

УДК 621. 777

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-40-47>

## КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ ИМИТАТОРА КОМПРЕССОРНОЙ ЛОПАТКИ

Боткин А.В., Вареник Е.В., Абрамов А.Н.

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

### Аннотация

Сложная геометрическая форма компрессорных лопаток обуславливает применение комплексного подхода к проектированию технологий штамповки поковок лопаток. Этот комплексный подход включает геометрическое моделирование поковки лопатки, компьютерное моделирование пластического формоизменения заготовки в штампе и напряженно-деформированного состояния инструмента; 3D геометрическое проектирование штампов и изготовление штампового инструмента с применением станков с числовым программным управлением. Использование комплексного подхода при разработке технологии изотермической штамповки заготовок лопаток позволяет сократить сроки подготовки производства, повысить качество поковок и стойкость штампов. Проектирование трехмерных параметрических ассоциативных математических моделей с применением различных CAD систем обеспечивает повышение качества разработки конструкторской документации на штамповую оснастку. Компьютерное моделирование течения металла в штампе позволяет спрогнозировать появление таких дефектов при штамповке, как зажимы и складки, полноту заполнения гравюры штампа, оптимальное положение детали относительно неподвижной системы координат, обеспечивающее приемлемые норму расхода металла при проектировании поковки и нагрузку на штамп. Для компьютерного моделирования течения металла в формоизменяющих операциях использовали кривые упрочнения жаропрочного алюминиевого сплава  $Al\text{-}5.3Cu\text{-}0.8Mg\text{-}0.5Ag\text{-}0.3Mn\text{-}0.15Zr$ , предварительно полученные осадкой стандартных образцов при температуре 420°C и различных скоростях деформирования, соответствующих интервалам скорости деформации и степени деформации, определенным предварительным моделированием формоизменения заготовки в формоизменяющих операциях технологии. Изготовление штамповой оснастки с применением станков с числовым программным управлением гарантирует высокую точность геометрической формы инструмента. В работе исследовано пластическое формоизменение заготовки в операциях закрытая осадка, прямое выдавливание, закрытая штамповка. Определены моделированием рациональная форма и размеры заготовки после всех формоизменяющих операций обработки давлением. Приведены успешные результаты опытной штамповки поковки имитатора лопатки по технологии, разработанной с применением комплексного подхода к проектированию в производственных условиях.

**Ключевые слова:** компьютерная оптимизация, компьютерное моделирование, изотермическая штамповка, жаропрочный алюминиевый сплав.

### Введение

Компрессорные лопатки имеют сложную геометрическую форму, поэтому в настоящее время применяют комплексный подход, включающий: геометрическое моделирование поковки лопатки, компьютерное моделирование пластического формоизменения заготовки в штампе и нагружения штампового инструмента; 3D геометрическое проектирование штампов и изготовление штампового инструмента с применением станков с числовым программным управлением [1]. В качестве CAD системы применяется программа «SolidWorks», позволяющая проектировать трехмерные параметрические ассоциативные математические модели, создавать на их основе ассоциативные чертежи. Эта система обеспечивает интеграцию всего

цикла создания изделия от проектирования, подготовки к производству до изготовления. В качестве системы моделирования процессов (CAE системы) используется программа «DEFORM 3D», позволяющая значительно сократить затраты и время разработки технологии за счёт виртуального моделирования процесса штамповки, без изготовления оснастки и загрузки кузнечно-прессового оборудования. Вместе эти системы образуют интегрированную систему по разработке сложнопрофильных поковок из различных материалов [2, 3].

Цель настоящей работы – обоснование технологической схемы штамповки, обеспечивающей качественное формоизменение поковки имитатора лопатки с минимальными нагрузками на инструмент за счет определения моделированием рациональной геометрической формы заготовки для всех технологических переходов с помощью компьютерного моделирования.

### Материал и методика исследования

В качестве основы для проектирования и моделирования использовали математическую модель имитатора лопатки, приведенную на **рис. 1**. Имитаторы лопаток используют при изготовлении моноколеса (блеска) линейной сваркой трением с последующей механической обработкой. На основе модели имитатора лопатки проектировали 3D модели поковки имитатора лопатки с припусками, напусками и технологической бобышкой. На **рис. 2** приведена технологическая схема штамповки имитатора лопатки.

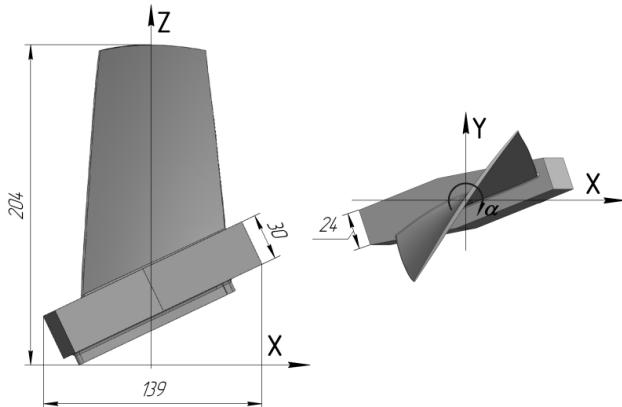


Рис. 1. Конструктивное изображение имитатора лопатки

В процессе исследований проводили компьютерное моделирование формоизменения заготовки по всем технологическим переходам штамповки поковки имитатора лопатки в программном комплексе *Deform 3D*.

При проведении компьютерного моделирования были приняты следующие условия и допущения:

- заготовка из сплава *Al-Cu-Mg-Ag* – пластичное тело; кривые упрочнения сплава (**рис. 3**), полученные в процессе горячего сжатия при различ-

ных скоростях деформации, соответствующих интервалам скорости деформации и степени деформации, определенным предварительным моделированием формоизменения заготовки в формоизменяющих операциях технологии, вводились в базу данных в виде табличной функции;

- пуансон, матрица и рамка при моделировании формоизменении заготовки – абсолютно жесткие тела (3D модели штампового инструмента и заготовки были разработаны в системе *Solid Works*);

- температура изотермической штамповки – постоянная, равная 420°C;

- тепловым эффектом деформации из-за малой скорости деформации пренебрегали;

- коэффициент трения между штамповым инструментом и заготовкой принимали по рекомендациям *DEFORM 3D*, равным 0,3 по Зибелю;

- количество конечных элементов – 100000;

- скорость перемещения пуансона – 2 мм/с;

- шаг по времени 0,1 с;

- количество шагов моделирования – 300.

Одним из этапов оптимизации было определение геометрической формы профильной заготовки, полученной выдавливанием на предварительном технологическом переходе. Она должна обеспечивать формообразование имитатора лопатки при окончательной штамповке без складок и зажимов металла. Определение такой формы осложнено тем, что объем первоначальной лопатки составляет треть от общего объема детали, а значит, течение металла из зоны башмака будет происходить интенсивнее и вести к образованию складок металла. Для решения этой задачи было применено компьютерное моделирование и по его результатам была определена оптимальная геометрическая форма заготовки предварительного перехода.

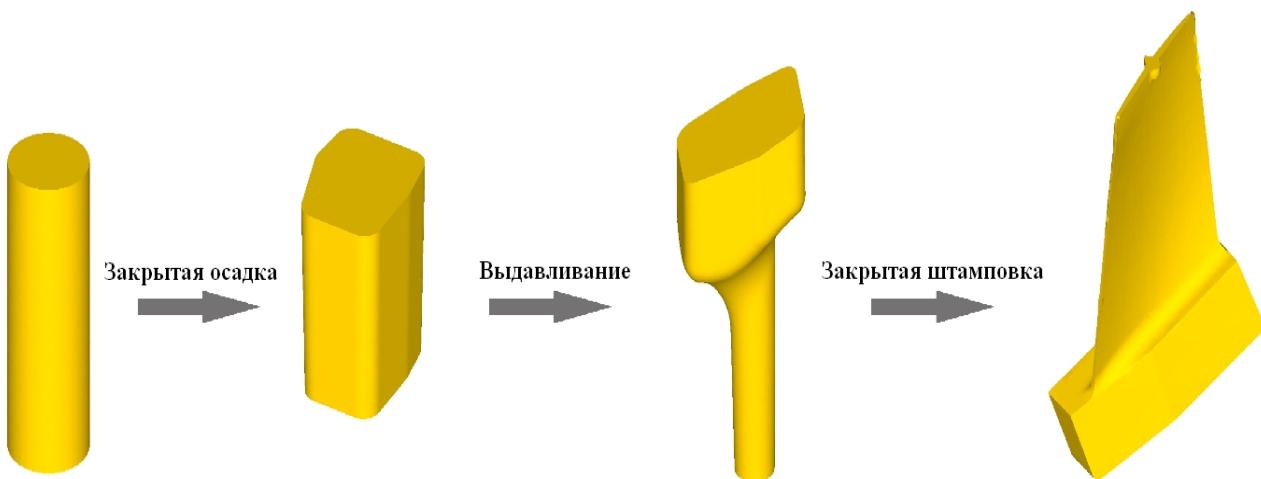


Рис. 2. Формоизменяющие операции технологии штамповки

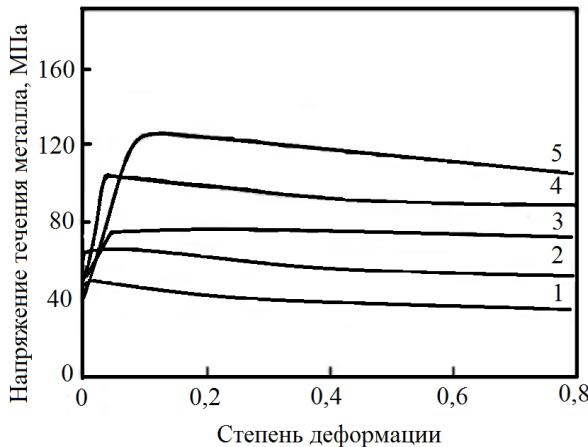


Рис. 3. Графические зависимости напряжения течения от степени деформации сплава  $Al\text{--}Cu\text{--}Mg\text{--}Ag$  в процессе сжатия при  $420^{\circ}\text{C}$ :  
 (1)  $\dot{\varepsilon} = 0.001 \text{ с}^{-1}$ ; (2)  $\dot{\varepsilon} = 0.01 \text{ с}^{-1}$ ; (3)  $\dot{\varepsilon} = 0.1 \text{ с}^{-1}$ ;  
 (4)  $\dot{\varepsilon} = 1.0 \text{ с}^{-1}$ ; (5)  $\dot{\varepsilon} = 10 \text{ с}^{-1}$  [11]

Оптимальную геометрическую форму заготовки определяли по следующему алгоритму: 1) определяли объемы первьевой части лопатки и башмака; 2) по эпюрам поперечных сечений пера лопатки строили конусную часть предварительной заготовки; 3) строили скругление при переходе от конусной части к башмаку с различными радиусами за счет соответствующего изменения объема башмака; 4) осуществляли компьютерное моделирование с варьированием радиусами сопряжения конусной части и башмака, определяли форму заготовки после предварительного перехода.

Другим этапом оптимизации при проектировании поковки является обоснование угла поворота имитатора лопатки вокруг оси  $Z$ , который обеспечивает при закрытой штамповке поковки наименьшую нагрузку на деталь закрытого штампа – рамку и предопределяет точность получения формы, размеров поковки, а также стойкость штамповой оснастки. Предположили, что минимальной инструментальной нагрузки на последнем технологическом переходе удастся достичь при расположении пера лопатки таким образом, чтобы на виде сверху левый конец пера располагался на одной горизонтали с правой нижней вершиной башмака. Исходя из этого при проектировании поковки было принято для исследования несколько углов поворота  $\alpha$  имитатора лопатки вокруг оси  $Z$  (см. рис. 1) относительно расположения лопатки по отношению к оси компрессора в промежутке от 19 до  $40^{\circ}$ .

## Результаты моделирования

На рис. 4 представлено заполнение гравюры штампа в зависимости от радиуса перехода от конусной части заготовки к башмаку, а также от формы самого башмака. Видно, что форма башмака предварительной заготовки, близкая к форме башмака окончательной поковки (рис. 4, а), не удовлетворяет условию формообразования без зажимов и складок, так как присутствуют встречные потоки металла с зоны башмака и с конусной части заготовки (рис. 4, б). Для того чтобы избежать такого явления, необходимо более тщательно проработать такой важный конструктивный элемент профильной заготовки, как радиус перехода от конусной части заготовки к башмаку. При сравнении заготовок на рис. 4, в и д видно, что при одинаковых радиусах перехода, но разной геометрии башмака наблюдается неодинаковое течение металла. Применение предварительной заготовки (см. рис. 4, в) сопровождается образованием складки (рис. 4, г). Как видно из рис. 4, е–з, радиус сопряжения  $R=40$  мм и компактная форма башмака (см. рис. 4, д) обеспечивают без складок и зажимов заполнение штампа при закрытой штамповке поковки имитатора лопатки.

Известно, что такой параметр моделирования, как плотность сетки, в значительной степени влияет на результаты расчета. Поэтому было проведено дополнительное моделирование для оптимальной формы предварительной заготовки, которое показало при варьировании плотностью сетки (70000, 150000 конечных элементов) аналогичную картину заполнения гравюры штампа, что и при разбиении заготовки на 100000 конечных элементов.

Для обоснования при проектировании поковки положения имитатора в неподвижной системе координат – угла поворота имитатора лопатки вокруг оси  $Z$  было проведено многократное моделирование формоизменение заготовок в закрытых штампах и построена на рис. 5 зависимость максимальной нагрузки на рамку штампа, при закрытой штамповке поковок, соответствующих различным углам поворота имитатора лопатки. Под нагрузкой понимается проекция силы деформирования на плоскость, перпендикулярную оси, вдоль которой перемещается пуансон (ось  $OY$ ). Чем меньше эта проекция, тем меньше нагрузка на рамку, а значит, и ее износ, тем выше точность поковок.

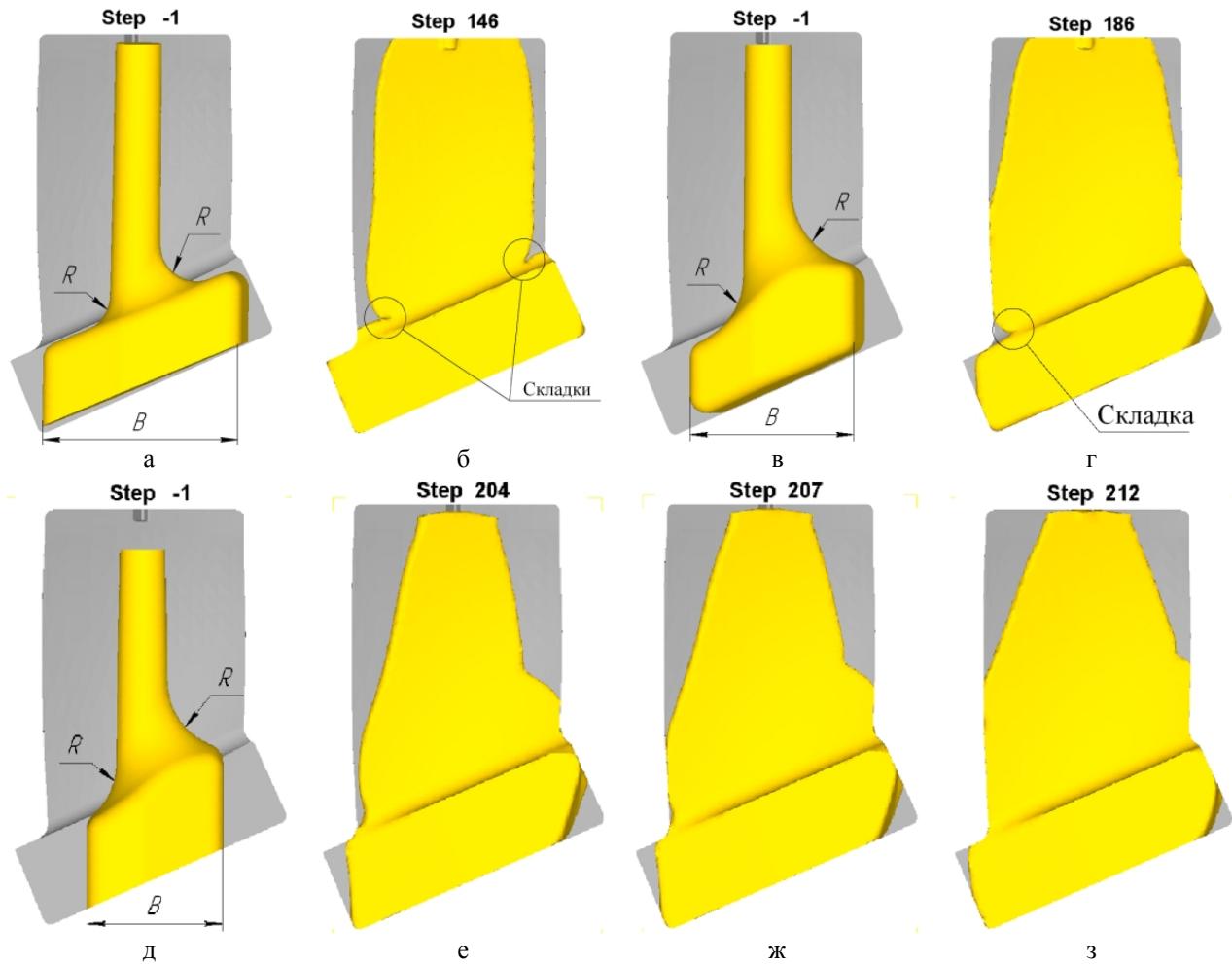


Рис. 4. Предварительная заготовка (а) с параметрами  $R=20$  мм,  $B=107$  мм; (в) с параметрами  $R=40$  мм,  $B=89$  мм; (е) с параметрами  $R=40$  мм,  $B=71$  мм и промежуточные стадии заполнения полостей штампа металлом (б, г, е, ж, з)

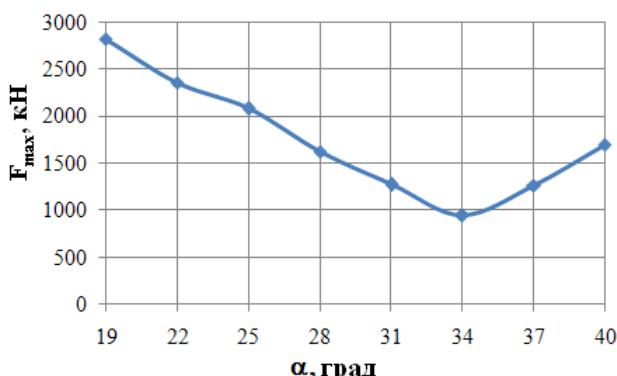


Рис. 5. Графическая зависимость максимальной нагрузки на инструмент при штамповке от угла поворота имитатора лопатки при проектировании поковки

Рис. 5 показывает, что из всех исследуемых положений лопатки угол поворота вокруг оси  $Z$ , равный  $34^\circ$  и использованный при проектировании поковки, обеспечивает наименьшую при штамповке нагрузку на инструмент.

Таким образом, предположение, что минимальной инструментальной нагрузки удастся достичь при расположении пера лопатки таким образом, чтобы на виде сверху левый конец пера располагался на одной горизонтали с правой нижней вершиной башмака, оказалось неверным. Следует также отметить, что при изменении угла поворота имитатора лопатки объем поковки различен, так как изменяются напуски, образующиеся при выравнивании поверхностей, прилегающих к рамке. С точки зрения этого фактора поворот на угол  $34^\circ$  не является оптимальным.

На основе результатов моделирования были определены форма и размеры заготовок по всем переходам технологической схемы штамповки (рис. 6), обеспечивающие получение поковки имитатора лопатки без зажимов и складок при минимальной инструментальной нагрузке на рамку закрытого штампа.

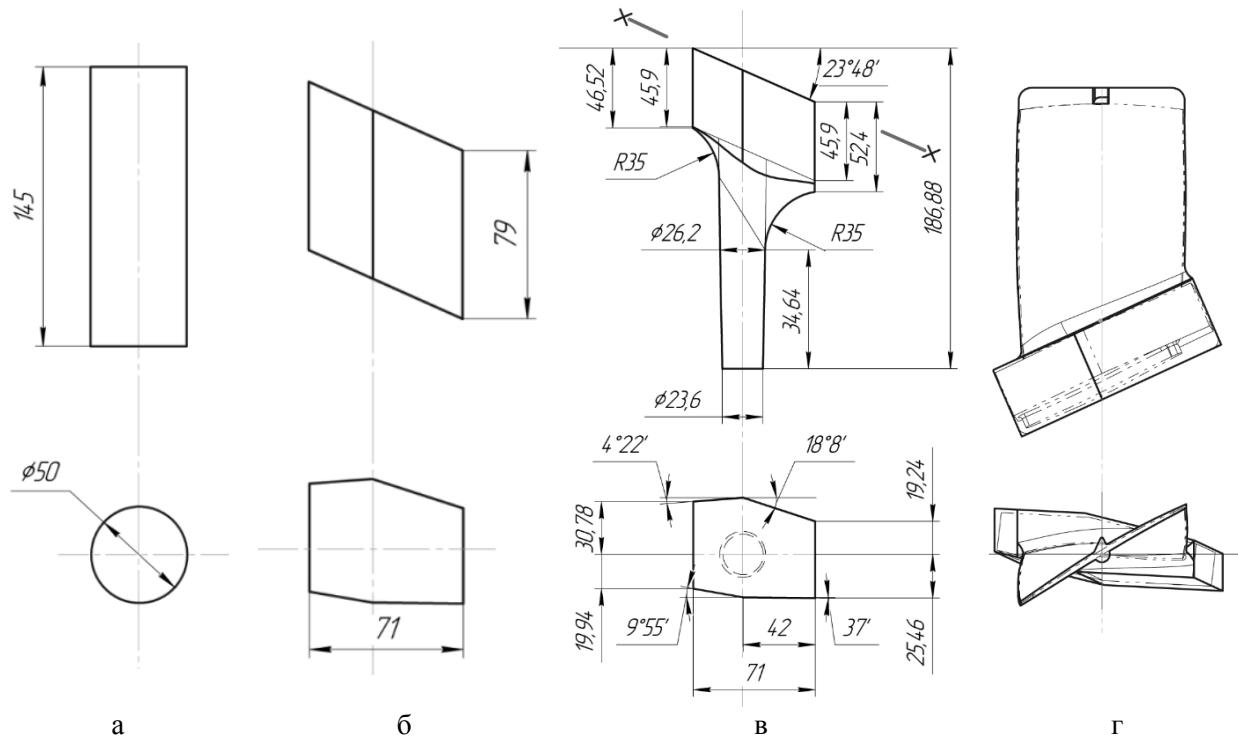


Рис. 6. Формы и замеры заготовки по переходам технологической схемы штамповки:  
а – исходная мерная заготовка; б – после закрытой осадки; в – после прямого выдавливания;  
г – после закрытой изотермической штамповки

На основе спроектированной и обоснованной результатами моделирования 3D модели поковки (рис. 7) и заготовок после предварительных формоизменяющих операций были спроектированы 3D модели инструмента и выполнены чертежи штампов: для закрытой осадки; для прямого выдавливания; для закрытой изотермической штамповки (рис. 8).

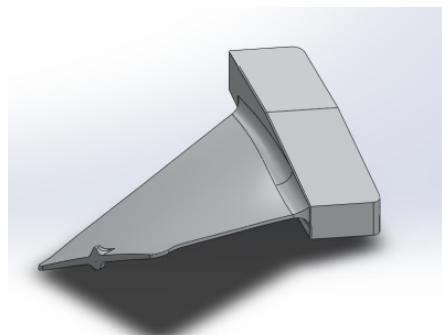


Рис. 7. 3D-модель поковки имитатора лопатки

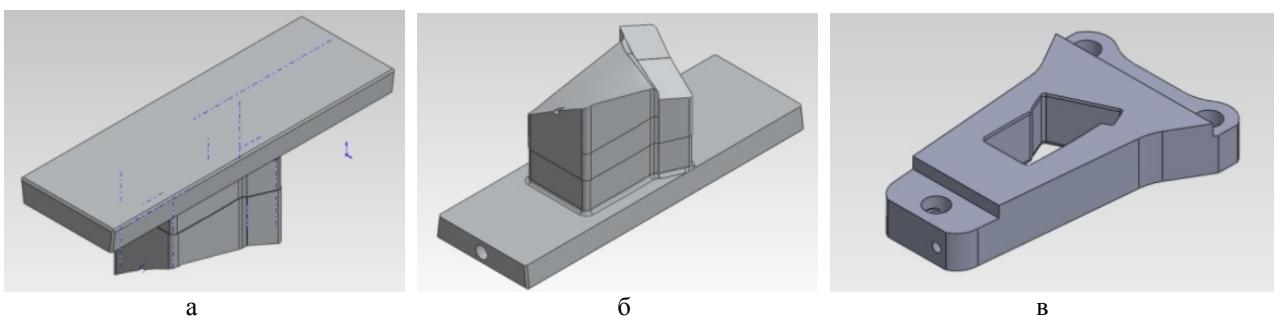


Рис. 8. 3D модель штампа для закрытой изотермической штамповки:  
а – пuhanсон; б – контрапuhanсон; в – рамка

### Результаты опытной штамповки поковки имитатора лопатки

В производственных условиях ОАО «УМПО» были изготовлены штампы для всех переходов технологической схемы штамповки (рис. 9). В качестве штампового материала применяли сталь Р6М5.

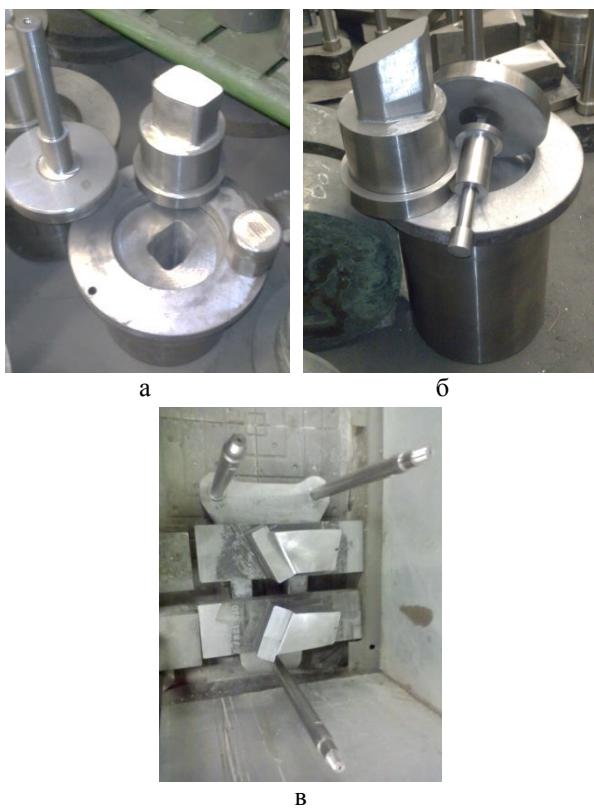


Рис. 9. Штампы для изготовления поковки имитатора лопатки: а – для закрытой осадки; б – для прямого выдавливания; в – для закрытой штамповки

Цилиндрическую заготовку из жаропрочного алюминиевого сплава  $Al-5.3Cu-0.8Mg-0.5Ag-0.3Mn-0.15Zr$  диаметром  $d = 50$  мм и длиной  $l = 145$  мм, равномерно нагретую до температуры  $420^{\circ}\text{C}$ , последовательно деформировали в изотермических условиях в штампе для закрытой осадки, в штампе для прямого выдавливания и в закрытом штампе.

В качестве смазочного материала применяли водорастворимую композицию «Росойл-Синтезол», разработанную в НИИ «Триботехники и смазки» при УНИИР УГАТУ и содержащую в своем составе противозадирные присадки и наполнитель.

В указанных условиях, с промежуточным нанесением смазки между переходами, были получены поковки имитатора лопатки, внешний вид которых представлен на рис. 10.



Рис. 10. Поковки имитатора лопатки

Из рис. 10 видно, что формирование поковки имитатора лопатки в зонах башмака и пера произошло полностью. Складки в зоне сопряжения пера и башмака отсутствуют, технологическая бобышка в концевой части пера оформлена полностью. Положение поковки в неподвижной системе координат, определяемое углом поворота имитатора лопатки вокруг оси  $Z$ , равным  $34^{\circ}$  при проектировании поковки, обеспечивает, как показала опытная штамповка, устойчивое исходное положение профилированной заготовки, полученной выдавливанием, на контрпуансоне в закрытом штампе, что положительно влияет на точность и бездефектность получаемых поковок.

### Заключение

Положение имитатора лопатки, определяемое углом поворота  $34^{\circ}$  вокруг оси  $Z$  неподвижной системы координат при проектировании поковки, обеспечивает минимальную расчетную нагрузку на инструмент при закрытой штамповке поковки имитатора лопатки.

Компьютерное моделирование позволило обосновать рациональную форму заготовки с радиусом сопряжения  $R=40$  мм и компактной формой башмака, обеспечивающую полное заполнение металлом штампа при закрытой штамповке имитатора лопатки без складок и зажимов как при моделировании формоизменения заготовки по переходам, так и при опытной штамповке.

Полученные результаты моделирования обеспечили на стадии проектирования штамповой оснастки и выполнении чертежей успешное проведение опытной закрытой изотермической штамповки поковки имитатора лопатки.

## Список литературы

1. V. Alimirsaloo, M. H. Sadeghi and F. R. Biglari, Optimization of the forging of aerofoil blade using the finite element method and fuzzy-Pareto based genetic algorithm, Journal of Mechanical Science and Technology. 2012, no. 26 (6), pp. 1801–1810.
2. Yong Shao & Bin Lu & Hengan Ou & Facai Ren & Jun Chen, Evolutionary forging preform design optimization using strain-based criterion / Int J Adv Manuf Technol. 2014, 71, pp. 69–80.
3. Paul Tran "Solidworks 2016: Advanced Techniques" SDC Publications, 2016. 726 p.
4. Kuang-Hua Chang. Motion Simulation and Mechanism Design with SOLIDWORKS Motion SDC Publications, 2016. 152 p.
5. David Planchard. SolidWorks 2016 Reference Guide: A comprehensive reference guide with over 250 standalone tutorials. SDC Publications, 2015. 992 p.
6. Y. Shao, B. Lu, H. Ou, J. Chen. A new approach of preform design for forging of 3D blade based on evolutionary structural optimization. Struct Multidisc Optim. 2015, 51, pp. 199–211.
7. Yanqiu Zhang & Shuyong Jiang & Yanan Zhao & Debin Shan, Isothermal precision forging of aluminum alloy ring seats with different preforms using FEM and experimental investigation, Int J Adv Manuf Technol. 2014. 72. pp. 1693–1703.
8. Использование программ DEFORM 3D и ANSYS на предприятиях машиностроительного производства для анализа и расчета деталей типа тел вращения / Жетесова Г.С., Жаркевич О.М., Бузурова Т.М., Жунусова А.Ш., Плещакова Е.А. // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4.
9. R.A. Kazakov, Simulation of isothermal forging of gas turbine compressor blade, Forging-stamping production. 5 (2011) 39–42.
10. Моделирование и аналитическая оценка силовых параметров изотермической штамповки лопатки из наноструктурного сплава ВТ6 / А.В. Боткин, А.Ф. Шаяхметов, И.П. Семенова и др. // Кузнецко-штамповочное производство. 2008. № 11. С. 43–48.
11. Xiao Yan Liu, Qing Lin Pan, Yun Bin He, Wen Bin Li, Wen Jie Liang, Zhi Min Yin Flow behavior and microstructural evolution of Al-Cu-Mg-Ag alloy during hot compression deformation Materials Science and Engineering A 500 (2009) 150–154.

Поступила 10.05.17.

Принята в печать 13.06.17.

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-40-47>

## COMPUTER DESIGN OF IMITATION COMPRESSOR BLADE ISOTHERMAL FORGING

**Aleksandr V. Botkin** – D.Sc. (Eng.), ProfessorUfa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. E-mail: botkinav@yandex.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9522-280X>**Elena V. Varenik** – Head of LaboratoryUfa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. E-mail: elenavarenik@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9757-2758>**Aleksey N. Abramov** – Ph.D. (Eng.), Associate ProfessorUfa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. E-mail: Abramov@rosoil.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6281-1675>**Abstract**

Because of the complex geometry of compressor blades a comprehensive approach should be taken to designing of corresponding forging processes. This comprehensive approach encompasses the following: geometric modelling of a forging; computer simulation of the plastic forming process taking place in the die and of the stress-strain state of the tool; 3D design of dies and the use of CNC machines for die tooling manufacture. The application of the comprehensive approach for the development of a forging technology for isothermal forging of compressor blades can help reduce the lead times, enhance the quality of forgings and the durability of dies. Design of 3D parametric associative models using various CAD systems can ensure a higher quality of the design documentation for die tooling. With the help of computer simulation of metal flowing in the die one can estimate the probability of such defects as pinches and folds, the level in the die cavity, the optimum position of the workpiece relative to the fixed reference. The latter is important to ensure acceptable metal consumption rates when designing the

forging and the die loads. For computer simulation of the metal flow in forming operations, hardening curves were used of the heat-resistant aluminium alloy Al-5.3 Cu-0.8 Mg-0.5-0.3 Mn Ag-0.15 Zr, which were obtained after the standard samples had been upset at 420°C and at different strain rates, which were consistent with the strain rate intervals and the degree of strain as determined through simulation. The use of CNC machines for die tooling manufacture ensures high accuracy of the tool geometry. The authors examine the plastic forming process of such operations as closed-die upsetting, direct extrusion, and closed-die forging. With the help of modelling the optimum shape and dimensions of the workpiece were identified after all the forming operations. The article includes the results of a successful pilot forging operation when an imitation blade was produced using the process which had been developed by implementing the comprehensive approach to design in a production environment.

**Keywords:** Computer optimization; computer modelling; isothermal forging; heat-resistant aluminium alloy.

**References**

1. V. Alimirsaloo, M. H. Sadeghi and F. R. Biglari, Optimization of the forging of aerofoil blade using the finite element method and fuzzy-Pareto based genetic algorithm, *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2012, no. 26 (6), pp. 1801–1810.
2. Yong Shao & Bin Lu & Hengan Ou & Facai Ren & Jun Chen, Evolutionary forging preform design optimization using strain-based criterion / *Int J Adv Manuf Technol.* 2014, 71, pp. 69–80.
3. Paul Tran "Solidworks 2016: Advanced Techniques" SDC Publications, 2016. 726 p.
4. Kuang-Hua Chang. Motion Simulation and Mechanism Design with SOLIDWORKS Motion SDC Publications, 2016. 152 p.
5. David Planchard. SolidWorks 2016 Reference Guide: A comprehensive reference guide with over 250 standalone tutorials. SDC Publications, 2015. 992 p.
6. Y. Shao, B. Lu, H. Ou, J. Chen, A new approach of preform design for forging of 3D blade based on evolutionary structural optimization. *Struct Multidisc Optim.* 2015, 51, pp. 199–211.
7. Yanqiu Zhang & Shuyong Jiang & Yanan Zhao & Debin Shan, Isothermal precision forging of aluminum alloy ring seats with different preforms using FEM and experimental investigation, *Int J Adv Manuf Technol.* 2014. 72. pp. 1693–1703.
8. Zhetesova G.S., Zharkevich O.M., Buzauova T.M., Zhunussova A.Sh., Pleshakova E.A. The use of the DEFORM 3D and ANSYS software by machine building companies for analysing and designing of rotary parts. *Sovremennye problem nauki i obrazovaniya [Problems of Today's Science and Education]*, 2012, no. 4. (In Russ.).
9. R.A. Kazakov, Simulation of isothermal forging of gas turbine compressor blade, *Forging-stamping production*. 5 (2011) 39–42.
10. Botkin A.V., Shayakhmetov A.F., Semenova I.P., Raab G.I., Valiev R.Z. and Pavlinich S.P. Modelling and analysis of power parameters of the isothermal forging of a blade made from the nanostructured alloy VT6. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo [Press forging]*, 2008, no. 11, pp. 43–48. (In Russ.).
11. Xiao Yan Liu, Qing Lin Pan, Yun Bin He, Wen Bin Li, Wen Jie Liang, Zhi Min Yin Flow behavior and microstructural evolution of Al-Cu-Mg-Ag alloy during hot compression deformation *Materials Science and Engineering A* 500 (2009) 150–154.

Received 10/05/17

Accepted 13/06/17

**Образец для цитирования**

Боткин А.В., Вареник Е.В., Абрамов А.Н. Компьютерное проектирование изотермической штамповки имитатора компрессорной лопатки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №2. С. 40–47. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-40-47>

**For citation**

Botkin A.V., Varenik E.V., Abramov A.N. Computer design of imitation compressor blade isothermal forging. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 2, pp. 40–47. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-40-47>