

УДК 621.791

## Построение алгоритма решения задач оснащения технологического процесса изготовления узлов аэрокосмического производства

С.И. Пономарев<sup>а</sup>, С.П. Ереско<sup>б</sup>, Т.Т. Ереско<sup>с</sup>

Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнева, пр-т «Красноярский рабочий» 31, Красноярск, Россия

<sup>а</sup>Serg\_ponom@mail.ru, <sup>б</sup>okm@sibsau.ru, <sup>с</sup>okm@sibsau.ru

Статья поступила 13.09.2014, принята 16.11.2014

*В работе предлагается описание совершенствования технологии изготовления деталей и узлов аэрокосмического производства при использовании компьютерного проектирования и управления технологическими процессами. Теоретические основы и алгоритмы построения технологического процесса изготовления деталей и узлов аэрокосмической отрасли с применением различных способов соединения жаропрочных материалов, например диффузионной сварки, проектируются на основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований, предлагаемых авторами «Атрибутивной базы данных для создания технологических процессов получения деталей аэрокосмического производства диффузионной сваркой» и «Атрибутивной базы данных технологического оборудования, инструмента и приспособлений для механической обработки деталей аэрокосмического производства». Применение новых жаропрочных материалов, в том числе высокотемпературной керамики, при изготовлении турбин газотурбинных двигателей требует решения сложных конструкторских и технологических задач. Одной из них является получение неразъемного металлокерамического узла, отвечающего всем требованиям, предъявляемым к газовой турбине. В Сибирском государственном аэрокосмическом университете проводятся работы по исследованию возможности изготовления узлов газотурбинных двигателей методом диффузионной сварки. Во время выполнения работ проведен обзор материалов, применяемых для изготовления деталей и узлов, применяемых в аэрокосмическом производстве зарубежными и отечественными компаниями. По результатам обзора создан массив базы данных, включая материалы, применяемые для изготовления деталей аэрокосмического производства, и режимы получения из них неразъемных соединений диффузионной сваркой. Разработан алгоритм адаптивного управления технологическим оснащением в процессе изготовления деталей и узлов аэрокосмической отрасли в реальном масштабе времени. На основе проведенных исследований и созданных баз данных выработаны рекомендации по изготовлению неразъемных металлокерамических узлов — турбин газотурбинных двигателей, используемых в аэрокосмическом производстве. Предлагаемый способ компьютерного проектирования и управления технологическими процессами изготовления деталей и узлов значительно упрощает организационные работы и сокращает время подготовки производства при изготовлении высококачественных деталей и узлов аэрокосмического производства.*

**Ключевые слова:** компьютерное проектирование, технологический процесс, алгоритм, массив базы данных.

## Solution algorithm for equipping the units-manufacturing technological process in aerospace production

S.I. Ponomarev<sup>а</sup>, S.P. Eresko<sup>б</sup>, T.T. Eresko<sup>с</sup>

Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev; 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, Russia

<sup>а</sup>Serg\_ponom@mail.ru, <sup>б</sup>okm@sibsau.ru, <sup>с</sup>okm@sibsau.ru

Received 13.09.2014, accepted 16.11.2014

*The article proposes the description of improving parts- and units-manufacturing technology in aerospace production when using computer-aided design and technological process control. Theoretical foundations and algorithms for constructing the parts- and units-manufacturing technological process in aerospace production by using various methods of connection for heat-resistant materials, such as diffusion welding, are designed on the basis of theoretical and experimental studies conducted and proposed by the authors of «Attribute database for making parts-manufacturing processes by diffusion welding in aerospace production» and «Attribute database for processing equipment, tools and equipment for machining the parts in aerospace production». Using new heat-resistant materials, including high temperature ceramics, in manufacturing turbines for gas turbine engines requires solving complex design and technological problems. One of them is to receive one-piece metal-ceramic unit that meets all the requirements of the gas turbine. In Siberian State Aerospace University, research of the possibility for manufacturing the units of gas turbine engines by diffusion welding is being done. While doing the research, a review of the materials used for parts- and units-manufacturing by foreign and domestic companies in aerospace production have been conducted. According to the results of the review, database array has been made, including the materials used for parts-manufacturing in aerospace production, and the modes used for receiving one-piece units by using diffusion welding. Algorithm for adaptive control of technology equipment, when manufacturing parts and units in aerospace production in real time period, has been developed. On the basis of the research and databases, recommendations for manufacturing one-piece metal-ceramic units such as turbines for gas turbine engines, used in aerospace production, have been worked out. The proposed method of computer-*

aided design and technological process control for parts- and units-manufacturing simplifies the organization of work and reduces the time for pre-production when manufacturing high-quality parts and units in aerospace production.

**Key words:** computer-aided design, technological process, algorithm, database array.

**Введение.** Космическая техника и космические технологии в 2006–2015 гг. развиваются, опираясь на широкое использование информационных и нанотехнологий. Это требует современного парка оборудования, задействованного в технологическом цикле и способного реализовать новейшие технологии. При этом на первый план выдвигаются задачи технического переоснащения, внедрения новых наукоемких технологий [1, с. 8].

В данный момент в машиностроительном производстве весьма актуальны проблемы повышения качества изготовления деталей машин и приборов, сокращения сроков и издержек производства. Современные подходы в области автоматизированного проектирования технологических процессов позволяют снизить трудоемкость и сроки проектирования, уменьшить себестоимость изготовления изделия, сократить объем проектной документации и повысить качество производства.

**Постановка и решение задачи.** Одним из эффективных способов повышения качества выпускаемой продукции и сокращения сроков производства является разработка интеллектуальных методов проектирования.

Газотурбинные двигатели (ГТД) — весьма распространенный тип силовой установки, применяемый на транспорте и в энергетике. Современный авиационный ГТД является наукоемким высокотехнологичным продуктом, аналогов которому по уровню напряжений и тепловому состоянию деталей нет среди других изделий машиностроения.

Для конструкции ГТД характерно широкое применение легких алюминиевых и магниевых сплавов, высокопрочных легированных сталей, жаростойких хромоникелевых и титановых сплавов, композитных материалов.

Производство новых ГТД требует постоянного совершенствования технологических процессов, разработки и внедрения новых методов и средств обработки, обеспечивающих постоянно растущие требования по качеству и эксплуатационной надежности. Технология изготовления деталей, узлов и двигателя в целом в значительной степени определяет ресурс изделия, трудоемкость и себестоимость его производства.

Однако не менее важными являются этапы эксплуатации и ремонта авиадвигателей, которые должны обеспечивать поддержание высокого уровня надежности и работоспособности изделия при интенсивной эксплуатации в неблагоприятных условиях, а также продлевать ресурс изделия. Эксплуатация ГТД при критических частотах вращения гибких роторов, при высокой температурной нагруженности отдельных элементов конструкции и значительных градиентах температур в различных зонах изделия предъявляет повышенные требования к качеству выполнения деталей и сборочных единиц.

Разработка передовых научно обоснованных подходов к обеспечению надежности и долговечности авиа-

ционных двигателей нового поколения на этапах проектирования, производства, эксплуатации и ремонта является залогом обеспечения их конкурентоспособности на мировом рынке [2, с. 8–9].

В Сибирском государственном аэрокосмическом университете проводятся работы по исследованию возможности изготовления узлов ГТД методом диффузионной сварки [3, 4]. Проведен обзор материалов для изготовления деталей и узлов, применяемых в аэрокосмическом производстве зарубежными и отечественными компаниями. По результатам обзора создан массив базы данных, включая материалы для изготовления деталей аэрокосмического производства и режимы получения из них неразъемных соединений диффузионной сваркой (рис. 1) [5 – 7].

Материал	Деталь АКП	Категория
ВМ175	диски турбин и компрессора высокого давления	Никелевый жаропрочный сплав
ЖС36	рабочие и сопловые лопатки с направленной и монокристаллической структурой	Никелевый жаропрочный сплав
ЖС32V	рабочие и сопловые лопатки с направленной и монокристаллической структурой	Никелевый жаропрочный сплав
ЖС40	рабочие лопатки с монокристаллической структурой	Никелевый жаропрочный сплав
ЖС	ротор турбонасосного агрегата	Никелевый жаропрочный сплав

Материал	Материал2	Проц	Темпе	Врем	Свар	Вакуум	Пр	Источник
Udimet 700	Udimet 700	Ni+Co	890	240	83	0,13		Диффузионная сварка мате
Nimanic 90	Nimanic 90	Ni	1200	15	32	0,13		Диффузионная сварка мате

Тип установки	Способ нагрева	Усилие сжатия, кН	Размеры рабочей	Щелкните
A306-21	радиационный	2	20x20x40	
ДФ-101	радиационный	60	700x700x700	
П-115	радиационный	400	400x400x400	
СДВ-50	индукционный	50	400x420x420	
СДВУ-60	радиационный	5	320x320x300	

Материал	Материал2	Проц	Темпе	Врем	Свар	Вакуум	Пр	Источник
ЖС6К	ЖС6КП		1000	10	20	0,13		Диффузионная сварка мате
ЖС6П	ЖС6Н		1000	10	20	0,13		Диффузионная сварка мате
ЖСУ6	ЖСУ6		1130	60	104			(патент СССР № 1819202) Во
ХН65ВМТЮ	ЭИ893		875	20	20	0,13		Диффузионная сварка мате
ХН67ВМЮТ	Сu		950	15	2,5	0,13	72	Диффузионная сварка мате

Тип установки	Способ нагрева	Усилие сжатия, кН	Размеры рабочей	Щелкните
ВА 51-39 ЗАО "Контактор", г.	индукционный	63	20x20x20	
МДС ОАО "Электроаппарат"	индукционный	63	20x20x10	

**Рис. 1.** База данных материалов, применяемых для изготовления деталей аэрокосмического производства, и режимы получения из них неразъемных соединений диффузионной сваркой

В результате анализа рассмотренного материала можно сделать вывод о том, что в настоящее время применение новых конструкционных материалов, в том числе керамических, для изготовления деталей и узлов аэрокосмического производства является наиболее перспективными [8].

Применение новых жаропрочных материалов, в том числе высокотемпературной керамики, при изготовлении турбин ГТД требует решения сложных конструкторских и технологических задач. Одна из них — получение неразъемного металлокерамического узла, отвечающего всем требованиям, предъявляемым к газовой турбине [9].

Металлокерамический узел может быть изготовлен с использованием различных методов и средств производства. Выбор оптимального варианта, особенно для ответственных изделий, представляет собой сложную

задачу. Выполнение требований к качественным показателям может отрицательно влиять на показатели себестоимости, трудоемкости и т. д. Поэтому при разработке технологического процесса изготовления ответственного узла — газовой турбины должны быть учтены все факторы и обеспечено получение заданных качественных показателей изделия при минимальных затратах труда и средств [10]. В качестве критериев требований к изготавливаемому узлу взяты требования из перечня научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Федеральной космической программы России на 2006–2015 гг. [11].

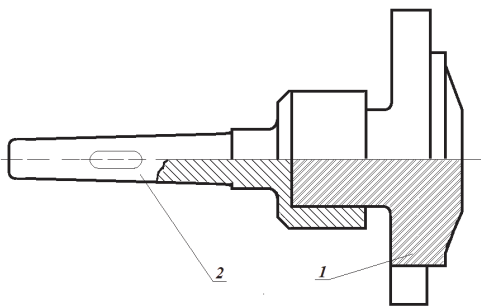


Рис. 2. Турбина турбонасосного агрегата: 1 — диск ротора, 2 — вал

Технологический процесс изготовления узла — газовой турбины — состоит из трех этапов: изготовление вала ротора, изготовление турбины ротора, изготовление ротора.

Проектирование технологического процесса механической обработки заготовки вала ротора представляет собой циклическую итерационную последовательность дискретных проектных процедур, каждая из которых является самостоятельной и завершённой во времени инженерной задачей [12]. Этим объясняется многовариантность технологических процессов механической обработки однотипных заготовок, различия в применяемом инструменте и режимах обработки, что приводит к необоснованному увеличению временных и материальных затрат на технологическую подготовку производства и, соответственно, к снижению эффективности технологического проектирования. В общем перечне задач, решаемых технологами, следует выделить так называемые «неформализованные» задачи, для которых не существует формальных, математически обоснованных методов решения. Среди неформализованных задач особое место занимают задачи выбора оснащения технологического процесса изготовления детали. Обеспечение однозначности нормативно-справочных данных в сочетании с обоснованным усовершенствованием логических моделей информационных массивов, направленным на преобразование табличных структур в сетевые, может обеспечить повышение эффективности технологического проектирования за счет применения массива баз данных. Использование формальных методов решения инженерных задач гарантирует повышение эффективности технологического проектирования, в первую очередь, автоматизированного [13]. Для решения этой задачи был разработан алгоритм адаптивного управления технологиче-

ским процессом механической обработки заготовки вала ротора в реальном масштабе времени (рис. 4).

На рис. 4 представлена блок-схема обучающего алгоритма адаптивного управления технологическим оснащением, составленного на основании условий генерации управляющей программы непосредственно в процессе обработки, по результатам текущих данных, в момент осуществления технологического процесса механической обработки заготовки вала ротора

В процессе функционирования создан массив базы данных [5, 14], содержащий характеристики оборудования, приспособлений и инструментов, регулирующих параметры механической обработки (рис. 3).

В блоке 1 вводится база данных области возможных вариаций исходных данных, определяющих структуру оснащения технологического процесса.

В процессе обработки отслеживаются построчным выделением текущие параметры технологического процесса — технологические переходы (блок 2). Их обработка выявляет параметры, определяющие оснащение процесса технологической операции (блок 3).

Дальнейшее преобразование безразмерных критериев выявляет массив данных (блок 4), который является основой для постоянного сравнения текущего значения критерия с учетом определенных для заданного технологического процесса и обрабатываемого материала значений по зависимостям разработанной технологии.

ТехнПереход		Номер с	Наименование операции	Технолог
63	Токарно-винторезная	Подрезать		
63	Токарно-винторезная	Полировка		
63	Токарно-винторезная	Развернуть		
Тип	Инст	Название инструмента		
Развертка	Коническая под укороченные конусы Мс			
Развертка	Ручная коническая			
Развертка	Машинная насадная оснащенная из тверд			
Развертка	Ручная коническая конусностью 1:30 с ци			
Развертки	Машинная цельная			
Развертка	Машинная цельная			
Развертка	Машинная с коническим хвостовиком ос			
Развертка	Коническая с цилиндрическим хвостови			
Развертка	Коническая с коническим хвостовиком п			
Развертка	Ручная коническая			
*				
63	Токарно-винторезная	Расверли		
63	Токарно-винторезная	Расточить		
63	Токарно-винторезная	Сверлить		

Рис. 3. Массив базы данных технологического оснащения

При соответствии производится выбор основных параметров из базы данных области возможных вариантов (оборудования, приспособлений, режущего, измерительного инструмента), удовлетворяющих условиям ввода (блок 7), при несоответствии производится проверка условий соответствия массива данным ввода (блок 5).

При несоблюдении условий производится операционная корректировка массива данных ввода (блок 6).

После выбора основных параметров производится проверка условий последней строки массива (блок 8). При несоответствии проводится сравнение значений основных параметров с данными из области возможных вариаций (блок 9), при соответствии — проверка условий соответствия массива данным ввода (блок 10). При несоблюде-



нии этого условия осуществляется оперативная корректировка массива данных ввода (блок 6).

Таким образом, предусмотрено трехступенчатое управление технологическим оснащением (блоки 5, 6, 10).

Оптимальные значения технологического оснащения создания параметров режима механической обработки достигается измерением требуемых качеств по-

лучаемой детали последовательно. К изменению следующего параметра переходят лишь при полном исчерпании возможности рационализации процесса предыдущим параметром. Выбор параметров адаптивного управления технологическим процессом моделируется как численная (аналитическая) модель оперативной задачи [15 – 17].

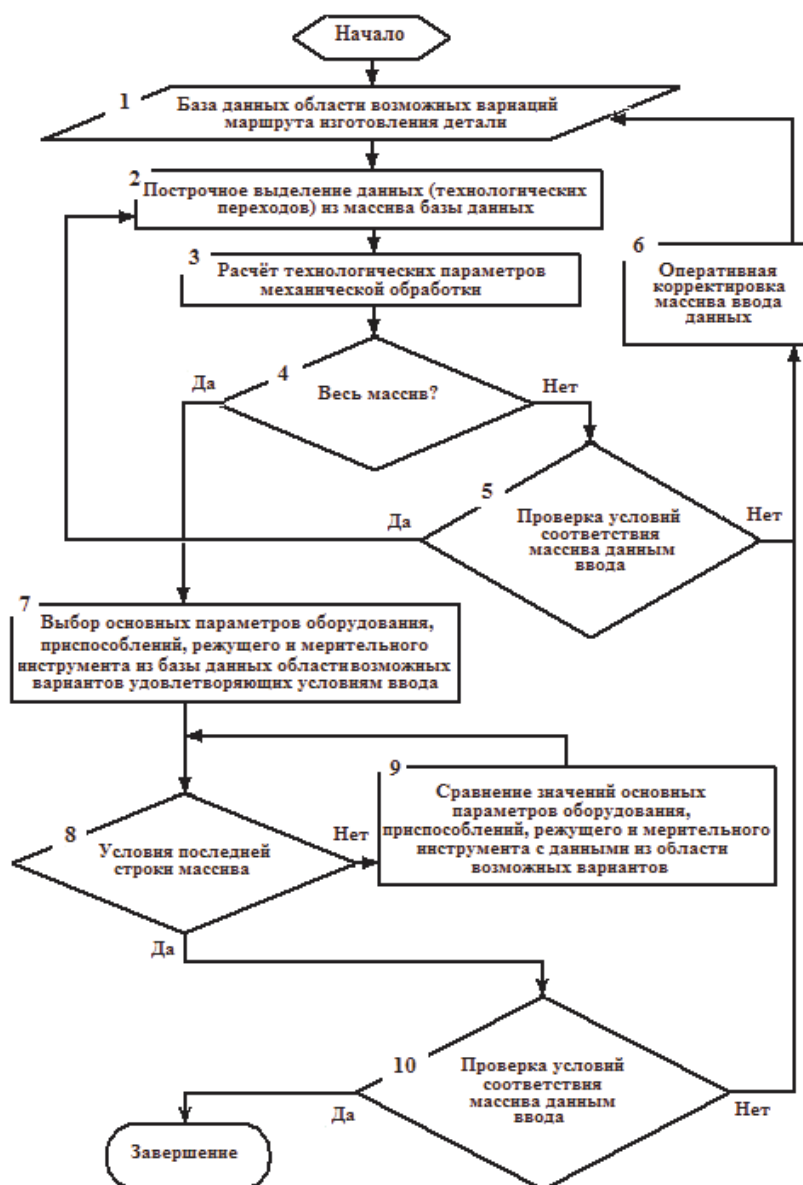


Рис. 4. Алгоритм адаптивного управления технологическим оснащением изготовления детали

Теоретические основы и алгоритмы построения технологического процесса решения задач второго и третьего этапа проектируются на основе предлагаемого авторами запатентованного способа соединения жаропрочного сплава на кобальтовой основе с керамикой на основе нитрида кремния [18] и технологической оснастки «Установка для получения металлокерамических изделий» [19]. В патентах реализован способ получения определенного узла — ротора турбины турбонасосного агрегата, состоящего из определенных материалов — жаропрочного сплава на кобальтовой основе и керамики на основе нитрида кремния, содержащий

определенные режимы получения металлокерамического узла диффузионной сваркой.

#### Выводы

В результате проведенного исследования разработаны практические рекомендации и методические материалы для формализации и алгоритмизации задач маршрутного технологического оснащения, что позволило формировать планы механической обработки поверхностей в автоматизированном режиме и применять унифицированные алгоритмы технологического проектирования для построения технологических САПР изготовления узлов для аэрокосмического производства [20].

*Литература*

1. Федеральная космическая программа России на 2006-2015 годы [Электронный ресурс], утв. постановлением Правительства Рос. Федерации от 22.10.2005 г. № 635 с изм. от 15.09.2008 г. № 683; от 31. 03. 2011 г. № 235. Доступ из справ.-прав. системы «Консультант Плюс».
2. Богуслаев А.В. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей: монография. Запорожье, 2009. 468 с.
3. Пономарёв С.И., Ереско С.П., Ереско Т.Т. Совершенствование технологии изготовления узлов аэрокосмического производства // Вестник СибГАУ. 2014. Вып. 2 (41). С. 78-80.
4. Пономарёв С.И., Ереско С.П., Совершенствование технологических процессов улучшающих техническое состояние узлов тепловых турбомашин // Материалы 12-й Международной конференции «Решетневские чтения». Красноярск, 2008. С. 133.
5. Пономарёв С.И., Ереско С.П. Формирование базы данных диффузионной сварки деталей аэрокосмического производства // Материалы 17-й Международной конференции «Решетневские чтения». Красноярск, 2013. С. 293–294.
6. Пономарёв С.И., Ереско С.П., Ереско Т.Т. Атрибутивная база данных для создания технологических процессов получения деталей аэрокосмического производства диффузионной сваркой. Св. ГР БД 2013621572 Рос. Федерация, № 2013621404; заявл. 31.10.13; зарег. в Реестре баз данных 19.12.13.
7. Пономарёв С.И., Ереско С.П., Ереско Т.Т. Методология экспериментальных исследований получения неразъемных металлокерамических узлов диффузионной сваркой // Механика XXI века. 2013. С. 153-154.
8. Пономарёв С.И., Ереско С.П., Ереско Т.Т. Совершенствование технологии изготовления металлокерамических узлов авиационной техники // Материалы IX Всероссийской научно- практической конференции «Проблемы авиации и космонавтики». Т 1. Технические науки. Информационные технологии. Красноярск, 2013. С. 165-166.
9. Пономарёв С.И., Ереско С.П., Разработка технологических процессов получения узлов металлокерамических турбин // Материалы 13-й Международной конференции «Решетневские чтения». Красноярск, 2009. С. 218.
10. Пономарёв С.И., Ереско С.П., Получение газовых турбин диффузионной сваркой // Материалы Российской академии наук «XXXVII Академические чтения по космонавтике». Секция 19 «Производство ракетно-космической техники». М., 2013. С. 29–30.
11. Федеральная космическая программа России на 2006-2015 годы [Электронный ресурс]. Перечень научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выдвигаемых на открытый конкурс 2006 года Федеральным космическим агентством в рамках «Федеральной космической программы России на 2006-2015 годы» и федеральной целевой программы «Реформирование и развитие оборонно-промышленного комплекса (2002-2006 годы)». Доступ из справочно-прав. системы «Консультант Плюс».
12. Пономарёв С.И., Утенков В.Д., Коваленко Н.А., Неклюдов А.В. Моделирование процесса проектирования технологии механической обработки // Технология машиностроения. 2002. № 4. С. 49-52.
13. Пономарёв С.И., Утенков В.Д., Филиппов Ю.А., Михайлов С.В., Красовец Э.Л. Автоматизация проектирования оптимальных маршрутных процессов механической обработ-

- ки // Материалы III Всероссийская научно-практическая конференция «Инновации в машиностроении». Пенза: ПГУ, 2003. С. 45–47.
14. Пономарёв С.И., Ручкин Л.В., Ручкина Н.Л. Атрибутивная база данных технологического оборудования, инструмента и приспособлений для механической обработки деталей аэрокосмического производства»: Св. ГР баз данных 2014620691; Заявка № 2014620376; зарег. в Реестре баз данных 15.05.14.
15. Пономарёв С.И., Ереско С.П. Построение модели технологического процесса диффузионной сварки // Материалы 15-й Международной конференции «Решетневские чтения». Красноярск, 2010. С. 246-247.
16. Пономарёв С.И., Ереско С.П. Построение модели технологического процесса диффузионной сварки // Материалы 15-й Международной конференции «Решетневские чтения». Красноярск, 2011. Т. 1. С. 243.
17. Пономарёв С.И., Ереско С.П. Управление автоматизированным оборудованием диффузионной сварки // Материалы 16-й Международной конференции «Решетневские чтения». Красноярск, 2012. С. 265–266.
18. Пономарёв С.И., Ереско С.П., Ереско Т.Т., Прокопьев С.И. Способ соединения жаропрочного сплава на кобальтовой основе с керамикой на основе нитрида кремния: пат. 2433026 Рос. Федерация, заявка №.2010128800/02. Зарег. 10.11.11.
19. Пономарёв С.И., Ереско С.П., Ереско Т.Т. Установка для получения металлокерамических изделий: пат. 93722. Рос. Рос. Федерация, заявка № 2009148910/22; зарег. 10.05.2010.
20. Пономарёв С.И., Ереско С.П., Ереско Т.Т. Совершенствование технологии изготовления узлов аэрокосмического производства // Вестник СибГАУ. 2014. Вып. 3 (42). С. 78-80.

*References*

1. Russian Federal Space Program for 2006-2015 [Elektronnyi resurs], utv. postanovleniem Pravitel'stva Ros. Federatsii ot 22.10.2005 g. № 635 s izm. ot 15.09.2008 g. № 683; ot 31. 03. 2011 g. №. 235. Dostup iz sprav.-prav. sistemy «Kon-sul'tant Plius».
2. Boguslaev A.V. Advanced simulation technology, optimization and intelligent automation throughout the lifecycle of aircraft engines: monografiya. Zaporozh'e, 2009. 468 p.
3. Ponomarev S.I., Eresko S.P., Eresko T.T. Improving the technology of aerospace production units // Vestnik SibGAU. 2014. Vyp. 2 (41). P. 78-80.
4. Ponomarev S.I., Eresko S.P. Improving the technological processes to improve the technical condition of the parts of thermal turbomachinery // Materialy 12-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Reshetnevskie chteniya». Krasnoyarsk, 2008. P. 133.
5. Ponomarev S.I., Eresko S.P. Formation of a database of diffusion welding of aerospace parts manufacturing // Materialy 17-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Reshetnevskie chteniya». Krasnoyarsk, 2013. P. 293–294.
6. Ponomarev S.I., Eresko S.P., Eresko T.T. Attribute database for the creation of technological processes of production of aerospace components by diffusion welding. Sv. GR BD 2013621572 Ros. Federatsiya, № 2013621404; zayavl. 31.10.13; zareg. v Reestre baz dannykh 19.12.13.
7. Ponomarev S.I., Eresko S.P., Eresko T.T. Methodology of experimental studies to obtain one-piece metal-node diffusion welded Coy // Mekhaniki XXI veku. 2013. P. 153-154.
8. Ponomarev S.I., Eresko S.P., Eresko T.T. Improving technology manufacturing sintered nodes aeronautical engineering //

Materialy IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy aviatcii i kosmonavтики». T1. Tekhnicheskie nauki. Informatsionnye tekhnologii. Krasnoyarsk, 2013. P. 165-166.

9. Ponomarev S.I., Eresko S.P. Development of processes for production of metal-turbine units // Materialy 13-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Reshetnevskie chteniya». Krasnoyarsk, 2009. P. 218.

10. Ponomarev S.I., Eresko S.P. Getting gas turbines diffusion welding // Materialy Rossiiskoi akademii nauk «XXXVII Akademicheskie chteniya po kosmonavtike». Sektsiya 19 «Proizvodstvo raketno-kosmicheskoi tekhniki». M., 2013. P. 29-30.

11. The Russian Federal Space Program for 2006-2015 [Elektronnyi resurs]. Perechen' nauchno-issledovatel'skikh i opytno-konstruktorskikh rabot, vydigaemykh na otkrytyi konkurs 2006 goda Federal'nym kosmicheskim agentstvom v ramkakh «Federal'noi kosmicheskoi programmy Rossii na 2006-2015 gody» i federal'noi tselevoi programmy «Reformirovanie i razvitie oboronno-promyshlennogo kompleksa (2002-2006 gody)». Dostup iz spravochno-prav. sistemy «Konsul'tant Plyus».

12. Ponomarev S.I., Utenkov V.D., Kovalenko N.A., Neklyudov A.V. Modelling of the design process of machining technology // Tekhnologiya mashinostroeniya. 2002. № 4. P. 49-52.

13. Ponomarev S.I., Utenkov V.D., Filippov Yu.A., Mikhailov S.V., Krasovets E.L. Design automation of optimal routing machining processes // Materialy III Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Innovatsii v mashinostroenii». Penza: PGU, 2003. P. 45-47.

14. Ponomarev S.I., Ruchkin L.V., Ruchkina N.L. Attributive database processing equipment, tools and equipment for machining aerospace parts production: Sv. GR baz dannykh 2014620691; zayavl. № 2014620376; zareg. v Reestre baz dannykh 15.05.14.

15. Ponomarev S.I., Eresko S.P. Constructing process models of diffusion welding // Materialy 15-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Reshetnevskie chteniya». Krasnoyarsk, 2010. P. 246-247.

16. Ponomarev S.I., Eresko S.P. Building a model of technological process of diffusion welding // Materialy 15-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Reshetnevskie chteniya». Krasnoyarsk, 2011. T. 1. P. 243.

17. Ponomarev S.I., Eresko S.P. Management of automated equipment diffusion welding // Materialy 16-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Reshetnevskie chteniya». Krasnoyarsk, 2012. P. 265-266.

18. Ponomarev S.I., Eresko S.P., Eresko T.T., Prokop'ev S.I. Connection method superalloy cobalt-based ceramics based on silicon nitride: pat. 2433026 Ros. Federatsiya, zayavka № 2010128800/02; zareg. 10.11.11.

19. Ponomarev S.I., Eresko S.P., Eresko T.T. Apparatus for producing metal lokeramicheskikh products.: pat. 93722. Ros. Ros. Federatsiya, zayavka № 2009148910/22; zareg. 10.05.2010.

20. Ponomarev S.I., Eresko S.P., Eresko T.T. Improving manufacturing technology nodes aerospace manufacturing // Vestnik SibGAU. 2014. Vyp. 3 (42). P. 78-80.

УДК 539.3

## Определение критических нагрузок с помощью энергетического критерия устойчивости для локального круглого дефекта

Л.А. Бохоева<sup>1 a</sup>, В.Е. Рогов<sup>2 b</sup>, А.С. Чермошнцева<sup>3 c</sup>

<sup>1</sup>Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, ул.Ключевская 40В, Улан-Удэ, Россия

<sup>2</sup>Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН, ул. Сахьяновой 8, Улан-Удэ, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, ул. Вторая Бауманская 5, Москва, Россия

<sup>a</sup>bohoeva@yandex.ru, <sup>b</sup>rogov54v@mail.ru, <sup>c</sup>anechka@yandex.ru

Статья поступила 11.09.2014, принята 13.11.2014

*Отслоения являются распространенным видом дефекта и часто считаются определяющим фактором при решении вопроса об использовании композиционных материалов. В данной работе решена нелинейная задача устойчивости тонкой пластины с дефектом в виде круглого отслоения. При достижении критической нагрузки возможны три вида потери устойчивости элементов конструкций из композиционных материалов с дефектами типа отслоений. Первый вид потери устойчивости — глобальное выпучивание всей пластины, т. е. потеря устойчивости композиционной балки как единого целого. Оно наблюдается при дефектах малой длины. Второй вид потери устойчивости — локальное выпучивание лишь отслоившейся верхней части, когда нижняя и основная части пластины остаются плоскими. Локальная потеря устойчивости является основным видом разрушения при сжатии слоистых композиционных материалов с дефектами типа тонких отслоений. Подобное выпучивание обусловлено высокой концентрацией межслойного напряжения на фронте дефекта (вершине трещины); далее при возрастании нагрузки область выпучивания увеличивается до критического размера. Такой вид потери устойчивости носит название «отслоение тонкого слоя». В работе рассмотрена модель тонкого слоя (локальное выпучивание). Определена критическая нагрузка с помощью энергетического критерия устойчивости. Критическая нагрузка представлена как точка бифуркации равновесных форм, найдены соответствующие ей перемещения для круглых по форме отслоений. Получены аналитические выражения для прогибов на начальной стадии закритического деформирования. Определен характер возможных равновесных форм — устойчивый и неустойчивый.*

**Ключевые слова:** межслойные дефекты, слоистые материалы, устойчивость, критическая нагрузка.