

УДК 608.4

## ПОВЫШЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ КОНСТРУКЦИИ АЛЮМИНИЕВОЙ ГОФРИРОВАННОЙ ВИТОЙ ШПУЛИ

© 2021 В.Ю. Арышенский<sup>1</sup>, Ф.В. Гречников<sup>2</sup>, С.В. Глушков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

<sup>2</sup>Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 31.05.2021

В работе представлены результаты расчётно-экспериментального исследования алюминиевых витых шпупов с различными конфигурациями профиля. Математическое моделирование изделия проводили при помощи программного комплекса ANSYS 18.2. Верификация моделей выполнена на основании испытаний, проведённых в центральной заводской лаборатории АО «Арконик СМЗ», на испытательной машине FP-100/1-10tn по действующим нормативным документам. Исследовалась опытная поставка шпупов с разработанным профилем специального вида. Сравнительный анализ проведён скупаемыми шпупами с профилем разработанным ранее поставщиком шпупов. Исследуемые шпупы изготовлены из сплава 3104 H19, толщина ленты 0,26 мм. По итогам исследования построены эмпирические формулы позволяющие определять нагрузку до смятия и высчитывать объём металла, для оценки удельной жесткости. В предложенные формулы введены безразмерные коэффициенты, учитывающие конфигурацию профиля (коэффициент формы) и относительную высоту стенки профиля. Коэффициенты представлены в виде номограмм для удобства графической оценки эффективности профиля. Определена критическая высота профиля, при которой удельная жесткость конструкции является наибольшей. Показано, что профиль с наклонной вертикальной стенкой и профиль с омегаобразной формой внутренней образующей обладают меньшей жесткостью, чем профиль с вертикальной П-образной формой гофра. Определен оптимальный диапазон угла отклонения от вертикальности стенки гофра, позволяющий с одной стороны обеспечить требуемый уровень жесткости конструкции, с другой стороны минимизировать металлоёмкость изделия. Сопоставление результатов модельных расчётов, результатов вычисления по предлагаемым эмпирическим зависимостям и фактических экспериментальных данных, показали их высокую сходимость, что позволяет сделать вывод о применимости предлагаемых формул при инженерных расчетах. Разработанный профиль специального вида позволяет снизить металлоёмкость шпупа на 13 % при сохранении требуемых прочностных характеристик и уровня жесткости.

*Ключевые слова:* Алюминиевая витая шпуля, жесткость конструкции, моделирование в программном комплексе ANSYS.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-4-12-17

Для формирования первых витков и дальнейшей их защиты от воздействий, как внешней среды, так и при контакте рулона с различными механизмами при транспортировке, в производстве алюминиевой ленты применяют шпупы. В зависимости от материала выделяют три основных типа применяемых шпупов: стальные, картонные [1] и алюминиевые [2]. Стальные шпупы характеризуются наибольшей прочностью и применяются при смотке рулонов по

*Арышенский Владимир Юрьевич, доктор технических наук, доцент кафедры ОМД.*

*E-mail: Vladimir.Aryshensky@arconic.com*

*Гречников Федор Васильевич, академик, доктор технических наук, профессор, научный руководитель Самарского федерального исследовательского центра РАН, заведующий кафедрой обработки металлов давлением Самарского университета. E-mail: gretch@ssau.ru*

*Глушков Сергей Валериевич, кандидат технических наук, доцент кафедры космического машиностроения. E-mail: glushkovsergeyv@mail.ru*

сле горячей и холодной прокатки, они являются многообразными и, как правило, оборачиваются внутри производства. Картонные шпупы менее прочные, по сути своей одноразовые, используются при смотке рулонов на финишных операциях и отгружаются заказчику ленты в составе рулона. Основным недостатком картонных шпупов логическим образом вытекает из их одноразовости, а именно необходимость утилизации шпупов после переработки ленты. Указанного недостатка лишены шпупы алюминиевые, поскольку их утилизация на производствах, связанных с переработкой алюминиевой ленты, не является проблемой, шпупы поступают в отходы, которые брикетируются и продаются как алюминиевый лом. Следует отметить, что себестоимость картонных шпупов находится на одном уровне с алюминиевыми и возможность последующей переработки является важным экономическим и экологическим аспектом.

Опыт успешного применения алюминиевых шпудл при производстве алюминиевой ленты насчитывает несколько десятилетий. Схема одной из первых шпудл такого типа представлена на рисунке 1 [3].

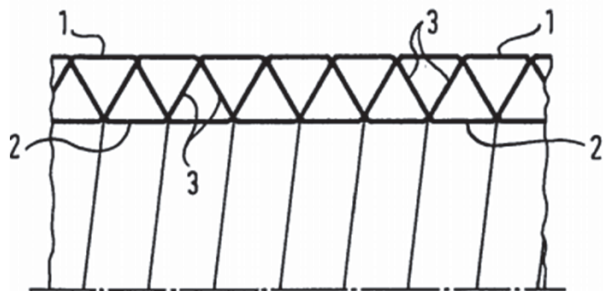


Рис. 1. Профиль шпудлы по патенту EP 0729911A2 [3]

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОФИЛЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ШПУДЛЫ

Ввиду того, что шпудла является расходным материалом, то актуальна задача о снижении ее металлоемкости при сохранении всех контролируемых параметров. Одним из вариантов успешной модификации [4] металлической шпудлы показан на рисунке 2. Здесь внешняя и внутренняя поверхности принимают волнистую или ребристую форму.



Рис. 2. Профиль шпудлы по патенту US 7040569 B2 [4]

В начале 2000 годов компания «Анкор» по заказу Самарского металлургического завода организовала выпуск алюминиевых витых шпудл с оптимизированной формой внутренней и внешней гофр. Преимущество предложенной конструкции [5,6] заключалось в придании внутренним гофрам омега-образной формы с одновременным увеличением расстояния между внешними полками, как показано на рисунке 3.

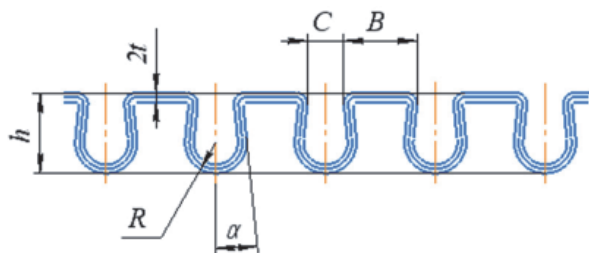


Рис. 3. Профиль шпудлы по патенту № RU192312U1 и RU54364U1 [5,6]

В 2018 году на Самарском металлургическом заводе устанавливается линия, на которой завод

начинает изготавливать алюминиевые шпудлы для внутренних потребностей производства. С целью выбора оптимальной геометрии шпудлы, проведены теоретические расчеты и ряд экспериментальных исследований.

Цель исследования получить оптимальный профиль алюминиевой витой шпудлы. Предложена форма, представленная на рисунке 4 [7].

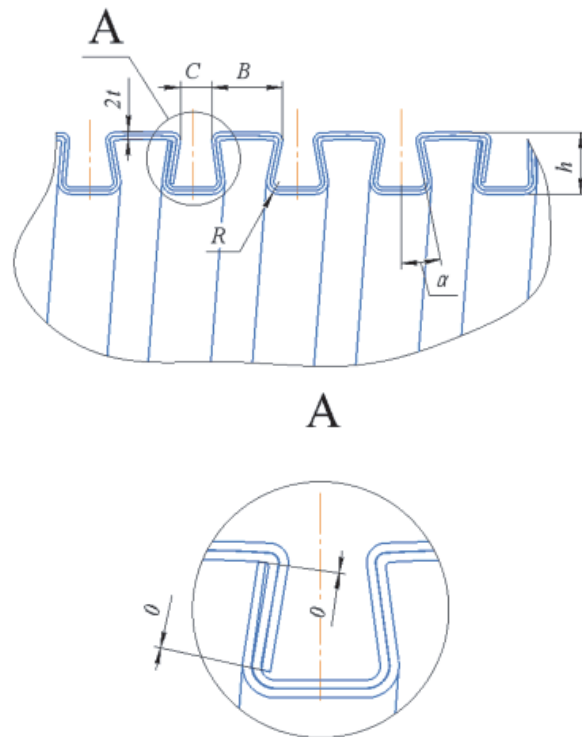


Рис. 4. Профиль предложенной формы

Алюминиевая шпудла должна сохранять свою заданную жесткость под действием динамических нагрузок, а именно, внешних поверхностных распределенных сил.

Важным аспектом, который необходимо учесть при проектировании, это надёжность замка (рис. 4 вид А), который в свою очередь не даёт шпудле «развернуться». Это требование было достигнуто, если формировать замок на каждом третьем витке. Принципиальная новизна предлагаемого замка заключается в его фиксации – начало и конец полосы упирается в существующий профиль.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью исследования характеристик разрабатываемой конструкции шпудлы заданного профиля была построена параметрическая оболочечная конечно-элементная модель в среде ANSYS 18.2. В виду тонкостенности шпудлы при построении модели использованы элементы оболочки Shell181 с использованием 9 точек интегрирования по толщине. Материал шпудлы

3104 Н19 принят изотропный с билинейным кинематическим упрочнением. Контактное взаимодействие между полосами, образующими профиль шпули, учитывалось при помощи контактных пар surface-to-surface с учётом толщины оболочечных элементов. Для реализации диаметрального сжатия нагружение модели осуществлялось при помощи пары абсолютно жёстких плоскостей.

В качестве предельной силы принимался момент достижения максимальными эквивалентными напряжениями уровня предела прочности материала, или силы, при которой стенки замкового соединения теряли устойчивость по местной форме с образованием волны выпучивания по окружности.

Шпуля во время эксплуатации подвергается в основном радиальным нагрузкам, поэтому были проведены испытания на поперечное сжатие. Испытания проводили на испытательной машине FP-100/1-10tn с диапазоном рабочего усилия до 10 т на шпулях-образцах с рабочей шириной 100 мм.

Испытуемый образец устанавливается на нижней опоре так, чтобы его ось вращения была горизонтальной (рисунок 5а). Посредством вертикального перемещения подвижной траверсы реализовывалось одноосное поперечное сжатие образца. В процессе нагружения фиксировались усилия на траверсе и величина ее перемещения. Нагружение продолжается до тех пор, пока шпуля-образец не сомнется.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прочность шпули определяется пределом текучести и толщиной ленты, из которой она изготавливается, диаметром шпули, частотой вертикальных стенок и их высотой. Для оценки

усилия смятия шпули при радиальном сдавливании предлагается эмпирическая формула:

$$P = 200\sigma_{0,2} \frac{n \cdot t \cdot k_f \cdot k_n}{D_{cp}} \cdot \cos\alpha, \quad (1)$$

где  $P$  – погонное усилие радиального сдавливания при превышении которого происходит ее смятие, кгс/100 мм длины;

$\sigma_{0,2}$  – предел текучести материала, МПа;

$n$  – количество вертикальных стенок на участок длиной 100 мм;

$t$  – толщина ленты из которой выполнен профиль, мм;

$k_n$  – расчетный коэффициент высоты стенки;

$k_f$  – расчетный коэффициент формы профиля;

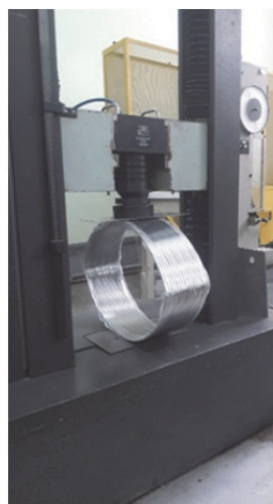
$D_{cp}$  – средний диаметр шпули, мм.

Параметры  $k_f$  и  $k_n$  предназначены для подстройки формулы при изменении геометрии профиля. Величина этих коэффициентов будет сильно изменяться в зависимости от формы профиля. Определение данных коэффициентов осуществляли при помощи конечно-элементного моделирования испытания на сжатие в среде ANSYS. На рисунке 6 показана зависимость произведения  $k_f \cdot k_n$  от формы профиля и высоты гофры. Здесь штрихпунктирная кривая соответствует профилю, представленному на рисунке № 2, с углом наклона полки 45°, штриховая линия – шпуле на рисунке № 3, где нижняя полка сделана омегаобразной с радиусом  $R=4$  мм, сплошная линия соответствует разработанному профилю (см. рис. 4), где  $\alpha=11,5^\circ$ ,  $R=1$  мм.

Анализ графика позволяет сделать вывод о том, что наклон вертикальной полки под углом 45° к горизонтальной внешней поверхности приводит к резкому эффекту снижения расчетной прочности. Это объясняется тем, что под нагрузкой тонкая стенка профиля теряет устойчивость и начинает изгибаться в критических



а



б

Рис. 5. Шпуля, установленная в испытательную машину FP-100/1-10tn: а) перед началом испытания; б) после достижения предельного сжатия

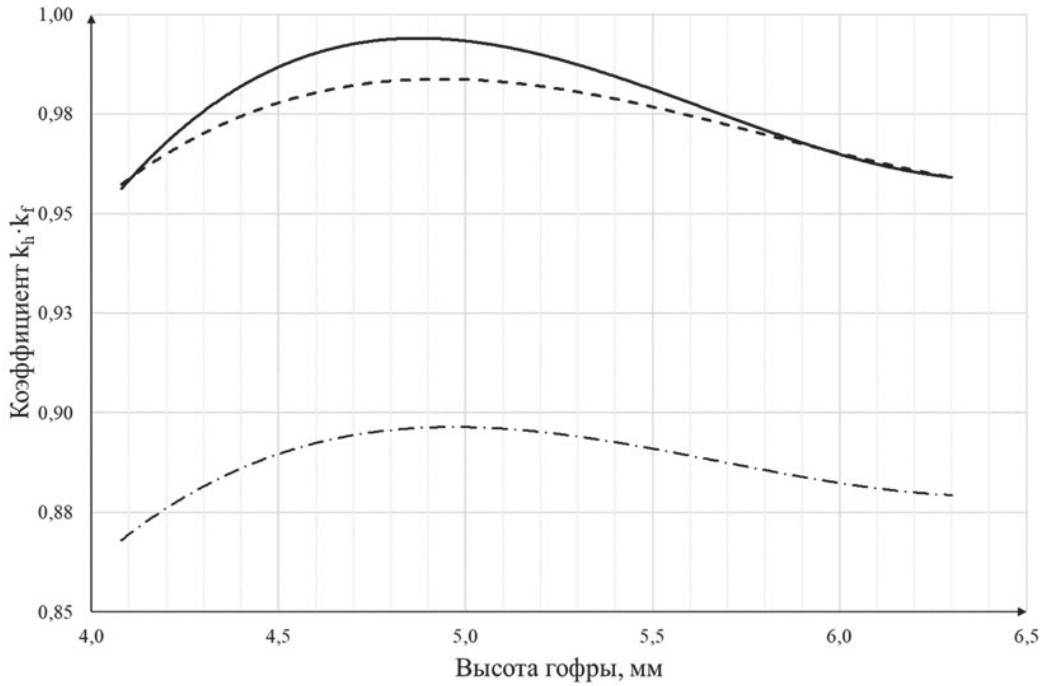


Рис. 6. Значение  $k_f \cdot k_n$  в зависимости от высоты гофры и формы профиля (диаметр шпули 404 мм)

местах (где угол действия сил наиболее острый), что приводит к преждевременному смятию шпули (рис. 5б).

Придание омегаобразной формы внутренним виткам (см. рис. 3) повышает жесткость конструкции. Наибольшая жесткость конструкции достигается при наименьшем радиусе загиба и с минимальным углом наклона вертикальных стоек.

Экспериментальные данные (см. табл. 1) подтверждают вышеприведенные расчетные выводы.

Следует отметить влияние высоты профиля, при увеличении высоты вертикальной стенки наблюдается сначала рост коэффициента за счет увеличения сечения, работающего на сжатие, до достижения критической высоты, после которого коэффициент начинает уменьшаться, от потери устойчивости.

Для определения оптимальной высоты профиля проведено теоретическое моделирование и экспериментальное исследование шпули выполненной по разработанной форме (см. рис. 4), для различных диаметров, результаты при-

ведены на рисунке 7. Здесь сплошная линия соответствует диаметру 280 мм, штрихпунктирная кривая – диаметру 498 мм, а штриховая линия – диаметру 404 мм. Сплошными маркерами показаны результаты натурных испытаний образцов, а полые маркеры представляют собой результаты конечно-элементного моделирования в пакете ANSYS. Расхождение в результатах натурных испытаний и компьютерного моделирования может быть объяснено тем, что расчетная компьютерная модель не учитывает технологический процесс формирования контура шпули из ленты, а предполагает естественное ненапряженное состояние материала. Исходя из полученного графика, учитывая требования по выдерживаемому усилию – 600 Н, можно рекомендовать снижение высоты полки до 4,5 мм, по сравнению с традиционно принятыми 5-6 мм.

Металлоемкость шпули в предположении о сохранении постоянной плотности материала и толщины будет выражаться через геометрические параметры:

$$V = \pi D_{cp} \cdot 2t \cdot \left( n \cdot \frac{h}{\cos \alpha} + 100 - n \cdot h \cdot \sin \alpha \right), \quad (2)$$

Таблица № 1. Фактическое сравнение типов шпуль (диаметр 404 мм, высота профиля 5 мм)

Параметр	Форма профиля		
	рис. 2	рис. 3	рис. 4
Средняя нагрузка, Н/100 мм	719	767	954

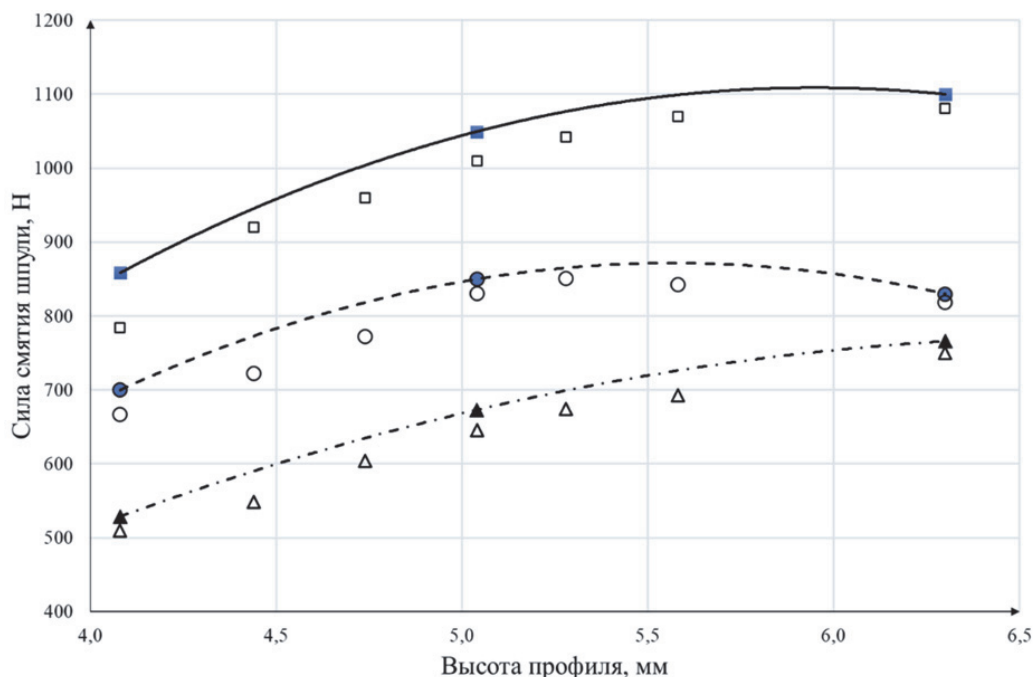


Рис. 7. Результаты исследования прочности шпули по форме профиля рис. 4

где  $V$  – объем металла на шпулю длиной 100 мм, Результаты расчета по формулам (1) и (2) приведены в табл. № 2.

Таким образом, установлен оптимальный диапазон величины угла  $\alpha$  и он находится в интервале 10-20°. Оптимальная угол наклона гофры позволит значительно снизить количество требуемого материала на её изготовления, и как следствие снизить её себестоимость.

С учетом всех вышеприведённых рассуждений была изготовлена и испытана партия шпудл диаметром 404 мм, результаты испытаний в сравнении с используемыми ранее шпулями приведены в табл. № 3.

Как видно из табл. 3, новая форма шпули с учетом оптимизации геометрических размеров профиля позволяет снизить металлоемкость шпули на 13 %, при сохранении прочности на том же уровне.

### ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработан про-

филь алюминиевой витой шпули. Этот профиль позволяет экономить до 13% материалов за счет снижения высоты вертикальной стенки шпули.

Высокий удельный уровень прочностных свойств достигается путем обеспечения прямоугольности профиля и выбора для него оптимальных геометрических параметров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ТУ 5456-001-05810809-2007, Шпули картонные. — Введ. 2007-09-28.— ОАО «СМЗ», 2007.— 6 с.  
 ТУ 1811-113-00195430-2000, Шпули алюминиевые. Дата регистрации 30.07.2002 — Введ.2001-02-01.— М.: Изд-во стандартов, 2001.— 27 с.  
 Simons J-P., Heringhaus G. Metallic winding core: Patent EP 0729911A2. 1996.  
 Schäfer F., Werner F. Winding tube and method for the production thereof: Patent US 7040569B2. 2006.  
 Коротков М. А. Алюминиевая двухслойная бобина: Пат. 54364 (РФ). 2006.  
 Коротков М. А. Алюминиевая двухслойная бобина: Пат. 192312 (РФ). 2019.  
 Оводенко А.М, Арышенский В.Ю., Яшин В.В., Гречников Ф.В. Алюминиевая двухслойная шпуля: Пат. 201057 (РФ). 2020.

Таблица 2. Оценка влияния соотношения высоты профиля и толщины ребра (на примере внутреннего диаметра шпули 404 мм)

$\alpha, ^\circ$	30	25	20	15	10	5	0
Расчетная нагрузка, Н/100 мм	761	796	825	848	865	877	878
Фактическая нагрузка (средняя), Н/100 мм	753				860		880
Расчетная удельная прочность Н/кг	250	257	260	258	253	247	236
Примечание	Низкая прочность		Оптимальный диапазон			Высокий расход металла	

Таблица 3. Результаты испытаний тестовой шпули в сравнении с ранее используемыми

Параметр	Тип шпули		
	Ранее используемые		Новая форма
Форма профиля	Рис. 3	Рис. 3	Рис. 4
Высота стенки	5-5,3	5,4-5,7	4,4-4,6
$\alpha$ , °	5	5	11,5
C, мм	3,5-3,7	3,3-3,4	2,5-3,2
B, мм	5,6-5,8	6-6,2	5,8-6,2
R, мм	3-4,5	3-4,5	1-1,5
Средняя нагрузка, Н/100 мм	874	877	859
Масса на погонный метр, кг/м	4,377	4,446	3,827
Удельная прочность, Н/кг	199,7	197,3	224,5

### INCREASING STRUCTURE STIFFNESS OF CORRUGATED ALUMINUM SPOOL

© 2021 V.Y. Aryshenskii<sup>1</sup>, F.V. Grechnikov<sup>2</sup>, S.V. Glushkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

<sup>2</sup> Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

The paper presents the results of a computational and experimental study of aluminum spools with different profile configurations. Mathematical modeling of the product was made using ANSYS 18.2 software package. Models were verified based on actual test results on FP-100/1-10tn testing machine in JSC "Arconic SMZ" Central Factory Lab as per valid normative documents. The study was made on a trial lot of spools with a specially developed type of profile. Comparative analysis was carried out against purchased spools with a profile previously developed by the spool supplier. The spools under study were made of alloy 3104 H19, 0.26 mm strip thickness. The study resulted in work out of empirical formulas helping to determine collapse load and calculate the amount of metal for evaluation of stiffness-to-weight ratio. The proposed formulas were added with dimensionless coefficients to account for the profile configuration (shape factor) and the relative height of the profile wall. The coefficients were presented in the form of nomograms for easy graphical assessment of the profile performance. The critical height of the profile was determined, at which specific stiffness of the structure is the highest. It was demonstrated that a profile with an inclined vertical wall and a profile with an omega-shaped inner generatrix have lower stiffness than a profile with vertical U-shaped corrugations. The optimal range of the corrugation wall tilt angle was determined to ensure the required level of the structure stiffness, on the one hand, and minimize metal consumption, on the other hand. Comparison of the results of model calculations, the results of computation by the proposed empirical dependencies and actual experimental data showed their high repeatability, which leads to the conclusion that the proposed formulas are applicable for engineering calculations. The developed profile of a special type makes it possible to reduce the spool metal consumption by 13% while maintaining the required strength performance and the level of stiffness.

**Key words:** Aluminum spool, structure stiffness, modeling using ANSYS engineering simulation software.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-4-12-17

Vladimir Aryshenskii, Doctor of Engineering Science, Associate Professor of the Department of Metal Forming by Pressure. E-mail: Vladimir.Aryshensky@arconic.com

Fedor Grechnikov, Academician, Doctor of Engineering Science, Professor, Scientific Director of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Head of Metal Forming Department. E-mail: gretch@ssau.ru

Sergey Glushkov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Space Engineering.

E-mail: glushkovsergeyv@mail.ru