

Т. Н. Васильева, К. А. Струнин, В. И. Онофриенко

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО СИЛЬФОНА

На примере расчета прочности сильфона конкретной конструкции рассмотрен один из возможных подходов к численному моделированию напряженно-деформированного состояния многослойных сильфонов. Предложенный подход основан на использовании осевой симметрии конструкции для перехода от трехмерной расчетной модели к двумерной. Расчеты выполняются в упругопластической постановке с использованием программного пакета, реализующего метод конечных элементов. В качестве примера реализации предложенного подхода выполнен расчет статической и усталостной прочности трехслойного стального сильфона расходной магистрали горючего ракеты космического назначения «Циклон-4М». Расчет статической прочности сильфона, нагруженного внутренним давлением, показал, что напряжения в слоях достигают предела текучести, но при этом несущая способность конструкции сохраняется. По результатам моделирования изменения напряженно-деформированного состояния сильфона за один цикл действия повторно-переменной нагрузки была определена амплитуда пластических деформаций в наиболее нагруженной области сильфона, что позволило оценить запас его усталостной прочности в условиях малоциклового нагружения. Достоинством предложенного подхода к оценке прочности многослойных сильфонов является то, что его реализация не требует больших объемов оперативной памяти и затрат времени для выполнения расчета.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, метод конечных элементов, расчетная модель, прочность.

На прикладі розрахунку міцності сильфона конкретної конструкції розглянуто один з можливих підходів до числового моделювання напружено-деформованого стану багат шарових сильфонів. Запропонований підхід ґрунтується на використанні осьової симетрії конструкції для переходу від тривимірної розрахункової моделі до двовимірної. Розрахунки виконують у пружно-пластичній постановці з використанням програмного пакета, який реалізує метод скінченних елементів. Як приклад реалізації запропонованого підходу виконано розрахунок статичної міцності та міцності від утомленості тришарового сталевого сильфона витратної магістралі пального ракети космічного призначення «Циклон-4М». Розрахунок статичної міцності сильфона, навантаженого внутрішнім тиском, показав, що напруги в шарах сильфона досягають межі текучості, але при цьому несуча здатність конструкції зберігається. За результатами моделювання зміни напружено-деформованого стану сильфона за один цикл дії повторно-змінного навантаження було визначено амплітуду пластичної деформації в найбільш навантаженій ділянці сильфона, що дозволило оцінити запас його міцності від утомленості в умовах малоциклового навантаження. Перевагою запропонованого підходу до оцінювання міцності багат шарових сильфонів є те, що його реалізація не потребує великих обсягів оперативної пам'яті та витрат часу на виконання розрахунку.

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, метод скінченних елементів, розрахункова модель, міцність.

Strength calculation example of the specific design bellows is taken to consider one of the possible approaches to the numerical simulation of the stress and strain state of the multilayer bellows. Proposed approach is based on the use of axial symmetry of the structure for transition from 3D calculation model to 2D one. Calculations take place in the elastoplastic setup, using the software package of the finite elements method. As an example of the proposed approach static and fatigue strength of the three-layer steel bellows of the Cyclone-4M fuel supply line are calculated. Calculation of the static strength of the bellows, loaded with internal pressure, showed that layer stresses achieve yield strength, at the same time preserving the bearing capacity of the structure. Results of the simulated change in the stress and strain state of the bellows per one cycle of the variable reloading were taken to find the amplitude of the plastic deformations in the most loaded area of the bellows, which allowed estimation of its fatigue strength in the conditions of low-cycle loading. Advantage of the proposed approach to the multilayer bellows strength evaluation is that it does not require large volumes of RAM and time to do the calculations.

**Keywords:** computer simulation, finite element method, calculation model, strength.

## Введение

Металлические сиффоны широко используются в ракетной технике в качестве компенсаторов тепловых расширений трубопроводов, разделителей сред, уплотнителей клапанов и др.

Отличительной особенностью многослойных сиффонов является то, что увеличение числа слоев сиффона позволяет в габаритах однослойного сиффона обеспечить снижение его жесткости.

В свое время основные параметры и характеристики многослойных металлических сиффонов определялись ГОСТом [1], и в процессе проектирования конструктор мог выбрать тот или иной сиффон из выпускаемой промышленностью номенклатуры. Отсутствие в предлагаемой номенклатуре конструкции сиффона с заданными характеристиками предполагает его проектирование, а значит, оценку прочности.

Доступная конструктору литература [2, 3, 4, 7], посвященная расчету параметров сиффонов, немногочисленна, предлагаемые методы в основном касаются расчета прочности однослойных сиффонов и являются приближенными. В связи с этим очевидными являются попытки численного решения задачи расчета прочности многослойных металлических сиффонов с использованием пакетов прикладных программ на базе метода конечных элементов.

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) многослойных сиффонов осложняется тем обстоятельством, что в рамках конечноэлементного подхода их расчет сводится к задаче контактного взаимодействия между слоями по нескольким обширным поверхностям, что, по сравнению с соответствующим расчетом однослойного сиффона, приводит к существенному возрастанию как времени расчета, так и требуемого объема оперативной памяти.

Настоящая статья посвящена рассмотрению одного из подходов к оценке прочности сиффонов на основе численного моделирования НДС многослойных сиффонов.

## Объект моделирования

В качестве объекта моделирования (рис. 1) рассмотрен трехслойный предварительно обжатый стальной сиффон расходной магистрали горючего ракеты космического назначения «Циклон-4М».

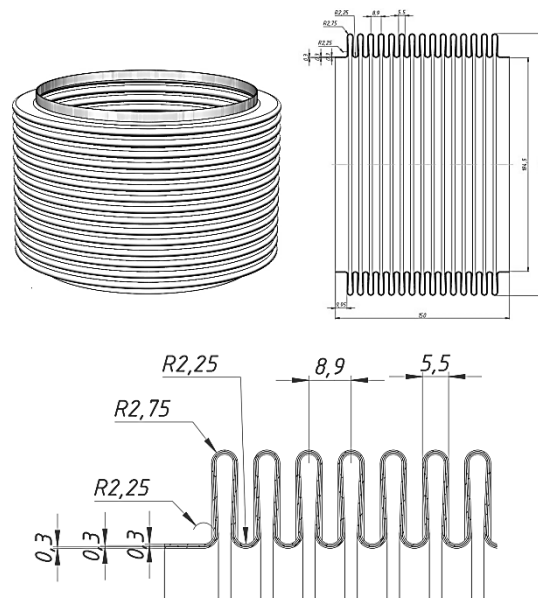


Рис. 1. Общий вид и продольный разрез трехслойного сиффона

Основные параметры сиффона:

- наружный диаметр  $D = 226$  мм;
- внутренний диаметр  $D_{\text{вн}} = 184,5$  мм;
- толщина слоя  $\delta_c = 0,3$  мм;
- радиус скругления наружного слоя в вершинах гофр  $2,75$  мм, во впадинах –  $2,25$  мм;
- число гофр  $n_z = 15$ ;
- параметр уплотнения

$$k = \frac{t - t_0}{t_0} = -0,11,$$

где  $t_0$  и  $t$  – шаг неуплотненного и уплотненного гофров.

Материал сиффона – сталь DIN 1.4541.

Условия эксплуатации:

- давление рабочей среды до  $10$  кгс/см<sup>2</sup>;
- давление гидроудара  $15$  кгс/см<sup>2</sup>;
- взаимный разворот торцов сиффона  $\varphi = 6^\circ$ .

### Выбор расчетной модели

Первоначально в качестве модели для численного моделирования была использована полномасштабная трехмерная модель сальфона из трех слоев при условии отсутствия взаимного проникновения в зоне контакта слоев. Расчет НДС сальфона выполнялся в линейно-упругой постановке с использованием пакета Ansys WorkBench 16.1.

Результаты расчета показали, что напряжения в скруглениях гофр существенно превышают предел прочности стали DIN 1.4541  $\sigma_B = 55...72$  кгс/мм<sup>2</sup> [9]. Это однозначно указывает на необходимость проведения расчета в упругопластической постановке.

Ввиду отсутствия данных по деформационной диаграмме растяжения стали DIN 1.4541 в качестве таковой была использована упрощенная билинейная диаграмма с основными опорными точками: предел текучести  $\sigma_T = 40$  кгс/мм<sup>2</sup> при относительной деформации  $\varepsilon = 0,2\%$  и предел прочности  $\sigma_B = 60$  кгс/мм<sup>2</sup> при относительной деформации  $\varepsilon = 30\%$ , соответствующей по значению удлинению при разрыве  $\delta$ .

Указанный выбор обусловлен тем, что сталь DIN 1.4541 относится к деформационно упрочняющимся, и, как показали испытания на партии образцов [5], после формовки сальфона исходные значения механических характеристик согласно ДСТУ EN 10088-2:2010: предел текучести  $\sigma_T = 22$  кгс/мм<sup>2</sup>, временное сопротивление  $\sigma_B = 55...72$  кгс/мм<sup>2</sup>, удлинение при разрыве  $\delta = 40\%$  – за счет нагартовки приобретают приведенные выше значения.

Однако попытка выполнить расчет НДС полномасштабной модели сальфона, нагруженной внутренним давлением с взаимным отклонением плоскостей торцов на угол  $6^\circ$ , в упругопластической постановке не дала ожидаемого результата – многочасовой расчет процесса нагружения не достигал сходимости. В связи с этим была предпринята попытка упрощения исходной постановки задачи. В частности, вместо модели из 15 гофр предложено перейти к

модели из трех гофр, поскольку картина нагружения гофр средней части сальфона является идентичной. Кроме того, принято решение использовать осевую симметрию конструкции, с тем чтобы от трехмерной модели перейти к двухмерной.

Достигнутое в результате использования предложенного подхода уменьшение размерности системы конечных элементов позволило существенно увеличить плотность сетки по толщине слоя. Действительно, при одинаковой плотности сетки конечных элементов предложенный подход уменьшает количество узлов примерно в  $pD/d_c \approx 2500$  раз. При этом необходимый для расчетов объем оперативной памяти снижается примерно в  $(1,5pD/d_c)^2 \approx 10^7$  раз. (Здесь  $D$  – наружный диаметр сальфона;  $d_c$  – толщина одного слоя).

В качестве примера на рис. 2 показан фрагмент использованной в расчетах сетки конечных элементов в зоне скругления наружного гофра трехслойного сальфона.

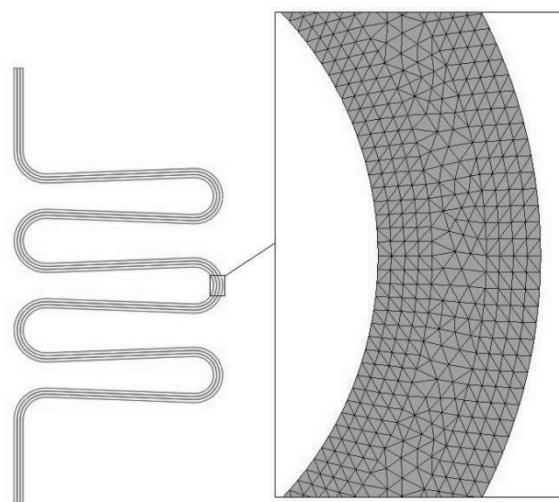


Рис. 2. Сетка конечных элементов на участке гофра

Как видно из рисунка, каждый слой моделируется четырьмя элементами по толщине. Ограничением перехода к двухмерной модели является то, что он исключает возможность проведения прямого расчета НДС при взаимном развороте торцов сальфона, однако последний можно имитировать осевым сжатием и растяжением модели на значение, соответствующее укорочению (удлинению) образующей наружной поверхности сальфона в плоскости разворота.

В плане проверки достоверности расчетной модели выполнен линейно-упругий расчет по определению продольной жесткости сальфона с использованием пакета SolidWorks Simulation версии 16. Для этого на одном из торцов сальфона задано закрепление типа «ролик-ползун», а на другом – приложена продольная сила  $F = 20$  кгс. Полученное по результатам расчета удлинение одного гофра сальфона  $\Delta = 0,373$  мм, что соответствует его продольной жесткости

$$C = \frac{F}{\Delta} = 53,6 \text{ кгс/мм.}$$

Экспериментально полученное значение жесткости одного гофра реального сальфона той же геометрии  $C = 42,6$  кгс/мм. Расхождение можно объяснить тем, что в реальной конструкции толщины слоев по длине гофра могут иметь местное утончение за счет вытяжки материала при формовке.

Полученная двухмерная модель прежде всего была использована для анализа процесса нагружения сальфона внутренним давлением  $15 \text{ кгс/см}^2$  в линейно-упругой постановке.

Условия закрепления модели – «ролик-ползун» по верхнему и нижнему торцам, т. е. под действием давления длина сальфона остается неизменной, но торцы обладают свободой перемещений, обусловленных изменением диаметра. Такое закрепление торцов двухмерной модели позволяет исключить влияние краевого эффекта на характер нагружения средних гофр сальфона.

Результаты линейно-упругого расчета показали, что максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения реализуются в скруглениях гофр, в слое с минимальным радиусом скругления (в вершине гофра – для внутреннего слоя, во впадине гофра – для наружного слоя), и достигают значения  $100 \text{ кгс/мм}^2$ , что подтверждает ранее полученный результат расчета по трехмерной модели и существенно превышает предел прочности стали DIN 1.4541.

Таким образом, линейно-упругий расчет свидетельствует, что при заданном внутреннем давлении  $15 \text{ кгс/см}^2$  конструкция однозначно работает за пределом упругости. Поэтому все последующие расчеты выполнялись в упругопластической постановке «пластичность – von Mises» с использованием описанной выше билинейной деформационной кривой.

### Напряженно-деформированное состояние сальфона в условиях статического нагружения

Максимальные напряжения в сальфоне реализуются в результате совместного действия давления рабочей среды при гидроударе  $15 \text{ кгс/см}^2$  и максимального обжатия (растяжения) гофр в результате взаимного разворота торцов сальфона на угол  $\varphi = 6^\circ$ .

Максимальное сжатие гофр модели сальфона будет иметь место в диаметральной плоскости сальфона, совпадающей с плоскостью разворота,

$$w = \frac{3\pi\varphi(D_n + 6\delta_c)}{n_r \cdot 360^\circ} = 1,95 \text{ мм.}$$

Результаты расчета для максимального сжатия и растяжения показаны на рис. 3, из которого следует, что и при сжатии, и при растяжении наибольших значений, превышающих предел текучести, напряжения достигают в центре впадины гофра наружного слоя сальфона. (Масштаб деформаций на рис. 3 соответствует масштабу геометрических размеров сальфона).

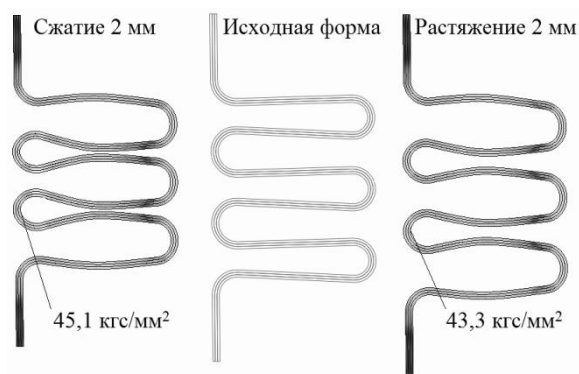


Рис. 3. Максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения в сечении модели сальфона при сжатии и растяжении с учетом действия внутреннего давления  $15 \text{ кгс/см}^2$

На рис. 4 показаны области сечения, в которых эквивалентные напряжения достигают предела текучести (затемненные участки по толщине слоя), и их масштабы: в наиболее нагруженных участках ширина области пластических деформаций составляет примерно 2/3 толщины слоя. Несмотря на появление остаточных деформаций, несущая способность конструкции сохраняется ввиду того, что центральные части (светлые области) по толщине слоя работают в пределах упругости. Кроме того, на отдельных участках, один из которых показан на рисунке, имеет место расслоение, то есть образование зазоров между слоями сальфона.

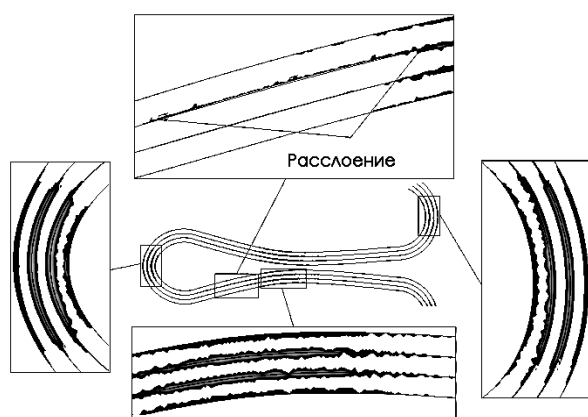


Рис. 4. Зоны пластичности по сечению сальфона

Очевидно, что рассмотренный случай нагружения с точки зрения прочности сальфона является наиболее критичным, но по сути однократным. Основным же случаем будет динамическое нагружение сальфона вследствие вынужденных колебаний магистрали во время полета при внутреннем давлении в магистрали 10 кгс/см<sup>2</sup>.

#### Напряженно-деформированное состояние сальфона в условиях малоциклового нагружения

Статический упругопластический расчет НДС сальфона под действием внутреннего давления 10 кгс/см<sup>2</sup> показал, что в этом случае напряжения на поверхности слоев также достигают значений предела текучести.

Полученные результаты показывают, что при циклическом нагружении сальфона и уровне напряжений в слоях, превышающем

предел текучести, основным фактором потери прочности сальфона в процессе эксплуатации может быть малоцикловая усталость.

Известно, что сопротивление разрушению при циклическом деформировании существенно зависит от характера нагружения (мягкое или жесткое) и циклических деформационных свойств материала. Поскольку исходным для оценки прочности в рассмотренных режимах нагружения является размах деформаций, обусловленных взаимным разворотом торцов сальфона на заданный угол  $\varphi = 6^\circ$ , циклическое нагружение по своему характеру будет жестким. С другой стороны, как уже отмечалось, сталь DIN 1.4541 является деформационно упрочняющимся материалом, то есть в результате повторяющихся циклов нагружения предел текучести растет на фоне снижения остаточного удлинения при разрыве. Следовательно, при расчете малоциклового усталости сальфона необходимо исходить из условия жесткого нагружения конструкции из деформационно упрочняющегося материала. В этом случае согласно справочнику [6] будет иметь место разрушение материала сальфона по усталостному типу с образованием трещин.

Экспериментально подтвержденный подход к оценке долговечности сальфонных компенсаторов при малоцикловом нагружении изложен в работе [7, с. 230], где для расчета запаса прочности по малоциклового усталости предлагается использовать кривую разрушающих деформаций при жестком нагружении, полученную на образцах материала конструкции. Наличие указанной кривой гарантирует получение более точной оценки, однако ее построение требует выполнения достаточно большого количества экспериментов по усталостному разрушению образцов.

Ввиду отсутствия данных кривой разрушающих деформаций при жестком нагружении образцов из стали DIN 1.4541 ограничимся упрощенной оценкой, в частности эмпирическим соотношением между циклической долговечностью (предельным числом циклов до разрушения)  $N$  и амплитудой пластической деформации за

цикл  $\varepsilon_{\text{апл}}$ , известным как формула Мэнсона-Коффина [6, с. 602]

$$N = \left( \frac{1}{4\varepsilon_{\text{апл}}} \ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{\frac{1}{m}},$$

где  $\psi$  – относительное сужение при разрыве (для стали 12X18H10T – аналога DIN 1.4541, при температуре 20°C значение  $\psi = 66-80\%$ );  $m$  – константа материала. Для малоуглеродистых низколегированных и высоколегированных сталей с пределом прочности  $\sigma_B = 30...70$  кгс/мм<sup>2</sup>  $m$  принимается равным 0,5 [8, с. 129]. Для близкой по механическим свойствам к DIN 1.4541 стали X18H10T  $m = 0,44$  [7, с. 230].

С целью определения  $\varepsilon_{\text{апл}}$  был выполнен упругопластический расчет с имитацией одного цикла нагружения двухмерной модели сиффона из трех гофр, которое включает продольное обжатие на 1,95 мм, обусловленное взаимным разворотом торцов сиффона на угол 6° на фоне действующего внутреннего давления 10 кгс/см<sup>2</sup>, соответствующего давлению рабочей среды.

Кривые истории нагружения модели по давлению и обжатию представлены на рис. 5, где горизонтальная ось соответствует безразмерному времени, то есть относительной длительности в пределах одного цикла нагружения. В соответствии с представленными кривыми вначале сиффон нагружается внутренним давлением 10 кгс/см<sup>2</sup>, затем подвергается сжатию на величину, соответствующую углу разворота 6°, а после этого – растяжению на ту же величину, что соответствует углу разворота 0°.

По результатам расчета максимальная эквивалентная относительная деформация за один цикл нагружения реализовалась в центре впадины наружного слоя наружной поверхности гофра при максимальном обжатии и составила  $\varepsilon_{\text{max}} = 6,587 \cdot 10^{-3}$ . Эквивалентная относительная деформация в том же элементе на момент достижения давлением значения 10 кгс/см<sup>2</sup> составила  $\varepsilon_{\text{ном}} = 3,766 \cdot 10^{-3}$ . С учетом полученных значений

$$\varepsilon_{\text{апл}} = \varepsilon_{\text{max}} - \varepsilon_{\text{ном}} = 2,821 \cdot 10^{-3}.$$

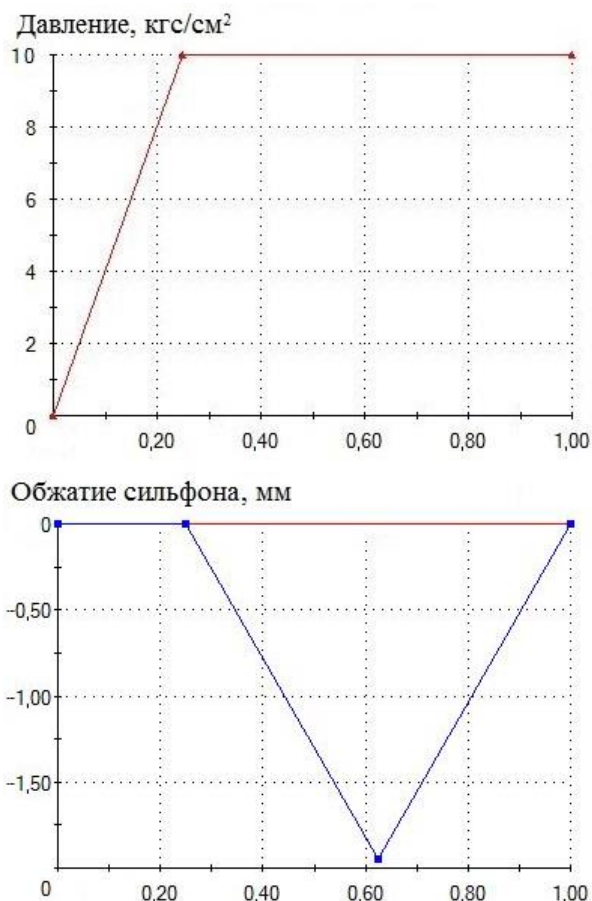


Рис. 5. Диаграммы нагружения расчетной модели

Для минимального значения  $\psi = 0,66$  и  $m = 0,5$  в соответствии с приведенным выше соотношением получим оценку числа циклов до разрушения  $N = 9140$  (для  $m = 0,44$   $N = 31740$ ). При длительности работы двигателя первой ступени порядка 200 с и частоте колебаний магистрали порядка 20 Гц общее число циклов нагружения сиффона составит около 4000, т. е. в соответствии с полученными оценками прочность сиффона по малоцикловой усталости можно считать обеспеченной.

### Выводы

Использование свойства осевой симметрии конструкции сиффона для перехода от трехмерной постановки задачи к двухмерной позволило реализовать один из возможных подходов к оценке запасов статической и усталостной прочности в условиях малоциклового нагружения для многослойных металлических сиффонов.

Указанный подход предполагает выполнение сравнительно простого численного моделирования процессов нагружения сильфона, не требующего значительных вычислительных затрат. Необходимым условием его реализации является наличие стандартных данных по механическим свойствам материала конструкции сильфона (предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение при разрыве, относительное сужение).

#### **Список использованной литературы**

1. ГОСТ 21744-83. Сильфоны многослойные металлические. Общие технические условия. 72 с.
2. Прочность, устойчивость, колебания: справочник; в 3-х т. / под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. М., 1968. Т. 2. 462 с.
3. Грабин Б. В., Давыдов О. И., Жихарев В. И. и др. Основы конструирования ракет-носителей космических аппаратов: учебник для студентов вузов / под ред. В. П. Мишина, В. К. Карраска. М., 1991. 416 с.
4. Сильфоны. Расчет и проектирование / под ред. Л. Е. Андреевой. М., 1975. 156 с.
5. Исследование влияния технологических операций на качество изготовления сильфонов из ленты стали марки DIN 1.4541 EN 1099-2 при различных температурно-силовых воздействиях и вибрациях в процессе изготовления и испытаний: техн. отчет № 3 М-13 / ГП «ПО ЮМЗ им. А. М. Макарова». Днепропетровск. 2013. 13 с.
6. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов / отв. ред. Писаренко Г. С. 2-е изд., перераб. и доп. Киев. 1988. 736 с.
7. Гусенков А. П., Москвитин Г. М., Хорошилов В. Н. Малоцикловая прочность оболочечных конструкций. М., 1989. 254 с.
8. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин на прочность и долговечность: справочник. М., 1985. 224 с.
9. ДСТУ EN 10088-2:2010. Сталі нержавкі. Ч. 2. Лист і стрічка з корозійнотривких сталей загальної призначеності. Технічні умови постачання. 42 с.

Статья поступила 10.06.2019