6F	Screwed End	1/4 - 2"	6 - 50	*		*										
A	Screwed End	1/4 - 2"	6 - 50	*	*											
ELIMINATOR	Screwed End	1/4 - 2"	6 - 50	*	*											
5000	Flanged	1/2 - 2"	13 - 50	*	*	*								OA	*	*
5000	Flanged	12" Trunnion	300 Trunnion	*		*		OA		OA	OA	OA				
5000	Flanged	14 - 20" Trunnion	350 - 500 Trunnion	*		*		OA			OA	OA*			†	
6000	Flanged	3/4 - 1-1/2"	19 - 40	*	*	*									*	*
6000	Flanged	14-20" Trunnion	350 - 500 Trunnion	*		*		OA			OA	OA				
7000	Flanged	1/2 - 10"	15 - 250	*	*	*		OA		*	*	OA			*	
9000	Flanged	1/2 - 12"	15 - 300	*	*	*		OA		*	*	OA			*	

T-PTFE
 X-XTREME
 M-Filled PTFE
 W-Metal-wrapped filled PTFE
 R-Delrin
 L-PEEK
 U-UHMW polyethylene
 F-FEP
 V-Graphite filled polyimide
 B-PFA

Рис. 1. Применение полимерных седел в шаровых кранах в компании Jamesbury [1]

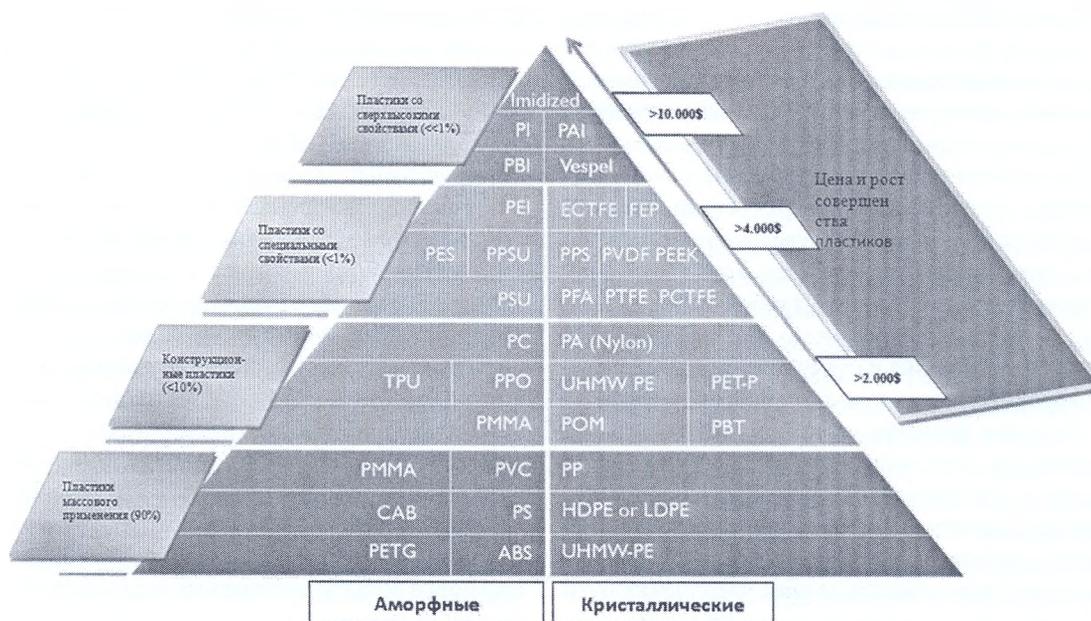


Рис. 2. Классификация основных применяемых пластиков по применимости и цене

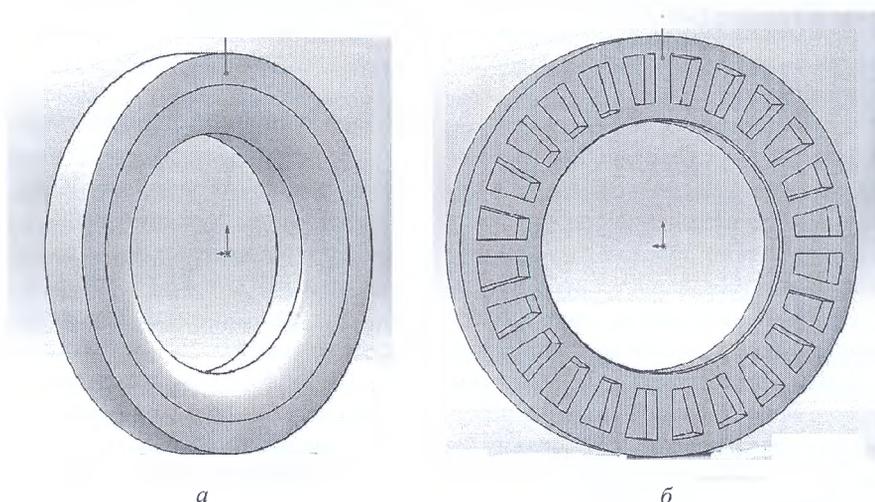


Рис. 3. Модель уплотнения с внутренними ребрами: а) обычно используемое седло; б) модель седла с внутренними ребрами

Таблица 1. Характеристики пластмасс

Характеристика пластмасс	PTFE	PET
Плотность, г/см ³	2,18	2,96
Модуль упругости, Н/м ²	2,6·10 ⁹	2,6·10 ⁹
Массовая плотность, кг/м ³	2200	1420
Предел прочности при растяжении, Н/м ²	71,5·10 ⁶	57,3·10 ⁶
Предел прочности при сжатии, Н/м ²	117,7·10 ⁶	92,9·10 ⁶
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,221	0,261

пределов прочности при растяжении и сжатии этих материалов достаточно близки.

Сравнение напряженно-деформированного состояния седел различного конструктивного исполнения

Проведем сравнение напряженно-деформированного состояния седел из фторопласта-4 и PET. Условия исследования: максимальная температура 50°C; давление 16 бар; жидкость — вода; скорость потока жидкости 10 м/с; наружный диаметр уплот-

нения 500 мм; внутренний диаметр 300 мм; толщина уплотнения 60 мм. Напряжения, испытываемые двумя образцами, представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, уплотнения испытывают умеренные напряжения. При этом для двух материалов степень воздействия напряжений одинакова и составляет примерно 0,014 МПа. Деформации перемещений, испытываемые двумя образцами, представлены на рис. 5.

По шкале перемещения видно, что материал под давлением деформируется меньше 0,001 мм, при этом оба материала испытывают одинаковую деформацию.

Для уменьшения веса и объема заготовки разработана модель уплотнения с внутренними полостями, которые выполняют роль ребер жесткости. Она с легкостью может быть реализована при помощи 3D-печати, рис. 6.

Это позволяет экономить на материале. При этом можно добиться равномерного распределения нагрузки по диаметру уплотнения, поскольку чем больше ребер, тем жестче становится конструкция, что способствует снижению локальных напряжений,

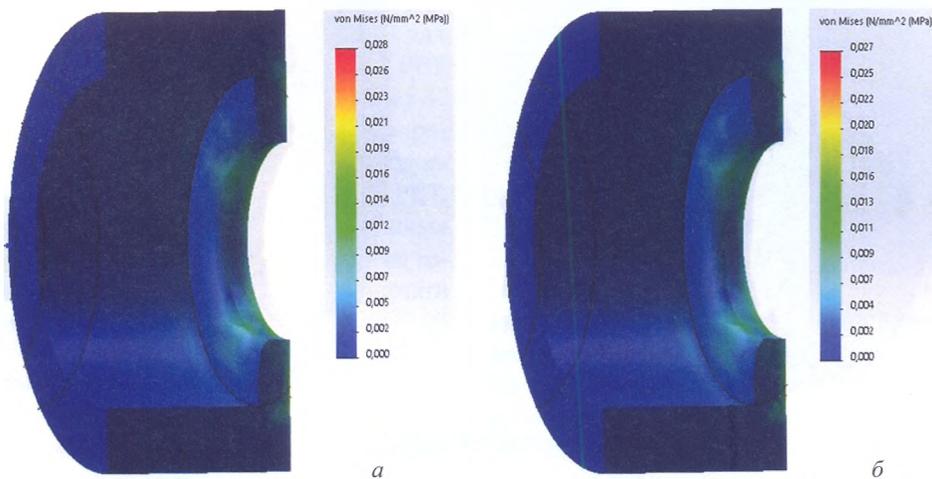


Рис. 4. Эпюры напряжений: а) фторопласт-4; б) PET

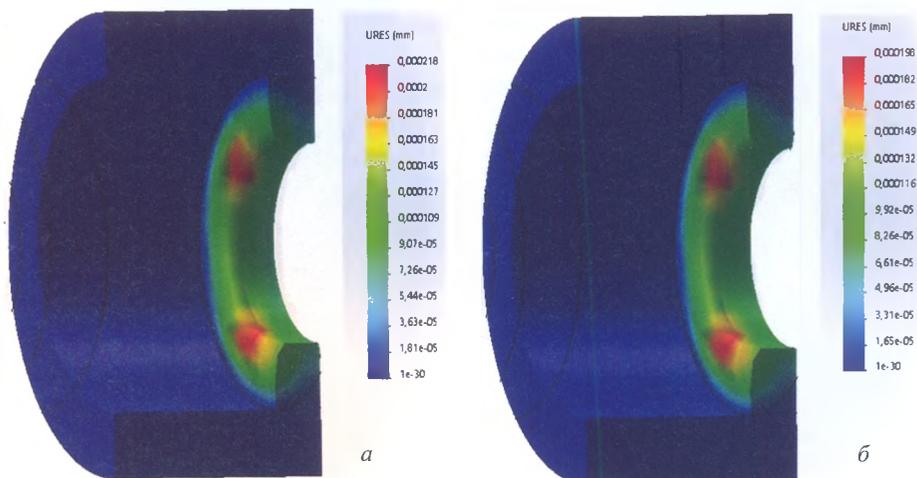


Рис. 5. Эпюры деформаций: а) фторопласт-4; б) PET



Рис. 6. Внутренняя реберная конструкция разработанного седла

рис. 7. Напряжения, испытываемые двумя образцами, представлены на рис. 7.

Анализ показал, что уплотнения испытывают напряжения, схожие по величине с напряжениями сплошного уплотнения. Наибольшая степень воздействия напряжений примерно 0,031 МПа. Деформации перемещений, испытываемые двумя образцами, представлены на рис. 8.

В данной эюре видно, что перемещения также составляют меньше 0,001 мм, при этом перемещения стали не локальными, как на рис. 4, а распределенными по всему диаметру уплотнения.

Рассмотрим зависимости давления от температуры данных материалов, полученных на основе исследований.

График (рис. 9) дает понять, что фторопластовое уплотнение способно выдержать давление в 16 бар

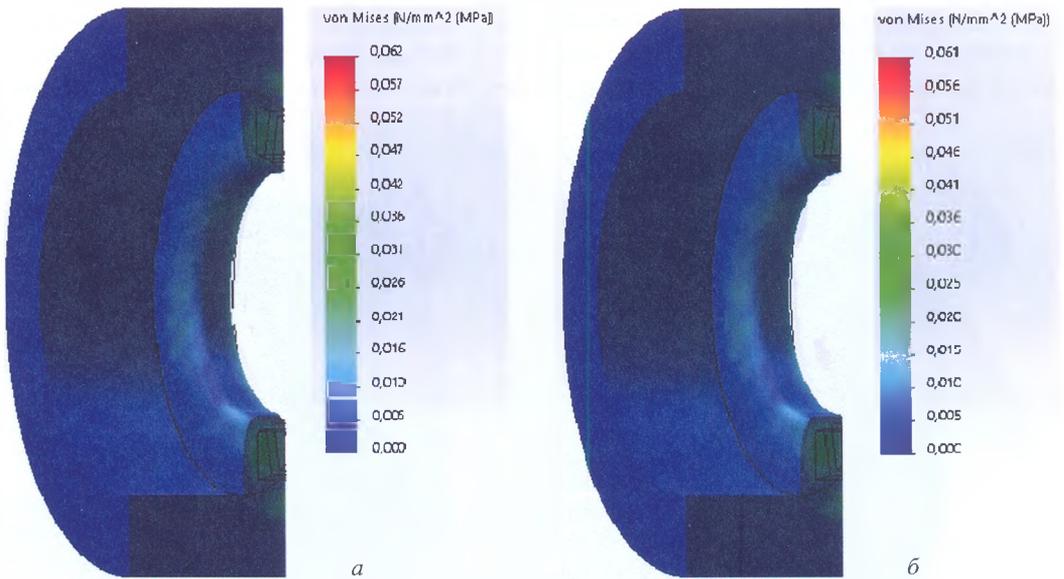


Рис. 7. Эпюры напряжений седел с ребрами: а) фторопласт-4; б) PET

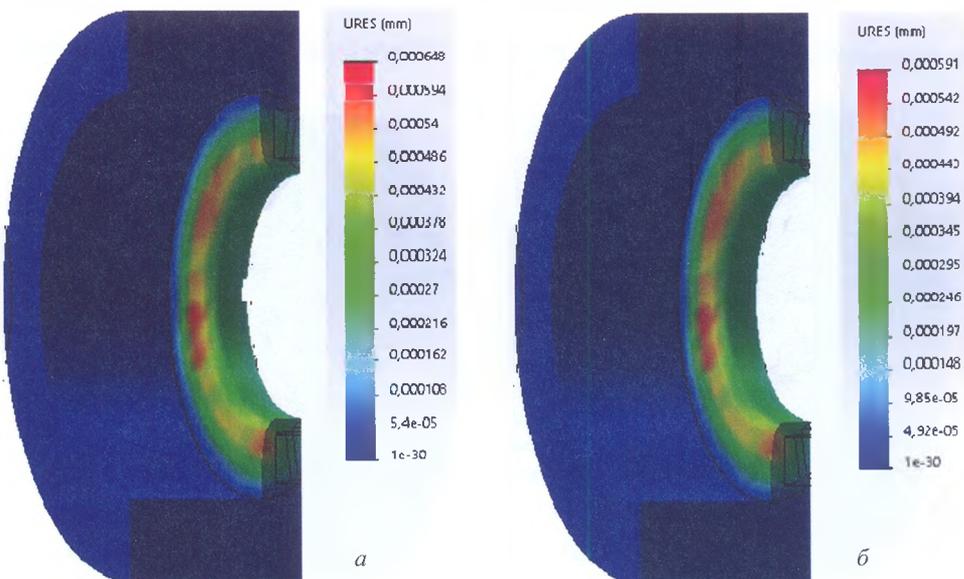


Рис. 8. Эпюры деформаций седел с ребрами: а) фторопласт-4; б) PET

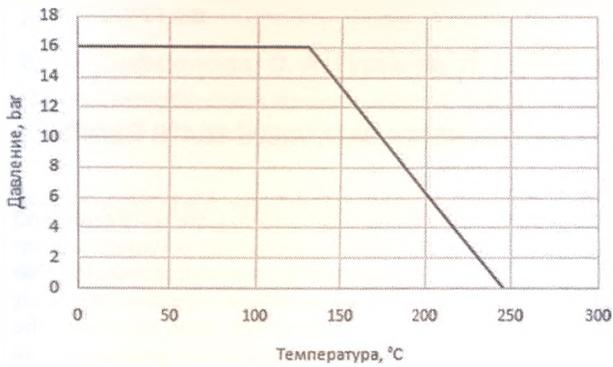


Рис. 9. График зависимости давления от температуры фторопласта-4 в изделии

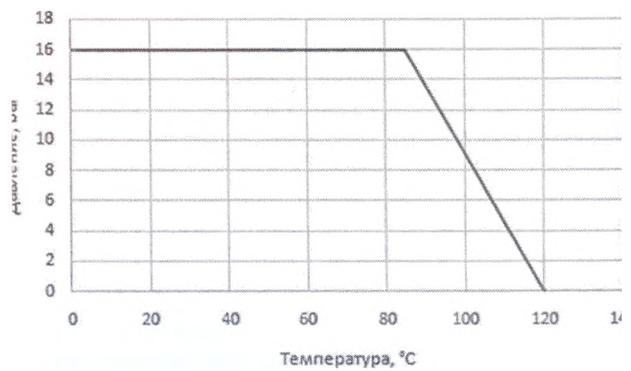


Рис. 10. Зависимость давления от температуры РЕТ в изделии

в температурном диапазоне от 0 до 130°C. Свыше 130°C материал начинает терять свои свойства, что приводит к снижению прилагаемого давления. Когда температура достигнет отметки 245°C, материал не сможет удерживать давление.

По графику (рис. 10) температурные диапазоны материала РЕТ намного меньше, чем у фторопласта-4. Уже на отметке 85°C материал начинает терять свои уплотнительные свойства. На отметке 120°C материал не сможет удерживать давление. Однако для моделируемых условий эксплуатации материал РЕТ выдерживает такое же давление, как и фторопласт-4.

Проведя анализ данных напряженно-деформированного состояния, можно прийти к выводу, что уплотнение различных конфигураций, сделанное из РЕТ, мало чем отличается от фторопласта-4 для указанных условий эксплуатации. Таким образом, технология изготовления таких уплотнений при помощи 3D-печати оправдывает себя.

Расчетная технико-экономическая оценка решений

Ниже приведены ориентировочные технико-экономические показатели для анализа целесообразности использования 3D-печати уплотнений из пластика типа ПЭТ с одновременной заменой уплотнения сплошной конфигурации седла на ребристую. Расчетные характеристики при анализе показаны при использовании возможностей производственных 3D-принтеров и приняты по среднерыночным расценкам. Данные анализа приведены в табл. 2 и 3.

Из табл. 3 видно, что наиболее рентабельным является изготовление уплотнения ребристой конфигурации, также данная конфигурация сокращает время изготовления уплотнения.

Объединив результаты анализа напряженно-деформированного состояния седел и технико-экономические оценки, можно констатировать, что уплотнения с ребрами жесткости эффективнее по сравнению со сплошным уплотнением. При этом для выбранных условий могут быть использованы более дешевые пластики типа РЕТ.

Таблица 2. Затраты

Уплотнение	Без ребер	С ребрами
Потрачено материала гр/см ³	7450 гр./7275	5685 гр./5573
Мощность принтера	0,3 кВт	0,3 кВт
Моделирование	5 ч	5 ч
Печать	100 ч	77 ч

Таблица 3. Оценка стоимости изделий 3D-печати

Уплотнение	Без ребер	С ребрами
Материал	21977,5 руб	14212,5 руб
Электроэнергия	282,60 руб	282,60 руб
Моделирование	750,00 руб	750,00 руб
Печать	15000 руб	11 550 руб
Амортизация	3200,00 руб	1540,00 руб
Цена первой детали	39 468,8 руб	28 161,3 руб

Данное исследование показало, что существует выраженная целесообразность изготовления уплотнений из материалов, используемых при 3D-печати. Печать разнообразных уплотнений, от небольших до уплотнений большого диаметра, единичными экземплярами и только тех, которые нужны в данный момент, и выполняемых непосредственно на производстве без затрат на логистику и хранение позволяет предположить перспективность быстрого ввода предложенных решений в жизнь. В дальнейшем с развитием технологий 3D-печати станет экономически целесообразно изготавливать седла из традиционного фторопласта.

Список литературы

1. Горобченко С. Л. Курс Трубопроводная арматура. Модуль Полимерные седла поворотной арматуры. Изд. Литрес, 2020. 280 с.
2. Зерциков К. Ю., Гайдадин А. Н. Влияние технологических факторов на размерную стабильность изделий из фторопласта и композитов на его основе / Пластические массы № 3–4. С. 26–29.
3. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / под общ. ред. Кондакова Л. А. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.

S. L. Gorobchenko, D. A. Kovalev, G. D. Semenov

St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design
191186 Russia, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 18

EVALUATION OF THE PROSPECTS OF NEW DESIGNS OF LARGE-DIAMETER BALL VALVE SEATS USING NUMERICAL MODELING AND 3D PRINTING CAPABILITIES

The issues of increasing the efficiency of the applying of polymer ball valve seats using numerical modeling are considered and the prospects of manufacturing new design seats by 3D-printing are evaluated. The main problems of choosing polymer seats for large-diameter ball valves are identified, taking into account the choice of material, design and cost indicators. It is revealed that the seat designs based on structures with stiffeners made of cheaper plastics used in 3D printing are not inferior to solid-section seats made of expensive fluoroplastics under simulated operating conditions of large-diameter ball valves of main water pipelines. The main directions of improving the use of polymer crane seats are shown using an integrated approach that takes into account the use of promising materials used in 3D-printing, the development of new seat designs, modeling of the stress-strain and thermal stress state, and the analysis of the technical and economic feasibility of using seats in specific types of shut-off valves.

Keywords: polymer seats, large-diameter shut-off ball valves, PET, PTFE, solid-section structures and structures with stiffeners, 3D-printing, technical and economic feasibility of seat's application.

References

1. Gorobchenko S. L. Course Pipe fittings. Module Polymer seats for rotary valves. M.: Litres, 2020. 280 p. (in Rus.).
2. Zershchikov K. Yu., Gaidadin A. N. Influence of technological factors on the dimensional stability of products made of fluoroplastic and composites based on it // *Plastics* No. 3–4. pp. 26–29 (in Rus.).
3. Seals and sealing technology: reference book / ed. L. A. Kondakova M.: Mashinostroenie, 1986. 464 p. (in Rus.).