

Разработка программы-тренажера формирования гладкого профиля пера заготовки компрессорных лопаток

К. С. Морозова*, И. Н. Хаймович

ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара, Российская Федерация
443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34
* kseniamorozova01@gmail.com

Аннотация

Сокращение времени технологической подготовки заготовительного производства (ТПЗП) на предприятиях аэрокосмической промышленности, и повышение качества выпускаемой продукции требует поиска новых решений, связанных с автоматизацией производства. Проектирование деталей сложной формы, как компрессорные лопатки (КЛ) газотурбинных двигателей (ГТД), обладает высокой трудоемкостью. Использование систем автоматизированного проектирования позволяет минимизировать вероятность возникновения ошибок, которые появляются при ручном проектировании, но требует высокой квалификации технологов. Учебно-методическое и программное обучение будущих специалистов подразумевает формирование практических навыков и умений, что достигается путем использования различных тренажеров, имитирующих реальные технологические процессы. Решение основной задачи ТПЗП КЛ – получение гладкого профиля пера заготовки лопатки компрессора – возможно при наличии соответствующего программного обеспечения (ПО) и алгоритмов. В работе рассматривается вопрос разработки блока тренажера для технологов кузнечно-штамповочного производства КЛ с использованием САПР – AutoCAD. Использование основных свойств кубических сглаживающих сплайнов для получение математической модели (ММ) заготовки позволит не только решить основную задачу ТПЗП КЛ, но и разработать программу формирования модели в САПР. Применение алгоритма сглаживания поверхности кубическими интерполяционными сплайнами позволяет получить модель штампованной поковки с гладкой поверхностью, и равномерным припуском по перу в зоне наибольшей изнашиваемости штампов, что способствует значительному повышению их стойкости. В основе работы тренажера алгоритм формирования гладкого профиля пера заготовки КЛ.

Ключевые слова: компрессорная лопатка, заготовка, перо лопатки, заготовительного производство, технологическая подготовка, гладкий профиль, система автоматизированного проектирования, интерполяционные сплайны, математическая модель, алгоритм

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Морозова, К. С. Разработка программы-тренажера формирования гладкого профиля пера заготовки компрессорных лопаток / К. С. Морозова, И. Н. Хаймович. – DOI 10.25559/SITITO.17.202103.642-648 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2021. – Т. 17, № 3. – С. 642-648.

© Морозова К. С., Хаймович И. Н., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Development of a Simulator for the Formation of a Smooth Profile for a Compressor Blade Blank

K. S. Morozova*, I. N. Khaimovich

Samara National Research University, Samara, Russian Federation

34 Moskovskoye shosse, Samara 443086, Russian Federation

* kseniamorozova01@gmail.com

Abstract

The reduction of technological preparation of the blank production time (TPBPT) at the enterprises of the aerospace industry, and the improvement of the quality of products require the search for new solutions related to the automation of production. The design of complex-shaped parts, such as compressor blades (CB) of gas turbine engines (GTE), is highly labor intensive. Computer-aided design systems minimize the possibility of errors that occur in manual design, but require high-quality technologists. Educational-methodical and program training of future specialists implies the formation of practical skills and abilities, which is achieved by the use of various training devices that simulate real technological processes. The solution of the main task of TPBPT CB - obtaining a smooth profile of the airfoil of the compressor blade billet - is possible with the availability of appropriate software (SW) and algorithms. The article considers the issue of development of a simulator unit for technologists of forging and stamping production CB using CAD – AutoCAD. The use of the basic properties of cubic smoothing splines for obtaining the mathematical model (MM) of the blank will not only solve the main problem of the TPBPT CB, but also allows us to develop a program of model formation in the CAD. The algorithm for smoothing the surface with cubic interpolation splines makes it possible to obtain a stamped forging model with a smooth surface and a uniform allowance for the blade in the zone of the greatest wear of the dies, which significantly increases their durability. The operation of the simulator is based on the algorithm for the formation of a smooth profile of the blade of the CB blank.

Keywords: compressor blade, workpiece, blade airfoil, blank production, technological preparation, smooth profile, computer-aided design system, interpolation splines, mathematical model, algorithm

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Morozova K.S., Khaimovich I.N. Development of a Simulator for the Formation of a Smooth Profile for a Compressor Blade Blank. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2021; 17(3):642-648. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202103.642-648>



Введение

Работка и совершенствовании существующих способов изготовления деталей авиационной промышленности нацелены на сокращение энерговременных ресурсов, повышение качества готового изделия и снижение коэффициента использования материалов (КИМ). Особый интерес представляет производство деталей сложной геометрии. При проектировании и изготовлении компрессорных лопаток (КЛ) газотурбинных двигателей (ГТД) особое внимание уделяется процессу технологической подготовки получения заготовки будущей детали, которая служит базой для проектирования штампованной поковки, элементов штампа и объектов контроля штамповой оснастки. Задача технологов сводится к поиску и разработке технологического процесса с учетом физических и механических свойств используемого материала, условий эксплуатации готовой детали, предъявляемой точности изготовления. В процессе ТПЗП необходимо решить задачу приближения геометрических параметров заготовки к размерам и форме готовой детали, что позволит сформировать заготовку под дальнейшую механическую обработку с высоким качеством поверхности и минимальным припуском по перу КЛ.

Снижение трудоемкости на этапе ТПЗП деталей сложной геометрической формы возможно путем использования САПР. Вопросы автоматизации проектирования заготовительного производства в области обработки металлов давлением рассмотрены в работах М. В. Мальцева, И. П. Медведева, Б. М. Позднеева, А. М. Золотова, Б. Г. Каплунова. Отмечается, что использование ручных способов формирования проекта изготовления деталей ракетно-космического комплекса не является эффективным. При изготовлении шаблонов деталей сложной формы требуется выполнение нескольких копий, чтобы сформировать формообразующую поверхность. Срок проектирования и изготовления технологической оснастки для штамповки лопатки составляет около шести месяцев, при этом не всегда обеспечивается высокое качество поверхности и соблюдается плавность перехода по сечениям по всему перу. На производственных предприятиях основу конструкторско-технологической документации составляют чертежи, где содержится вся необходимая информация об изготавливаемом объекте. Однако, для сложнофасонных деталей традиционный чертеж является неинформативным. Основу проектирования деталей авиационной промышленности составляют специальные методы формирования геометрии штамповой оснастки (плазово-шаблонный, расчётно-плазовый и бесплазовый), отличающиеся более высокой трудоемкостью изготовления сборочных единиц.

Развитие производства требует поиска принципиально новых решений, которые позволят автоматизировать процесс заготовительного производства. В настоящее время, решение задачи автоматизации заготовительного производства основано на использовании математических моделей, которые содержат необходимую информацию об изделии с конструкторско-технологической точки зрения. Использование мате-

матических моделей (ММ) подразумевает отказ от традиционных методов хранения информации на бумажном носителе (в виде чертежей, схем, плазов, шаблонов) и переход на машинные автоматизированные системы.

Примером применимости математических методов для формирования сложных поверхностей является изготовлении стенки и корыта КЛ и направляющих лопаток ГТД путём аппроксимации (рис. 1). Сущность метода состоит в том, что для улучшения качества готового изделия за счёт обеспечения стабильности его механических свойств, выпуклую поверхность заготовки в продольном направлении выполняют в виде двух цилиндрических или конических поверхностей, линии сопряжения которых, являются общей образующей этих поверхностей, расположенной в пределах поля допуска по толщине. Аналогично строится и внутренняя (вогнутая) поверхность лопатки¹ [1; 2].

Авторы Г. П. Гырдымов, Ю. М. Соломцев отмечают, что построение ММ на базе сплайн-функций является наиболее эффективным и исключает вероятность получения случайных ошибок при построении профиля поковки. Сплайны не связаны с физикой моделируемых процессов и обладают высокой обрабатываемостью на ЭВМ.

Работа по формированию гладкого профиля пера заготовки КЛ требует высокой квалификации технологов и является энергозатратной. Применение САПР позволяет выполнять расчетную часть в автоматическом режиме и получать всю необходимую конструкторско-техническую документацию. Технолог выполняет роль посредника: вводит исходные параметры и оценивает результат. Снижение временных затрат с момента проектирования до выхода готовой детали и получение поверхности заготовки КЛ высокого качества возможно при развитии у технолога необходимых знаний и умений.

Целью исследования является разработка программы-тренажера для технологов кузнечно-штамповочного производства для формирования гладкого профиля пера заготовки КЛ. Основу программы-тренажера составляет универсальная ММ, построенная с применением кубических сглаживающих сплайнов и алгоритм формирования гладкого профиля пера заготовки КЛ.

Описание алгоритма формирования гладкого профиля в САПР

Сплайн представляет собой функцию, область определения которой разбита на конечное число отрезков, на каждом из которых она совпадает с некоторым алгебраическим многочленом. Иными словами – это кусочно-заданная функция.

В настоящее время в САПР наряду с методом конечных элементов (КЭ) широко используются алгоритмы сплайн-интерполяции [3; 4]. Применение кубических интерполяционных сплайнов позволяет определить промежуточное значение функции по уже имеющимся значениям. Основная задача интерполяции состоит в восстановлении с определённой точностью функции f на заданном отрезке $[a; b]$ по таблице

¹ Михеев В. А., Хаймович А. И. Математическое моделирование процессов динамической рекристаллизации поликристаллических материалов в условиях интенсивной пластической деформации [Электронный ресурс] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2011. № 7. С. 37-42. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16524240> (дата обращения: 13.07.2021). Рез. англ.



чисел $(x_i; f_i), i = 1, 2, \dots, n$, где $f_i = f(x_i)$ и точки x_i образуют упорядоченную последовательность $\Delta: a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$ [5].

Естественный кубический сплайн удовлетворяет условиям:

1) функция $S(x)$ дважды непрерывно дифференцируемая функция на $[a; b]$ ($S(x) \in C^2[a; b]$);

2) на каждом из отрезков $[x_i; x_{i+1}]$ функция $S(x)$ является полиномом третьей степени вида:

$$S(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3,$$

$$i = 1, 2, \dots, n - 1$$

3) функция $S(x)$ – интерполяционная функция, т.е.

$$S(x_i) = f(x_i), i = 1, 2, \dots, n;$$

4) краевым условиям $S''(a) = S''(b) = 0$.

Существует несколько алгоритмов, позволяющих проводить процедуру сглаживания табличных данных. Алгоритм Кирхгофа-Лява подразумевает использование условия минимизации функционала при сравнении производных, дающих чистый изгиб [1; 6]. В основу алгоритма формирования гладкого профиля пера заготовки КЛ легли положения сглаживания интерполяционными кубическими сплайнами, которыми описывается массив узловых точек. Математическая модель интерполяционного сплайна подробно описана в работах Ф. Гилла, В. А. Василенко, Ю. С. Завьялова.

Рассмотрим алгоритм последовательной корректировки положения каждой исходной точки вдоль осей сечения (изменение положения крайних узловых точек исключается) (рис.1). Первый этап корректировки исключает из расчета первую точку из общего массива, образуя пробел. По оставшимся узловым точкам строится интерполяционный сплайн, определяющий величину коррекции. С последующим этапом величина пробела увеличивается за счет роста числа точек, входящих в пробел. Формирующиеся последующие сплайны: 2, 3 и т.д. позволяют рассчитать суммарную степень корреляции, равную среднеарифметическому значению поэтапных величин. Длина пробела определяется кривизной профиля и шагом базовых точек.

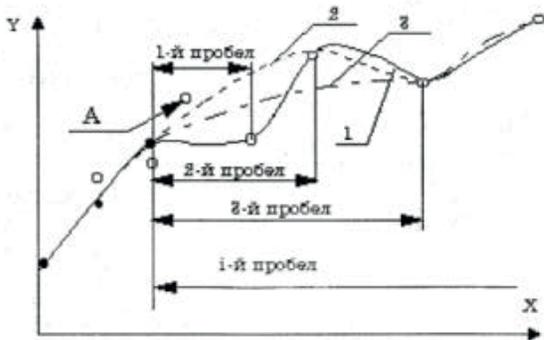
Модель кубического сплайна:

$$Spl(x) = y_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (1)$$

где $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ на каждом подынтервале $[x_i; x_{i+1}]$,

$$i = 1, 2, \dots, n - 1.$$

Методика расчёта коэффициентов сглаживающего сплайна следующая:



Р и с. 1. Графическая модель сплайна

Fig. 1. Spline graphic model

Коэффициенты b_i, c_i, d_i находим из условия непрерывности, т.е. производная на последующем интервале равна производной на предыдущем в той же точке, включая производные второго порядка. Тогда коэффициенты можно выразить следующими формулами:

$$b_i = \frac{y_{i+1} + y_i}{h_i} - h_i(\sigma_{i+1} + 2\sigma_i);$$

$$c_i = 3\sigma_i;$$

$$d_i = \frac{\sigma_{i+1} + \sigma_i}{h_i}; i = 1, 2, \dots, n - 1.$$

Из системы найдём значения σ_n :

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 & h_1 & & & \\ & \alpha_2 & h_2 & & \\ & & \alpha_3 & h_3 & \\ & & & \dots & \\ & & & & \alpha_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \dots \\ \sigma_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \dots \\ \beta_n \end{pmatrix}$$

Элементы α_i вычисляются по формулам:

$$\alpha_1 = -h_1; \alpha_i = 2(h_{i-1} + h_i) - \frac{h_{i-1}^2}{\alpha_{i-1}};$$

$$\alpha_n = -h_{n-1} - \frac{h_{n-1}^2}{\alpha_{n-1}}; i = 2, 3, \dots, n - 1$$

а правые части системы β_i по формулам:

$$\beta_1 = h_1\Delta_1; \beta_i = (\Delta_i - \Delta_{i-1}) - \frac{h_{i-1}\beta_{i-1}}{\alpha_{i-1}};$$

$$\beta_n = -h_{n-1}\Delta_{n-3} - \frac{h_{i-1}\beta_{i-1}}{\alpha_{i-1}}; i = 2, 3, \dots, n - 1$$

Коэффициенты σ_i находятся методом обратной подстановки:

$$\sigma_i = \frac{\beta_i - h_i\sigma_{i+1}}{\alpha_i}, i = n - 1;$$

$$\sigma_i = \frac{\beta_n}{\alpha_n}, n = 2, \dots, 1$$

Систему уравнений, состоящую из n уравнений можно решить методом исключения. Также можно использовать существующие программы для вычисления σ_i .

На каждом шаге итерации оставшиеся точки аппроксимируются кубическим сплайном, что позволяет рассчитывать, новые скорректированных значений рассматриваемой точки: $Y_{ki,1}; Y_{ki,2}; \dots; Y_{ki,n}$. Отклонения новых координат точки от исходных определяются из отношений:

$$\Delta y_{ki,1} = y_{ki,1} - y_{ki};$$

$$\Delta y_{ki,2} = y_{ki,2} - y_{ki}; \dots;$$

$$\Delta y_{ki,n} = y_{ki,n} - y_{ki};$$

где y_{ki} – исходная координата рассматриваемой точки в i -ой операции.

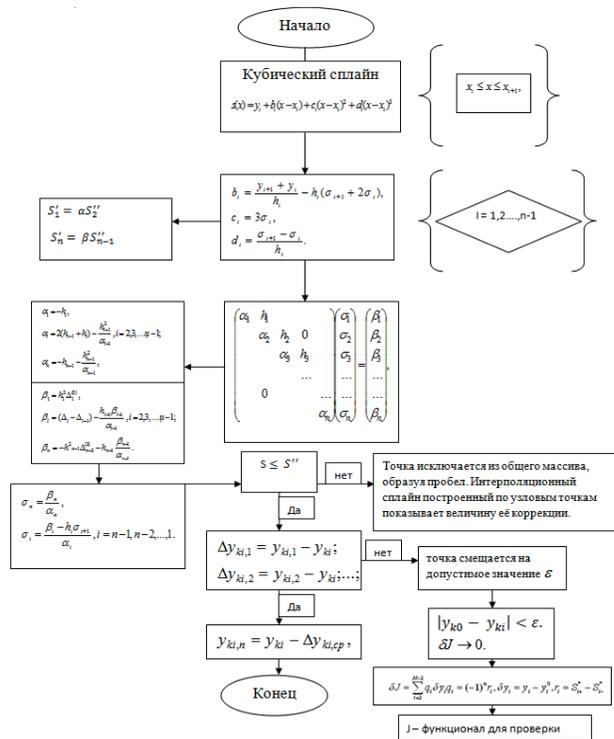
Координата рассматриваемой точки находится из выражения: $y_{ki,n} = y_{ki,n} - \Delta y_{ki,cp}$

в котором $\Delta y_{ki,cp} = (\Delta y_{ki,1} + \Delta y_{ki,2} + \dots + \Delta y_{ki,m})/m$ – среднее отклонение.

В результате корректировки любая точка массива не должна выходить за пределы ранее установленного промежутка, т.е.



$|y_{k0} - y_{kj}| < \varepsilon$. Если условие не выполняется, то точка смещается на допустимое значение ε . После нахождения всех точек проводят оценку плавности сечений пера поковки. Описанный алгоритм формирования ММ представлен на рис.2.



Р и с 2. Алгоритм формирования гладкого профиля пера заготовки КЛ
F i g. 2. Algorithm for the formation of a smooth profile of the blade airfoil of the CB blank (CB - compressor blade)

Описание работы программы-тренажера

Методика решения задачи формирования гладкого профиля пера заготовки КЛ может быть представлена последовательным выполнением следующих операций:

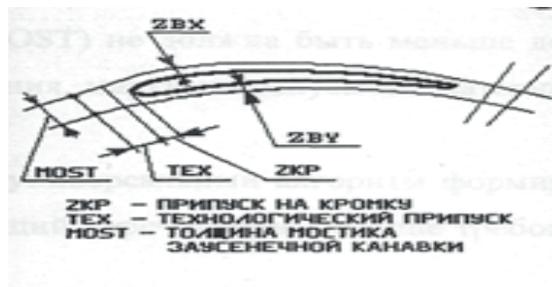
1. сглаживание исходных координат лопатки компрессора по всем сечениям с использованием кубических интерполяционных сплайнов;
2. назначение технологических припусков по перу компрессорной лопатки;
3. построение профиля пера заготовки в системах автоматизированного проектирования.

Сглаживание координат пера лопатки ведется по описанному выше алгоритму перебора узловых точек сетки поверхности пера.

Главная задача при формировании профиля пера заготовки лопатки компрессора основана на построении гладкого профиля пера лопатки и назначении припусков. Ранее было сказано, что сложная геометрия пера КЛ требует особого подхода в назначении припусков для формирования штампованной поковки (рис. 3).

Назначаются следующие припуски: по спинке (ZBX), по корыту (ZBY), по кромкам (ZKP). Следует учитывать, что величина

припусков может изменяться в широких диапазонах: от 0 до 15 мм. Также учитывается технологический напуск (ТЕХ), обеспечивающий правильное продолжение пера в штампе, значение которого варьируется от 0 до 20 мм.

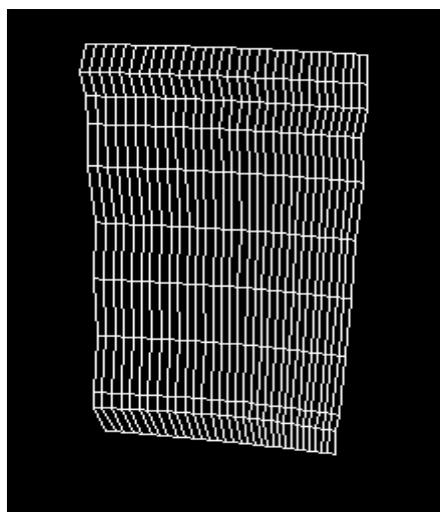


Р и с 3. Назначение припусков по перу заготовки КЛ
F i g. 3. Blade airfoil allowances for CB blanks

Обобщенная структура САПР объектов ТПЗП подразумевает получение профиля пера заготовки КЛ, но и формирование всей необходимой конструкторско-технологической документации. Предполагается, что решение задачи ТПЗП КЛ будет выполняться путем поэтапной реализации подзадач: формирование гладкого профиля пера заготовки; расчет размеров и построение чертежа поковки; расчет математических моделей штамповой оснастки [7-14].

Разработка программы

Основным этапом разработки программы-тренажера является использования алгоритма формирования гладкого профиля пера заготовки в САПР AutoCAD. Оценка результативности работы проведена на этапе построения поверхности корыта пера КЛ (рис. 4). Установлено, что программа обеспечивает плавность перехода между сечениями, что подтверждает гипотезу об эффективном использовании теоретического алгоритма формирования поверхности пера заготовки для систем автоматизированного проектирования [15-20].



Р и с 4. Поверхность «корыта» пера КЛ
F i g. 4. The surface of the "trough" of the CB blade airfoil

Лопатка компрессора – объект сложной геометрической формы. Получение модели штамповки КЛ подразумевает поэтапное моделирование всех её элементов: перо, хвостовик, бобышка. Работа программы-тренажера может быть разбита на три структурных блока:

- построение гладкого профиля пера заготовки КЛ с необходимыми припусками по перу, по предложенному алгоритму;
- формирование или выбор конфигурации хвостовика;
- формирование технологической бобышки.

Интеграция отдельных конструктивных элементов в системе автоматизированного проектирования приведет к формированию модели заготовки лопатки, по которой могут быть получены чертежи штамповой оснастки.

Таким образом, использование систем автоматизированного проектирования позволяет сократить трудоёмкость технологической подготовки производства, за счет автоматизированного выпуска чертежей заготовки лопатки и штамповой оснастки. Применение алгоритма сглаживания поверхности кубическими интерполяционными сплайнами позволяют получить модель штампованной поковки с гладкой поверхностью, и равномерным припуском по перу в зоне наибольшей изнашиваемости штампов, что способствует значительному повышению их стойкости [20-25].

Заключение

Анализ состояния вопроса получения деталей сложной геометрии показал, что наилучшие результаты достигаются при использовании кубических интерполяционных сплайнов для сглаживания поверхности от сечения к сечению. В основу алгоритма теоретического расчета профиля пера заготовки КЛ положены основные свойства кубических сплайнов. Использование гладкого профиля заготовок КЛ в штампе позволяет повысить стойкость штамповой оснастки.

Применение алгоритма теоретического расчета профиля пера заготовки КЛ в САПР AutoCAD позволяет получать модели штамповой поковки (отдельных элементов штампа) с гладкой поверхностью.

Программа-тренажер получения гладкого профиля пера заготовки КЛ может быть использована для формирования необходимых навыков и умений будущих специалистов-технологов. Она является универсальным инструментом, поскольку обеспечивает возможность получения гладкого профиля пера заготовки КЛ, который может быть использован для проектирования штамповой оснастки в автоматическом режиме.

References

- [1] Khaimovich I.N., Khaimovich A.I., Kovalkova E.A. Automation of Calculation Method of Technological Parameters of Wiredrawing with Account of Speed Factor and Material Properties. *Solid State Phenomena*. 2020; 299:552-558. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.552>
- [2] Khaimovich I.N., Frolov M.A. Improvement of Technological Process of Multiproduct Production on the Bases of Simulation Modeling of Production Unit. *Key Engineering Materials*. 2016; 684:487-507. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.684.487>
- [3] Zvonov S.Y., Popov I.P., Shlyapugin A.G. Peculiarities of the process of hollow conical parts shaping from a ring blank. *Russian Aeronautics*. 2010; 53(3):358-361. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068799810030190>
- [4] Korolev A.V., Korolev A.A., Balayev A.F., Iznairov B.M., Zakharov O.V., Vasin A.N. Probability Nature of Solid Bodies Destruction. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015; 10(21):42692-42695. (In Eng.)
- [5] Dubovská R. The quality control of machining process with CAD/CAM system support. *Proceedings of the 8th International DAAAM Baltic Conference-Industrial Engineering*. Tallin, Estonia; 2012. p. 27-32. Available at: <http://innomet.ttu.ee/daaam12/proceedings/pdf/Dubovska.pdf> (accessed 13.07.2021). (In Eng.)
- [6] Dubovska R., Jambor J., Majerik J. Implementation of CAD/CAM system CATIA V5 in simulation of CNC machining process. *Procedia Engineering*. 2014; 69:638-645. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.037>
- [7] Khaimovich I.N. Computer-aided design of blank forging production facilities for aircraft engine compressor blades. *Russian Aeronautics*. 2014; 57(2):169-174. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068799814020093>
- [8] Khaimovich I.N., Khaimovich A.I. Computer-Aided Engineering of the Process of Injection Molding Articles Made of Composite Materials. *Key Engineering Materials*. 2017; 746:269-274. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.746.269>
- [9] Khaimovich A.I., Khaimovich I.N. Methods and Algorithms for Computer-aided Engineering of Die Tooling of Compressor Blades from Titanium Alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 302(1):012062. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/302/1/012062>
- [10] Khaimovich I.N. CAD system of design and engineering provision of die forming of compressor blades for aircraft engines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 87(8):082024. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/8/082024>
- [11] Wei Z., Zhang Sh., Jafari S., Nikolaidis T. Gas turbine aero-engines real time on-board modelling: A review, research challenges, and exploring the future. *Progress in Aerospace Sciences*. 2020; 121:100693. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100693>
- [12] Balli O. Failure analysis of inlet guide vane (IGV) actuator and bellcrank assembly used on J85 turbojet engines. *Engineering Failure Analysis*. 2020; 115:104700. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104700>
- [13] Babu K.S., Raghavulu K.V., Jani S.P. Design and strengthening properties of different forging gas turbine blade materials. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 46(17):8461-8465. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.489>
- [14] Wu J., Wen B., Zhang Q., Zhou Y., Ding S., Du F., Zhang S., Wang Z. A novel blade tip clearance measurement method based on event capture technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020; 139:106626. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106626>
- [15] Bazhina A.D., Bazhin P.M., Chizhikov A.P., Konstantinov A.S., Stoln A.M. Influence of high-temperature annealing



- on structure of titanium aluminide materials obtained by combustion and high-temperature shear deformation. *Intermetallics*. 2021; 139:107313. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107313>
- [16] Waligórski M., Batura K., Kucal K., Merksiz J. Empirical assessment of thermodynamic processes of a turbojet engine in the process values field using vibration parameters. *Measurement*. 2020; 158:107702. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107702>
- [17] Agapovichev A.V., Sotov A.V., Kokareva V.V., Smelov V.G., Kyarimov R.R. Study of the structure and mechanical characteristics of samples obtained by selective laser melting technology from VT6 alloy metal powder. *Nanoscience and Technology: An International Journal*. 2017; 8(4):323-330. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1615/NanoSciTechnolIntJ.v8.i4.30>
- [18] Grechnikov F.V., Erisov Ya.A., Alexandrov S.E. Effect of anisotropic yield criterion on the Springback in plane strain pure bending. *CEUR Workshop Proceedings*. 2016; 1638:569-577. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-1638/Paper69.pdf> (accessed 13.07.2021). (In Eng.)
- [19] Grechnikov F.V., Erisov Ya.A., Surudin S.V., Tereshchenko V.V. Theoretical and experimental study of plastic anisotropy of Al-1Mn alloy taking into account the crystallographic orientation of the structure. *Materials Physics and Mechanics*. 2018; 40(2):274-284. (In Eng.) DOI: http://dx.doi.org/10.18720/MPM.4022018_16
- [20] Grechnikov F.V., Erisov Ya.A. Virtual Material Model with the Given Crystallographic Orientation of the Structure. *Key Engineering Materials*. 2016; 684:134-142. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.684.134>
- [21] Dem'yanenko E.G., Popov, I.P. Limits of flanging process feasibility to create thin-wall conical shells. *Russian Aeronautics*. 2012; 55(4):408-412. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068799812040150>
- [22] Sotov A.V., Agapovichev A.V., Smelov V.G., Kokareva V.V., Dmitrieva M.O., Melnikov A.A., Golanov S.P., Anurov Y.M. Investigation of the IN-738 superalloy microstructure and mechanical properties for the manufacturing of gas turbine engine nozzle guide vane by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020; 107(5-6):2525-2535. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05197-x>
- [23] Demyanenko E.G., Popov I.P., Menshikov V.S. Research of the process of axisymmetric forming of thin-walled flat blanks into the conical parts with minimal thickness variation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017; 177(1):012122. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012122>
- [24] Bogdanov A., Degtyarev A., Korkhov V., Kyaw T., Shchegoleva N. Big Data as the future of information technology. *CEUR Workshop Proceedings*. 2018; 2267:26-31. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2267/26-31-paper-4.pdf> (accessed 13.07.2021). (In Eng.)
- [25] Khaimovich A., Agapovichev A., Sotov A., Kokareva V., Smelov V., Zhuchenko E. Research study of residual stress during Ni-Co-Cr alloy selective laser melting process. *Materials Today: Proceedings*. 2019; 19(5):2454-2457. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.063>

Поступила 13.07.2021; одобрена после рецензирования 05.09.2021; принята к публикации 12.09.2021.

Submitted 13.07.2021; approved after reviewing 05.09.2021; accepted for publication 12.09.2021.

Об авторах:

Морозова Ксения Сергеевна, аспирант кафедры обработки металлов давлением, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3172-6587>, kseniamorozova0197@gmail.com

Хаймович Ирина Николаевна, профессор кафедры обработки металлов давлением, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8798-3745>, kovalek68@mail.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the authors:

Kseniia S. Morozova, Postgraduate student of the Metal Press Department, Samara National Research University (34 Moskovskoye shosse, Samara 443086, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3172-6587>, kseniamorozova0197@gmail.com

Irina N. Khaimovich, Professor of the Metal Press Department, Samara National Research University (34 Moskovskoye shosse, Samara 443086, Russian Federation), Dr. Sci. (Tech.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8798-3745>, kovalek68@mail.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

