

Бадыков Р.Р.  
Юртаев А.А.  
Григорьев Е.М.  
Ломачёв А.О.

Самарский национальный  
исследовательский университет  
имени академика С. П. Королёва  
(Самарский университет)

Московское шоссе, д. 34,  
г. Самара, 443086,  
Российская Федерация

[badykov.rr@ssau.ru](mailto:badykov.rr@ssau.ru)  
[yurtaev.aa@ssau.ru](mailto:yurtaev.aa@ssau.ru)  
[grigorev.em@ssau.ru](mailto:grigorev.em@ssau.ru)  
[lomachev.ao@ssau.ru](mailto:lomachev.ao@ssau.ru)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГОФРИРОВАННОГО ВКЛАДЫША ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ЛЕПЕСТКОВОГО ПОДШИПНИКА

*Статья посвящена процессу проектирования инструментов для изготовления гофрированного вкладыша газодинамического радиального лепесткового подшипника. В статье предлагается применение альтернативной технологии изготовления гофрированного вкладыша и решаются связанные с данной технологией задачи по прогнозированию, учёту и компенсации влияния остаточных упругих деформаций, возникающих при его изготовлении. Подчеркивается значимость использования численного метода конечных элементов для учёта остаточных деформаций и напряжений с целью минимизации негативного влияния остаточной упругой деформации.*

**Ключевые слова:** газодинамический подшипник; численная модель; пресс-форма; ANSYS Static Structural; штамповка; деформация

### 1 Введение

Процесс проектирования радиального газодинамического подшипника состоит из множества этапов. Основными этапами являются: выбор типа подшипника, конструктивного облика, расчёт его характеристик, создание моделей и конструкторской документации. Однако в процессе работы над каждым этапом необходимо учитывать какие технологии будут доступны для производства компонентов подшипника.

При изготовлении компонентов газодинамического радиального лепесткового подшипника необходимо решить две основные задачи: обеспечить его ресурс и несущую способность. Задача по обеспечению ресурса решается за счёт выбора режима работы подшипника, а также за счёт выбора антифрикционных покрытий, наносимых на внутреннюю поверхность наружного лепестка и вала. Задача по обеспечению несущей способности подшипника решается за счёт предварительного расчёта геометрии лепестков, гофрированных вкладышей и выбора метода их изготовления. При этом в литературе подробно изложены методики расчёта несущей способности подшипников данного

типа, однако информация, касающаяся изготовления гофрированных вкладышей, приводится редко [1-5].

Технологии изготовления ротора и наружных лепестков с требуемой точностью хорошо известны. Основные сложности возникают при производстве гофрированных вкладышей. Классический процесс изготовления гофрированных вкладышей включает в себя штамповку и последующую термообработку металлических листов заданной толщины. Однако вкладыши в процессе обработки металла давлением подвержены упругим деформациям после снятия нагрузки. Таким образом, неопределённость геометрии гофрированных вкладышей вследствие физики процесса изготовления будет оказывать влияние на жесткостные характеристики и, соответственно, на несущую способность подшипника.

В процессе проектирования технологической оснастки одним из способов снижения негативного влияния остаточных упругих деформаций на отклонение конечной геометрии изготовленных гофрированных вкладышей является добавление перегиба. Второй способ заключается в повышении температуры процесса штам-

повки, что позволяет снизить упругость материала. [6–8]. Данный процесс заключается в том, что после обработки металла давлением, гофрированные вкладыши вместе с матрицей и пуансоном помещаются в муфельную печь, где выдерживаются на протяжении 5-7 часов в зависимости от применяемого материала заготовки. Таким образом, для изготовления большой партии подшипников в короткий срок необходимо изготовить десятки матриц и пуансонов, либо процесс изготовления партии подшипников займёт существенное количество времени.

Альтернативой данному методу является известная технология изготовления элементов пластинчатых гидродинамических демпферов для опор газотурбинных двигателей [9]. Однако для использования данной технологии необходимо учесть остаточные упругие деформации, а также рассчитать напряжения в заготовке и профилированных шкивах с целью последующей компенсации деформации гофрированного вкладыша и введения поправок профилей шкивов при изготовлении. Одним из лучших способов для учёта влияния остаточных деформации является использование численного метода конечных элементов, что и было сделано в данной работе.

## 2 Исходные данные, разработка и настройки численной модели

Согласно результатам расчёта характеристик подшипника высота выступа гофрированного вкладыша должна составлять 0,45 мм, а длина 3,6 мм. Расстояние между соседними выступами должно составлять 4,6 мм (рисунок 1). Исследования проводились для заготовок толщиной 0,12 мм.

Материал демпфирующего листа – листовая сталь из прецизионного материала 36НХТЮ.

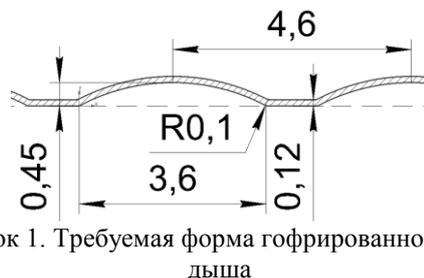


Рисунок 1. Требуемая форма гофрированного вкладыша

Для получения заданной формы было принято решение использовать метод прокатки заготовки между шкивами с зубчатым профилем. Шкивы было решено изготавливать из полимера eSUN Hard-Tough методом фотополимерной 3D печати SLA. Выбранный материал удовлетворяет требованиям для работы ролика механическими свойствами (таблица 1). За счёт SLA 3D печати обеспечивается изотропность механических свойств по объёму получаемой детали. Метод производства роликов обеспечит точность исполнения формы. При этом применение пластичных полимерных материалов для изготовления шкивов обеспечивает лучшее формирование гофры, в отличие от процесса изготовления гофры при использовании стальных формообразующих поверхностей [5, 10].

Для создания модели с целью изучения процессов изготовления гофрированных вкладышей использовался программный пакет ANSYS. Была построена параметрическая 2D модель одного зуба во встроенном CAEP Design Modeler (рисунок 2). При этом принято допущение о плоскопараллельном движении профилированных шкивов. В модели задавалась ширина заготовки в 60 мм для учёта усилия, необходимого для процесса формовки.

Таблица 1. Свойства материалов для расчёта

Свойство	Сталь 36НХТЮ	Смола eSUN Hard-Tough
Плотность, г/см <sup>3</sup>	7,97	1,05
Модуль Юнга, ГПа	200	2,5
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3
Предел текучести, МПа	612,5	39
Касательный модуль упругости, МПа	735	193
Предел прочности, МПа	1150	126 (на сжатие)

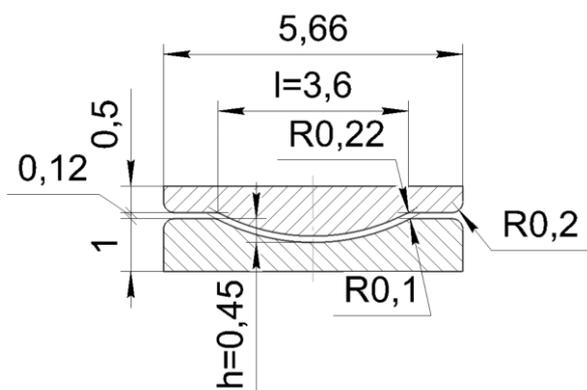


Рисунок 2. Исходные геометрические параметры профилированных шкивов для одного зуба

Для создания геометрической модели применялся модуль Design Modeler. Геометрическая модель является параметрической. В модели заложена возможность изменения высоты выступа с сохранением длины дуги окружности. Иными словами, чем больше высота выступа, тем он уже. Эта зависимость представлена линейным уравнением:

$$l = 3.9039[mm] - 0.678 \cdot h \quad (1)$$

Точная зависимость между высотой и шириной дуги при сохранении её длины

может быть определена при использовании тригонометрических функций. Однако разность результатов расчёта при использовании тригонометрических функций и линейной зависимости (1) составляет менее 0,03% для исследуемых размеров дуги и изменения её высоты на 0,2 мм.

Скругления по краям профилированных шкивов выполнены с целью предотвращения вырождения результатов расчёта при решении модели. Данные скругления не оказывают влияния на результат расчёта по формированию гофры.

Свойства применяемых материалов приведены в таблице 1: сталь 36НХТЮ и полимер eSUN Hard-Tough [11, 12].

Далее на геометрическую модель была наложена конечно-элементная сетка в модуле ANSYS Static Structural. Для этого модель заготовки была разбита на 5 элементов в толщину и 330 элементов в ширину. Рабочие поверхности профилированных шкивов разбиты на КЭ размером 0,02 мм. Тип конечных элементов – PLANE183. Общее количество КЭ составило 5971 (рисунок 3).

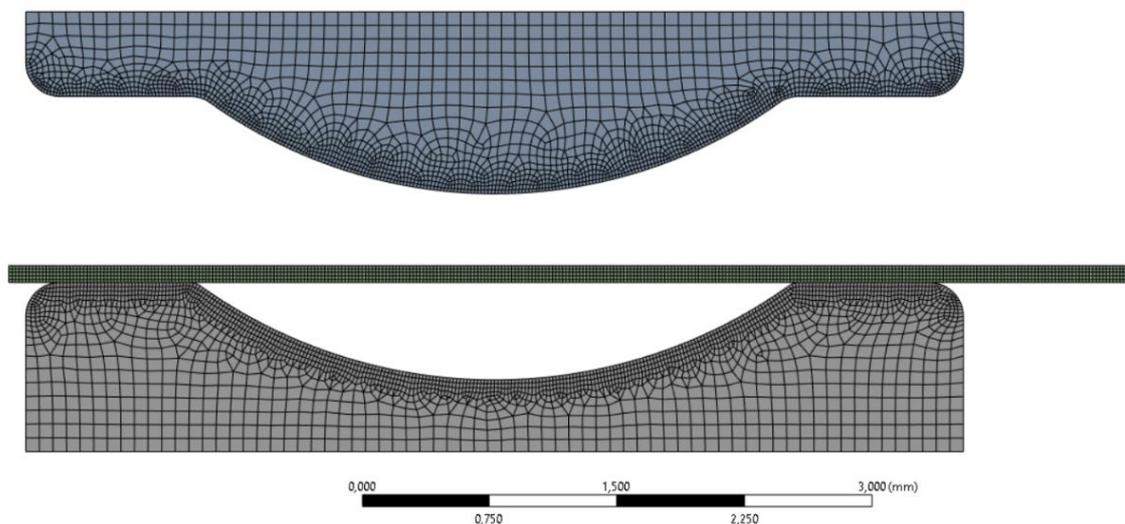


Рисунок 3. 2D КЭ сетка модели для одного выступа

Расчёт проводился в нестационарной постановке в два этапа. Первый этап длится от 0 до 0,8 с, а второй от 0,8 до 1,0 с. Каждый исследуемый временной этап был

разбит на 1000 временных отрезков. Тем самым приращение по времени для первого этапа составило 0,0008 с, а для второго 0,0002 с соответственно. В модели была

включена опция учёта больших деформаций (Large Deformation - ON).

В ходе расчёта учитывались контактные нагрузки. Влияние трения не учитывалось. Использовались контактные пары без трения («Frictionless»). Контактные поверхности показаны на рисунке 4. Для обеих контактных пар были применены следующие настройки:

- Formulation → Pure penalty;
- жёсткость в нормальном направлении задавалась в виде коэффициента и равнялась 0,12 (Normal stiffness → Factor → 0,12);
- жёсткость обновлялась каждую итерацию (Update stiffness → Each Iteration);
- радиус области захвата контакта – 0,1 мм (Pinball Radius → 0,1 mm)
- Interface Treatment → Adjust to Touch.

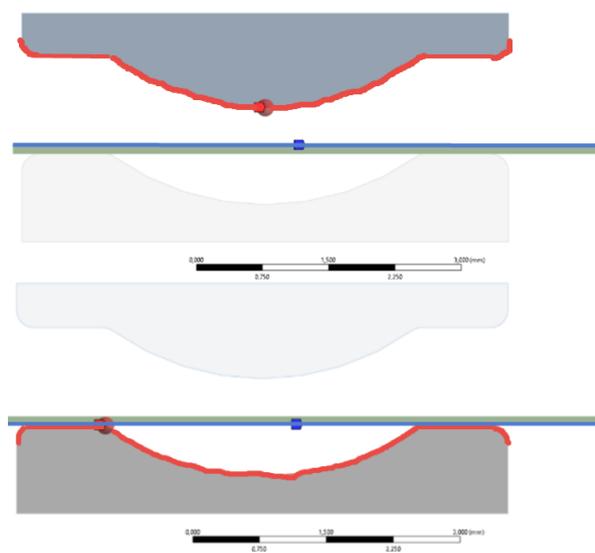


Рисунок 4. Контактные пары

Для расчёта были заданы следующие граничные условия (рисунок 5):

- ограничение движения нижнего шкива по поверхности (A);
- перемещение верхнего шкива на 1 мм вниз до полного контакта нижнего шкива и верхнего с заготовкой на первом этапе. Последующее перемещение верхнего шкива на 0,4 мм вверх для измерения остаточной деформации заготовки на втором этапе;

- закрепление левого края заготовки в точке (B) для исключения статической неопределённости задачи.

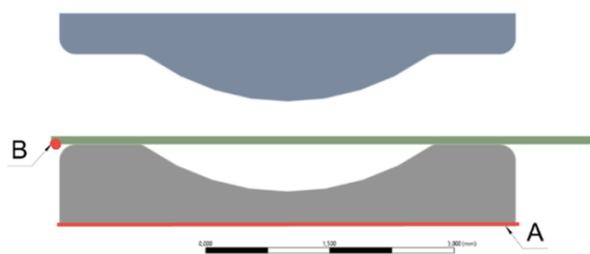


Рисунок 5. Ограничения модели

Этапы расчёта модели представлены на рисунке 6.

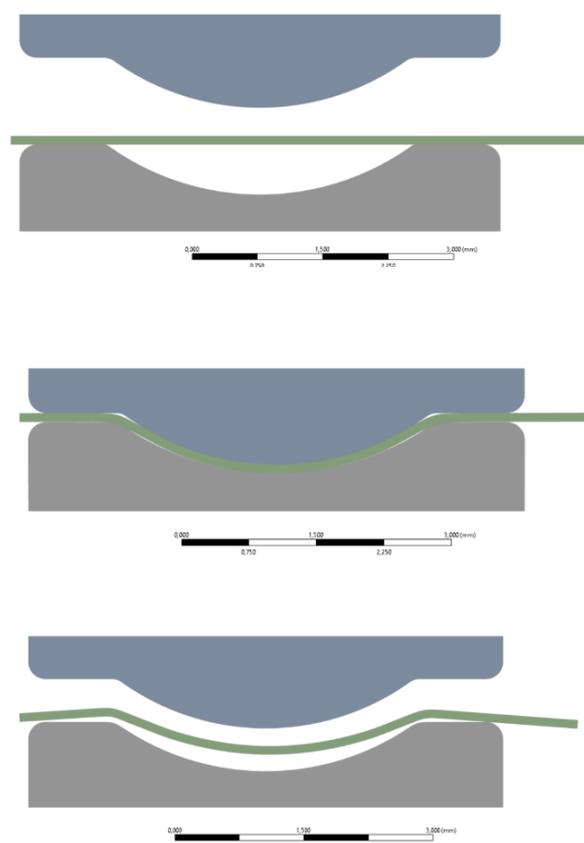


Рисунок 6. Этапы расчёта модели

В результате была создана нестационарная структурная конечно-элементная параметрическая модель для определения величины остаточных деформаций гофрированного вкладыша после процесса его изготовления.

### 3 Обработка результатов расчёта модели

Для обработки результатов расчёта была разработана подпрограмма, написанная на встроенном в Ansys языке APDL.

Данная подпрограмма считывает номер, а затем и положение трёх узлов сетки, принадлежащей модели заготовки. По координатам трёх точек окружности вычисляются положение её центра и радиус. Схема, описывающая алгоритм расчёта, представлена на рисунке 7.

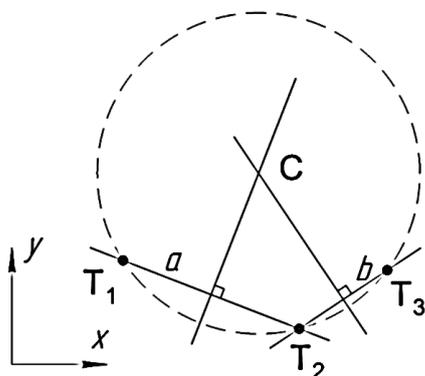


Рисунок 7. Описание обработки результатов

Через пары точек проводятся две прямые. Первая прямая  $a$  проходит через точки  $T_1$  и  $T_2$ , а прямая  $b$  – через  $T_2$  и  $T_3$ . Уравнения этих прямых будут:

$$y_a = m_a(x - x_1) + y_1; \quad (2)$$

$$y_b = m_b(x - x_2) + y_2, \quad (3)$$

где  $m$  – коэффициент наклона линии, получаемый из выражений:

$$m_a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}; \quad (4)$$

$$m_b = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}. \quad (5)$$

Центр окружности находится на пересечении двух перпендикулярных прямых, проходящих через середины отрезков  $T_1T_2$  и  $T_2T_3$ . Прямая, перпендикулярная к линии с коэффициентом наклона  $m$ , имеет коэффициент наклона  $-1/m$ , значит уравнения прямых, перпендикулярных  $a$  и  $b$  и прохо-

дящих через середины  $T_1T_2$  и  $T_2T_3$ , будут иметь следующий вид:

$$y'_a = -\frac{1}{m_a} \left( x - \frac{x_1 + x_2}{2} \right) + \frac{y_1 + y_2}{2}; \quad (6)$$

$$y'_b = -\frac{1}{m_b} \left( x - \frac{x_2 + x_3}{2} \right) + \frac{y_2 + y_3}{2}. \quad (7)$$

Прямые пересекаются в центре окружности  $C$ . Решение относительно  $x$  выглядит следующим образом:

$$x_c = \frac{m_a m_b (y_1 - y_3) + m_b (x_1 + x_2) - m_a (x_2 + x_3)}{2(m_b - m_a)}. \quad (8)$$

Координата  $y_c$  центра окружности вычисляется по ранее выведенному выражению (6). Зная координаты центра окружности, можно вычислить её радиус по формуле:

$$r = \sqrt{(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2} \quad (9)$$

Таким образом, разработанная подпрограмма позволяет рассчитать радиус роликов для изготовления гофрированного вкладыша, исходя из известной формы выступов гофры.

### 4 Результаты расчёта

По результатам серии расчётов были получены зависимости влияния высоты и длины выступов профилированных шкивов на радиус гофра заготовки (рисунок 8). Целевое значение радиуса гофры заготовки равняется  $r_{цел} = 3,7482$  мм, что соответствует расчётной форме выступа. Процесс оптимизации был осуществлён с использованием модуля оптимизации Ansys (*Direct Optimization*).

В результате проведённой серии расчётов было установлено, что для достижения требуемой формы гофрированного вкладыша необходимо, чтобы профиль шкивов имел высоту выступа равную 0,57 мм и ширину выступа равную 3,51 мм.

Результаты расчёта модели представлены на рисунках 9 – 12. На рисунках 9 и 10

представлены эквивалентные напряжения профилированных шкивов и заготовки соответственно.

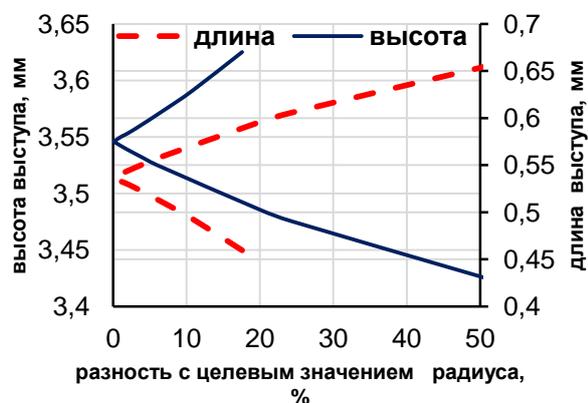


Рисунок 8. Зависимости влияния высоты и длины выступов шкивов на радиус гофра

Величины эквивалентных напряжений не превысили предельных значений для применяемых материалов. Максимальные напряжения составили: 803,42 МПа – для заготовки, 71,80 МПа – для нижнего шкива, 42,06 МПа – для верхнего шкива. Таким образом коэффициенты запаса составили 1,75 для нижнего шкива и 3 для верхнего шкива. Что позволяет сделать вывод о возможности использования данного полимера для производства профилированных шкивов.

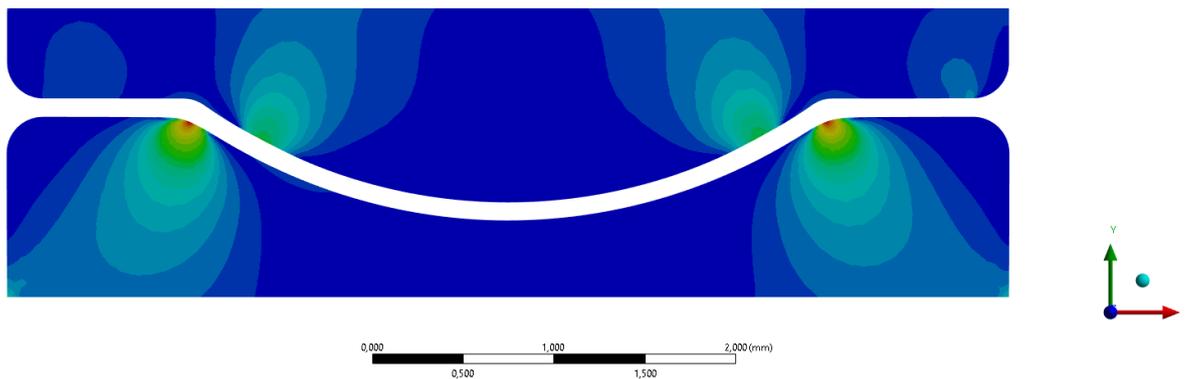
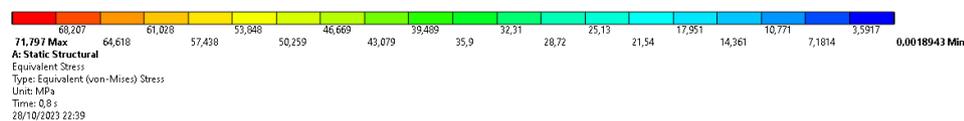


Рисунок 9. Эквивалентные напряжения шкивов

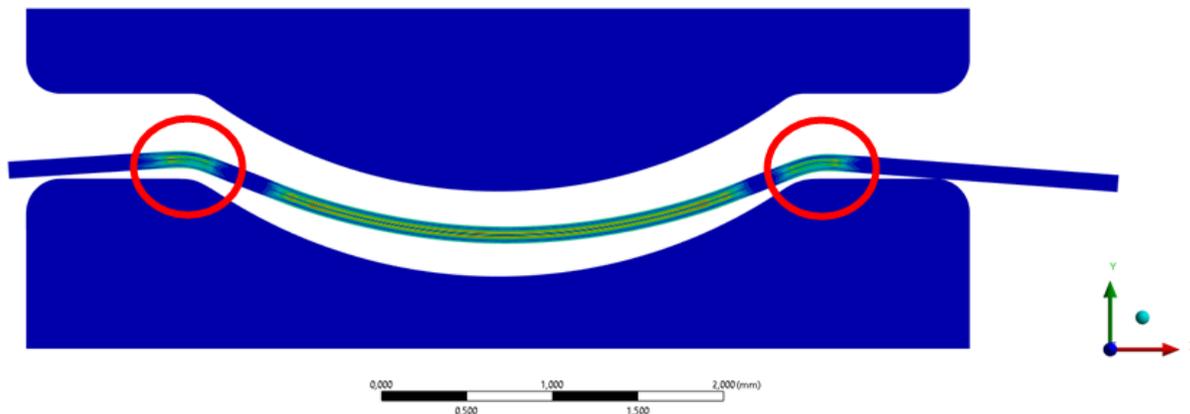


Рисунок 10. Эквивалентные напряжения заготовки

В соответствии с результатами численного расчёта видно, что наибольшая величина остаточной упругой деформации возникает в областях перехода плоской части в выступ (рисунок 10). Это связано с изменением кривизны в данной точке, что может оказывать негативное влияние на геометрию изготавливаемого гофрированного

вкладыша. В качестве одного из способов снижения напряжений в данной точке предлагается добавить галтельные переходы и скругления в профили шкивов.

Максимальные величины деформации составили: 0,02 мм для нижнего шкива (рисунок 11) и 0,004 мм для верхнего шкива (рисунок 12).

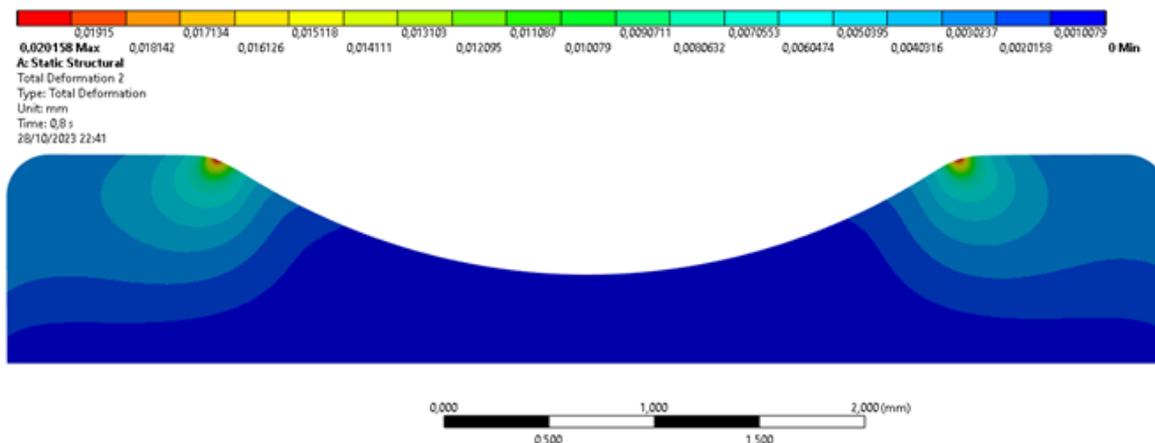


Рисунок 11. Деформация нижнего шкива

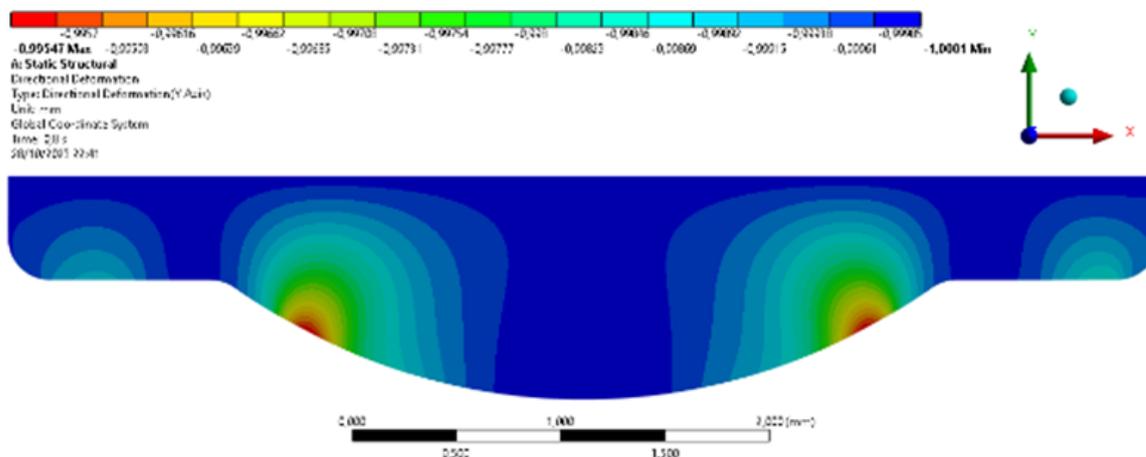


Рисунок 12. Деформация верхнего шкива

На рисунке 13 приведено сравнение форм гофрированного вкладыша после процесса формовки: без поправок формы зуба профилированных шкивов, с поправ-

ками формы зуба и требуемая форма согласно результатам аналитического расчёта.

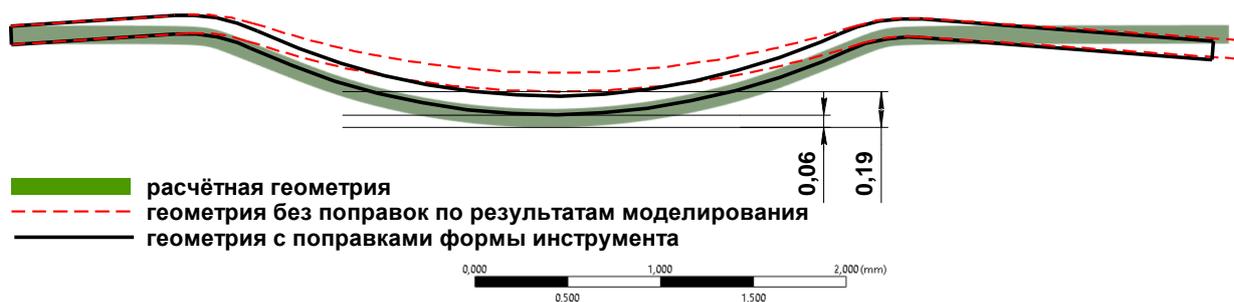


Рисунок 13. Сравнение результатов расчёта остаточных деформаций

Согласно полученным результатам расчёта форма выступа гофры в результате введения поправок профиля зуба шкивов точнее соответствует требуемой расчётной геометрии в отличие от формы гофры с использованием исходной геометрии. Разница между расчётной формой и формой без поправок составляет 0,19 мм, в то время как разница между расчётной формой и формой с поправками составляет 0,06 мм.

На основе проведённых расчётов была разработана конструкторская документация на профилированные шкивы. Далее данные шкивы были изготовлены и испытаны (рисунок 14).

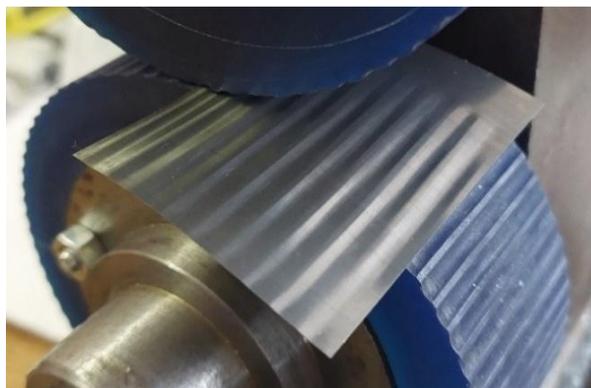


Рисунок 14. Изготовленные профилированные шкивы

В результате серии расчётов было установлено, что для достижения требуемой геометрии гофрированного вкладыша необходимо внести следующие поправки в профиль шкива: высота выступа должна составлять 0,57 мм, а его ширина равняться 3,51 мм.

## 5 Заключение

В результате выполнения работы по моделированию процесса изготовления гофрированного вкладыша газодинамического лепесткового подшипника сделаны следующие основные выводы:

1. Разработана численная параметрическая модель процесса изготовления гофрированного вкладыша для определения поправок геометрии профиля шкива. Данная модель позволяет рассчитать радиус зуба для изготовления гофрированного вкладыша, исходя из известной формы выступов гофры. Разница между расчётной формой и формой без поправок составила 0,19 мм, в то время как разница между расчётной формой и формой с поправками составила 0,06 мм.

2. В соответствии с результатами структурного расчёта величины эквивалентных напряжений профилированных шкивов и заготовки не превысили предельных значений для используемых материалов. Максимальные напряжения для профилированных шкивов составили 71,80 МПа и 42,06 МПа. Получены следующие коэффициенты запаса для профилированных шкивов: 1,75 и 3. Таким образом, применение полимера eSUN Hard-Tough для изготовления профилированных шкивов с использованием технологии фотополимерной 3D печати SLA является обоснованным решением.

3. Согласно результатам численного расчёта наибольшая величина остаточной упругой деформации возникает в областях перехода плоской части в выступ. Это свя-

зано с изменением кривизны в данной точке, что оказывает негативное влияние на геометрию изготавливаемого гофрированного вкладыша. В качестве одного из способов снижения напряжений в данной точке предлагается добавить галтельные переходы и скругления в профиль шкивов.

#### Список использованных источников

- [1] Ruscitto, D. Hydrodynamic air lubricated compliant surface bearing for an automotive gas turbine engine. 1 – Journal bearing performance: tech. rep. / D. Ruscitto, J. McCormick, S. Gray. – Latham, New York – Apr. 1978.
- [2] Chen, H. M. Application of foil bearings to helium turbocompressor / H. M. Chen, R. Howarth, W. M. Soyars, J. C. Theilacker, G. Bernard // Proceedings of the 30th Turbomachinery Symposium. – 2001. – pp. 103–114.
- [3] DellaCorte, C. Design, Fabrication, and Performance of Open Source Generation I and II Compliant Hydrodynamic Gas Foil Bearings / C. DellaCorte, K. C. Radil, R. J. Bruckner, S. A. Howard // Tribology Transactions. – May 2008. – vol. 51, pp. 254–264.
- [4] Dykas, B. Design, Fabrication, and Performance of Foil Gas Thrust Bearings for Microturbomachinery Applications / B. Dykas, R. Bruckner, C. DellaCorte, B. Edmonds, J. Prah // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – Oct. 2008. – vol. 131. – pp. 1–19.
- [5] Shalash, K. An Experimental Study of Gas Lubricated Foil Journal Bearings Using an Instrumented Rotor with Wireless Telemetry : D. Sc. Thesis / K. Shalash. – EPFL, Lausanne, Switzerland, 2019.
- [6] Ozturk, F. Effect of Warm Temperature on Springback Compensation of Titanium Sheet / F. Ozturk, R. E. Ece, N. Polat, A. Koksal // Materials and Manufacturing Processes. – Aug. 2010. – vol. 25. – pp. 1021–1024.
- [7] Zhan, L. A review of the development of creep age forming: Experimentation, modelling and applications / L. Zhan, J. Lin, T. A. Dean // International Journal of Machine Tools and Manufacture – Jan. 2011. – vol. 51. – pp. 1–17.
- [8] Moon, Y. H. Effect of tool temperature on the reduction of the springback of aluminum sheets / Y. H. Moon, S. S. Kang, J. R. Cho, T. G. Kim // Journal of Materials Processing Technology. – Jan. 2003. – vol. 132. – pp. 365–368.
- [9] Многослойные демпферы двигателей летательных аппаратов / Ю. К. Пономарев, Ю. Н. Проничев, Д. Е. Чегодаев [и др.]. – Самара : Изд-во СГАУ, 1998. – 234 с. : ил.
- [10] Żywica, G. A new method of manufacturing a foil bearing using tools made by the rapid prototyping technology / G. Żywica, P. Bagiński, A. Andrearczyk // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2020. – vol. 31. – pp. 514–524, ISSN 1755-5817, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.08.003>.
- [11] Механические свойства полимера eSUN Hard-Tough [сайт]: – URL: [https://esun-3d.ru/catalog/fotopolimernye\\_smoly/5677/?oid=5678](https://esun-3d.ru/catalog/fotopolimernye_smoly/5677/?oid=5678) (дата обращения 4.12.2023)
- [12] Туманов, А. Т. Авиационные материалы. Т. 2: Коррозионностойкие и жаростойкие стали и сплавы / А. Т. Туманов – Москва : ВИАМ, 1989 – 368 с.

**Badykov R.R.**  
**Yurtaev A.A.**  
**Grigorev E.M.**  
**Lomachev A.O.**

**MANUFACTURING PROCESS SIMULATION  
OF A BUMP FOIL FOR A GAS FOIL BEARING**

Samara National Research University  
(Samara University)

34, Moskovskoye shosse,  
Samara, 443086,  
Russian Federation

[badykov.rr@ssau.ru](mailto:badykov.rr@ssau.ru)

[yurtaev.aa@ssau.ru](mailto:yurtaev.aa@ssau.ru)

[grigorev.em@ssau.ru](mailto:grigorev.em@ssau.ru)

[lomachev.ao@ssau.ru](mailto:lomachev.ao@ssau.ru)

*The paper describes the tools design process for manufacturing the bump foil of a radial gas foil bearing. The paper proposes an alternative technology for manufacturing the bump foil and a solution to the issues related to this technology, accounting for the compensating effects of residual elastic deformations after the manufacturing process. The significance of the finite element method implementation for residual deformations and stresses accounting is emphasized, aiming to minimize the negative impact of residual elastic deformation on the bearing operational parameters.*

**Keywords:** gas dynamic bearing; numerical mode; mold; ANSYS Static Structural; stamping; deformation

## References

- [1] Ruscitto, D., McCormick, J. and Gray S. (Apr. 1978), *Hydrodynamic air lubricated compliant surface bearing for an automotive gas turbine engine. 1: Journal bearing performance*, Mechanical Technology Incorporated, Latham, New York.
- [2] Chen, H. M., Howarth, R., Soyars W. M., Theilacker J. C. and Bernard G. (2001), "Application of foil bearings to helium turbocompressor", *Proceedings of the 30th Turbomachinery Symposium*, pp. 103–114.
- [3] DellaCorte, C., Radil K. C., Bruckner R. J. and Howard S. A. (May 2008), "Design, Fabrication, and Performance of Open Source Generation I and II Compliant Hydrodynamic Gas Foil Bearings", *Tribology Transactions*, vol. 51, pp. 254–264.
- [4] Dykas, B., Bruckner, R., DellaCorte, C., Edmonds, B. and PrahJ, J. (Oct. 2008), "Design, Fabrication, and Performance of Foil Gas Thrust Bearings for Microturbomachinery Applications", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 131, pp. 012301–012301.
- [5] Shalash, K. (2019). An Experimental Study of Gas Lubricated Foil Journal Bearings Using an Instrumented Rotor with Wireless Telemetry, D. Sc. Thesis, EPFL, Lausanne, Switzerland.
- [6] Ozturk, F., Ece, R. E., Polat, N. and Koksai, A. (Aug. 2010), "Effect of Warm Temperature on Springback Compensation of Titanium Sheet", *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 25, pp. 1021–1024.
- [7] Zhan, L., Lin J. and Dean, T. A. (Jan. 2011), "A review of the development of creep age forming: Experimentation, modelling and applications", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 51, pp. 1–17, Jan.
- [8] Moon, Y. H., Kang, S. S., Cho, J. R. and Kim, T. G. (Jan. 2003), "Effect of tool temperature on the reduction of the springback of aluminum sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 132, pp. 365–368.
- [9] Ponomarev, Y.K., Pronichev, YU.N., Chegodaev, D.E., Vershigorov, V.M. and Kirilin, A.N. (1998), *Mnogosloynnye dempfery dvigateley letatel'nyh apparatov* [Multilayer dampers for aircraft engines], Izdatel'stvo SGAU, Samara, Russia. (in Russian).
- [10] Żywica, G., Bagiński, P. and Andrearczyk, A (2020), "A new method of manufacturing a foil bearing using tools made by the rapid prototyping technology", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 31, pp. 514–524, ISSN 1755-5817, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.08.003>.
- [11] Mechanical properties of polymer eSUN Hard-Tough [сайт]: – URL: [https://esun-3d.ru/catalog/fotopolimernye\\_smoly/5677/?oid=5678](https://esun-3d.ru/catalog/fotopolimernye_smoly/5677/?oid=5678) (Accessed 4 December 2023)
- [12] Tumanov, A. T.(1989), *Aviatsionnye materialy* [Aviation materials]. Vol. 2: Korroziionnostoykie i zharostoykie stali i splavy [Corrosion-resistant and heat-resistant steels and alloys], VIAM, Moscow. (in Russian).