

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 3 (81)

2018

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

СОДЕРЖАНИЕ

Главный редактор

Заслуженный деятель науки и техники РФ
д.т.н., проф. СУСЛОВ А.Г.

Председатель редакционного совета

чл.-кор. РАН ПРИХОДЬКО В.М.

Зам. председателя редакционного совета

д.т.н., проф. ГРИГОРЬЯНЦ А.Г.

Редакционный совет:

д.ф.-м.н., проф. АМОСОВ А.П. (г. Самара)

д.т.н., проф. АРТЁМОВ И.И. (г. Пенза)

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

д.т.н., проф. БЕЛОВ В.Д. (г. Москва)

д.т.н., проф. БОЛДЫРЕВ А.И. (г. Воронеж)

д.т.н., проф. БОЧКАРЕВ П.Ю. (г. Саратов)

акад. НАН Беларуси

ВИТЯЗЬ П.А. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

д.т.н., проф. ЕМЕЛЬЯНОВ С.Г. (г. Курск)

д.т.н., проф. ЗУБАРЕВ Ю.М. (г. Санкт-Петербург)

д.т.н., проф. КИРИЧЕК А.В. (г. Брянск)

д.т.н., проф. КЛИМЕНКО С.А. (г. Киев, Украина)

акад. РАН ЛЫСАК В.И. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

д.т.н., проф. МИХАЙЛОВ А.Н. (г. Донецк, Украина)

д.т.н., проф. МОРОЗОВ В.В. (г. Владимир)

д.т.н., проф. МОТРЕНКО П.Д. (г. Ростов-на-Дону)

д.т.н., проф. ОЛЕЙНИК А.В. (г. Москва)

д.т.н., проф. ПОЛЕТАЕВ В.А. (г. Рыбинск)

д.т.н., проф. СИТНИКОВ А.А. (г. Барнаул)

д.т.н., проф. СМОЛЕНЦЕВ В.П. (г. Воронеж)

д.т.н., проф. СХИРТЛАДЗЕ А.Г. (г. Москва)

д.т.н., проф. ФАТЮХИН Д.С. (г. Москва)

д.т.н., проф. ХАНДОЖКО А.В. (г. Брянск)

д.т.н., проф. ХЕЙФЕЦ М.Л. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ХУДОБИН Л.В. (г. Ульяновск)

д.т.н., проф. ЧИГИРИНСКИЙ Ю.Л. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. ШАВРИН О.И. (г. Ижевск)

Зам. главного редактора

ДЮБКОВА Н.В.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

Журнал распространяется по подписке,
которую можно оформить в любом почтовом
отделении (индексы по каталогам:

«Роспечать» **79195**, «Пресса России» **39536**).

Тел. редакции: 8-903-869-70-63

E-mail: naukatm@yandex.ru

www.ntmash.tu-bryansk.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по
надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации средства массовой

информации ПИ № ФС77-66087 от 10 июня 2016 года

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

- Демин В.А. Управление качеством заготовок, получаемых обработкой металлов давлением 3
- Хейфец М.Л., Бородавко В.И., Пынькин А.М., Грецкий Н.Л.
Технологический процесс электронно-лучевой сварки пакета лопаток паровых турбин 9

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

- Безязычный В.Ф. Расчетное прогнозирование влияния технологических условий обработки на эксплуатационные свойства деталей машин 14
- Суслов А.Г. Управление качеством изделий машиностроения на всех этапах их жизненного цикла 22

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ И МОДУЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Сафонов С.В., Смоленцев В.П. Обеспечение эксплуатационных характеристик изделий технологическими методами. 26
- Михайлов А.Н., Михайлов В.А., Михайлов Д.А., Пичко А.П., Шейко Е.А. Структурная надежность и методы повышения ресурса газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств 32

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОДГОТОВКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

- Бржозовский Б.М., Бочкарев П.Ю., Мартынов В.В., Мартынов П.В.
Проблемы управления, мониторинга и диагностики сложных мехатронных систем в машиностроении. 42

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК при Минобрнауки России изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по направлению 05.02.00 – Машиностроение и машиноведение 05.16.00 – Металлургия и материаловедение

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Наукоёмкие технологии в машиностроении», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 3 (81)

2018

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

Honoured Scientist and Engineer of Russia
d.en.s. SUSLOV A.G.

Chairman of Editorial Committee

m.-corr. RAS PRIHOD'KO V.M.

Chairman Assistant

d.en.s., prof. GRIGOR'YANTS A.G.

Editorial Committee:

d.p.-m.s., prof. AMOSOV A.P. (Samara)

d.en.s., prof. ARTEMOV I.I. (Penza)

d.en.s., prof. BAZROV B.M. (Moscow)

d.en.s., prof. BELOV V.D. (Moscow)

d.en.s., prof. BOLDYREV A.I. (Voronezh)

d.en.s., prof. BOCHKAREV P.Yu. (Saratov)

Acad. NAS of Belarus

VITYAZ' P.A. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. DEMIN V.A. (Moscow)

d.en.s., prof. EMEL'YANOV S.G. (Kursk)

d.en.s., prof. ZUBAREV Yu.M. (St. Petersburg)

d.en.s., prof. KIRICHEK A.V. (Bryansk)

d.en.s., prof. KLIMENKO S.A. (Kiev, Ukraine)

Acad. RAS LYSAK V.I. (Volgograd)

d.en.s., prof. MAKAROV V.F. (Perm')

d.en.s., prof. MALIKOV A.A. (Tula)

d.en.s., prof. MIHAJLOV A.N. (Doneck, Ukraine)

d.en.s., prof. MOROZOV V.V. (Vladimir)

d.en.s., prof. MOTRENKO P.D. (Rostov-on-Don)

d.en.s., prof. OLEJNIK A.V. (Moscow)

d.en.s., prof. POLETAEV V.A. (Rybinsk)

d.en.s., prof. SITNIKOV A.A. (Barnaul)

d.en.s., prof. SMOLENCEV V.P. (Voronezh)

d.en.s., prof. SHIRTLADZE A.G. (Moscow)

d.en.s., prof. FATYUKHIN D.C. (Moscow)

d.en.s., prof. HANDOZHKO A.V. (Bryansk)

d.en.s., prof. HEJFETS M.L. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. HUDOBIN L.V. (Ul'yanovsk)

d.en.s., prof. CHIGIRINSKY Yu.L. (Volgograd)

d.en.s., prof. SHAVRIN O.I. (Izhevsk)

Deputy chief editor

DJUBKOVA N.V.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

Journal is spreaded on a subscription, witch can be issued in any post office (index on the catalogues: «Rospechat» **79195**,

«Pressa Rosii» **39536**).

Editorial office Ph: 8-903-869-70-63

E-mail: naukatm@yandex.ru

www.ntmash.tu-bryansk.ru

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications of Russian Federation (ROSKOMNADZOR).

Registration certificate

ПИ № ФС77-66087 от 10.06.2016

CONTENTS

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN BLANK PRODUCTION

- Demin V.A.** Quality control of blanks manufactured by metal forming 3
Heifets M.L., Borodavko V.I., Pynkin A.M., Gretskey N.L. Engineering procedure in electron-beam welding of blade packet for steam turbines. 9

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF MACHINING

- Beziyazychny V.F.** Design prediction of processing conditions impact upon machine performance properties. 14
Suslov A.G. Engineering product quality control at all stages of product life 22

FUNCTION-ORIENTED AND MODULAR TECHNOLOGIES

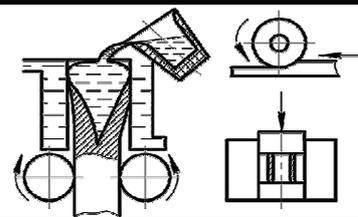
- Safonov S.V., Smolentsev V.P.** Operation properties support for products by technological methods. 26
Mikhailov A.N., Mikhailov V.A., Mikhailov D.A., Pichko A.P., Sheiko E.A. Structural reliability and methods for gas turbine engine life increase based on support of functionally-directed properties 32

TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATED CONTROL

- Brzhozovsky B.M., Bochkaryov P.Yu., Martynov V.V., Martynov P.V.** Problems of control, monitoring and diagnostics of complex mechatronic systems in mechanical engineering. 42

A Journal is included in the list of editions approved by HEB at the Ministry of Education and Science of Russia for the publication of competitors' works for academic degrees in the direction of 05.02.00 – Mechanical Engineering and Science of Machines, 05.16.00 – Metallurgy and Materials Science.

Reprint is possible only with the reference to the journal
«Science intensive technologies in mechanical engineering»



УДК 621.7.04

DOI: 10.12737/article_5a8ef9cb057f82.61176738

В.А. Демин, д.т.н.

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1)

E-mail: va_demin@bk.ru

Управление качеством заготовок, получаемых обработкой металлов давлением

Представлены современные требования к заготовкам, полученным обработкой металла давлением. Приведены данные по точности и шероховатости поверхности заготовок из проката. Проанализированы различные критерии разрушения, применяемые для анализа процесса штамповки. Показано, что испытание металла по Эриксену нельзя использовать для оценки предельного коэффициента вытяжки.

Ключевые слова: машиностроение; обработка металлов давлением; качество заготовок.

V.A. Demin, D. Eng.

(Bauman State Technical University of Moscow
Build.1., 5, 2-d Baumanskaya, Moscow, 105005)

Quality control of blanks manufactured by metal forming

Current requirements to blanks manufactured by metal forming are presented. There are shown data on accuracy and surface roughness of rolled blanks. Different fracture criteria used for the analysis of press forming are analyzed. It is shown that metal tests on Eriksen should not be used for the estimate of the limiting drawing ratio.

Keywords: mechanical engineering; metal processing; blank quality.

Современное машиностроение требует получения заготовок с заданными характеристиками, такими как: размер зерна, разнотолщинность, чистота поверхности, запас пластичности после обработки металла давлением [1]. Выполнение этих требований увеличивает качество получаемых заготовок и поэтому, в настоящее время, актуальной задачей является управление качеством в процессе получения заготовок.

Обработкой давлением получают заготовки с помощью проката,ковки и штамповки.

Основные виды проката:

– прокат листовой холоднокатаный и горячекатаный;

– прокат круглого сечения и квадратного сечения.

Прокат листовой холоднокатаный толщиной от 0,35 до 5,0 мм по ГОСТ19904-90

подразделяется:

1) *по точности изготовления:*

– по толщине: ВТ – высокая, АТ – повышенная, БТ – нормальная;

– по ширине: ВШ – высокая, АШ – повышенная, БШ – нормальная (листовой прокат);

– по длине: (листовой прокат, кроме прокатанного полистно) ВД – высокая, АД – повышенная, Д – нормальная;

2) *по плоскостности* (листовой прокат): ПО – особо высокая, ПВ – высокая, ПУ – улучшенная, ПН – нормальная;

3) *по характеру кромки:* О – обрезаемая, НО – необрезаемая.

Разнотолщинность проката в одном поперечном сечении не должна превышать половины суммы предельных отклонений по толщине, которые приведены в табл. 1.

1. Предельные отклонения по толщине

Толщина проката	Предельное отклонение по толщине при ширине проката											
	До 1000 включительно			Св. 1000 до 1500 включительно			Св. 1500 до 2000 включительно			Св. 2000 до 2350 включительно		
	ВГ	АГ	БГ	ВГ	АГ	БГ	ВГ	АГ	БГ	ВГ	АГ	БГ
От 0,3 до 0,4	±0,02	±0,03	±0,04	±0,03	±0,04	±0,05						
Св 0,4 до 0,5	±0,03	±0,04	±0,05	±0,04	±0,05	±0,06						
Св 0,5 до 0,65	±0,04	±0,05	±0,06	±0,05	±0,06	±0,07	±0,06	±0,07	±0,09			
Св 0,65 до 0,9	±0,04	±0,06	±0,08	±0,05	±0,06	±0,08	±0,07	±0,09	±0,11			
Св 0,9 до 1,2	±0,05	±0,08	±0,10	±0,06	±0,09	±0,11	±0,07	±0,10	±0,13			
Св 1,2 до 1,4	±0,06	±0,09	±0,10	±0,07	±0,10	±0,12	±0,08	±0,12	±0,15			
Св 1,4 до 1,5	±0,07	±0,10	±0,12	±0,08	±0,11	±0,13	±0,09	±0,13	±0,16			
Св 1,5 до 1,8	±0,08	±0,12	±0,14	±0,09	±0,12	±0,15	±0,10	±0,14	±0,17	±0,14	±0,17	±0,21
Св 1,8 до 2,0	±0,08	±0,12	±0,15	±0,09	±0,13	±0,16	±0,10	±0,15	±0,18	±0,15	±0,18	±0,22
Св 2,0 до 2,5	±0,10	±0,14	±0,17	±0,11	±0,15	±0,18	±0,12	±0,18	±0,20	±0,18	±0,20	±0,23
Св 2,5 до 3,0	±0,12	±0,16	±0,18	±0,13	±0,16	±0,19	±0,14	±0,19	±0,22	±0,19	±0,21	±0,25
Св 3,0 до 3,2	±0,13	±0,17	±0,19	±0,14	±0,18	±0,21	±0,18	±0,20	±0,23	±0,20	±0,22	±0,27
Св 3,2 до 4,0	±0,14	±0,18	±0,20	±0,16	±0,19	±0,22	±0,19	±0,21	±0,24	±0,21	±0,23	±0,28
Св 4,0 до 5,0	±0,16	±0,19	±0,20	±0,18	±0,20	±0,23	±0,20	±0,22	±0,25	±0,23	±0,25	±0,30

Характеристика качества отделки поверхности тонколистового холоднокатаного проката из малоуглеродистой стали регламентируется ГОСТ 9045- 93 и приведена в табл. 2.

2. Характеристика качества отделки поверхности

Группа отделки	Характеристика качества отделки	
II	На обеих сторонах проката не допускаются дефекты, глубина которых превышает 1/2 суммы предельных отклонений по толщине и выводящие за минимальные размеры по толщине, а также цвета побежалости на расстоянии, превышающем 50 мм от кромок. На лицевой стороне (лучшей по качеству поверхности) не допускаются риски и царапины длиной более 50 мм	
III	На обеих сторонах не допускаются дефекты, глубина которых превышает 1/2 суммы предельных отклонений по толщине и выводящие прокат за минимальные размеры по толщине:	
	IIIа цвета побежалости не допускаются на расстоянии более 200 мм от кромок	IIIб цвета побежалости допускаются по всей поверхности проката

В ГОСТ 9045-93 говорится о том, что качество поверхности тонколистовой стали, обжатой в холодном состоянии для вытяжки (CR3 и CR4), может быть неодинаковым в случае закрытых и открытых деталей. Поверхность тонколистовой стали, предназначенной для изготовления закрытых деталей, может иметь поры, незначительные выемки, слабые штрихи или царапины, а также незначительное обесцвечивание. Поверхность тонколистовой стали, предназначенной для изготовления открытых деталей, должна быть относительно свободна от указанных выше дефектов. Если не оговорено иначе, осмотру подвергают только одну сторону листа. Тонколистовую сталь, обжатую в холодном состоянии, обычно выпускают с матированной поверхностью, которая пригодна для последующей обычной декоративной окраски, при этом подобную сталь не рекомендуют для электрохимических покрытий. При формоизменении тонколистовой стали, обжатой в холодном состоянии, при изготовлении из нее деталей может произойти ухудшение состояния поверхности некоторых локализованных зон, что может потребовать ручной обработки подобных участков деталей для подготовки поверхности к последующему применению изделия.

Так же отмечается, что в случае удаления поверхностных дефектов зачисткой мелкозернистым наждачным или войлочным кругом с наждачной пастой на поверхности проката

допускаются следы абразивной зачистки, а глубина зачистки не должна выводить прокат за минимальный размер по толщине.

Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый по ГОСТ 2590-2006 подразделяют:

– по точности прокатки: особо высокой – АО1; высокой – А1, А2, А3; повышенной – В1; обычной – В1, В2, В3, В4, В5;

– по длине: мерной – МД; мерной с немерной длиной – МД1; кратной мерной – КД; кратной мерной с немерной длиной – КД1; немерной – НД; ограниченной в пределах немерной – ОД; ограниченной с немерной длиной – ОД1; в мотках – НМД;

– по предельным отклонениям по длине проката мерной и кратной мерной длины по группам: БД и ВД;

– по кривизне на классы: I, II, III, IV.

Величины допусков на круглый прокат приведены в табл. 3.

Улучшить качество штампованных заготовок можно благодаря совершенствованию технологии и разработке таких переходов, которые обеспечат наилучшее расположение волокон металла в заготовке. Например, в работе [2] показано, что в металле с волокнистым строением микроструктуры (рис.1) наблюдается анизотропия механических свойств, которая может оказывать существенное влияние на износ при истирании. Причем уменьшение износа зависит от угла выхода волокон на поверхность заготовки.

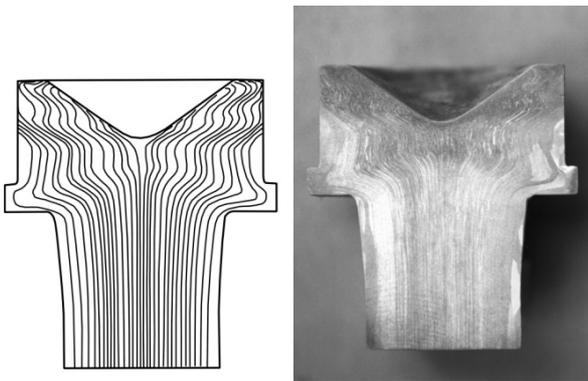


Рис. 1. Металл с волокнистым строением микроструктуры

Были проведены эксперименты на заготовках из стали 45 с шероховатостью образцов и пальца $Ra 1,25$. Износ оценивали при помощи измерения массы образца до и после эксперимента.

Экспериментально установлено, что при штамповке поковок с углом выхода волокон макроструктуры на контактную поверхность в

диапазоне от 0 до 15°, может быть получен минимальный износ при истирании данных поверхностей, что увеличивает срок службы полученных деталей.

Одним из основных критериев качества заготовок полученных обработкой давлением является отсутствие технологических отказов в процессе штамповки [3]. Для прогнозирования разрушения используются различные критерии.

Сегодня, для анализа процессов объемной штамповки, наибольшее распространение получила программа QForm VX, в которой используется критерий разрушения Коккрафта – Лэтэма.

$$\Psi = \int_0^{\bar{\varepsilon}_p} \frac{\sigma_1^+}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}_p,$$

где $\bar{\varepsilon}_p$ – приращение накопленной пластической деформации; σ_1^+ – максимальное растягивающее напряжение; $\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжений.

Однако в работе [4] показано, что нормализованный критерий Коккрафта–Лэтэма не позволяет выполнить количественный прогноз разрушения материала для произвольного технологического процесса холодной штамповки. Критерий можно использовать только для качественной оценки сходных технологических процессов, в которых напряженное состояние и пути деформирования опасных точек отличаются незначительно.

В настоящее время для прогнозирования разрушения металла в процессе обработки давлением так же используют критерии Калпина и Колмогорова.

Критерий Калпина:

$$\Psi = \int_0^{\bar{\varepsilon}_0} \left(n\varphi_0 \varepsilon_0^{n-1} + \frac{\varphi_0 \varepsilon_{np}^n(\eta_k)}{\varepsilon_{np}(\eta_k)} \right) d\varepsilon_0 < 1,$$

где $\varepsilon_{np}(\eta_k)$ – предельное значение накопленной деформации; $\bar{\varepsilon}_0$ – степень деформации, накопленная к концу процесса формоизменения; φ_0, n – коэффициенты.

Критерий Колмогорова:

$$\Psi = \int_0^{\bar{\varepsilon}_0} \frac{d\bar{\varepsilon}_0}{\varepsilon_0^*}$$

где ε_0^* – предельная интенсивность логарифмической деформации для заданного напряженно-деформированного состояния.

3. Допуски на диаметр круглого проката

Номинальный диаметр d , мм	Предельное отклонение, мм, при точности прокатки					
	A1	B1	B1	A01	A2	B2
От 5 до 9	+0,1 -0,2	+0,1 -0,5	+0,3 -0,5	-	±0,15	±0,4
10	+0,1 -0,3	+0,1 -0,5	+0,3 -0,5	-	±0,15	±0,4
От 11 до 12	+0,1 -0,3	+0,1 -0,5	+0,3 -0,5	-	±0,15	±0,4
От 13 до 15	+0,1 -0,3	+0,1 -0,5	+0,3 -0,5	±0,12	±0,20	±0,4
От 16 до 17	+0,1 -0,3	+0,1 -0,5	+0,3 -0,5	±0,12	±0,20	±0,5
От 18 до 19	+0,1 -0,3	+0,1 -0,5	+0,3 -0,5	±0,15	±0,20	±0,5
От 19 до 22	+0,1 -0,4	+0,2 -0,5	+0,4 -0,5	±0,15	±0,20	±0,5
От 23 до 25	+0,1 -0,4	+0,2 -0,5	+0,4 -0,5	±0,15	±0,25	±0,5
От 25 до 28	+0,1 -0,4	+0,2 -0,7	+0,3 -0,7	±0,15	±0,25	±0,6
От 29 до 30	+0,1 -0,5	+0,2 -0,7	+0,3 -0,7	±0,15	±0,25	±0,6
От 31 до 33	+0,1 -0,5	+0,2 -0,7	+0,4 -0,7	±0,15	±0,30	±0,6
От 34 до 35	+0,1 -0,5	+0,2 -0,7	+0,4 -0,7	-	±0,30	±0,6
От 36 до 40	+0,1 -0,5	+0,2 -0,7	+0,4 -0,7	-	±0,30	±0,8
От 41 до 48	+0,1 -0,5	+0,2 -0,7	+0,4 -0,7	-	±0,40	±0,8
50	+0,1 -0,7	+0,2 -1,0	+0,4 -1,0	-	±0,40	±0,8
52	+0,1 -0,7	+0,2 -1,0	+0,4 -1,0	-	±0,40	±1,0
От 53 до 58	+0,1 -0,7	+0,2 -1,0	+0,4 -1,0	-	±0,50	±1,0
От 60 до 78	+0,1 -0,9	+0,3 -1,1	+0,5 -1,1	-	±0,50	±1,0
80	+0,3 -1,0	+0,3 -1,3	+0,5 -1,3	-	-	±1,0
От 82 до 97	+0,3 -1,0	+0,3 -1,3	+0,5 -1,3	-	-	±1,3
100	-	+0,4 -1,7	+0,6 -1,7	-	-	±1,3
От 105 до 115	-	+0,4 -1,7	+0,6 -1,7	-	-	±1,5
120	-	+0,6 -2,0	+0,8 -2,0	-	-	±1,5
От 125 до 155	-	+0,6 -2,0	+0,8 -2,0	-	-	±2,0
160	-	-	+0,9 -2,5	-	-	±2,0

От 165 до 200	-	-	+0,9 -2,5	-	-	±2,5
От 210 до 220	-	-	+1,2 -3,0	-	-	±3,0
От 230 до 250	-	-	+1,2 -3,0	-	-	±4,0
От 260 до 270	-	-	+2,0 -4,0	-	-	±6,0

В работе [5] проведено сравнение перечисленных выше критериев разрушения для операции «отбортовка». Выбор данной операции объясняется тем, что известна точка, в которой происходит разрушение.

Результаты расчетов показаны на рис. 2. Как видно на рис. 2 критерий разрушения Колмогорова показывает результаты, максимально приближенные к результатам эксперимента. По критерию Кокрафта–Лэтэма место разрушения рассчитано правильно, но результат занижен. По критерию Калпина место разрушения определено неверно.

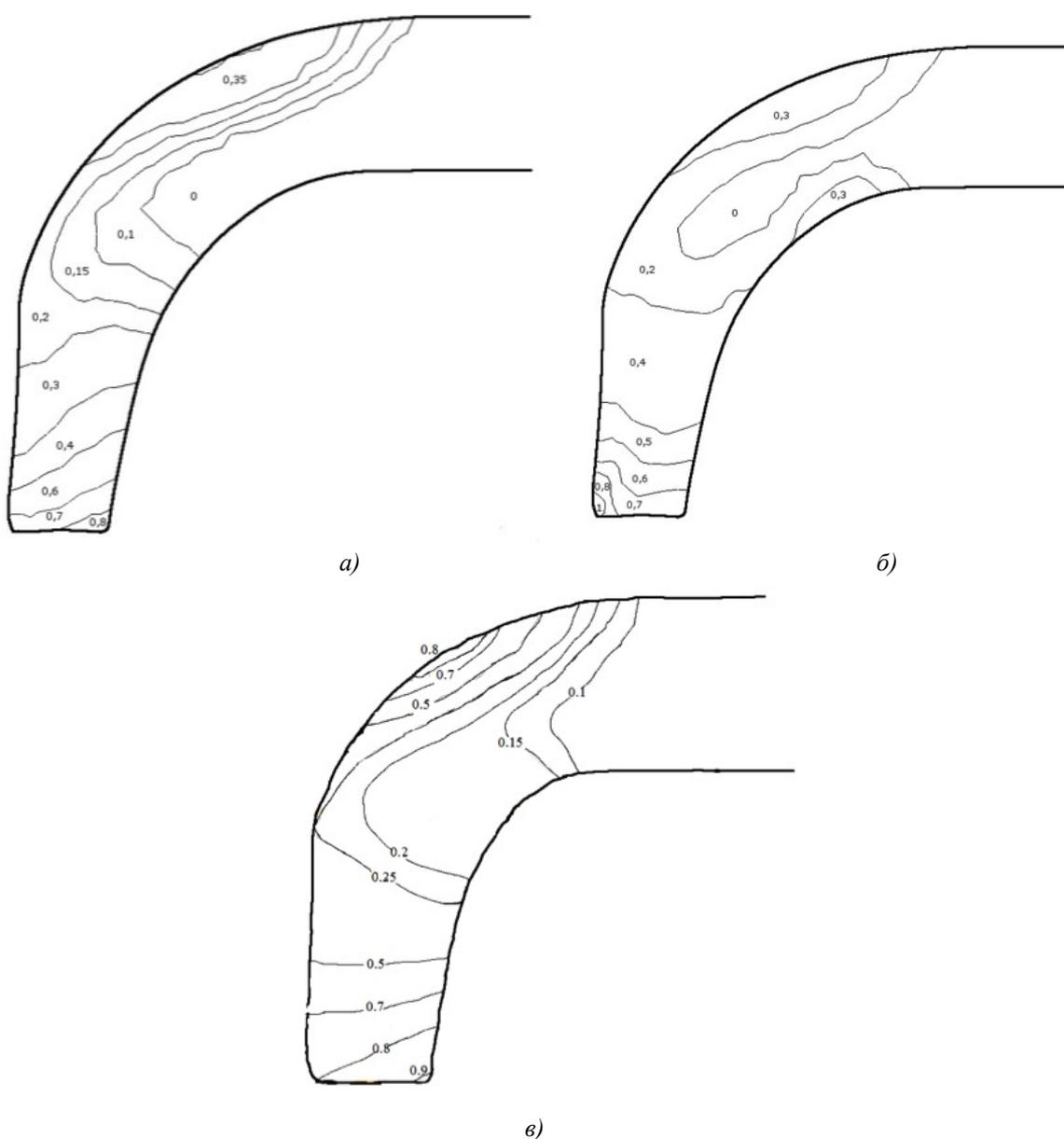


Рис. 2. Результаты расчета по критериям разрушения:

а – критерий разрушения Кокрафта–Лэтэма; *б* – критерий разрушения Калпина; *в* – критерий разрушения Колмогорова

Приведенные критерии разрушения получены авторами с применением теории течения, но в некоторых случаях для анализа процесса деформирования лучше использовать теорию кратковременной ползучести. Поэтому интересна работа [6], где принято, что процесс штамповки протекает в условиях вязкого течения и с учетом повреждаемости уравнения состояния, описывающее поведение материала, подчиняющегося энергетической теории ползучести и повреждаемости.

В результате для материала, подчиняющегося деформационному критерию разрушения, предлагается использовать следующий критерий:

$$\omega_e^{cp} = \frac{C_1}{\varepsilon_{e\text{ пр}}^{cp}} \ln \left(1 + \frac{b^2}{a^2} t^{2f} \right),$$

где ω_e^{cp} – повреждаемость; $\varepsilon_{e\text{ пр}}^{cp}$ – предельная деформация; t – время; C_1, a, b, f – величины, характеризующие геометрию образца.

Однако в работе [6] не приведены результаты экспериментальной проверки полученного критерия.

При проектировании технологических процессов вытяжки цилиндрических и коробчатых деталей основным параметром, определяющим качество получаемых заготовок, является коэффициент вытяжки:

$$K = D/d,$$

где d, D – диаметры детали и заготовки, соответственно.

При определении предельного коэффициента вытяжки используют таблицы значений K или эмпирические формулы. Качественную характеристику металла на пригодность к вытяжке определяют по ГОСТ 10510-80 «Метод испытания на выдавливание листов и лент по Эриксену». В работе [7] рассмотрена связь между группой штампуемости стали для холодной штамповки, определяемой испытаниями по Эриксену и предельным коэффициентом вытяжки.

Проведены расчеты предельного коэффициента вытяжки и глубины лунки для сталей DC03, DC04, DC05 и стали 08. По результатам расчета построены графики, приведенные на рис. 3 и 4.

Из рис. 3 и 4 видно, что, например, сталь DC04 имеет лучшую штампуемость по Эриксену, чем сталь DC03, а предельный коэффициент вытяжки меньше.

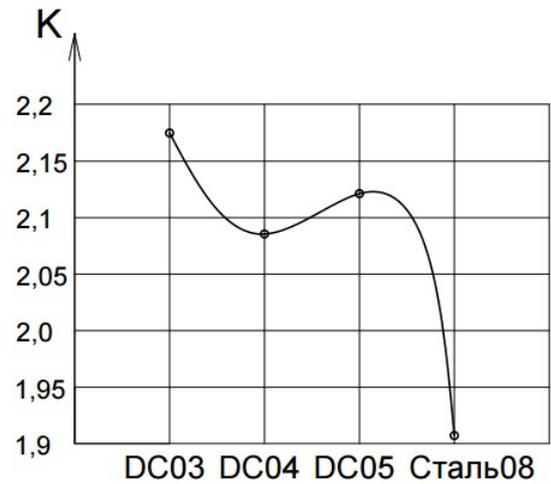


Рис. 3. Зависимости предельного коэффициента вытяжки от марки стали

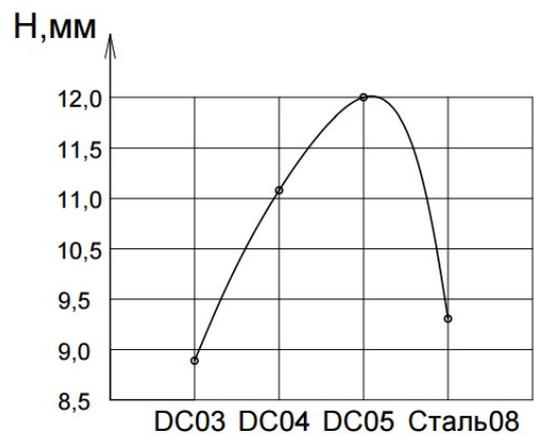


Рис. 4. Зависимость глубины лунки при испытании по Эриксену от марки стали

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демин, В.А. Проектирование инновационных технологий в обработке металлов давлением // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – №8 (74). – С. 3–6.
2. Алленов, М.Г., Белокуров, О.А. Влияние направления волокон макроструктуры стальных поковок на износ полученных из них изделий // Вестник МГТУ Станкин. – 2016. – № 4 (39). – С. 67–70.
3. Демин, В.А. Проектирование процессов толстолистовой штамповки на основе прогнозирования технологических отказов. – М.: Машиностроение-1, 2002. – 186 с. ISBN 5-94275-035-1
4. Власов, А.В. О применении критерия Кокрофта-Лэтэма для прогнозирования разрушения при холодной объемной штамповке // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – Вып. 11. – Ч. 1. – С. 46–58.
5. Демин, В.А., Ромасенко, А.В., Костылев, В.А. Отбортовка отверстия под резьбу более М6 // Заготовительные производства в машиностроении. – 2017. – Т.15. – №8. – С. 357–360.

6. Ларин, С.Н., Платонов, В.И., Куприн, Е.П., Яковлев, С.С. (мл). Подход к оценке повреждаемости при деформировании стрингерных конструкций с цилиндрическими каналами по различным теориям ползучести и повреждаемости // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – Вып. 3. – С. 3–14.

7. Демин, В.А. Исследование связи между предельным коэффициентом вытяжки и группой штампуемости стали для холодной штамповки // Известия Тульского государственного университета. – 2017. – Вып. 12. – Ч. 2. – С. 262–268.

REFERENCES

1. Demin, V.A. Design of innovation technologies in metal forming // *Science Intensive Techniques in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.8 (74). – pp. 3-6.

2. Allenov, M.G., Belokurov, O.A. Macrostructure fiber direction impact in steel forged pieces upon wear of products made of them // *Bulletin of STANKIN MSTU*. – 2016. – No.4 (39). – pp. 67-70.

3. Demin, V.A. *Thick-Sheet Stamping Design Based on Technological Failures Prediction*. – М.: Mechanical Engineering-1, 2002, - pp. 186. ISBN 5-94275-035-1

4. Vlasov, A.V. On Cocroft-Latham criterion application for failure prediction at cold die forging // *Bulletin of Tula State University. Engineering Sciences*. – 2017. – Edition 11. – Part.1. – pp. 46-58.

5. Demin, V.A., Romasenko, A.V., Kostylev, V.A. Hole folding for threading higher of M6 // *Pre-Production in Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol.15. – No.8. – pp. 357-360.

6. Larin, S.N., Platonov, V.I., Kuprin, E.P., Yakovlev, S.S. (young). Approach to damageability estimate at deformation of stringer structures with cylindrical channels on different areas of creep and damageability // *Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences*. – 2016. – Edition 3. – pp. 3-14.

7. Demin, V.A. Investigation of ties between limiting drawing ratio and group of steel stamping for cold forming // *Proceedings of Tula State University*. – 2017. – Edition 12. – Vol.2. – pp. 262-268.

Рецензент д.т.н. Б.М. Базров

УДК 621.9: 658.512

DOI: 10.12737/article_5a8ef9cb7d0fc9.83528290

М.Л. Хейфец, д.т.н., В.И. Бородавко, ген. директор, А.М. Пынькин, зам. ген. директора, Н.Л. Грецкий, н.с. (ГНПО «Центр» НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь)
E-mail: mlk-z@mail.ru

Технологический процесс электронно-лучевой сварки пакета лопаток паровых турбин

Предложена технология изготовления пакета лопаток паровых турбин из жаропрочной высоколегированной трудносвариваемой стали мартенситного класса. Описано преимущество применения электронно-лучевой сварки при сборке пакета лопаток вместо традиционного электродугового способа сварки в защитной среде. Рассмотрена специально спроектированная технологическая оснастка необходимая для автоматизации процесса сварки.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка; пакеты лопаток паровых турбин; концентрированные потоки энергии; трудно-свариваемые стали мартенситного класса.

M.L. Heifets, D. Eng., V.I. Borodavko, general Director, A.M. Pynkin, deputy general Director, N.L. Gretskey, r. a., (SSPC "Center" NAS of Belarus, Minsk, Belarus)

Engineering procedure in electron-beam welding of blade packet for steam turbines

A technology for manufacturing a steam turbine blade packet made of heat-resistant high-alloy hard-to-weld steel of a martensitic class is offered. The advantage of electron-beam welding use at the assembly of a blade packet instead of a common electric arc welding method in protective environment is described. A technological tooling specially designed essential for welding process automation is considered. There are shown results of laser scanning a blade packet geometry with the aid of NikonMetrology MCAx40+ coordinate measuring arm with the further computer analysis of results obtained in applied Focus software which has shown that thermal deformations are within the limits of a tolerance for the mentioned operation and exclude completely further processing.

The application of electron-beam welding at manufacturing a blade packet allows increasing assembly quality, decreasing defects and cost price of an engineering process.

Keywords: electron beam welding; packets of steam turbine blades; concentrated energy flows; hard-to-weld steels of martensitic class.

Паровая турбина – самая значимая и самая дорогостоящая часть тепловых электростанций. Во время работы она подвергается интенсивному воздействию высоких температур, коррозии, эрозии, и в результате ее детали испытывают статические, динамические и температурные напряжения [1 – 3].

Рабочие лопатки являются одними из ответственных элементов турбины и наиболее напряженных деталей, определяющих во многом надежность и срок службы паровой турбины. Они испытывают напряжения – от растяжения и от изгиба, вызываемых действием центробежных сил, а также сил, возникающих вследствие изменения направления движения газа в межлопаточных каналах.

Лопатки испытывают также переменные напряжения от вибрации со знакопеременной амплитудой. Величина этих напряжений может достигать больших значений. Кроме того, лопатки находятся под действием высокой температуры, которая снижает механические свойства материала. От качества материала, изготовления и установки лопаточного аппарата в значительной степени зависит надежность и экономичность эксплуатации турбины. Тяжелые условия работы лопаточного аппарата определяют те высокие требования, которым они должны соответствовать [4, 5].

Лопатки первой ступени изготавливают с цельно-фрезерованным профилем в едином

целом с участком бандажа и хвостовой части и передают на сборку в виде пакета из двух лопаток, сваренных между собой по бандажу и хвосту. При наборе лопаток на диск между бандажами каждой пары лопаток выдерживается зазор от 0,3 до 0,8 мм, замыкается каждый ряд лопаток замковыми пакетами (рис. 1). После набора лопаток на диск производится механическая обработка бандажей и гребешков уплотнений [6, 7].

Материалы, применяемые при изготовлении лопаток паровых турбин. Поскольку лопатки турбин работают в тяжелых условиях высоких температур и нагрузок, их изготавливают из жаропрочных сталей [4]. В ГНПО «Центр» НАН Беларуси при изготовлении пакета лопаток используется жаропрочная высоколегированная сталь мартенситного класса 15X11МФ, химический состав которой приведен в табл. 1.

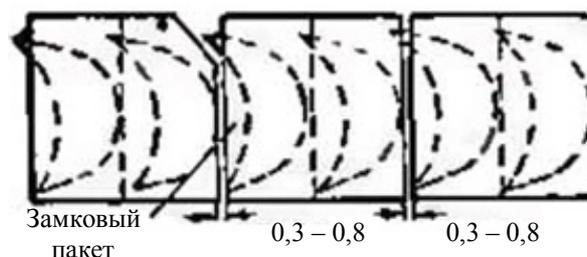


Рис. 1. Вид сверху на бандажи сварных пакетов рабочих лопаток с замковым пакетом

1. Химический состав применяемой стали [8]

Обозначение	Массовая доля элементов, %								
	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Молибден	Ванадий	Железо	Сера	Фосфор
15X11МФ	0,12...0,19	Не более 0,50	Не более 0,70	10,00...11,50	0,60...0,80	0,25...0,40	Осн.	Не более 0,025	Не более 0,030

Технологический процесс электронно-лучевой сварки. Для повышения качества сборки и снижения количества брака при сварке пакета лопаток паровых турбин [9, 10], вместо традиционного электродугового способа сварки в защитной среде, предложено применять электронно-лучевую сварку (ЭЛС) на специальных режимах с предварительным и последующим подогревом зоны сварки расфокусированным электронным лучом (рис. 2).

Повышенная концентрация энергии луча обуславливает высокую скорость сварки и позволяет получать швы не только с минимальной зоной расплавленного металла, но и соединения, в которых металл околошовной зоны не претерпевает значительных изменений

вследствие минимизации количества теплоты. Малая погонная энергия при ЭЛС способствует снижению зоны термического влияния, исключает недостатки, вызванные изменением физико-механических свойств металла в околошовной зоне.

Глубокое проплавление металла при ЭЛС позволяет исключить необходимость выполнения разделки кромок перед сваркой. Кроме того, минимизация количества теплоты дает возможность уменьшить деформации изделий по сравнению с дуговым способом сварки. Высокий вакуум в камере ЭЛС способствует высокой чистоте сварочной ванны и дегазации сварочного шва.

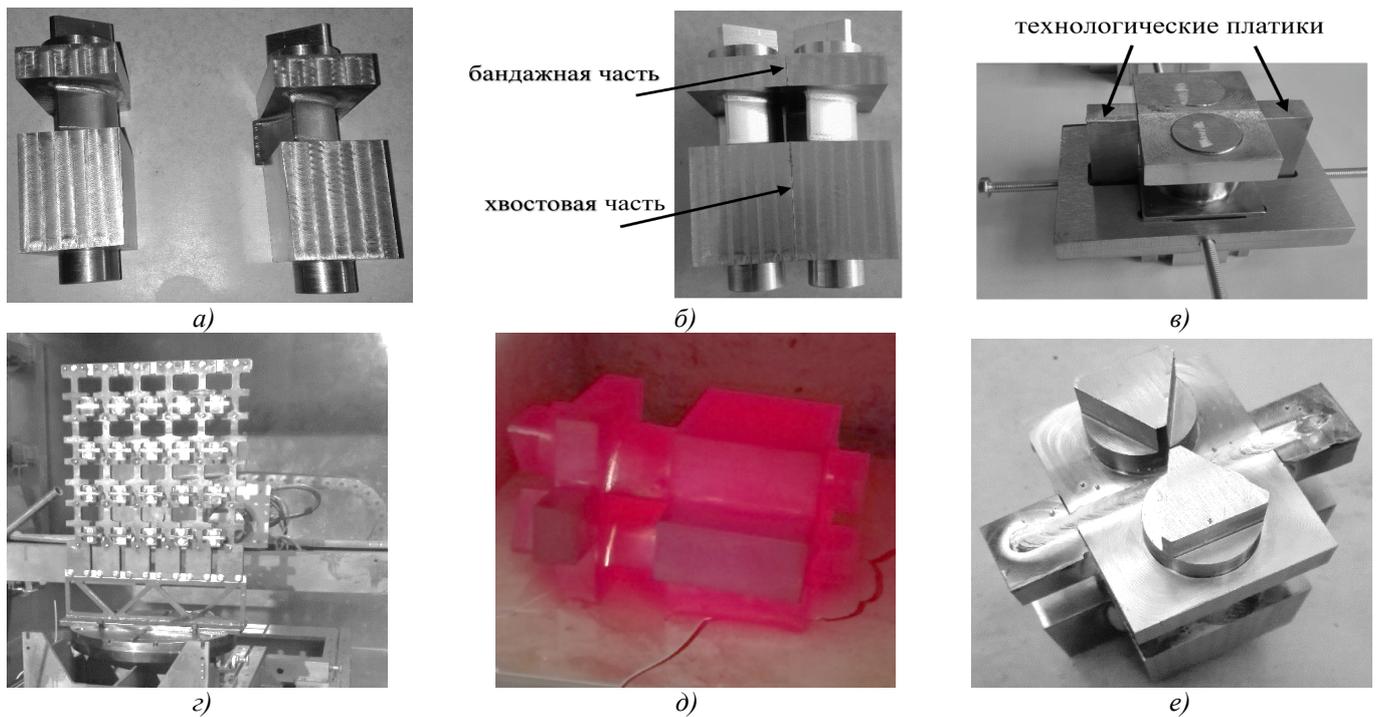


Рис. 2. Технологический процесс и средства оснащения электронно-лучевой сварки пакета лопаток паровых турбин:

а – лопатка; *б* – пакет лопаток; *в* – сборка в кассеты пакетов лопаток турбин с технологическими пластиками; *г* – многоместная технологическая оснастка в камере; *д* – термообработка пакета лопаток для снятия внутренних напряжений после сварки; *е* – пакет лопаток после сварки и термообработки

Технологические возможности электронно-лучевого комплекса КЛ 156, разработанного Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, позволяют обеспечить: высокое качество сварного соединения по всей глубине при уникальных соотношениях «глубина/ширина» (до 20:1) и «цена/качество»; прочностные характеристики сварного шва и околошовной зоны, не уступающие характеристикам основного материала; резкое снижение тепловложения в изделие, исключая значительные термические деформации.

Система автоматизированного управления позволяет формировать финишные и косметические сварные соединения по сложной (трехмерной) траектории, а прецизионная оснастка (одновременно до 5 координат) дает возможность решать сложные задачи по высокоточной сварке, как в единичном, так и в серийном производстве.

Сборка лопаток (рис. 2, *а*) в пакеты производится ЭЛС по стыку участков бандажной и хвостовой частей (рис. 2, *б*) на всю глубину без разделки кромок. Для входа и выхода электронного луча предусмотрены технологические пластики (рис. 2, *в*), которые удаляются при последующей механической обработке. Пакет, состоящий из двух лопаток и технологических пластиков, собирается и базируется в

кассету (рис. 2, *в*), которая устанавливается в многоместной технологической оснастке (рис. 2, *г*).

Разработанная многоместная технологическая оснастка позволяет автоматизировать процесс ЭЛС и производить до 40 пакетов лопаток за одну установку. Учитывая повышенную склонность к хрупкому разрушению жаропрочных сталей мартенситного класса после сварки, пакеты лопаток после ЭЛС незамедлительно подвергаются термической обработке (отпуску) для снятия внутренних напряжений и формирования требуемых механических свойств (рис. 2, *д*). Далее пакет лопаток (рис. 2, *е*) поступает на окончательную механическую обработку, где удаляются пластики и окончательно формируются посадочные и присоединительные места при обеспечении требуемых размеров, форм и допусков (рис. 3).

Контроль и диагностика электронно-лучевой сварки. После ЭЛС и снятия внутренних напряжений выполняется визуальный осмотр лопаток с целью выявления механических повреждений и других нарушений качества поверхности. Далее для диагностики сварного соединения проводится ультразвуковой дефектоскопический контроль на наличие пор, неметаллических включений и микротрещин в шве и околошовной зоне [11]. Затем изготавливаются микрошлифы, которые под-

вергаются травлению перед металлографическим исследованием на микроскопе MeijiTechno MT8500 с помощью программного пакета SIAMS 800 (рис. 4).

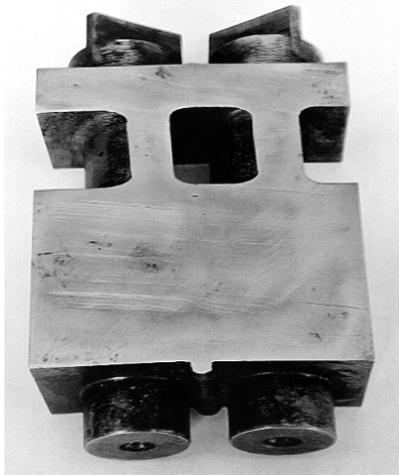


Рис. 3. Пакет лопаток после сварки, термической и механической обработки

Дополнительно проводятся контрольные измерения изменений геометрии деталей и определяются зоны термической деформации. Измерения до сварки и после производятся путем лазерного сканирования пакета лопаток с помощью координатно-измерительной руки NikonMetrology MCAx40+ (рис. 5) с последующим компьютерным анализом полученных результатов в прикладной программе Focus.

Числовые значения отклонений определя-

ются в автоматическом режиме и представляются в виде цветовой карты отклонений (рис. 6).

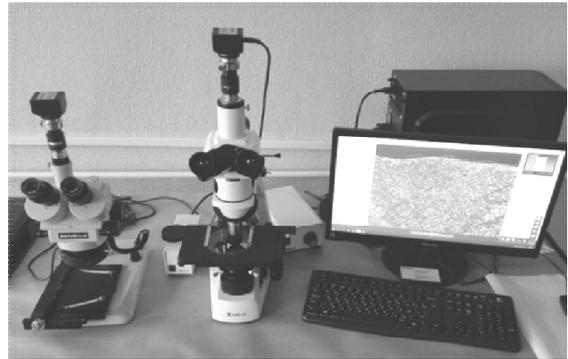


Рис. 4. Микроструктурный анализ шлифов сварочного соединения пакета лопаток на микроскопе MeijiTechno MT8500 с помощью программного пакета SIAMS 800



Рис. 5. Лазерное сканирование пакета лопаток с помощью координатно-измерительной руки NikonMetrology MCAx40+

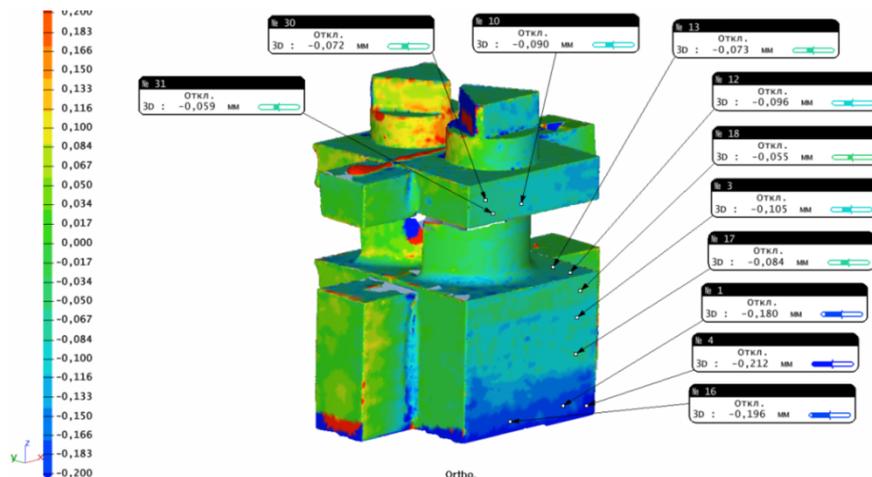


Рис. 6. Цветовая карта измерений зон термической деформации

При сравнении полученных результатов с номинальными САД-данными, формируются абсолютно четкие изображения имеющих геометрических отклонений. Контроль сложных поверхностей соответствует требованиям изучения упругого последствие и усадоч-

ных деформаций материалов после ЭЛС. Благодаря измерениям, зарегистрированным при помощи сканера, программа с высокой точностью определяет геометрические отклонения от САД модели на стадиях до и после ЭЛС.

При обработке на предложенных режимах

существенных дефектов сварочного шва не обнаружено.

В результате проведенных измерений в бандажном шве пакета лопаток деформация не заметна (максимальное отклонение -0,09 мм). Зона максимальных термических деформаций при ЭЛС выявлена в хвостовом шве, в верхней его части, и составляет -0,212 мм. В зоне корня шва термическая деформация незначительна (максимальное отклонение -0,096 мм).

Термические деформации лежат в пределах допуска на данной операции и исключают последующую механическую обработку.

Заключение

Разработан технологический процесс и средства его оснащения для изготовления пакета лопаток паровых турбин из жаропрочной высоколегированной трудно-свариваемой стали мартенситного класса.

Показаны преимущества применения электронно-лучевой сварки при сборке пакета лопаток вместо традиционного электродугового способа сварки в защитной среде. Глубокое проплавление металла позволяет исключить разделку кромок перед электронно-лучевой сваркой, а минимизация количества теплоты дает возможность уменьшить деформации изделий по сравнению с дуговым способом сварки. Высокий вакуум в камере способствует повышенной чистоте сварочной ванны, дегазации сварочного шва, а в результате отсутствия конвективных течений, снижает интенсивность охлаждения.

Рассмотрена диагностика процесса сварки путем лазерного сканирования пакета лопаток с помощью координатно-измерительной руки NikonMetrology MCAx40+ с последующим компьютерным анализом полученных результатов в прикладной программе Focus, которая показала, что термические деформации лежат в пределах допуска на данной операции и исключают последующую механическую обработку.

Применение при изготовлении пакета лопаток электронно-лучевой сварки позволяет повысить качество сборки, снизить количество брака и себестоимость технологического процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Быстрицкий, Г.Ф. Основы энергетики. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 277 с.
2. Трухний, А.Д., Макаров, А.А., Клименко, В.В. Основы современной энергетики. Часть 1. Современная теплоэнергетика – М.: Издательский дом МЭИ, 2002. – 367 с.
3. Дейч, М.Е. Техническая газодинамика. – М.: Энергия, 1974. – 592 с.
4. Резников, М.И., Липов, Ю.М. Паровые котлы тепловых электростанций. – М.: Энергоиздат, 1981. – 240 с.
5. Костюк, А.Г. Паровые и газовые турбины для электростанций: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. /

А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; под ред. А.Г. Костюка. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 556 с.

6. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки: учебное пособие для вузов / А.Д. Трухний, Б.В. Ломакин. 2-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 40 с.

7. Энергетические установки электростанций: учебник для вузов по специальностям "Электрические станции" и "Электрические системы и сети" / С.Я. Белинский, Ю.М. Липов. – М.: Энергия, 1974. – 304 с.

8. ГОСТ 5632-2014 "Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки"

9. Бородавко, В.И. Изготовление пакета лопаток паровых турбин с применением электронно-лучевых технологий / В.И. Бородавко, Н.Л. Грецкий, А.М. Пынькин, М.Л. Хейфец // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XXIV международной научно-технической конференции, в г. Севастополе 11-17 сентября 2017 г. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 43–47.

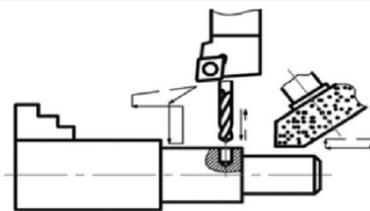
10. Бородавко, В.И., Вабищевич, П.А., Грецкий, Н.Л., Пынькин, А.М., Пуляев, В.К., Волотовский, Ф.А., Корзун, А.Е., Хейфец, М.Л. Применение электронно-лучевой сварки при изготовлении пакета лопаток паровых турбин // Инженер-механик. – 2017. – № 2(75). – С. 27–30.

11. Корзун, А.Е., Волотовский, Ф.А., Бородавко, В.И., Пынькин, А.М., Гайко, В.А., Хейфец, М.Л. Управление производственными процессами в мехатронных технологических комплексах // Инженер-механик. – 2017. – № 1(74). – С. 18–20.

REFERENCES

1. Bystritsky, G.F. *Power Engineering Fundamentals*. – M.: INFRA-M, 2006. – pp. 277.
2. Trukhny, A.D., Makarov, A.A., Klimenko, V.V. *Modern Power Engineering Fundamentals. Part 1. Modern Heat-Power Engineering* – M.: MEI Publishing House, 2002. – pp. 367.
3. Deutsch, M.E. *Engineering Gas Dynamics*. – M.: Energy, 1974. – pp. 592.
4. Reznikov, M.I., Lipov, Yu.M. *Steam-Boilers of Thermoelectric Power Stations*. – M.: Energoizdat, 1981. – pp. 240.
5. Kostyuk, A.G., *Steam and Gas Turbines for Power Stations: college textbook, 3-d edition revised and supplemented / A.G. Kostyuk, V.V. Frolov, A.E. Bulkin, A.D. Trukhny; under the editorship of A.G. Kostyuk*. – M.: MEI Publishing House, 2008. – pp. 556.
6. *Dual Purpose Turbine Plants and Turbines: college manual / A.D. Trukhny, B.V. Lomakin*. 2-d stereotyped edition. – M.: MEI Publishing House, 2006. – pp. 40.
7. *Power Plants for Power Stations: college textbook for specialties "Power Stations" and "Electric Systems and Electric Means" / S.Ya. Belinsky, Yu.M. Lipov*. – M.: Energy, 1974. – pp. 304.
8. RSS 5632-2014 "Alloy Stainless Steel and Corrosion-Proof Heat Resistant Refractory Alloys. Grades"
9. Borodavko, V.I. Manufacturing blade packet for steam turbines using electron beam techniques / V.I. Borodavko, N.L. Gretskey, A.M. Pynkin, M.L. Heifets // *Mechanical Engineering and Techno-Sphere of the XXI-st Century: Proceedings of the XXIV Inter. Scientif.-Tech. Conf.*, Sevastopol, September 11-17, 2017. – Donetsk: DonNTU, 2017. – pp. 43-47.
10. Borodavko, V.I., Vybishchevich, P.A., Gretskey, N.L., Pynkin, A.M. Pulyaev, V.K. Volotovskiy, F.A., Korzun, A.E., Heifets, M.L. Electron beam welding use at blade packet manufacturing for steam turbines // *Engineer-Mechanic*. – 2017. – No.2 (75). – pp. 27-30.
11. Korzun, A.E., Volotovskiy, F.A., Borodavko, V.I., Pynkin, A.M., Gaiko, V.A., Heifets, M.L. Industrial process control in mechatronic technological complexes // *Engineer-Mechanic*. – 2017. – No.1 (74). – pp. 18-20.

Рецензент д.т.н. С.В. Кузьмин



УДК 621.8

DOI: 10.12737/article_5a8ef9cc2f18f8.10224814

В.Ф. Безъязычный, д.т.н.
(ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный
технический университет имени П. А. Соловьева», 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53)
E-mail: technology@rsatu.ru

Расчетное прогнозирование влияния технологических условий обработки на эксплуатационные свойства деталей машин

Предложены зависимости для назначения технологических условий обработки, обеспечивающих заданные параметры качества поверхностного слоя при механической обработке, и расчётного определения показателей эксплуатационных свойств изделий на основе известных параметров качества поверхностного слоя.

Ключевые слова: режим резания; поверхностный слой; эксплуатационные свойства деталей.

V.F. Beziyazychny, D. Eng.
(FSBEI HE "Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk",
53, Pushkin Str., Rybinsk, 152934)

Design prediction of processing conditions impact upon machine performance properties

The paper reports theoretical dependences defining a correlation of technological processing conditions (cutting modes, tool tip geometry, properties of worked and tool materials), quality parameters of a surface layer (surface roughness, degree and depth of cold work, residual stresses) and performance properties of machinery (fatigue resistance, wear-resistance, contact rigidity, press-fit connection strength) which can be used in a team-work of a designer and a technologist at simultaneous technological pre-production.

Keywords: cutting mode; surface layer; performance properties of parts.

Введение

При изготовлении деталей машин, как правило, преобладают операции механической обработки, в частности, обработки лезвийным инструментом. Они составляют свыше 50 % общей трудоемкости изготовления особо ответственных изделий. Окончательная механическая размерная обработка деталей является перспективной для дальнейшего развития технологии машиностроения.

Для многих деталей современных машин и других изделий нередко требуется обеспечение именно заданной величины и глубины залегания остаточных напряжений, глубины наклепа, требуемой шероховатости поверхности,

так как бесспорным фактом является то, что в ряде случаев чрезмерное уменьшение шероховатости или увеличение степени и глубины наклепа поверхности может оказаться вредным и снижать срок работы изделия. Тем не менее, до настоящего времени недостаточно представлены обобщенные теоретические зависимости между параметрами поверхностного слоя, точности обработки, эксплуатационными свойствами деталей машин и параметрами процесса механической обработки.

Актуальность решения задачи по определению технологических условий обработки обусловлена также необходимостью достижения стабильности или изменяемости по желаемым законам характеристик поверхностного слоя,

когда отдельные поверхности ответственных деталей работают в различных температурно-силовых условиях (например, диски и лопатки ГТД и др.)

В этом случае требуется определить взаимосвязь технологических условий обработки с параметрами качества поверхностного слоя, точности обработки, свойствами обрабатываемого и инструментального материалов, жёсткостью технологической системы СПИЗ, размерами детали, что в функциональном виде может быть представлено следующим образом:

$$(t, S, v, r, \varphi) = f \left(\begin{matrix} \sigma_{ост}, h_n, Rz, \Delta\varepsilon, T_p, \sigma_B, \sigma_T, E_D, \tau_p, \\ \mu, \beta_D, \beta_p, \lambda_{ст}, a, \lambda_d, \lambda_p, (c\rho)_и, \\ \theta_{пл}, \gamma, \alpha, \varphi_1, \rho_1, j_{сист}, B_1, H_1, L, H \end{matrix} \right), \quad (1)$$

где σ_B, E_D – предел прочности и модуль упругости обрабатываемого материала, МПа; β_D, β_p – коэффициент температурного линейного расширения обрабатываемого и инструментального материалов, $1/^\circ\text{C}$; τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, МПа; μ – коэффициент Пуассона обрабатываемого материала; $\lambda_D, \lambda_d, \lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности инструментального, обрабатываемого материала и материала стержня режущего инструмента, соответственно, Дж/(м·сек $^\circ\text{C}$); α и γ – задний и передний углы режущего инструмента, (радиан); φ и φ_1 – главный и вспомогательный углы режущего инструмента в плане, (радиан); r и ρ_1 – радиус при вершине режущего инструмента

в плане и радиус округления режущей кромки, мм; $j_{сист}$ – жёсткость технологической системы СПИЗ, Н/м; L и H – длина и высота детали, мм; B_1 и H_1 – высота и ширина сечения державки режущего инструмента, мм; v – скорость резания, м/с; σ_T – предел текучести обрабатываемого материала на разрыв, МПа; h_n – глубина наклёпа материала поверхностного слоя детали, мкм; Rz – высота неровностей профиля обрабатываемой поверхности, мкм; t и S – глубина резания и подача, мм; $\Delta\Sigma$ – суммарная погрешность обработки, мкм; $\sigma_{ост}$ – величина остаточных напряжений на заданном уровне от поверхности, МПа; a – температуропроводность обрабатываемого материала, $\text{м}^2/\text{с}$; $(c\rho)_д$ и $(c\rho)_и$ – удельная объёмная теплоёмкость обрабатываемого и инструментального материалов; Дж/($\text{м}^3 \cdot \text{K}$); T_p – стойкость режущего инструмента, мин.

Содержание исследования

Для реализации функциональной зависимости (1) необходимо иметь расчётные уравнения для определения параметров качества поверхностного слоя (остаточных напряжений в поверхностном слое, степени и глубины наклёпа и параметров шероховатости поверхности, погрешности обработки). Такие зависимости приведены в работах [1, 2]. Так, например, при $r \left[1 - \sqrt{1 - (S/2r)^2} \right] \leq t \leq r(1 - \cos\varphi)$ высота неровностей на обработанной поверхности определяется по следующей зависимости:

$$Rz = \frac{1}{8r} \left\{ \frac{1}{\tau_p \left[1 + \frac{1}{B} + \text{tg}(\text{arctg}B - \gamma) \right]} \left[\frac{a_1^{0,125} b_1^{0,7} c\rho\theta\rho_1^{0,1} a^{0,43}}{v\lambda \sin^{0,165} \alpha} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[2,85 \sin^{0,115} \alpha v^{0,57} a_1^{0,345} \lambda b^{0,3} + 0,6625 \lambda_p \beta \varepsilon a_1^{0,57} \rho_1^{0,075} \right] - \right. \right. \\ \left. \left. - 0,5 \tau_p \rho_1 b \left(\frac{\arccos \left(1 - a_2 B^{-b_2(1-\sin\gamma)^{-x}} \right) +}{\sin \alpha (\cos \gamma + B \sin \gamma)} + \frac{\delta}{\rho_1} \right) \times \cos \alpha \right] \right\}, \text{ мм}$$

где $B = 1/\text{tg}\beta$ – безразмерный комплекс процесса резания, характеризующий степень пластических деформаций материала снимаемого припуска и материала поверхностного слоя обрабатываемой детали; β_1 – угол наклона условной плоскости сдвига, градус; a_1 и b_1 – толщина и ширина среза, м; $c\rho$ – удельная объёмная теплоёмкость обрабатываемого материала, Дж/($\text{м}^3 \cdot \text{K}$); θ – температура в зоне резания, $^\circ\text{C}$; δ – высота площади износа режущей части инструмента по задней поверхности, м; x, a_2, b_2 – величины, зависящие от сочетания свойств обрабатываемого и инструментального материалов [2].

Глубина наклёпа обработанной поверхности при точении жаропрочных сталей и сплавов рассчитывается по формуле

$$h_H = \frac{2,36 \cdot 10^{-8} \tau_p^{0,75} S^{0,6} \rho_1^{0,17} \varphi^{0,35}}{\nu^{0,28} r^{3,5} S^{1,7} \alpha^{0,09} \gamma^{0,33}}, \text{ м,}$$

где τ_p , Па; S , м/об; t , м; ρ_1 , м; α , γ , φ – градус; r , м.

Формула справедлива для следующих условий обработки: $t = 0,5 \dots 2$ мм; $S = 0,05 \dots 0,4$ мм/об; $\nu = 0,1 \dots 0,8$ м/с; $r = 0,5 \dots 2$ мм; $\rho_1 = 20 \dots 100$ мкм; $\varphi = 15 \dots 90^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 5 \dots 20^\circ$; $\gamma = 5 \dots 20^\circ$, при наличии фаски износа резца $\delta = 0,1 \dots 1,0$ мм.

С использованием таких зависимостей может решаться задача по определению технологических условий обработки, обеспечиваю-

щих заданные значения остаточных напряжений, глубины наклёпа, шероховатости поверхности и точности обработки, а также могут быть рассчитаны различные показатели, характеризующие качество поверхностного слоя обработанной детали, такие как шероховатость поверхности, глубина и степень наклёпа материала поверхностного слоя, распределение остаточных напряжений, показатели, характеризующие погрешность обработки, возникающей при резании и вызванной влиянием силовых и температурных деформаций системы СПИЗ, размерным износом режущего инструмента.

Для реализации изложенного выше разработана система расчета параметров процесса резания, алгоритм функционирования которой представлен на блок-схеме (рис. 1) [3].

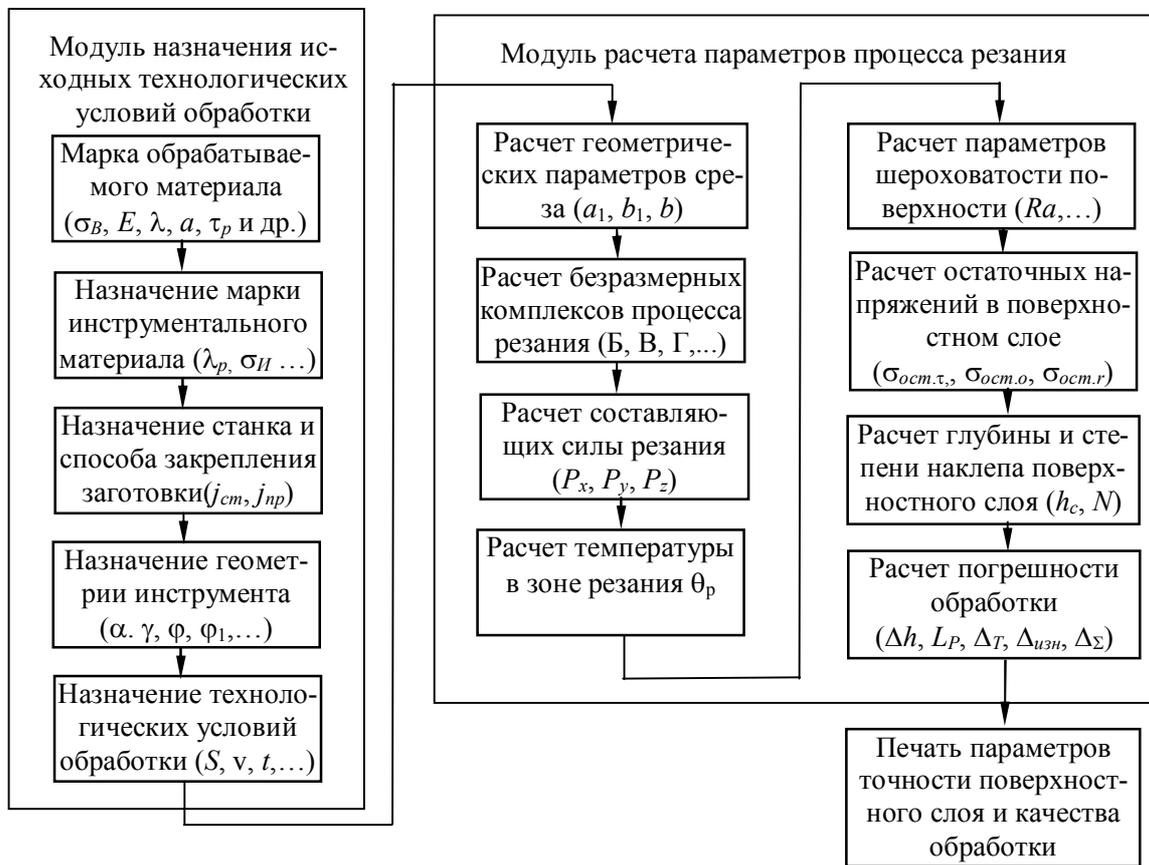


Рис. 1. Система расчета параметров качества поверхностного слоя и точности обработки деталей

Разработана также многоуровневая система расчета режимов резания, обеспечивающих заданные показатели точности обработки и качества поверхностного слоя деталей, для возможных сочетаний задаваемых параметров точности обработки и качества поверхностного слоя при различных сочетаниях искомых технологических условий обработки и огра-

ничениях, накладываемых на процесс оптимизационного поиска решения. Анализ результатов расчета показал, что использование многоуровневого алгоритма в системе обеспечивает значительно лучшее приближение получаемых показателей точности обработки и качества поверхностного слоя к их заданным величинам.

В табл. 1 представлены результаты расчета технологических условий обработки (режимов резания и геометрии инструмента), обеспечивающих заданные показатели точности обработки и качества поверхностного слоя (суммарную погрешность Δ_{Σ} , шероховатость Ra , глубину наклепа h_c и величину остаточных

напряжений $\sigma_{ост}$ на глубине 25 мкм в различных сочетаниях, полученные с использованием многоуровневой системы оптимизации (геометрические параметры инструмента на 1-м уровне оптимизации: $r = 1,0$ мм; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\rho = 30$ мкм).

1. Пример расчета технологических условий токарной обработки, обеспечивающих заданный комплекс параметров точности обработки и качества поверхностного слоя деталей, полученных с использованием многоуровневой системы расчета режимов резания

Обрабатываемый и инструментальный материалы	Заданные параметры точности обработки и качества поверхностного слоя				Число уровней оптимизации U	Рассчитанные технологические условия обработки						Полученные параметры точности обработки и качества поверхностного слоя			
	Δ_{Σ} , мкм	Ra , мкм	h_c , мкм	$\sigma_{ост}$, МПа		S , мм/об	v , м/с	t , мм	r , мм	φ , град	φ_1 , град	Δ_{Σ} , мкм	Ra , мкм	h_c , мкм	$\sigma_{ост}$, МПа
13X12HВМ – Т15К6	0 – 30	1,25	70	-180	2	0,25	1,80	0,50	2,67	45	15	-11,8	1,26	70	-167
	0 – 30	0,63	120	-200	3	0,16	1,40	0,84	2,33	40,8	15	-11,3	0,62	100	-183
	0 – 74	1,6	100	-140	2	0,36	1,28	1,06	4,12	45	15	-38,2	1,23	120	-211
	0 – 19	0,63	40	-80	3	0,10	2,27	0,89	0,86	44,5	15	-6,7	0,61	39	-67
ХН73МБТ Ю– ВК6М	0 – 19	1,0	100	-150	3	0,20	0,89	0,47	1,85	30	15	-10,0	0,84	97	-183
	0 – 30	1,25	120	-400	4	0,20	0,79	0,47	1,25	44,7	17,1	-15,6	1,32	113	-391
	0 – 19	0,63	70	-180	2	0,09	1,12	0,90	0,60	45	15	-8,5	0,63	70	-179
	0 – 30	1,0	100	-240	3	0,16	0,80	0,92	1,02	40,1	15	-11,3	0,98	100	-240
ВТ3-1 – ВК8	0 – 30	0,63	60	-100	4	0,11	0,55	0,50	0,72	43,2	16,7	-7,3	0,62	57	-107
	0 – 74	1,6	80	-140	3	0,14	0,31	0,67	0,50	40,4	15	-20,9	1,60	80	-144
	0 – 19	1,6	75	-150	2	0,13	0,39	1,09	0,39	45	15	-13,6	1,59	75	-152
	0 – 46	2,0	80	-120	3	0,16	0,38	1,07	0,47	36,6	15	-17,6	1,98	80	-129

Параметры качества поверхностного слоя представляют практический интерес с точки зрения обеспечения эксплуатационных свойств изделий, таких как усталостная прочность, износостойкость, контактная жесткость, прочность прессовых соединений и др.

В качестве характеристик сопротивления усталости материала детали использованы критерий поврежденности материала, который определяется по изменению модуля упругости $E_{обн}/E_{исх}$, где $E_{обн}$ и $E_{исх}$ – модули упругости материала поверхностного слоя детали после обработки и в исходном состоянии.

В результате исследований д.т.н. В.Ф. Безъязычного совместно с кандидатами технических наук Б.М. Драпкиным, М.В. Тимофеевым, Н.В. Осадчим, Р.В. Любимовым, А.Л. Водолагиным получена зависимость [4]:

$$\sigma_{-1} = \frac{C\sigma_{-исх}}{E_{исх} \left(\frac{2,85E^{0,1}}{B^{0,43} \sin^{0,05} \alpha} + 0,6625 \frac{\Gamma D^{0,3} E^{0,175}}{B \sin^{0,165} \alpha} \right)^K}, \quad (2)$$

где B, V, Γ, D, E – безразмерные комплексы процесса резания; C и K – величины, зависящие от свойств обрабатываемого материала; σ_{-1} и $\sigma_{исх}$ – предел выносливости материала детали после обработки и в исходном состоянии (до обработки).

Указанные комплексы определяются по приведенным ниже формулам [5].

$B = v/a_1/a$ – безразмерный комплекс, процесса резания, характеризующий степень влияния режимных условий процесса резания по сравнению с влиянием теплофизических свойств обрабатываемого материалов, где v – скорость резания, м/с; a_1 – толщина среза, м; a – теплопроводность обрабатываемого ма-

териала, м²/с; $\Gamma = \frac{\lambda_p}{\lambda_g} \beta \epsilon$ – безразмерный ком-

плекс процесса резания, отражающий влияние геометрии инструмента и отношения теплопроводностей инструментального и обрабатываемого материалов; λ и λ_p – коэффициенты теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов, Дж/м·°С; β и

ε – угол заострения и угол при вершине резца в плане, радиан; $D = a_1/b_1$ — безразмерный комплекс, характеризующий геометрию сечения среза, м; b_1 – ширина среза; $E = \rho/a_1$ – безразмерный комплекс, характеризующий влияние на процесс резания геометрической формы режущей кромки резца; ρ_1 – радиус округления режущей кромки резца, м.

Зависимость предела выносливости материала детали от комплекса параметров качества поверхностного слоя определяется по следующим формулам [2]:

– при точении

$$\sigma_{-1} = m \cdot (\sigma_B / \sigma_{BЭ})^K \cdot Rz^{-0,05} \cdot h_c^{0,147} \cdot \sigma_{ост}^{-0,09},$$

– при фрезеровании

$$\sigma_{-1} = n \cdot (\sigma_B / \sigma_{BЭ})^L \cdot Rz^{-0,067} \cdot h_c^{0,139} \cdot \sigma_{ост}^{-0,063},$$

где m, n, K, L – величины, зависящие от вида обработки. При точении $m = 420$ и $K = 0,73$; при фрезеровании $n = 224$ и $L = 0,83$;

$\sigma_B/\sigma_{BЭ}$ – отношение предела прочности обрабатываемого материала к пределу прочности электротехнической стали.

– при шлифовании плоских поверхностей периферией круга:

• жаропрочных никелевых сплавов

$$\sigma_{-1} = 1151 \cdot Ra^{-0,2153} \cdot \sigma_{ост\ max}^{-0,095} \cdot h_H^{0,164}$$

• титановых сплавов

$$\sigma_{-1} = 1465 \cdot Ra^{-0,4042} \cdot \sigma_{ост\ max}^{-0,095} \cdot h_H^{0,164}$$

• конструкционных сталей

$$\sigma_{-1} = 653 \cdot Ra^{-0,0881} \cdot \sigma_{ост\ max}^{-0,095} \cdot h_H^{0,164}$$

При обработке точением с оптимальной скоростью резания θ , соответствующей минимуму износа режущего инструмента и минимальной высоте шероховатости на обработанной поверхности, интенсивность изнашивания обрабатываемой поверхности J_h определяется по следующей зависимости [2]:

$$J_h = 0,0316 \cdot 3,7^{v+1} \alpha_2^{0,5} b \times \left\{ \frac{1}{8r} \times \left[\frac{0,6625 a_1^{0,125} c_p \theta_0 \times \left(4,3 \sin^{0,115} \alpha v^{0,57} a_1^{0,345} \lambda \left(\frac{t}{m} \right)^{0,3} + \lambda_p \beta \varepsilon a^{0,57} \rho_1^{0,075} \right)}{\tau_p a^{-0,43} \sin^{0,05} \alpha v_0 t^{0,25} c_0 m^{0,74-n_0} \times b^{0,04} \rho_1^{n_0-0,1} (1 - 0,45 \sin \gamma)} \right]^{0,719-0,2(v+1)+5,2t_y} \right\} \times \left(\frac{34,64 \sigma_0}{k f_m} \right)^{t_y} \left(\frac{N}{A_c} \right)^{-0,323(v+1)+0,161-0,16t_y} \left(\frac{1-\mu^2}{E} \right)^{0,161+0,84t_y-0,323(v+1)}$$

где a_1 – толщина среза, м; b_p – длина контакта режущих кромок инструмента с обрабатываемым материалом, м; β и ε – угол заострения и угол при вершине резца в плане, радиан; v_0 – оптимальная скорость резания, м/с; C_0 – величина, зависящая от предела прочности обрабатываемого материала; m – величина, зависящая от соотношения подачи, глубины резания и радиуса при вершине резца в плане; v и b – параметры кривой аппроксимации опорной поверхности; α – величина, зависящая от вида контакта поверхностей; σ_0 – действующее напряжение, Па; k – коэффициент, характеризующий напряженное состояние на контакте; f_m – молекулярная составляющая коэффициента трения; N – сила, сжимающая контактируемые тела, Н; A_c – номинальная площадь соприкасающихся тел, мм²; t_y – параметр кривой функциональной усталости.

Таким образом, интенсивность изнашивания поверхности является функцией условий ее обработки, а также свойств материала детали.

Одним из видов соединений деталей в узлах являются соединения с натягом, которые могут выдержать в процессе эксплуатации изделия значительные нагрузки. Такие соединения имеют широкое применение в различных узлах и механизмах. Обеспечение требуемых прочностных характеристик соединений с на-

тягом зависит не только от выбора посадки в соединении, физико-механических свойств материалов деталей, их геометрических размеров, вида сборки, но и от качества поверхностного слоя сопрягаемых поверхностей деталей, в частности от шероховатости поверхности, степени и глубины наклепа поверхностного слоя. Последние зависят от технологических условий их обработки: режима резания, геометрии режущего инструмента и др.

Основными критериями, характеризующими прочность посадки, являются осевая сила P_0 и момент $M_{кр}$, выдерживаемые соедине-

ниями, которые определяются по формулам [6]:
– при изготовлении соединяемых деталей из различных материалов

$$P_0 = \pi \cdot l \cdot f_{ос} \cdot \frac{\delta_n - 1,2(Rz_1 + Rz_2)}{\frac{C_1 W_1}{2(1 + \mu_1) \cdot \left(\frac{N_1 \sigma'_{0,2}}{\alpha_1}\right)^2} + \frac{C_2 W_2}{2(1 + \mu_2) \cdot \left(\frac{N_2 \sigma''_{0,2}}{\alpha_2}\right)^2}},$$

$$M_{кр} = \pi \cdot d \cdot l \cdot f_{кр} \cdot \frac{\delta_n - 1,2(Rz_1 + Rz_2)}{\frac{C_1 W_1}{(1 + \mu_1) \cdot \left(\frac{N_1 \sigma'_{0,2}}{\alpha_1}\right)^2} + \frac{C_2 W_2}{(1 + \mu_2) \cdot \left(\frac{N_2 \sigma''_{0,2}}{\alpha_2}\right)^2}};$$

– при изготовлении соединяемых деталей из одного материала

$$P_0 = \pi \cdot l \cdot f_{ос} \cdot \frac{2(1 + \mu) \cdot \sigma_{0,2}^2 \cdot \delta_n - 1,2(Rz_1 + Rz_2)}{\alpha^2 \cdot \frac{C_1 W_1}{N_1^2} + \frac{C_2 W_2}{N_2^2}},$$

$$M_{кр} = \pi \cdot d \cdot l \cdot f_{кр} \cdot \frac{(1 + \mu) \cdot \sigma_{0,2}^2 \cdot \delta_n - 1,2(Rz_1 + Rz_2)}{\alpha^2 \cdot \frac{C_1 W_1}{N_1^2} + \frac{C_2 W_2}{N_2^2}},$$

где d – номинальный диаметр соединения; l – длина контакта сопрягаемых поверхностей; $f_{ос}$ и $f_{кр}$ – коэффициенты трения при осевом сдвиге и при кручении; C_1 и C_2 – безразмерные коэффициенты, зависящие от свойств материалов сопрягаемых деталей.

Значения C_1 и C_2 определяют по формулам [7]:

$$C_1 = \frac{d^2 + d_0^2}{d^2 - d_0^2} - \mu_1; \quad C_2 = \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2,$$

где d_0 – диаметр отверстия пустотелого вала, мм (при сплошном вале $d_0 = 0$ и $C_1 = 1 - \mu$); μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона материалов сопрягаемых деталей; D – диаметр наружной поверхности втулки, мм; E_1 и E_2 – модули упругости материалов охватываемой и охватывающей поверхностей, соответственно, МПа; δ_n – номинальный натяг, выбираемый из таблицы для конкретного соединения или задаваемый на чертеже изделия (определяется из условий заданной посадки сопряжения); Rz_1 и Rz_2 – высота неровностей сопрягаемых поверхностей; N – степень наклепа обработанной поверхности, определяемая по формуле

$$N = \frac{\alpha \sqrt{WG}}{\sigma_{0,2}},$$

где α – параметр междислокационного взаимодействия в материале детали; значение α следует определять по табл. 2; W – удельная накопленная энергия деформации, Дж/мм³; G – модуль сдвига материала детали, МПа; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести материала детали, МПа. Значение модуля сдвига материала, определяют по известной зависимости

$$G = \frac{E}{2(1 - \mu)}, \text{ где } E \text{ – модуль упругости мате-}$$

риала детали, МПа; W_1 и W_2, N_1 и N_2, α_1 и $\alpha_2, \sigma'_{0,2}$ и $\sigma''_{0,2}$ – значения накопленной энергии, степени наклепа, параметра междислокационного воздействия и условного предела текучести материалов первой и второй сопрягаемых деталей.

Формула для расчета скрытой энергии деформации W , Дж/м³, при токарной обработке в поверхностном слое материалов, в зависимости от параметров процесса резания, имеет следующий вид [1]:

$$W = 2 \cdot 10^{-7} \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot \delta} \right)^{2,1698} \cdot t^{0,2396} \cdot v^{-0,5612} \cdot S^{9,6588} \cdot \varphi^{0,7009} \cdot \alpha^{-0,1857} \cdot \gamma^{-0,6240} \cdot \rho_1^{0,2879} \cdot r^{-0,3},$$

где δ – относительное удлинение материала обрабатываемой детали; σ_B – предел прочности материала обрабатываемой детали, Па; t – глубина резания, мм; v – скорость резания, м/мин; S – подача, мм/об; φ – главный угол резца в плане, градус; α – задний угол резца, градус; γ – передний угол резца, градус; r – радиус при вершине резца в плане, мм.

2. Физико-механические свойства металлов и сплавов и рассчитанный для них коэффициент α

Материал	Предел прочности материала σ_B , МПа	Предел текучести материала σ_T , МПа	Рассчитанный коэффициент α
Углеродистые стали			
08	330	200	0,20
10,10кп	340	210	0,20
15	380	225	0,22
20,20кп	410	250	0,22
25	530	275	0,26
30	540	320	0,26
35	520	310	0,26
40	570	320	0,26
45	300	340	0,28
50	630	350	0,28
55	640	360	0,28
Легированные стали и сплавы			
30Г	550	290	0,28
50Г	650	370	0,28
60Г	700	380	0,30
35Г2	630	370	0,28
30Х	900	700	0,21
50Х	1100	900	0,20
20ХГ	800	600	0,23
15Х	750	560	0,23
40Х	1000	800	0,22
50ХФА	1250	1080	0,20
X18H9T	600	280	0,30
H23H18	920	630	0,28
12X18H9T	620	320	0,30
Жаропрочные сплавы			
XH77TIOP	1020	660	0,34
XH70BMТЮ	1140	750	0,34
XH73MBТЮ	1200	800	0,34
XH50BMKTЮP	1220	785	0,35
XH70MBФ	800	370	0,39
XH62BMKЮ	950	500	0,39

При обработке шлифованием зависимости для расчета удельной скрытой энергии деформации W , Дж/м³, представлены следующими выражениями:

сталь 15:
$$W = 0,0313 \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot \delta} \right)^{-1,9156} \cdot t^{1,7196} \cdot v_{кр}^{-0,7705} \cdot S_{np}^{-0,3938},$$

сталь 45:
$$W = 0,0313 \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot \delta} \right)^{-1,9156} \cdot t^{2,883} \cdot v_{кр}^{-0,5097} \cdot S_{np}^{-0,6395},$$

XH77TIOP:
$$W = 0,0313 \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot \delta} \right)^{-1,9156} \cdot t^{2,1489} \cdot v_{кр}^{-0,6458} \cdot S_{np}^{-0,5269},$$

BT3-1:
$$W = 0,0313 \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot \delta} \right)^{-1,9156} \cdot t^{3,842} \cdot v_{кр}^{-0,3397} \cdot S_{np}^{-2,2872},$$

где S_{np} – продольная подача стола, м/с; $v_{кр}$ – скорость вращения круга, м/с; t – глубина резания, м.

Распределение накопленной энергии деформации по глубине поверхностного слоя можно установить по выражению, полученному М.А. Прокофьевым [4]:

$$W_h = W \cdot \exp(-kh),$$

где W_h – скрытая энергия деформации на глубине поверхностного слоя h , Дж/м³;

W – удельная накопленная энергия деформации на поверхности, Дж/м³; k – коэффициент, характеризующий эффективность изменения скрытой энергии деформации по глубине поверхностного слоя.

При выполнении расчетов по определению накопленной энергии деформации в поверхностном слое следует учитывать следующее. Исследованиями установлено, что модуль упругости материала детали вследствие воздействия на него в процессе обработки теплового и силового факторов изменяется [2]. При механической обработке модуль упругости материала поверхностного слоя детали $E_{обр}$ определяется следующей зависимостью:

$$E_{обр} = C \cdot A^K,$$

где C и K – величины, зависящие от материала обрабатываемой детали и определяемые по табл. 3.

3. Коэффициенты для расчёта модуля упругости в зависимости от группы материала

Группа обрабатываемых материалов	Вид обработки и значения коэффициентов			
	точение		фрезерование	
	$C \cdot 10^{-3}$	K	$C \cdot 10^{-3}$	K
Никелевые жаропрочные сплавы	165	-0,08	182	-0,08
Конструкционные стали	166	-0,10	197	-0,07
Титановые сплавы	88	-0,11	100	-0,15

Заключение

Предложенные в данном исследовании расчетные зависимости позволяют на стадии конструкторско-технологической подготовки производства определять выбор методов обработки и технологические условия их выполнения с целью прогнозирования эксплуатационных свойств деталей машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Инженерия** поверхности деталей / Колл. авт. под ред. А. Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. **Безъязычный, В.Ф.** Метод подобия в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2012. – 320 с.
3. **Безъязычный, В.Ф., Киселев, Э. В.** Автоматизация расчета технологических условий обработки, обеспечивающих комплекс заданных параметров точности и качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей // Справочник. Инженерный журнал. (Приложение). 2008. № 8. – С. 13–23.

4. **Драпкин, Б.М., Кононенко, В.К., Безъязычный, В.Ф.** Свойства сплавов в экстремальном состоянии. – М.: Машиностроение, 2004. – 256 с.

5. **Силин, С.С.** Метод подобия при резании материалов. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.

6. **Безъязычный, В.Ф., Федулов, В.М., Чугуевская, С.В.** К вопросу расчетного определения прочностных характеристик сборочных соединений с натягом с учетом шероховатости поверхности собираемых деталей и степени их наклепа // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. № 4. – С. 21 – 26.

7. **Сборка** и монтаж изделий машиностроения: справочник. В 2-х т. / Ред. совет: В.С. Корсаков (предс.) и др. / под ред. В.С. Корсакова, В. К. Замятина, – М.: Машиностроение, 1983. 480 с.

8. **Новиков, М.П.** Основы технологии сборки машин и механизмов. – 5-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.

9. **Прокофьев, М.А.** Технологическое обеспечение параметров наклепа поверхностного слоя деталей при шлифовании на основе определения скрытой энергии деформации. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, – 2006.

REFERENCES

1. *Parts Surface Engineering* / author group under the editorship of A.G. Syslov. – М.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320.

2. **Beziyazychny, V.F.** *Similarity Method in Mechanical Engineering*. – М.: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 320.

3. **Beziyazychny, V.F., Kiselyov, E.V.** Calculation automation of processing technological conditions ensuring complex of specified parameters of surface layer accuracy and quality and performance properties of parts // *Reference Book. Engineering Journal. (Appendix)*. 2008. No.8. – pp. 13-23.

4. **Drapkin, B.M., Kononenko, V.K., Beziyazychny, V.F.** *Alloy Properties at Extreme State*. – Mechanical Engineering, 2004. – pp. 256.

5. **Silin, S.S.** *Similarity Method at Material Cutting*. – М.: Mechanical Engineering, 1979. – pp. 152.

6. **Beziyazychny, V.F., Fedulov, V.M., Chuguevskaya, S.V.** To design definition problem of strength characteristics of assembly units with tightness taking into account surface roughness of parts assembled and degree of their cold work // *Assembly in Mechanical Engineering, Instrument Engineering*. – 2015. No.4. – pp. 21-26.

7. *Assembly and Mounting of Engineering Products*: reference book. In 2 Vol. / Editorial Board: V.S. Korsakov (Chairman) et al. / under the editorship of V.S. Korsakov, V.K. Zamyatin, - М.: Mechanical Engineering. 1983. pp. 480.

8. **Novikov, M.P.** *Fundamentals of Assembly Technology of Machines and Mechanisms*. - 5th edition revised. – М.: Mechanical Engineering, 1980. – pp. 592.

9. **Prokofiev, M.A.** *Technological Support of Cold Work Parameters of Surface Layer in Parts at Grinding on Basis of Latent Deformation Energy Definition*. Self-Abstract of the Thesis for the Can. Eng. degree. Rybinsk, - 2006.

Рецензент д.т.н. Ю.С. Степанов

УДК 621.002:658.62.018.012
DOI: 10.12737/article_5a8ef9cce19d80.89624845

А.Г. Суслов, д.т.н.
(ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)
E-mail: mootechmash@mail.ru

Управление качеством изделий машиностроения на всех этапах их жизненного цикла

Рассмотрены методы обеспечения и повышения качества изделий машиностроения на всех этапах их жизненного цикла: маркетинга; проектирования; технологической подготовки производства; изготовления материалов, заготовок, деталей и их сборки; эксплуатации; ремонта; утилизации. Показано, что основное влияние на качество выпускаемых изделий оказывает конструкторско-технологическая подготовка производства. Поэтому при разработке систем управления основное внимание должно уделяться техническому обеспечению и повышению качества выпускаемых изделий, а не организационно-управленческим аспектам.

Ключевые слова: управление качеством; этапы жизненного цикла; маркетинг; проектирование; технологическая подготовка; изготовление; эксплуатация; ремонт; утилизация.

A.G. Suslov, D. Eng.
(FSBEI HE "Bryansk State Technical University" 7, 50 Years of October Boulevard, Bryansk, 241035)

Engineering product quality control at all stages of product life

In the paper it is shown that at quality control of engineering products particular attention should be paid to engineering and technological measures which exert basic influence upon assurance and quality increase. Technical and technological measures are shown at all stages of product life: marketing; design; technological pre-production; manufacturing materials, blanks, parts and their assembly; operation; repair and utilization. It is emphasized that still at the preliminary stages it is necessary that a factor of competitive ability of a product designed should be defined. It is shown convincingly that engineering product quality is formed at the stage of design and ensured at the stage of manufacturing. The realization of measures shown in the paper allows ensuring high-quality competitive engineering product manufacturing at enterprises.

Keywords: quality control; life stages; marketing; design; work preparation; manufacturing; operation; repair; utilization.

Под управлением качеством изделий машиностроения на всех этапах их жизненного цикла понимается система технических, технологических, метрологических и организационно-управленческих мероприятий по обеспечению и повышению качества изделий машиностроения на следующих этапах: маркетинга; проектирования; технологической подготовки производства; изготовления материалов, заготовок, деталей и их сборки; эксплуатации; ремонта; утилизации [1, 2].

Особое внимание следует уделять техническим и технологическим мероприятиям, так как они оказывают основное влияние на обеспечение и повышение качества изделий машиностроения.

В то же время разрабатываемые в нашей стране различные системы управления качеством, например «саратовская», «львовская», присвоение «Знака качества», да и в настоящее время существующие системы, в основном базируются на организационно-управленческих мероприятиях. Еще в начале 1970-х гг. была объявлена пятилетка качества, и начали

разрабатываться опережающие стандарты, которые при правильном их использовании в определенной мере давали возможность технически и технологически повышать качество изделий машиностроения. Однако службы стандартизации на предприятиях не стимулировали своевременную конструкторско-технологическую подготовку для правильной реализации этих опережающих стандартов. В итоге через 2 - 3 года реализации этих стандартов предприятия оказались не готовы к этому, и произошло формальное их внедрение.

В качестве примера можно привести ГОСТ2789-73 "Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики», вышедший в 1973 г., а внедрение предусматривалось в 1975 г. Получив этот стандарт, предприятия ничего не делали по подготовке производства для его внедрения в 1975 г. Поэтому конструкторы пользовались приложением к этому стандарту по соотношению классов шероховатости, предусмотренных в старом ГОСТе 2789-59 и параметрами шероховатости R_a и R_z , и практически остались на техническом уровне требо-

ваний старого ГОСТа. Хотя в новом ГОСТе предусматривались ряд новых параметров шероховатости, таких как R_{max} , S_m , s , tp , которые оказывают основное влияние на долговечность рабочих поверхностей деталей. К сожалению, до сих пор этот ГОСТ не внедрен в полной мере, в то же время в 2017 г. он вышел в качестве Межгосударственного ГОСТа с некоторыми "неудачными" редакционными правками. Хотя есть весь необходимый справочный материал для конструктора-технолога и метролога для успешного его внедрения [2].

На этапе маркетинга:

1. Определяется потребность рынка в соответствующих изделиях машиностроения.

2. Технически определяется конкурентоспособность выпускаемых изделий [3, 4]:

$$K = P / (Ц + Эр), \quad (1)$$

где P – работа, произведенная машиной за срок морального старения (5 лет), руб.; $Ц$ – цена изделия, руб.; $Эр$ – эксплуатационные расходы на изделие за срок морального старения (5 лет), руб.

Причем цена изделия должна учитывать его качество:

$$Ц = C \cdot НПС + (R \cdot C \cdot НПС) / 100, \quad (2)$$

где C – себестоимость изделия, руб.; $НПС$ – норма потребительной стоимости изделия, учитывающая его качество; R – рентабельность, %.

3. Разрабатывается техническое задание на проектирование с указанием коэффициента конкурентоспособности на изделия, превышающим его значение для аналогичных выпускаемых изделий.

На этапе проектирования [2, 5, 6]:

1. Выбирается или разрабатывается новый технологический процесс, для реализации которого проектируется изделие. Если на этой стадии проектирования выбран устаревший неконкурентоспособный технологический процесс, то изделие никогда не будет конкурентоспособным. В качестве примера можно привести проектирование рельсошлифовального комплекса (Брянский машиностроительный завод, конец 1980 гг.) для обработки рабочей поверхности рельса в процессе эксплуатации. В 1980 гг. в нашей стране была осознана необходимость введения скоростных поездов. Для этого требовалось подготовить железную дорогу для движения скоростных поездов. Так как рабочие поверхности рельсов наших железных дорог имели продольную волнистость порядка 100...200 мкм, а для скоростных дорог она не должна превышать 10...20 мкм, то необходимо было производить обработку рабочих поверхностей рельсов в пути. С этой целью для начала производства

рельсообрабатывающих комплексов был закуплен в Швейцарии рельсошлифовальный комплекс для обработки рабочей поверхности рельса в пути методом шлифования торцовыми кругами. Он был передан Брянскому машиностроительному заводу в качестве образца. Однако этот рельсошлифовальный комплекс базировался на технологии, спроектированной еще в 1950 гг. и, естественно, не учитывал научных достижений последующих 30 лет. В соответствии с запроектированной технологией, при рельсошлифовке предусматривалось возвращение приработанного поперечного профиля рельса к исходному. Это приводило к необходимости снятия более высоких припусков при ремонте. В то же время, развитие трибологии в эти годы убедительно показало, что сформировавшийся в процессе приработки поперечный профиль рельса на каждом участке дорог является оптимальным и, его необходимо сохранять при ремонте, что позволяет значительно снизить припуск на обработку.

Учитывая это, была предложена новая технология обработки рабочих поверхностей рельсов в пути:

- иглофрезерование для снятия перенаклепанного с микротрещинами поверхностного слоя рельса по его контуру;

- шлифование абразивными брусками с поперечной асцилиацией по всему поперечному профилю для снятия продольной волнистости и доведения ее до 10...20 мкм;

- шлифование лепестковыми кругами для обеспечения требуемой шероховатости.

Причем предложенный технологический процесс мог быть реализован при скорости рельсообрабатывающего комплекса 20...25 км/ч. Тогда как рельсошлифовальный комплекс по устаревшей технологии производил обработку рабочих поверхностей рельсов в пути со скоростью 8...9 км/ч.

Однако предприятие уже затратившее на копирование швейцарского рельсошлифовального комплекса и производство своего аналога несколько миллионов государственных средств, отказалось от проектирования рельсообрабатывающего комплекса под реализацию нового технологического процесса обработки рабочих поверхностей рельсов в пути.

В результате долгих лет доработки устаревшего рельсошлифовального комплекса и огромных материальных затрат предприятие обанкротилось. Этот пример убедительно говорит о необходимости тщательного выбора или проектирования нового конкурентоспособного технологического процесса, для реализации которого предназначено изделие на начальной стадии его проектирования.

2. Разрабатывается кинематическая схема изделия, позволяющая реализовывать принятый технологический процесс.

3. Производится выбор узлов, соединений подшипников и других комплектующих деталей, обеспечивающих реализацию работы разработанной кинематической схемы изделия.

4. Выбирается или разрабатывается электронная система управления и диагностики проектируемого изделия.

5. Формируется сборочный чертеж проектируемого изделия.

6. Определяется коэффициент конкурентоспособности спроектированного изделия и, при необходимости его повышения, осуществляется соответствующая корректировка проекта.

7. Устанавливается оптимальная экономически целесообразная долговечность отдельных узлов и деталей спроектированного изделия.

8. Определяются эксплуатационные свойства и их значения, лимитирующие оптимальную долговечность деталей и их соединений.

9. Осуществляется выбор материалов для изготовления отдельных деталей изделия, исходя из необходимости обеспечения требуемых значений эксплуатационных свойств.

10. Рассчитываются размеры, их точность и параметры шероховатости рабочих поверхностей деталей, обеспечивающие требуемые значения эксплуатационных свойств.

11. Разрабатываются рабочие чертежи отдельных деталей проектируемого изделия.

На этапе технологической подготовки производства [2, 7 – 9]:

1. Определяются технологические способы получения заготовок для изготовления деталей проектируемого изделия исходя из их конфигурации и их функционального назначения.

2. Выбираются технологические методы окончательной обработки рабочих поверхностей деталей, обеспечивающие требуемую точность и качество поверхностного слоя.

3. Рассчитываются оптимальные режимы для выбранных методов окончательной обработки рабочих поверхностей деталей машин.

4. Производится сравнение технологической себестоимости по выбранным методам и режимам окончательной обработки рабочих поверхностей деталей машин.

5. Устанавливаются технологические методы и оптимальные режимы рабочих поверхностей деталей машин, обеспечивающие требуемую точность и параметры качества поверхностного слоя с наименьшей технологической себестоимостью.

6. Определяются предварительные технологические методы обработки рабочих поверхностей, а также окончательные и предва-

рительные методы остальных поверхностей деталей проектируемого изделия. При этом следует учитывать, что каждый предыдущий метод обработки позволяет получать точность размера на 1 – 2 квалитета и высотные параметры шероховатости в 3 – 4 раза выше последующего метода обработки.

7. Формируются технологические процессы изготовления деталей, обеспечивающие требуемую точность размеров и качество поверхностного слоя с наименьшей технологической себестоимостью.

8. Разрабатываются схемы сборки изделия.

9. Проектируются технологические процессы сборочных единиц и изделия в целом. При этом особое внимание необходимо уделять выбору методов и оптимальных режимов сборки ответственных соединений, оказывающих влияние на долговечность изделия [2].

10. Проектируются технологические процессы изготовления электронных систем управления и диагностики изделий.

11. При необходимости проектируются и изготавливаются станочные приспособления и инструменты или осуществляется их закупка.

Следует отметить, что последние годы в брянской (БГТУ) и рыбинской (РГАТУ имени П.А. Соловьева) технологических школах проводятся исследования по установлению непосредственной взаимосвязи эксплуатационных свойств деталей машин с условиями их обработки. Результатом этих исследований являются теоретические и эмпирические уравнения взаимосвязи различных эксплуатационных свойств (статическая и усталостная прочность; износостойкость; контактная жесткость; коррозионная стойкость; герметичность соединений; прочность посадок) рабочих поверхностей деталей с режимами при различных методах их обработки. Это позволяет частично объединить и сократить время на проектирование и технологическую подготовку производства.

На этапе изготовления [2]:

1. Введение повременной оплаты труда, в соответствии со сложностью выполняемой работы на отдельных предприятиях и производствах.

2. Строжайшее соблюдение технологической дисциплины. Соблюдение технологической дисциплины должны контролировать цеховые мастера, технологи и контролеры. Немаловажную роль в необходимости соблюдения технологической дисциплины играет разъяснительная работа среди исполнителей. Соблюдение технологической дисциплины способствует автоматизации производства, внедрению активных методов контроля и адаптивных систем управления качеством на

рабочих местах. Этому также способствует синхронное обеспечение рабочих мест режущим инструментом в соответствии с его стойкостью.

3. Своевременная диагностика и ремонт технологического оборудования. Так как основное влияние на точность размеров и качество обрабатываемых поверхностей деталей оказывает динамическая жесткость станков, то при диагностировании целесообразно производить ее контроль. С этой целью с успехом может быть применена оперативная автоматизированная система, использующая метод проф. Скрагана:

$$j_{\text{дин}} = \Delta P_y / \Delta y, \quad (3)$$

где ΔP_y – разность радиальной силы резания при обработке поверхностей с различным припуском, автоматически измеряемая с использованием силового динамометра; Δy – разность радиусов обрабатываемых поверхностей с различным припуском, измеряемая после обработки индуктивным датчиком.

Реализация данной методики позволит оперативно в течение 10 мин диагностировать динамическую жесткость токарных, фрезерных и шлифовальных станков.

4. Введение пооперационного контроля.

На этапе эксплуатации [3]:

1. Строгое соблюдение технических условий эксплуатации изделий. Нельзя превышать допустимые нагрузки, мощности и скорости, предусмотренные в паспорте изделия.

2. Транспортировка и хранение изделий должны выполняться в соответствии с техническими требованиями.

3. Своевременные диагностирование и поднастройка изделий.

На этапе ремонта [3]:

1. Своевременные текущий и капитальный ремонт изделий.

2. Строгое соблюдение технологической дисциплины при текущем и капитальном ремонте.

3. При необходимости производится замена отслуживших свой срок деталей или их восстановление с целью повышения их долговечности.

На этапе утилизации [3]:

1. Полная разборка изделий.

2. Рассортировка деталей и тщательная дефектация с целью их использования в новых изделиях. Практика японских предприятий показывает что, в зависимости от наличия ресурса работоспособности деталей из старых изделий, примерно 40 % этих деталей могут быть использованы в новых изделиях.

Следует отметить, что утилизацией своих изделий должны заниматься их производители.

Реализация приведенных выше технических и технологических мероприятий на всех этапах жизненного цикла позволит промышленным предприятиям выпускать высококачественные и конкурентоспособные изделия. Для этого разрабатываемые системы управле-

ния качеством на промышленных предприятиях для их работоспособности должны включать должностные обязанности всех исполнителей, начиная от генерального директора до рабочего, по обеспечению и повышению качества изделий машиностроения на всех этапах жизненного цикла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Управление** качеством продукции машиностроения: учебное пособие / М.М. Кане, А.Г. Суслов, О.А. Горленко и др.; под общ. ред. д-ра техн. наук М.М. Кане. – М.: Машиностроение, 2010. – 416 с.

2. **Качество** машин: Справочник. В 2-х т. Т.1/ А.Г. Суслов, Ю.В. Гуляев, А.М. Дальский и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 430 с.

3. **Качество** машин: Справочник. В 2-х т. Т.2/ А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.

4. **Суслов, А.Г.** Конструкторско-технологическое обеспечение качества и конкурентоспособности изделий машиностроения // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – №7(73). – С. 25–28.

5. **Суслов, А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

6. **Инженерия** поверхностей деталей / Колл. Авт.; под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

7. **Суслов, А.Г.** Обеспечение конкурентоспособности и качества изделий машиностроения // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – №4(22). – С. 3–6.

8. **Технологическое** обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений (Библиотека технолога) / Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко О.Н. и др./ под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.

9. **Безязычный, В.Ф.** Метод подобия в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2012. – 320 с.

REFERENCES

1. *Quality Control of Engineering Produce: manual* / M.M. Kane, A.G. Suslov, O.A. Gorlenko et al.; under the general editorship of M.M. Kane. – M.: Mechanical Engineering, 2010. – pp. 416.

2. *Machine Quality: reference book. In 2 Vol., Vol. 1/* A.G. Suslov, Yu.V. Gulyaev, A.M. Dalsky et al. – M.: Mechanical Engineering, 1995. – pp. 430.

3. *Machine Quality: reference book. In 2 Vol., Vol. 2/* A.G. Suslov, E.D. Brown, N.A. Vitkevich et al. – M.: Mechanical Engineering, 1995. – pp. 256.

4. Suslov, A.G. Design and technological support of quality and competitive ability of engineering products // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.7 (73). – pp. 25-28.

5. Suslov, A.G. *Quality of Machine Parts Surface Layer*. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.

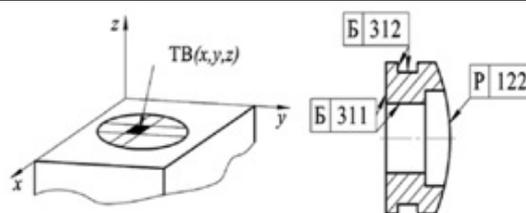
6. *Parts Surface Engineering* / authors' group; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, - 2008. – pp. 320.

7. Suslov, A.G. Competitive Ability and Quality Support of Engineering Products // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2013. – No. 4(22). – pp. 3-6.

8. *Technological Support and Operation Properties Increase of Parts and Their Joints (Technologist's Library)* / Suslov A.G., Fyodorov V.P., Gorlenko O.N. et al./ under the general editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2006. – pp. 448.

9. Beziyazychny, V.F. *Similarity Method in Engineering Techniques*. – M.: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 320.

Рецензент д.т.н. О.А. Горленко



УДК 621.9.047

DOI: 10.12737/article_5a8ef9cea470f1.24480940

С.В. Сафонов, к.п.н., **В.П. Смоленцев**, д.т.н.
(Воронежский государственный технический университет,
394026, Воронеж, Московский пр., 14)
E-mail: vsmolen@inbox.ru

Обеспечение эксплуатационных характеристик изделий технологическими методами

Рассмотрены вопросы повышения качества изделий технологическими способами путем обеспечения эксплуатационных показателей разрабатываемых наукоемких изделий на этапе отработки технологичности в процессе их освоения и запуска в производство. Приведен новый подход к выбору технологических способов достижения требуемых свойств модификацией поверхностного слоя, для чего разработана система выбора из используемых и целесообразности создания новых технологических способов. В основу системы положен принцип полезности с критериальной оценкой вариантов обработки наиболее эффективных для обеспечения требуемых эксплуатационных показателей изделия.

Ключевые слова: принцип полезности; критериальная оценка; отработка технологичности; технологические способы.

S.V. Safonov, Can. Pedagog., **V.P. Smolentsev**, D. Eng.
(Voronezh State Technical University, 14, Moskovsky Avenue, Voronezh, 394026)

Operation properties support for products by technological methods

The paper reports the consideration of the matters of product quality increase by technological methods through the way of operation characteristics support of science intensive products under development at the stage of manufacturability improvement in the course of their mastering and introduction into production. A new approach to the choice of technological methods is shown to achieve the required properties through modification of a surface layer is shown for that purpose there is developed a system of choice among technological methods used and a purposefulness for new technological methods creation. A principle of utility with a criterion estimate of the most efficient processing options to support the required operation values of a product is assumed as a basis.

Keywords: utility principle; criterion estimate; manufacturability improvement; technological methods.

Современное машиностроение развивается в направлении совершенствования создаваемых изделий, что вызывает необходимость постоянного запуска в производство новых поколений техники, все более сложных для изготовления, где не всегда имеются эффективные технологические способы или их разработка находится на стадии исследований.

Для ускорения процесса отработки технологичности при освоении в производстве создаваемых (особенно наукоемких) технических объектов требуется система качественной и количественной оценки технологических способов, обеспечивающих получение требуемых эксплуатационных показателей.

Известны работы брянской технологиче-

ской школы по технологическому обеспечению и повышению эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений [1]. В работах д.т.н., проф. А.Г. Сулова и А.М. Михайлова приводятся результаты исследований по адаптации технологических методов обработки к эксплуатационным свойствам изготавливаемых деталей [2, 3].

В современных условиях идет постоянный переход на новые изделия машиностроения, где требуется получать все новые повышенные эксплуатационные показатели при устранении или снижении ограничений по трудоемкости изготовления, обслуживания, себестоимости изделий. Особенно сильно это проявляется в авиакосмической, очень затратной отрасли, и прежде всего при наиболее наукоемком производстве двигателей.

Структурная модель управления качеством изготовления изделий

На рис. 1 приведена структура управления качеством изделий в процессе их серийного производства. Если изготовитель принимал участие во всех этапах создания (это просто обеспечивается при административном объединении всех соисполнителей), то сдача проекта изготовителю значительно ускоряется и достигается приоритетное положение в освоении рынка сбыта новой продукции (особенно при наличии патентов в период их действия). Здесь решающую роль играет качество маркетинговых исследований, т.к. ошибки этих подразделений могут привести к крупным финансовым потерям разработчика и изготовителя (вплоть до банкротства).

Для сокращения сроков освоения изделия изготовитель может создать структурное подразделение (бригаду, бюро) для изучения изделия в период его разработки (чертежей, регламентов, руководящих технических материалов (РТМ), юридических и финансовых документов). Тогда этап подготовки (см. рис. 1) может быть значительно сокращен и через короткий срок начат выпуск изделий. При этом основное внимание уделяется проектированию технологической документации, количество которой зависит от масштаба, сроков поставок, уровня оснащенности, комплектации исполнителями, финансового и организационного состояния предприятия, стабильности заказов.

Обычно запуск разделяют на этапы, где вначале оснащают производство средствами технологического оснащения достаточными для изготовления единичных изделий, далее осваивают средства автоматизации и другие

виды оснащения, переходят на серийное производство продукции с минимальной доработкой конструкции, что дает возможность планомерно снижать себестоимость и наращивать прибыль при сохранении качества изделия [4 – 6], которое регламентируется имеющейся документацией (руководящими техническими материалами и др.), приведенной на рис. 1.

По результатам испытаний и информации от заказчиков формируется база для повышения показателей вновь разрабатываемых изделий [7 – 9]. Доработка выпускаемой продукции выполняется, если обнаружены скрытые дефекты (ошибки разработчика; брак производства; нарушения условий эксплуатации, транспортировки, хранения), что вызывает дополнительные затраты изготовителя (в чем он, естественно, не заинтересован). Вместе с тем накопление информации позволяет своевременно начать создание нового объекта с повышенным качеством (защита элементов новизны, реклама, проработка принципиальных подходов, выбор поставщиков, поиск заказчиков, планы реконструкции производства, финансирования, оснащения, комплектации кадрами).

В условиях рыночной экономики изготовитель стремится сам обеспечить себя заказами. Для этого необходимо систематически повышать качество изделий (создание подразделений по управлению качеством, финансирование работ и др.), улучшать технологическую базу, в ряде случаев расширять производственные площади или создавать систему соисполнителей в виде малых предприятий или арендованных участков. Технологические процессы [10] у изготовителя должны обеспечивать заложенные в конструкции показатели качества [11, 12], а при реконструкции производства стимулировать рост качества изделий.

Достижение желаемого качества возможно, если следовать указаниям алгоритма, приведенного на рис. 2.

Начало проектирования (см. рис. 2) включает принципиальный подход к получению изделия требуемого качества, выбор варианта изделия, его принципиальной схемы, оценку возможности его изготовления у себя (в форме опытного образца), в серийном производстве. Для этого необходима техническая база (в основном испытательная, экспериментальная), информационная структура, позволяющая объективно оценить уровень создаваемого изделия относительно известных аналогичных по назначению конструкций, требования по оснащению, затратам и другое.



Рис. 1. Структурная модель управления качеством изделия на этапах отработки технологичности и освоения серийного выпуска

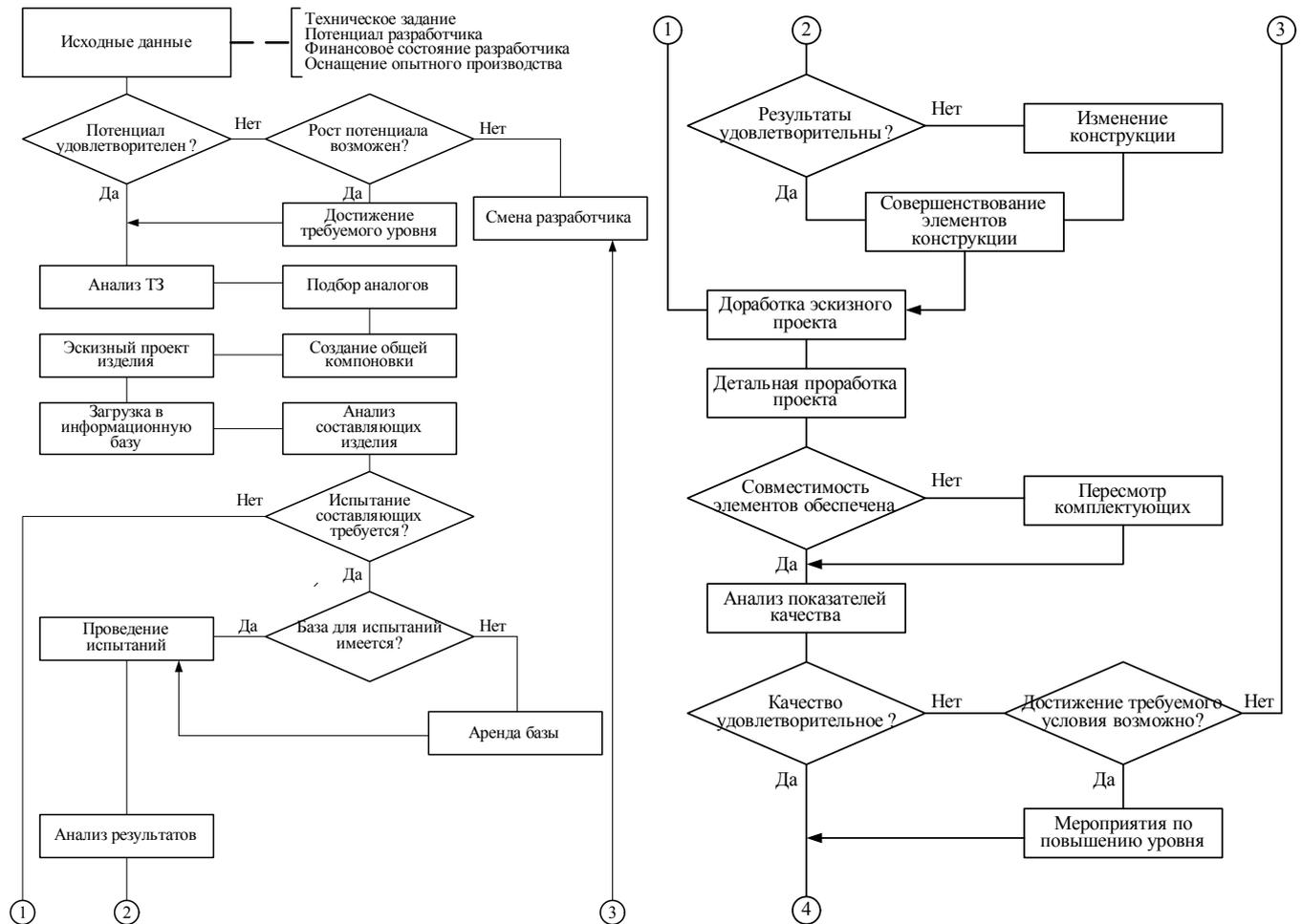


Рис. 2, лист 1. Алгоритм управления качеством в процессе создания изделия

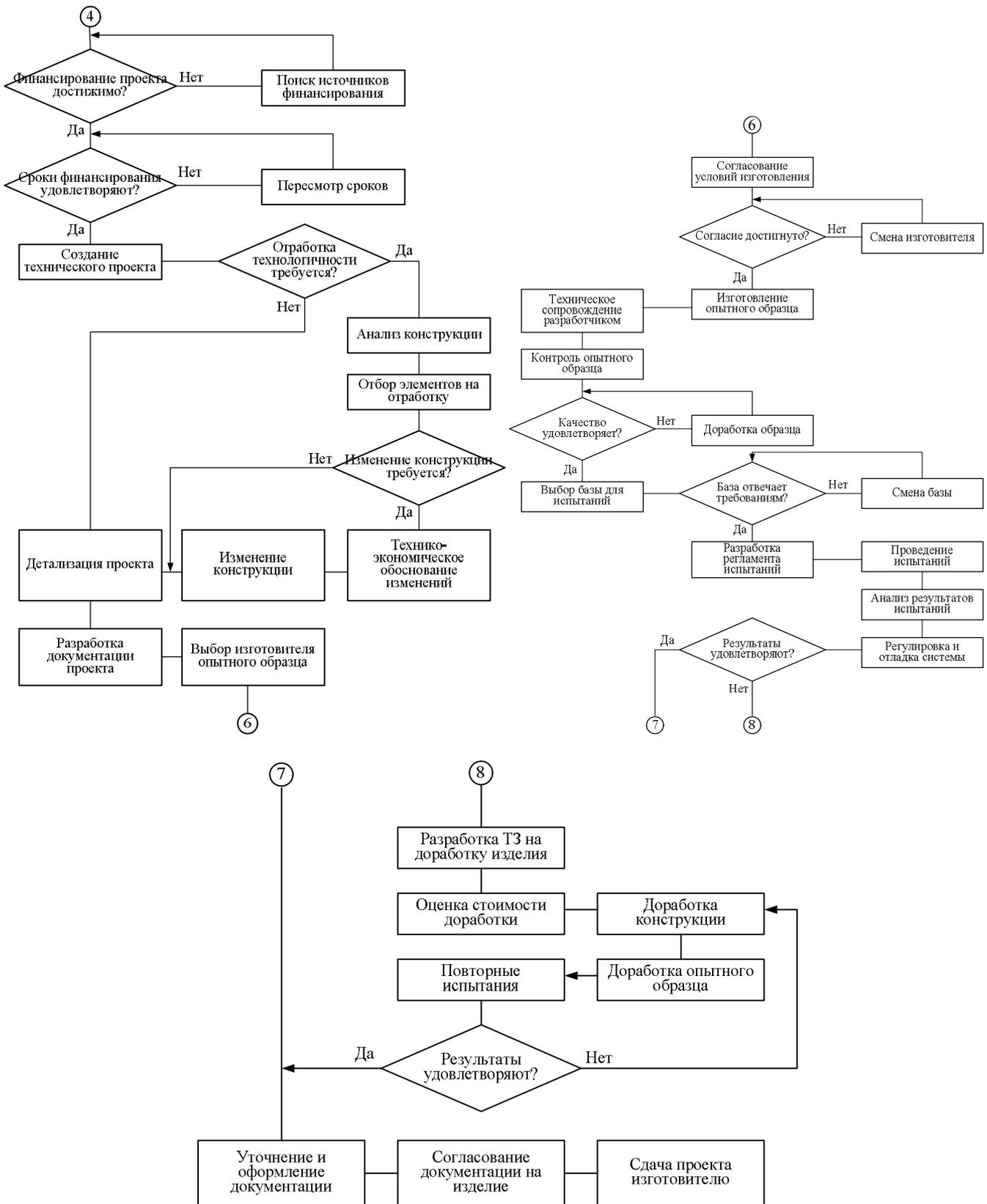


Рис. 2, лист 2

По мере накопления информации (см. рис. 2) требуется градация ее содержания с целью сохранения государственной и коммерческой тайны. Планируется работа служб маркетинга

(сроки запуска новых изделий, доступность информации и др.). На рассматриваемом этапе наиболее востребован интеллектуальный потенциал, включающий уровень исполнителей,

новые идеи (в виде открытий, изобретений (как собственных, так и приобретенных), результатов научных разработок), достаточность средств для финансирования и реальность выбора источников получения средств на приемлемых условиях, соответствие решаемых задач условиям бизнес-плана, пути достижения показателей качества технологическими методами [13].

Далее создается информация для рекламы, требования к информационным базам, кадровым подразделениям (политика комплектации штатов, смены поколений, структура исполнителей, направления переподготовки специалистов и др.), научная и интеллектуальная деятельность, разработка новых процессов, способов, устройств, освоение новой техники, обучение кадров.

На рис. 3 показаны типовые лопатки турбины авиационных двигателей, которые определяют основные эксплуатационные показатели и качество всего изделия.

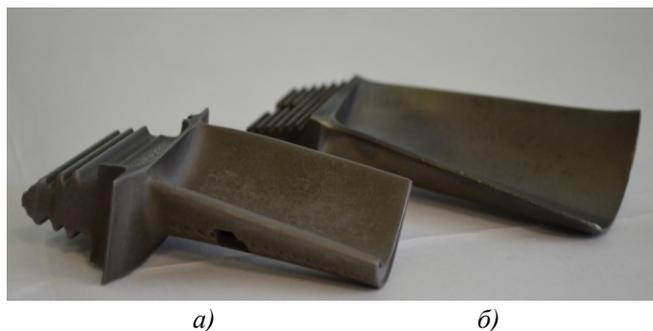


Рис. 3. Рабочие лопатки турбины:
а – охлаждаемая литая; б – штампованная

В табл. 1 приведена эффективность технологических способов воздействия на поверхностный слой на примере лопаток реактивных двигателей. Оценка полезности проведена по результатам механических и усталостных испытаний (жаростойкость, защита от внешних воздействий, прочность), что открывает возможность выбора минимального количества требуемых воздействий, являющихся базой для создания комбинированных технологических процессов и разработки технических заданий для исследовательских работ.

Рабочие лопатки турбины авиационных двигателей работают при высоких температурах и даже при интенсивном охлаждении. Требуется защита их пера от действия нагрева, определяющего также ресурс при действии знакопеременных нагрузок (усталостная прочность).

1. Повышение защитных свойств поверхностного слоя турбинных лопаток

Главный эксплуатационный показатель	Метод воздействия на поверхностный слой лопатки	Эксплуатационные показатели
Повышение жаростойкости	Специальное покрытие	Повышение рабочей температуры перед турбиной на 200...300 К
Повышение предела усталости (ресурса)	Механическое упрочнение	Повышение ресурса двигателя на 10...15 %

Заключение

Сформирован новый подход к развитию технологической науки, включающий целенаправленное управление механизмом разработки новых технологических способов, решающих задачу ускорения отработки технологичности создаваемой наукоемкой техники, что обеспечивает приоритет страны на международных рынках сбыта продукции и пополнение инвестиций для опережающего создания комбинированных методов обработки с использованием электрических методов обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сулов, А.Г., Федоров, В.П., Горленко, О.А. и др. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / под общей ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.
2. **Научноёмкие технологии в машиностроении** / А.Г. Сулов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др. – М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.
3. **Машиностроение. Энциклопедия** / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. // Технология изготовления деталей машин. Т. III-3/А.М. Дальский, А.Г. Сулов, Ю.Ф. Назаров и др.; под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2000. – 840 с.
4. **Смоленцев, В.П., Грицюк, В.Г., Сафонов, С.В.** Эксплуатационные свойства изделий после электроискрового легирования и нанесения покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 12. – С. 31–37.
5. **Смоленцев, В.П., Сафонов, С.В., Катиков, В.И.** Поддержание качества поверхностного слоя изделий в процессе их очистки от загрязнений // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2014. – № 7(37). – С. 21–23.
6. **Сафонов, С.В., Григорьев, С.Н., Смоленцев, В.П.** Модификация поверхностного слоя металлических изделий //

Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – № 2. – Т.11. – С. 19–26.

7. Сафонов, С.В., Смоленцев, В.П., Грицюк, В.Г. Электроискровое легирование и покрытие металлических изделий // Справочник. Инженерный журнал. – 2014. – № 11. – С. 13–19.

8. Сафонов, С.В., Смоленцев, В.П., Юхневич, С.С., Перова, А.В. Создание переходных диффузионных слоев при электроэрозионном покрытии // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – № 5(47). – С. 34–40.

9. Сафонов, С.В., Смоленцев, В.П., Грицюк, В.Г. Режимы электроискрового легирования и покрытия металлических изделий // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 5(35). – С. 28–31.

10. Смоленцев, Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. – М.: Машиностроение, 2005. – 511 с.

11. Смоленцев, В.П., Мельников, В.П., Схиртладзе, А.Г. Управление системами и процессами: учеб. для вузов. – М.: Изд. «Академия». 2010. – 336 с.

12. Мельников, В.П., Смоленцев, В.П., Схиртладзе, А.Г. Управление качеством для технических направлений: учебник. – М.: Изд. «КНОРУС». 2015. – 336 с.

13. Бондарь, А.В. Качество и надежность. – М.: Машиностроение. 2007. – 308 с.

REFERENCES

1. Suslov, A.G., Fyodorov, V.P., Gorlenko, O.A. et al. *Technological Support and Operation Properties Increase of Parts and Their Joints* / under the general editorship of A.G. Suslov. – М.: Mechanical Engineering, 2006. – pp. 448.

2. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering* / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Beziyazychny et al. – М.: Mechanical Engineering. 2012. – pp. 528.

3. *Mechanical Engineering. Encyclopedia* / Editorial Board: K.V. Frolov (Chairman) et al. // *Technology for Machinery Manufacturing*. Vol. III-3/A.M. Dalsky. A.G. Suslov,

Yu.F. Nazarov et al.: under the general editorship of A.G. Suslov. – М.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 840.

4. Smolentsev, V.P., Gritsyuk, V.G., Safonov, S.V. Operation properties of products after electrospark alloying and coatings // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2014. – No.12. – pp. 31-37.

5. Smolentsev, V.P., Safonov, S.V., Katukov, V.I. Surface layer quality support in machinery during their decontamination // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – No. 7(37). – pp. 21-23.

6. Safonov, S.V., Grigoriev, S.N., Smolentsev, V.P. Surface layer modification in metal products // *Bulletin of Voronezh State Technical University*. – 2015. – No. 2. – Vol. 11. – pp. 19-26.

7. Safonov, S.V., Smolentsev, V.P., Gritsyuk, V.G. Electrospark alloying and metal product coating // *Reference Book. Engineering Journal*. – 2014. – No. 11. – pp. 13-19.

8. Safonov, S.V., Smolentsev, V.P., Yuhnevich, S.S., Perova, A.V. Transition diffusion layer formation at electroerosion coating // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – No. 5(47). – pp. 34-40.

9. Safonov, S.V., Smolentsev, V.P., Gritsyuk, V.G. Modes of electrospark alloying and metal product coating // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – No. 5(35). – pp. 28-31.

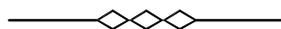
10. Smolentsev, E.V. *Design of Electric and Combined Methods of Processing*. – М.: Mechanical Engineering, 2005. – pp. 511.

11. Smolentsev, V.P., Melnikov, V.P., Skhirtladze, A.G. *Process and System Control*: college textbook. М.: “Academy” Publishing House. 2010. – pp. 336.

12. Melnikov, V.P., Smolentsev, V.P., Skhirtladze, A.G. *Quality Control for Engineering Directions*: textbook. – М.: “KNORUS” Publishing House. 2015. – pp. 336.

13. Bondar, A.B., *Quality and Reliability*. – М.: Mechanical Engineering. 2007. – pp. 308.

Рецензент д.т.н. М.А. Тамаркин



УДК 621.438

DOI: 10.12737/article_5a8ef9cf16dbd8.65103997

А.Н. Михайлов, д.т.н., В.А. Михайлов, аспирант,
Д.А. Михайлов, к.т.н., А.П. Пичко, аспирант,
Е.А. Шейко, к.т.н.
(Донецкий национальный технический университет,
Академия гражданской защиты, г. Донецк)
E-mail: mntk21@mail.ru

Структурная надежность и методы повышения ресурса газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств

В представленной работе выполнен анализ особенностей эксплуатации структурных элементов и подсистем газотурбинного двигателя (ГТД). Исследована структурная надежность ГТД, которая определяется на этапе проектирования авиационного двигателя. Приведены структурно-логические формулы надежности авиационного двигателя. В работе предложен общий подход в повышении ресурса структурных элементов ГТД на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств. Представлены основные принципы обеспечения функционально-ориентированных свойств элементной базы ГТД. Показаны пути обеспечения заданного, номинального или предельного ресурса ГТД на основе функционально-ориентированных свойств элементов.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель; структура двигателя; структурно-логические формулы надежности; функционально-ориентированные свойства; технология; ресурс.

A.N. Mikhailov, D. Eng., V.A. Mikhailov, Post graduate student,
D.A. Mikhailov, Can. Eng., A.P. Pichko, Post graduate student,
E.A. Sheiko, Can. Eng.
(Donetsk National Technical University, Academy of Civil Defense, Donetsk)

Structural reliability and methods for gas turbine engine life increase based on support of functionally-directed properties

In the paper presented there is carried out an analysis of peculiarities in the operation of structural elements and subsystems of gas turbine engine (GTE). A GTE structural reliability is investigated which is defined at the stage of aircraft engine design. There are shown structural logistic formulae of aircraft engine reliability. In the work there is offered a general approach to the life increase of GTE structural elements on the basis of functionally-directed properties. Basic principles for the support of functionally-directed properties of the GTE element base are shown. The ways to ensure a specified rated or limit GTE life on the basis of functionally-directed properties of elements are shown.

Keywords: gas turbine engine; engine structure; structural logistic formulae of reliability; functionally-directed properties; technology; life.

Введение

Газотурбинные двигатели (ГТД) широко используются в народном хозяйстве благодаря стабильности их основных характеристик и параметров работы во времени, характеризующихся качественными техническими показателями и степенью совершенства этих систем, к которым можно отнести следующие:

тягу двигателя, удельную массу двигателя, габаритные размеры, удельный расход топлива, коэффициент полезного действия, ресурс двигателя и других показатели. Это обусловлено также тем, что ГТД обладают и другим рядом качественных характеристик, а именно: модульностью конструкции двигателя; стабильностью его показателей качества во времени при эксплуатации двигателя в различных

климатических условиях и при воздействиях разных агрессивных сред; удобством обслуживания и ремонта двигателя в процессе эксплуатации; возможностью своевременного восстановления разрушенных или изношенных деталей двигателя и др.

Вместе с тем, можно отметить, что ГТД относятся к сложным техническим системам, которые состоят из множества структурных элементов, соединенных в определенные подсистемы. Здесь главными элементами являются лопатки, которые структурированы по устройствам ГТД. Например, в двигателе серии ТВЗ-117, имеются следующие устройства с лопатками: входной направляющий аппарат (ВНА), устройство осевого компрессора, устройство с лопатками турбины компрессора, устройство с лопатками свободной турбины. В частности, осевой компрессор имеет 4-е группы различных лопаток: поворотные лопатки направляющего аппарата (НА) на статоре, лопатки НА на статоре, лопатки спрямляющего аппарата (СА) на статоре, рабочие лопатки ротора (12 ступеней).

В целом процесс работы ГТД можно характеризовать следующими основными особенностями:

1. Наличие сложной структуры подсистем лопаток в ГТД.

2. Сложная структура подсистем лопаток в ГТД формируется из системы групп и подгрупп лопаток (ступеней).

3. В процессе эксплуатации ГТД на сложную структуру подсистем лопаток действует система неравномерных эксплуатационных воздействий (система неравномерных функций), которая возникает из-за следующих факторов: конструктивных особенностей лопатки, ее расположения в ГТД, кинематической структуры лопатки, особенностей движения газо-воздушного потока по тракту двигателя, температуры среды в соответствующей подсистеме двигателя, структуры абразивно-пылевой среды и тому подобного.

4. В результате действия неравномерных эксплуатационных воздействий (абразивно-эрозионные, коррозионные, солевые, щелочные, кислотные, температурные и другие) на лопатки ГТД происходит неравномерный износ или разрушение рабочих поверхностей лопаток.

5. Возникающие неравномерности износа можно свести к неравномерностям 3-х родов, а именно: 1-го рода – возникающие по поверхности лопатки; 2-го рода – возникающие по группе лопаток; 3-го рода – возникающие

между группами лопаток.

Эти особенности работы ГТД снижают ресурс лопаток различных групп и требуют дальнейшего анализа их работы, создания методов повышения ресурса элементов, подсистем и всего ГТД в целом.

В настоящее время для повышения ресурса элементной базы ГТД разработано множество различных методов повышения работоспособности авиационных двигателей [1–3]. Однако, в ряде случаев, эти методы не позволяют обеспечивать дальнейшее повышение ресурса ГТД, особенно в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий. Поэтому данная работа ориентирована на дальнейшее повышение ресурса лопаток ГТД в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций [5].

Целью данной работы является повышение ресурса ГТД путем обеспечения функционально-ориентированных свойств (ФОС) его структурных элементов на основе повышения их межремонтного ресурса и количества восстановлений, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций на поверхности лопаток, по группам лопаток и между их группами, за счет разработки технологических методов и средств их реализации.

В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи работы: выполнить анализ особенностей эксплуатации структурных элементов и подсистем ГТД; исследовать особенности структуры ГТД; разработать структурно-логические формулы надежности ГТД для этапа его проектирования; разработать общий подход повышения ресурса ГТД на основе обеспечения ФОС его элементов и подсистем; предложить принципы обеспечения ФОС элементной базы; разработать основные пути обеспечения заданного, номинального или предельного ресурса ГТД на основе ФОС.

Структура и эксплуатационные особенности ГТД

ГТД – это сложная система, состоящая из множества структурных элементов. Структура – это совокупность элементов и отношений между ними. Укрупненно структуру ГТД можно представить следующим выражением:

$$Str = \{X, A\},$$

где X – множество структурных элементов системы (ГТД); A – множество отношений на множестве X .

Здесь: $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n\}$;
 $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_j, \dots, a_m\}$,

где x_i – i -й структурный элемент множества X ; a_j – j -е отношение на множестве X ; n – мощность (порядок или общее количество элементов) множества X ; m – общее количество отношений на множестве X .

В качестве примера, на рис. 1 представлены варианты структурных схем вертолетных турбовальных ГТД [5].

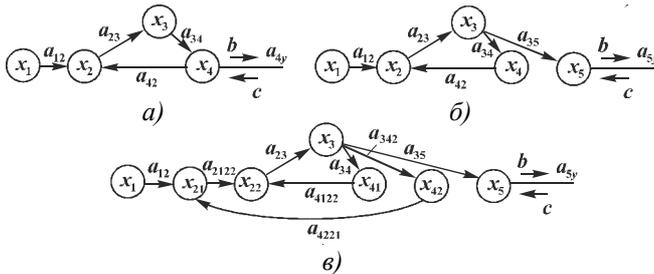


Рис. 1. Варианты структурных схем вертолетных турбовальных ГТД:

a – одновального без свободной турбины; *б* – со свободной турбиной; *в* – со свободной турбиной и компрессорами низкого и высокого давления

Выполненный анализ особенностей эксплуатации ГТД [1 – 4] показал, что здесь главным является то, что структурные элементы эксплуатируются в различных условиях. Причем выполненные исследования показывают, что рационально для всех лопаток, элементов и подсистем обеспечивать одинаковый – заданный ресурс их работы. Если элементы и подсистемы ГТД эксплуатируются в неодинаковых условиях, то происходит преждевременное разрушение одних элементов и подсистем при сохранении работоспособности других элементов и подсистем. Это конечно не рационально и требует новых подходов в повышении эксплуатационных свойств ГТД [5 – 8].

Можно отметить, что в ГТД по его подсистемам действуют переменные эксплуатационные функции. Например, для ГТД серии ТВ3-117, действие этих функций гипотетически можно представить в соответствии с рис. 2.

В этом случае, при эксплуатации ГТД, эксплуатационные функции, действующие на подсистемы x_j , различны. При этом каждая подсистема эксплуатируется в своих особых условиях, имеющих различные особенности. Эти особенности можно представить с помощью следующего выражения:

$$F_{x1} \neq F_{x2} \neq \dots \neq F_{xj} \neq \dots \neq F_{xn};$$

где F_{xj} – j -я эксплуатационная функция, дейст-

вующая на x_j подсистему ГТД.

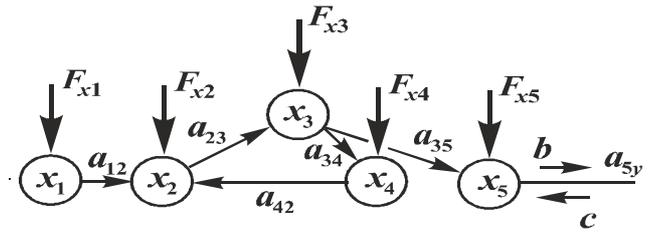


Рис. 2. Гипотетическая схема действия различных эксплуатационных функций на подсистемы ГТД

Также следует отметить, что в каждой подсистеме – на каждый элемент (лопатку) и группу элементов действуют неравномерные эксплуатационные воздействия. Для примера, на рис. 3 представлен общий вид абразивно-эрозионных разрушений лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117. На поверхностях и элементах этих лопаток имеется неравномерный их износ, который значительно снижает общий эксплуатационный потенциал ГТД.

Проведенные исследования [5 – 8] показывают, что в ГТД, на элементы (лопатки), группы элементов (ступени лопаток) и между группами ступеней действуют не одинаковые, неравномерные эксплуатационные функции, которые приводят к возникновению следующих видов неравномерностей [6]: 1-го рода (по элементам лопатки); 2-го рода (по номерам ступеней); 3-го рода (по видам групп ступеней).

На основании этого, при обеспечении свойств лопаток необходимо учитывать следующие особенности:

- неравномерные воздействия и разрушения лопатки в пределах каждой ступени в одноименном виде групп лопаток, возникающие по элементам лопатки;
- неравномерные воздействия и разрушения элементов лопатки в зависимости от номера ступени в одноименном виде групп лопаток;
- неравномерные воздействия и разрушения элементов лопатки в зависимости от вида групп лопаток.

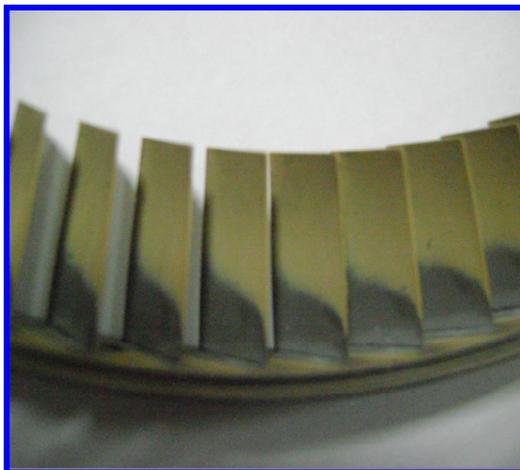
К основным видам эксплуатационных воздействий среды на лопатки компрессора ГТД можно отнести следующие:

- газоздушный поток с включениями пыли, пепла, песка, абразива и тому подобных частиц;
- потоки крупных частиц и элементов;
- ударные, динамические и вибрационные нагрузки;
- действие различных видов сил и возникающих при этом напряжений изгиба и кру-

чения, растяжения и сжатия, смятия и среза;
 – пар, жидкости, вода, льдинки, снег;
 – кислотные, щелочные, солевые и другие
 виды воздействий;
 – температурные и другие воздействия;
 – комбинированные воздействия.



а)



б)



в)

Рис. 3. Общий вид эрозийных разрушений лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117:

а – лопатки направляющего аппарата статора;
 б – лопатки статора; в – лопатки ротора

Следует отметить, что рабочий процесс вертолетного турбовального двигателя (рис. 4) гипотетически соответствует идеальному термодинамическому циклу Брайтона [3] с подводом Q_1 и отводом Q_2 теплоты при постоянных давлениях и изэнтропическом сжатии (кривая $A-B$) и расширении (кривая $C-D$). Здесь, в качестве рабочего тела рассматривается воздух с удельной теплоемкостью c_p и показателем изэнтропы k , молекулярный состав которого не меняется.

На рис. 4 показана диаграмма идеального цикла Брайтона. Здесь, приведены данные для степени повышения давления $\pi_{сж} = p_b / p_a = 12$, максимальной температуры цикла $T_c = 1600$ °С, температуры начала сжатия T_a и степени повышения температуры $Q_{ц} = 1,73$. Для ГТД модели ТВ3-117 значение $\pi_{сж} = 9,9$. Получаемая при этом работа $L_{уд}$ является удельной, поскольку цикл рассматривается для 1 кг массы рабочего тела. Она соответствует заштрихованной площади (см. рис. 4), которая равна разности работ в турбине и сжатия в компрессоре.

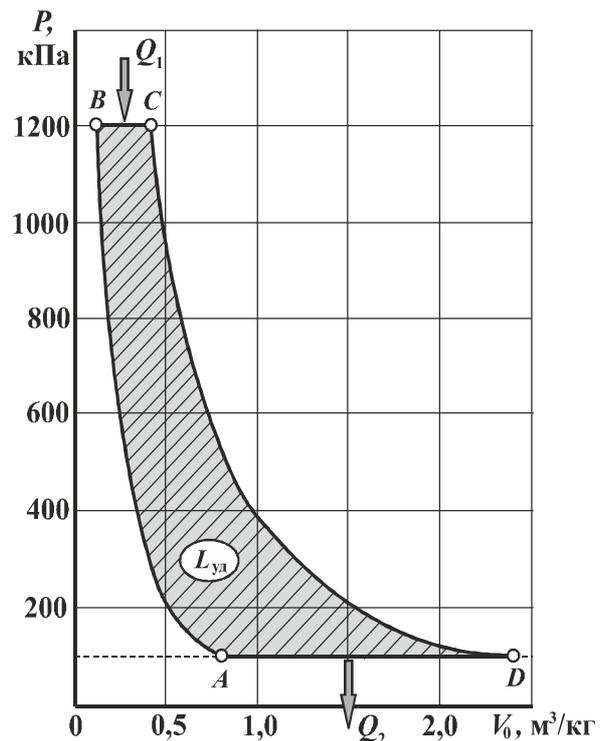


Рис. 4. Диаграмма идеального цикла Брайтона

На основании диаграммы рис. 4, для осевого компрессора важнейшим является обеспечение параметров сжатия газовоздушного потока проточной части в соответствии с кривой $A-B$. Однако на практике идеальный цикл всегда отличается от реального термодинамического цикла. На это оказывает влияние целый

комплекс различных параметров. Важнейшие из них – это постоянно увеличивающиеся зазоры между лопатками ротора и статора, лопатками ротора и корпусом компрессора и лопатками статора и ротором.

С увеличением зазоров проточной части компрессора снижаются все параметры термодинамического цикла. Увеличение зазоров между лопатками и элементами проточной части компрессора происходит в основном из-за эрозионно-абразивного их износа и действия целого комплекса других эксплуатационных воздействий. Особенно это усиливается в условиях действия различных видов эксплуа-

тационных неравномерностей по структурным элементам и подсистемам ГТД, которые дополнительно снижают его ресурс.

Структурная надежность ГТД

Надежность ГТД – свойство технологической системы выполнять или сохранять во времени требуемые функции в заданных режимах и условиях применения. ГТД (рис. 5) структурируется на базе подсистем, которые в свою очередь состоят из определенных групп элементов и ступеней лопаток (рис. 6).

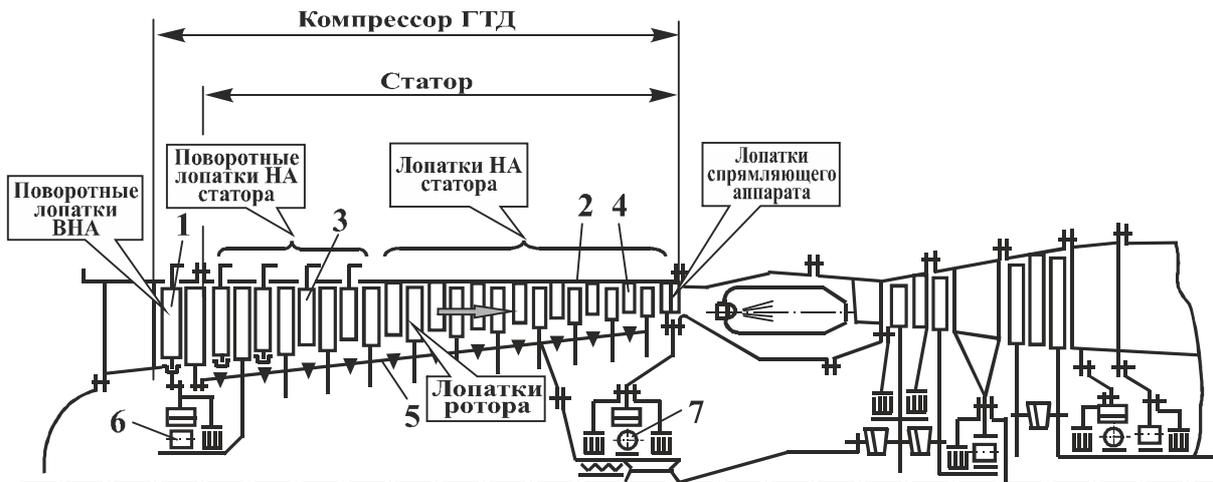


Рис. 5. Схема вертолетного ГТД со свободной турбиной и одновальным газогенератором: 1 – входное устройство; 2 – осевой компрессор; 3 – камера сгорания; 4 – турбина компрессора; 5 – переходник; 6 – свободная турбина; 7 – выпускной канал; 8 – вал отбора мощности

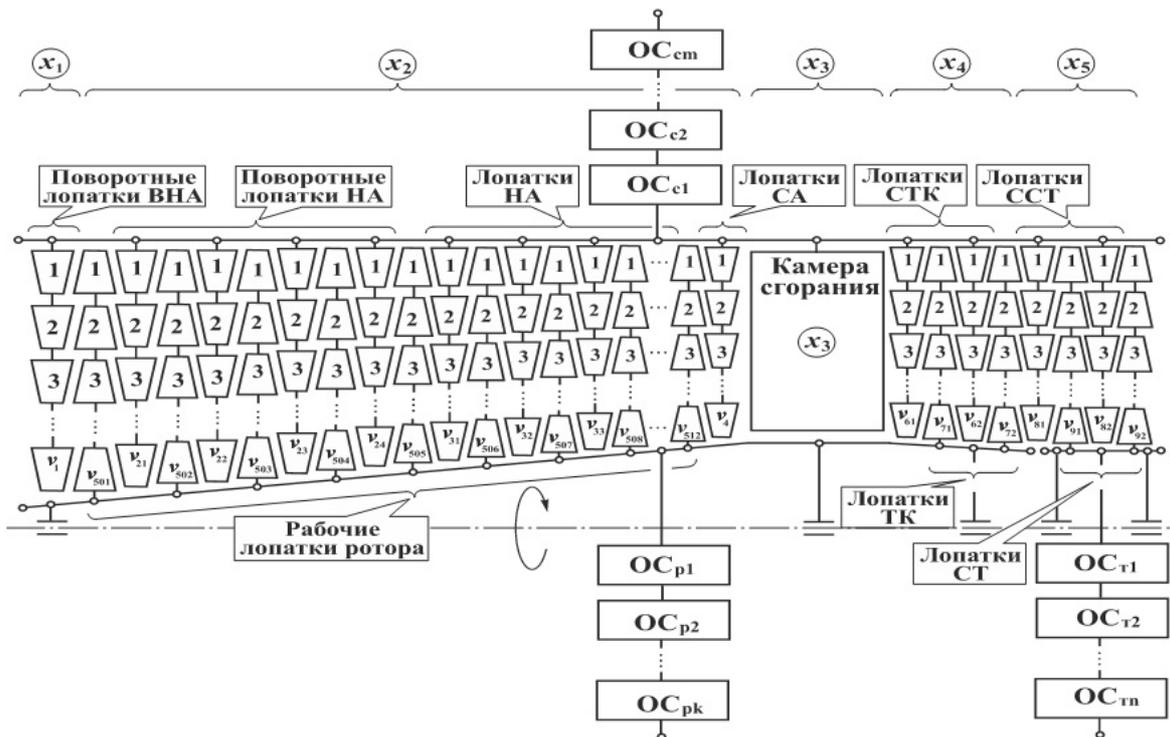


Рис. 6. Структурная схема газотурбинного двигателя

В качестве примера на рис. 5 представлена схема вертолетного ГТД со свободной турбиной и одновальным газогенератором. Здесь показаны различные подсистемы, имеющие множество различных элементов (лопаток) и подсистем, структурированных в группы. К этим группам лопаток можно отнести следующие виды:

- поворотные лопатки входного направляющего аппарата (ВНА) (1 ступень);
- поворотные лопатки направляющего аппарата (НА) статора (4 ступени);
- лопатки направляющего аппарата (НА) статора (8 ступеней);
- лопатки спрямляющего аппарата (СА) (1 ступень);
- лопатки ротора (12 ступеней).

На рис. 6 представлена структурная схема ГТД. Эта схема построена в соответствии со схемой рис. 1, в, для вертолетного турбовального двигателя. Здесь показаны подсистемы x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 , состоящие из групп лопаток, скомпонованных на определенных ступенях двигателя. На структурной схеме рис. 6 представлены ступени статора ВНА, НА, СА, камера сгорания, ступени статора турбины компрессора (СТК), статора свободной турбины (ССТ). Они объединены в единую систему оболочкой двигателя, условно показанной на рис. 6 вертикальной прямой, которая имеет отношения с обслуживаемыми подсистемами $OC_{o1}, OC_{o2}, \dots, OC_{om}$. При этом лопатки роторов турбокомпрессора также в своей структуре имеют обслуживаемые подсистемы $OC_{p1}, OC_{p2}, \dots, OC_{pk}$. Лопатки ротора свободной турбины обслуживаются подсистемами $OC_{T1}, OC_{T2}, \dots, OC_{Tn}$. К обслуживаемым подсистемам можно отнести следующие узлы, подсистемы и механизмы:

наружная оболочка двигателя, различные корпуса, диски, лабиринтные уплотнения, кожух и жаровая труба, валы, подшипники, выхлопное устройство, шестерни, трубопроводы, компенсаторы, крепежные элементы, топливную, масляную и другие системы и агрегаты.

Вероятность сохранения работоспособности ГТД, состоящего из структурных элементов, представленных на рис. 6, за наработку t , определяется по следующей структурно-логической формуле надежности:

$$P(t) = P_1(t) P_2(t) P_3(t), \quad (1)$$

$P(t)$ – вероятность сохранения работоспособности ГТД; $P_1(t)$ – вероятность сохранения работоспособности первой подсистемы ГТД; $P_2(t)$ – вероятность сохранения работоспособности второй подсистемы ГТД; $P_3(t)$ – вероятность сохранения работоспособности третьей подсистемы ГТД (рис. 6);

В соответствии со структурной схемой рис. 6, составляющие выражения (1) определяются следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} P_1(t) &= P_{11}(t) P_{12}(t); \\ P_2(t) &= P_{21}(t) P_{22}(t); \\ P_3(t) &= P_{31}(t) P_{32}(t), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$P_{11}(t), P_{21}(t), P_{31}(t)$ – вероятность сохранения работоспособности основных подсистем, состоящих из групп элементов (лопаток) для первой, второй, третьей систем, соответственно; $P_{12}(t), P_{22}(t), P_{32}(t)$ – вероятность сохранения работоспособности обслуживаемых подсистем для первой, второй, третьей систем, соответственно.

Первые составляющие выражения (2) определяются на основании выражения:

$$\left. \begin{aligned} P_{11}(t) &= \prod_{i_1=1}^{v_1} P_{1i_1} \cdot \left[\prod_{i_{21}=1}^{v_{21}} P_{2i_{21}} \cdot \prod_{i_{22}=1}^{v_{22}} P_{2i_{22}} \cdot \dots \cdot \prod_{i_{24}=1}^{v_{24}} P_{2i_{24}} \right] \cdot \left[\prod_{i_{31}=1}^{v_{31}} P_{3i_{31}} \cdot \prod_{i_{32}=1}^{v_{32}} P_{3i_{32}} \cdot \dots \cdot \prod_{i_{37}=1}^{v_{37}} P_{3i_{37}} \right] \times \\ &\quad \times \prod_{i_4=1}^{v_4} P_{4i_4} \cdot P_{x_3} \cdot \left[\prod_{i_{61}=1}^{v_{61}} P_{6i_{61}} \cdot \prod_{i_{62}=1}^{v_{62}} P_{6i_{62}} \right] \cdot \left[\prod_{i_{81}=1}^{v_{81}} P_{8i_{81}} \cdot \prod_{i_{82}=1}^{v_{82}} P_{8i_{82}} \right]; \\ P_{21}(t) &= \left[\prod_{i_{5011}=1}^{v_{5011}} P_{501i_{5011}} \cdot \prod_{i_{5012}=1}^{v_{5012}} P_{501i_{5012}} \cdot \dots \cdot \prod_{i_{50112}=1}^{v_{50112}} P_{501i_{50112}} \right] \cdot \left[\prod_{i_{71}=1}^{v_{71}} P_{71i_{71}} \cdot \prod_{i_{72}=1}^{v_{72}} P_{72i_{72}} \right], \\ P_{31}(t) &= \prod_{i_{91}=1}^{v_{91}} P_{91i_{91}} \cdot \prod_{i_{92}=1}^{v_{92}} P_{92i_{92}}, \end{aligned} \right\}$$

где $P_{\tau\mu}$ – вероятность сохранения работоспособности любой лопатки τ -ой группы μ -й подгруппы; $v_{\tau\mu}$ – количество лопаток τ -й группы μ -й подгруппы; P_{x_3} – вероятность сохранения работоспособности камеры сгорания, системы x_3 .

Надежность обслуживающих подсистем ГТД, структура которых определяется выражением (2), составленным в соответствии со структурой рис. 6, определяются на основании выражений:

$$\left. \begin{aligned} P_{12}(t) &= P_{c1} P_{c2} \cdots P_{cm}; \\ P_{22}(t) &= P_{p1} P_{p2} \cdots P_{pk}; \\ P_{32}(t) &= P_{T1} P_{T2} \cdots P_{Tn}, \end{aligned} \right\}$$

где P_{ce} , $P_{p\delta}$, $P_{T\omega}$ – вероятность сохранения работоспособности ε , δ , ω – подсистем обслуживающих систем ГТД, соответственно; m , k , n – мощность или общее количество обслуживающих подсистем ГТД.

Представленные структурно-логические формулы надежности позволяют на этапе проектирования ГТД определять требуемую структурную надежность и рациональный структурный состав элементов и подсистем для различных вариантов авиационных двигателей.

Общий подход в повышении ресурса ГТД. Выполненные исследования особенностей эксплуатации ГТД показывают, что структурные элементы двигателя разрушаются неравномерно, при этом действуют неравномерности нескольких родов [5]. Это обусловлено тем, что структура ГТД состоит из групп элементов (лопаток), которые составляют другие группы (ступени), входящие в свою очередь в следующие группы подсистем (турбокомпрессор, газогенератор, свободная турбина и др.). Поэтому из-за сложной, и по сути дела, многомерной структуры элементов ГТД возникают многомерные неравномерные разрушения лопаток нескольких родов [5]. Эти неравномерности разрушений лопаток не позволяют традиционными методами обеспечивать заданные их свойства и вести повышение ресурса ГТД.

В условиях действия неравномерных многомерных разрушений элементов ГТД целесообразно обеспечивать для них ФОС на базе различных функционально-ориентированных технологий [5]. Эти технологии обеспечивают реализацию следующих вариантов свойств:

1. ФОС, ориентированные в соответствие с группой особых принципов функционально-ориентированных технологий [5 – 9].

2. ФОС, изменяющиеся в пространстве (например, поверхность или объем детали) функционального элемента (лопатки), функциональных элементов ступени и группы ступеней лопаток. Изменяющиеся свойства могут

выполняться за счет изменяющихся физико-механических свойств, за счет изменяющейся толщины покрытия и других параметров [5].

3. ФОС, изменяющиеся во времени по функциональному элементу, функциональным элементам ступени и группам ступеней лопаток. Эти свойства можно реализовывать за счет специальных, градиентных, модульных, функционально-ориентированных покрытий [9].

4. ФОС, изменяющиеся в зависимости от особенностей эксплуатации структурных элементов, узлов, групп и подсистем ГТД [5].

5. ФОС, выполняемые в соответствии с другими особенностями эксплуатации ГТД [5].

ФОС структурных элементов ГТД позволяют в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий реализовывать следующие особенности:

- равномерное (одинаковое) разрушение всех структурных элементов ГТД (например, поверхностей, поверхностных слоев, объемных элементов, геометрических размеров и формы), что позволяет решать вопросы регулировки, восстановления и повышения их ресурса в ГТД;

- обеспечивается возможность полного одновременного исчерпания ресурса каждого элемента ГТД по всему комплексу параметров разрушений, например, эрозионному износу; пределу выносливости по изгибным, растягивающим, касательным и другим напряжениям. Это позволяет выработать весь потенциал ресурса всех деталей ГТД до их полного разрушения по всем видам разрушений, что в целом повышает технико-экономические параметры эксплуатации ГТД;

- обеспечивается возможность реализации кратного ресурса по одним видам разрушений элементов ГТД (например, по эрозионному износу) относительно других видов разрушений (например, по выносливости); это позволяет вести работы по многократному восстановлению ресурса элементов ГТД сначала в зависимости от одного вида разрушений, потом по другому виду разрушений и так далее;

- единовременное полное разрушение покрытий (при восстановлении лопаток с помощью покрытий), наносимых на структурные элементы ГТД при не разрушении (износе) основного материала, например, тела пера лопатки. Это позволяет увеличить число возможных восстановлений элементов ГТД;

- единовременное полное разрушение сразу всех структурных элементов ГТД, что обеспечивает полную выработку ресурса всех структурных элементов ГТД в целом и повышение

технико-экономических параметров эксплуатации авиационных двигателей;

– обеспечивать кратный ресурс одних элементов относительно других структурных элементов ГТД и другие особенности; это обеспечивает возможность в повышении общего эксплуатационного потенциала ГТД за счет рационального или оптимального использования запасных частей.

Все это позволяет повысить общий ресурс ГТД за счет увеличения его межремонтного ресурса и количества восстановлений его структурных элементов. Также можно отметить, что при реализации ФОС на базе функционально-ориентированных технологий обеспечивает дополнительно следующее:

1. Возможность повышения ресурса ГТД за счет комплексного увеличения его межремонтного ресурса и количества восстановлений элементной базы.

2. Повышение общего эксплуатационного потенциала всех структурных элементов ГТД.

3. Создание условия реализации полной адаптации физико-механических свойств структурных элементов ГТД при изготовлении к особенностям их эксплуатации в двигателе.

4. Возможность реализации заданного ресурса элементов, подсистем и всего ГТД.

5. Возможность управления свойствами элементов ГТД при их изготовлении для обеспечения требуемых свойств двигателя в условиях эксплуатации, что в ряде случаев диктуется конъюнктурой рынка или производителя ГТД.

6. Качественно новую совокупность свойств ГТД.

На рис. 7 представлена гипотетическая схема общего подхода в обеспечении ФОС ГТД с взаимосвязями φ_i^j объектов системы: эксплуатационные функции F , технологические воздействия TB и свойства C . На базе этих связей реализуются функционально-ориентированные свойства [5 - 9]. Здесь можно отметить, что структура связей между элементами модели имеет замкнутую форму, которая позволяет определять параметры технологических воздействий и свойств детали в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций на элементы детали.

Петли модели φ_i^i обозначают внутренние процессы в i -м объекте системы.

Основные принципы обеспечения функционально-ориентированных свойств элементной базы. В соответствии с гипотетиче-

ской схемой общего подхода, представленной на рис. 7, функционально-ориентированные свойства (C) должны реализовываться на базе группы особых принципов ориентации свойств и технологических воздействий [9]:

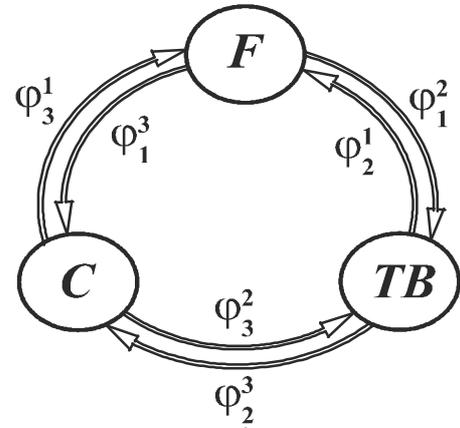


Рис. 7. Гипотетическая схема общего подхода в обеспечении ФОС ГТД с взаимосвязями φ_i^j объектов системы: эксплуатационные функции F , технологические воздействия TB и свойства C (ФОС)

1. Функционального соответствия особенностей действия эксплуатационных функций, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств.

2. Топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента детали, в котором действует элементарная функция при эксплуатации, геометрическим параметрам зоны реализации технологических воздействий на деталь и геометрических параметров зонного обеспечения необходимых свойств.

3. Количественного соответствия множества функциональных элементов, в которых действует множество различных элементарных функций при эксплуатации, множеству реализации технологических воздействий и множеству элементов обеспечения необходимых свойств в функциональных элементах детали.

4. Адекватной зависимости пространственных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, технологических воздействий и эксплуатационных свойств в пространстве каждого элемента детали.

5. Адекватной зависимости временных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, временных или пространственных особенностей реализации технологических воздействий и временных эксплуатационных свойств в каждом функциональном элементе детали.

6. Структурного соответствия действия множества элементарных функций, реализации множества технологических воздействий и выполнения множества свойств в функциональных элементах детали из условия обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств всей детали.

7. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в пространстве и во времени каждого функционального элемента заданному или предельному потенциалу общих свойств всей детали в целом.

8. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в окрестностях каждого функционального элемента в пространстве и во времени заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всей детали в целом.

ФОС лопаток и подсистем ГТД формируются на базе этой группы особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств деталей в зависимости от особенности их эксплуатации в авиационном двигателе. В частности, при восстановлении работоспособности лопаток ГТД с помощью различных покрытий, на базе принципов 1, 2, 3 формируются ФОС лопатки компрессора при послойном обеспечении этих свойств при условии одновременного разрушения всего покрытия лопатки [8]. При этом с использованием принципа 6 обеспечиваются свойства различных структурных групп ГТД в соответствии со структурно-логической формулой надежности (1) и структурой рис. 6 и т.д. Причем необходимо учитывать неравномерности действия эксплуатационных функций на лопатки ГТД, которые отображаются как неравномерности трех родов [5].

Некоторые особенности обеспечения ФОС элементов и подсистемам ГТД. ФОС лопаток и элементов ГТД позволяют обеспечить следующее:

1. Повышать ресурс ГТД.
2. Выполнять многократное восстановление элементов и подсистем ГТД.
3. Повышать межремонтный ресурс ГТД, увеличивать количество восстановлений элементов и подсистем, а также повышать общий ресурс авиационного двигателя:

$$R_o = \sum_{j=1}^t R_j ;$$

где R_o – общий ресурс ГТД; R_j – межремонтный ресурс ГТД; t – количество восстановлений ГТД при ремонтах.

4. За счет многократного восстановления работоспособности элемента ГТД, ресурс которого ограничивается одним видом разрушения, например абразивно-эрозионным износом, ресурс может ограничиваться другим видом разрушений, например по напряжениям выносливости. Это позволяет вести создание ГТД с учетом увеличения ресурса.

5. Создавать ГТД на базе принципа равенства ресурсов всех элементов и подсистем:

$$R_1 = R_2 = \dots = R_j = \dots = R_n = R_o ;$$

где n – общее количество элементов системы ГТД.

Здесь возможно три варианта значений ресурса, а именно, максимальный, номинальный или заданный:

$$R_o \rightarrow \max \vee R_o \rightarrow \text{nom} \vee R_o = A .$$

6. Создавать ГТД на базе принципа кратности ресурсов всех элементов и подсистем:

$$s_1 R_1 = s_2 R_2 = \dots = s_j R_j = \dots = s_n R_n ;$$

где s_j – целое число, определяющее количество восстановления для j -го элемента ГТД.

7. Увеличивать полный потенциал использования всех элементов ГТД, например по величине ресурса.

В качестве примера обеспечения ФОС рабочих лопаток ротора компрессора ГТД серии ТВ3-117 на рис. 8 приведены данные по обеспечению свойств с помощью многослойного функционально-ориентированного нитрида титанового покрытия. Данное покрытие выполняется неравномерной толщины в соответствии с особенностями эксплуатации лопатки. В этом случае неравномерная толщина функционально-ориентированного многослойного покрытия выполняется посредством покрытий постоянной толщины, что позволяет формировать ФОС.

Заключение

Выполненные исследования направлены на повышение ресурса ГТД путем обеспечения ФОС его структурных элементов на основе повышения их межремонтного ресурса и количества восстановлений, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций на поверхности лопаток, по группам лопаток и между их группами, за счет разработки технологических методов и средств их реализации.

Выполненный анализ особенностей эксплуатации структурных элементов и подсистем ГТД позволил разработать структурно-логические формулы надежности ГТД для

этапа его проектирования. А также в работе предложен общий подход повышения ресурса ГТД на основе обеспечения ФОС его элементов и подсистем. Этот подход базируется на основе группы особых принципов обеспечения ФОС элементной базы. В работе показаны основные пути обеспечения заданного, номинального или предельного ресурса ГТД на основе ФОС.

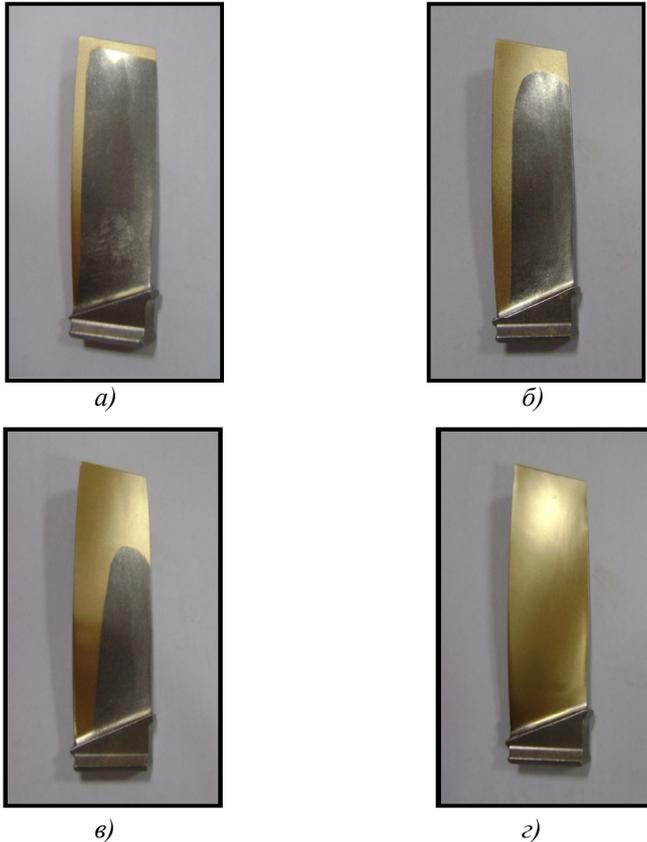


Рис. 8. Общий вид лопатки с функционально-ориентированным покрытием:
 а – с одним слоем; б – двумя слоями; в – тремя слоями; з – четырьмя слоями

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богуслаев, В.А. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД. / В.А. Богуслаев, В.К. Яценко, П.Д. Жеманюк и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич». 2005. – 559 с.
2. **Авиаинформ** // Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2016. – Вып. № 4 (145). – 182 с.
3. Григорьев, В.А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В.А. Григорьев, В.А. Зрелов, Ю.М. Игнаткин и др. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
4. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
5. Михайлов, В.А., Пичко, А.П., Чугункин, А.В., Хавлин, Т.В., Лукичев, А.В., Михайлов, Д.А., Михайлов, А.Н. Общие основы и принципы повышения ресурса га-

зотурбинных двигателей на базе функционально-ориентированного подхода // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, – 2017. – Вып. 3 (58). – С. 32–43.

6. Михайлов, В.А., Михайлов, А.Н., Байков, А.В. Комплексное повышение ресурса всех групп лопаток компрессора турбовального ГТД на основе функционально-ориентированного подхода // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 9(75). – С. 42–48.

7. Михайлов, А.Н., Хавлин, Т.В. Особенности технологического процесса повышения ресурса лопаток турбины авиационного двигателя на базе функционально-ориентированной технологии // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научн. тр. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – Вып. 1 (56). – С. 101–114.

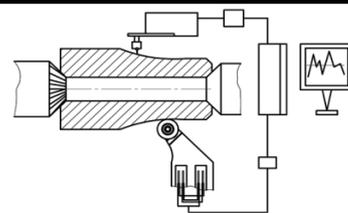
8. Толстых, С.О., Михайлов, А.Н., Михайлов, Д.А. Повышение работоспособности лопаток компрессора ГТД на базе многослойных ионно-плазменных функционально-ориентированных покрытий // Инженер. Междунар. студ. науч.-техн. журнал. – Донецк: ДонНТУ. 2016. – № 21. – С. 62–66.

9. Михайлов, А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

REFERENCES

1. Boguslayev, V.A. *Finishing-Strengthening of GTE Parts.* / V.A. Boguslayev, V.K. Yatsenko, P.D. Zhemanjuk et al. – Zaporozhie: PC “Motor Sich”. 2005. – pp. 559.
2. **Aviainform** // Monthly Information-Analytical Journal. – M.: International Association “Union of Aircraft Engine Manufacturing”, 2016. – Ed. No. 4(145). – pp. 182.
3. Grigoriev, V.A. *Helicopter Gas Turbine Engines.* / V.A. Grigoriev, V.A. Zrelov, Yu.M. Ignatkin et al. – M.: Mechanical Engineering, 2007. – pp. 491.
4. Suslov, A.G. *Technological Support of Parameter State in Parts Surface Layer.* – M.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 208.
5. Mikhailov, V.A. Pichko, A.P., Chugunkin, A.V., Khavlin, T.V., Lukichev, A.V., Mikhailov, D.A., Mikhailov, A.N. General fundamentals and principles of gas turbine engine life increase based on functionally-directed approach // *Efficient Technologies and Systems of Mechanical Engineering: Inter. Proceedings.* – Donetsk: DonNTU, - 2017. Ed. 3(58). – pp. 32-43.
6. Mikhailov, V.A., Mikhailov, A.N., Baikov, A.V. Life complex life increase for all blade groups of compressor of turbine-shaft GTE based on functionally-directed approach // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2017. – No. 9(75). – pp. 42-48.
7. Mikhailov, A.N., Khavlin, T.V. Peculiarities in engineering procedure of turbine blade life increase for aircraft engine based on functionally-directed technology // *Efficient Technologies and Systems of Mechanical Engineering: Inter. Proceedings.* – Donetsk: DonNTU, 2017. – Ed. 1.(56). – pp. 101-114.
8. Tolstykh, S.O., Mikhailov, A.N., Mikhailov, D.A. Working capacity increase of compressor blades for GTE based on multi-layer ion-plasma functionally-directed coatings // *Engineer. Inter. Scientif.-Tech. Journal.* – Donetsk: DonNTU. 2016. – No.21. – pp. 62-66.
9. Mikhailov, A.N. *Synthesis Fundamentals of Functionally-Directed Technologies.* Donetsk: DonNTU, 2009. – pp. 346.

Рецензент д.т.н. Д.И. Петрешин



УДК 658.62.018.012:519.2

DOI: 10.12737/article_5a8ef9cf8f1e97.91258557

**Б.М. Бржозовский, д.т.н., П.Ю. Бочкарев, д.т.н.,
В.В. Мартынов, д.т.н., П.В. Мартынов, к.т.н.**
(ФГБОУ ВО Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)
E-mail: v_martynov@mail.ru

Проблемы управления, мониторинга и диагностики сложных мехатронных систем в машиностроении

Рассмотрены основные проблемы, связанные с эффективной эксплуатацией сложных мехатронных систем (СМС) в машиностроении. Показана целесообразность применения статистического оценивания и представлены методы для его проведения, позволяющие определять характеристики СМС по результатам наблюдений за ее пространственно-временной эволюцией.

Ключевые слова: станочные мехатронные системы; управление; мониторинг; диагностика; проблемы.

**B.M. Brzhozovsky, D. Eng., P.Yu. Bochkaryov, D. Eng.,
V.V. Martynov, D. Eng., P.V. Martynov, Can. Eng.**
(FSBEI HE Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Polytechnicheskaya Str., Saratov, Russia, 410054)

Problems of control, monitoring and diagnostics of complex mechatronic systems in mechanical engineering

The paper reports the analysis results of problems connected with operation efficiency increase of complex mechatronic systems (CMS) under conditions of engineering production on the basis of the estimate and analysis of the state and its changes under conditions of distortions. A mathematical apparatus of the estimate is under consideration and a purposefulness for the development of special methods allowing the determination rapidly the significance of deviations in an evolution path of CMSs from the area limits of working capacity for obtaining responses to the questions connected with different aspects of their operation reliability support.

Keywords: machine mechatronic systems; control; monitoring; diagnostics; problems.

Современные сложные мехатронные системы, прежде всего станочные (СМС), открывают новые технологические возможности для повышения эффективности и качества обработки сложных и точных поверхностей. Это связано с тем, что они оснащаются высокоэффективными управляемыми приводами [1], специальными информационными системами [2] и другими функциональными устройствами [3], позволяющими перейти на новые методы формирования управления траекториями формообразующих движений. Однако сложные динамические процессы, возмущающие траектории и формирующие параметры точности, сдерживает применение этих методов в производственных условиях. Совместное многомерное движение фазовых траекторий и нечеткость границ фазовых портретов трудно оценить количественно.

Перечисленные трудности можно было бы

минимизировать за счет автоматического управления в реальном времени. Однако прикладная теория автоматического управления не обеспечивает инженерными методиками синтез регуляторов, способных в полной мере учесть особенности функционирования СМС для формирования управления. В связи с этим управление целесообразно осуществлять на основе оценивания текущего состояния СМС, принимая решения не только о сроках реализации, но и о содержании управляющих воздействий. Последнее является особенно важным, поскольку основной задачей управления является не только компенсация нежелательных последствий, связанных с изменением состояния СМС, но и целенаправленное воздействие на само состояние в случае, если воздействие оценивается как целесообразное. Таким образом, повышение эффективности функционирования СМС на ос-

нове разработки методов оценивания и анализа их состояния при организации и управлении процессами эксплуатации и технического обслуживания является актуальной научно-технической задачей (рис. 1).

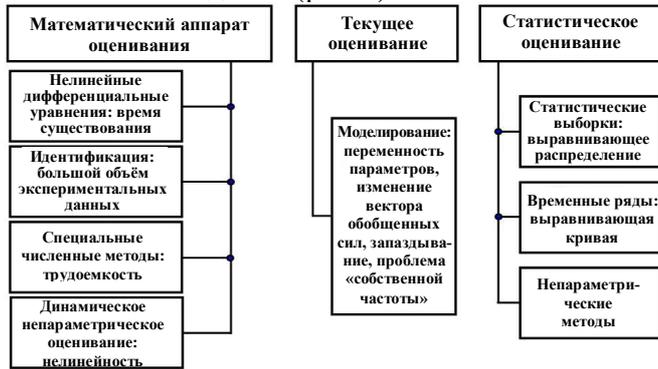


Рис. 1. Основные проблемы и подходы к оцениванию и анализу процессов в СМС

Математический аппарат оценивания. Математический аппарат для изучения свойств сложных систем управления чаще всего представляется нелинейными дифференциальными уравнениями высоких порядков. Однако достаточно полное и точное априорное моделирование основных характеристик процесса резания практически невозможно и нецелесообразно (даже с учетом возможностей современных высокопроизводительных специализированных контроллеров и ЭВМ) из-за их многообразия и конечного времени существования аналитических моделей (при идентификации), а также необходимости решения дополнительно возникающих сложных задач распознавания образов (при диагностировании).

Использование специальных численных методов индивидуально и весьма трудоемко и также вряд ли может быть применимо в реальное время для формирования «быстрых» алгоритмов (при управлении) [4]. В результате все большее значение приобретает мониторинг состояния СМС, поскольку он является практически единственной информационной базой автоматизированной подналадки в процессе ее функционирования с изменяющимися воздействиями и параметрами. Однако для всей гаммы СМС практически отсутствуют однотипные критерии, технически доступные для «наблюдения», и соответствующие однотипные правила принятия решений в реальное время. Изложенное означает, что для эффективного решения задач управления, мониторинга и диагностики необходимо программно-математическое обеспечение, реализующее специальные методы оценивания состояния СМС и его изменений под действием возмущений.

В общем виде задача оценивания обычно формулируется следующим образом [5]. На основе множеств функций (сигналов), полученных экспериментальным путем для реального процесса, необходимо указать оператор модели из заданного класса операторов, который наилучшим, в определенном смысле, образом

представлял бы оператор процесса на заданных множествах сигналов. В понятие наилучшего представления или аппроксимации может вкладываться различный смысл. Возможна также постановка задачи оценивания, при которой ищется не наилучший, а достаточно точная аппроксимация оператора процесса оператором модели на заданных множествах сигналов.

Оператор модели может содержать неизвестные функции (например, ядра интегральных операторов или еще более мощные неизвестные множества); оценивание в терминах таких операторов является непараметрическим. Непараметрическое оценивание в принципе предполагает получение в экспериментах непрерывных множеств входных и выходных величин (сигналов). Но ввиду того, что каждое измерение даже в статическом режиме занимает конечное время, бесконечные множества измерений неосуществимы. Главная трудность – большой объем необходимого экспериментального материала (высокая мощность множеств при их нелинейных связях), который может быть часто и недостоверным из-за неработоспособности принципа суперпозиции.

Динамическое непараметрическое оценивание применяется преимущественно к системам, близким к линейным и ограниченной размерности. Это известные методы частотных и временных характеристик, взаимных корреляционных функций, которые широко используются в практике оценивания качества СМС в динамическом режиме.

Наиболее трудным является непараметрическое оценивание состояния стохастической нелинейной системы, описываемой стохастическим оператором. Стохастическая система оценивается в классе моделей с дискретным временем, где оператор модели является векторной случайной функцией. Случайность этой функции может отражать мультипликативные шумы на всех (или любых) входах и выходах системы, внутренние случайные изменения, дрейфы параметров, которые, в свою очередь, проявляются в изменении входных и выходных параметров.

Кроме этого у каждого параметра есть значение (называемое бифуркационным), прохождение через которое способно вызвать изменение значения другого параметра, поскольку они взаимосвязаны между собой, причем в большинстве случаев связи являются неоднозначными. Это приводит к появлению альтернатив в дальнейшем ходе эволюции состояния СМС. Информация об этой эволюции в имеющихся системах управления в большинстве случаев не производится в связи с отсутствием способов получения и методов обработки данных, необходимых для этого. Отсутствует и хорошо апробированный математический аппарат для формирования управляющих воздействий в автоматическом или автоматизированном режиме.

Текущее оценивание. При управлении СМС на основе оценивания ее текущего состояния регистрируется и анализируется информация о закономерностях протекания тех физических

процессов, под действием которых свойства СМС проявляются наиболее явно. Под действием этих процессов СМС начинает «раскачиваться» благодаря тому, что в ней имеются источники постоянного притока энергии и возникающие неравновесности не устраняются, а наоборот, возрастают, накапливаются и усиливаются, запуская необратимые диссипативные процессы, которые, размывая неоднородности, вызывают переход СМС к новому стационарному состоянию.

Для определения этого состояния можно использовать математическое моделирование (см. рис.1). Однако существующие модели позволяют отображать только те ситуации, которые являются результатом влияния факторов, связанных с действием обобщенных сил. Формируемые при «медленных» движениях механической системы СМС от приводов главного движения и подачи, эти силы взаимодействуют через виртуальный регулятор – процесс резания, который формирует динамику взаимодействия сил за счет внутренних процессов упруго-пластического деформирования, имеющих более сложные нелинейные и нестационарные модели и порождающих «малые» возмущения («быстрые» движения), которые могут быть отображены этими моделями лишь частично как реакции контуров механической системы.

Но даже исследование и получение конкретных результатов моделирования «медленных» движений требуют априорного вычисления упругих, инерционных и диссипативных характеристик механической системы СМС, являющихся параметрами моделей. В свою очередь, параметры зависят от вектора обобщенных сил, определяющих параметры нелинейных связей конструктивных элементов и соответствующие параметры модели. Указанный факт является характерным признаком нелинейности системы.

Существуют экспериментально-аналитические методы вычисления параметров, но изменение вектора обобщенных сил в пространстве и во времени при реализации технологических операций и, особенно, при переходе от одной операции к другой приводит к необходимости многократного вычисления этих параметров даже при управляемых известных движениях инструмента и заготовки. Таким образом, результаты моделирования могут быть получены лишь при постоянстве составляющих вектора обобщенных сил. Однако в связи с тем, что в процессе функционирования СМС изменяются программируемые управляющие воздействия и возмущения, например, из-за изнашивания инструмента, необходимо каждый раз обновлять результаты моделирования при соответствующих изменениях вектора обобщенных сил. Вариации сил могут быть связаны и с особенностями технологических процессов, например, при точении длинных валов или при обработке торцов изменяются точка приложения и параметры обобщенного вектора сил, следовательно, необходимо обновлять полученные ранее характеристики механической системы СМС и

их взаимодействия с другими конструктивными элементами. Таким образом, возникает достаточно трудоемкая задача многократного поиска численных характеристик динамических процессов.

При рассмотрении более тонких процессов формирования обобщенных сил необходимо учитывать упругодиссипативные характеристики, пластическое деформирование и их изменения при резании. Эти процессы на больших отрезках времени приводят к медленным эволюционным изменениям параметров динамической системы СМС. Эффективным средством их исследования является метод усреднения, реализуемый при изучении асимптотических свойств системы. Для проведения усреднения необходимо использовать полученные модели, которые не содержат малых компонент, вызывающих эволюционное изменение. Программируемые и эволюционные изменения могут быть разделены по темпам развития процессов. Эволюционные изменения в динамической системе СМС при резании оцениваются интегрированием вдоль известного решения упрощенной системы [6].

Передаточные функции приводов главного движения и подачи могут быть определены для конкретного состояния СМС. В то же время возникает неопределенность при моделировании динамики движения рабочего органа, в том числе и из-за смещения центра масс и тепловых деформаций, влияющих на точность позиционирования.

Другой, более сложной проблемой является учет упругих и пластических деформаций, а также их запаздывания относительно силы резания [7]. Эти процессы зависят от многих известных факторов (изменяющихся характеристик инструмента и заготовки, режимов обработки и т.д.) и количественно могут быть оценены лишь для их конкретных состояний. Таким образом, эта неопределенность не позволяет реализовать процесс априорного моделирования упруго-пластических деформаций при резании.

Наконец, существует проблема «собственной частоты», которая обычно определяется при значимом увеличении амплитуды колебаний в процессе сканирования частот сигнала в правой части уравнения, моделирующего динамику. Вектор обобщенной силы определяется в некотором диапазоне состояний СМС (приведенная жесткость, зазоры и т.д.); тем самым, изменяются ее резонансная и собственная частоты. Эти частоты тесно связаны между собой основными понятиями, и имеется противоречие: без связи с внешней средой нет возможности определить собственную частоту, но увеличение этой связи приводит к уменьшению точности определения собственной частоты. Математическое же определение понятия собственной частоты опирается на разделение переменных и не предполагает такой связи [6]. В случае же оценивания качества нелинейных динамических процессов при резании это является дополнительной сложностью для распознавания динамических образов.

При дальнейшем анализе следует обратить

внимание на многосвязность вектора управления и возмущений с формируемыми выходными характеристиками СМС. Эта взаимосвязь для всего спектра технологий не имеет аналитического представления и в ряде случаев может быть определена лишь эмпирически.

Статистическое оценивание. Рассматривая и анализируя классические задачи статистического оценивания как способа определения неизвестных характеристик СМС по результатам наблюдений за ее пространственно-временной эволюцией, необходимо сказать, что многие из них практически не реализуемы или имеют низкую эффективность из-за ограничений размерности вектора доступной информации, многотемповых нелинейных изменений элементов вектора состояния, оказывающих взаимное влияние друг на друга, наличия шумов измерения, использования априорной и часто слабо формализуемой информации о виде зависимости изменений состояния от времени, порождающей множество реализаций моделей управления. Поэтому является актуальным оценивание на основе восстановления характеристик качества функционирования СМС по результатам обработки данных, регистрируемых в виде статистических выборок или временных рядов динамики (рис.1), с последующим целенаправленным поиском условий, в которых СМС способна эффективно адаптироваться к допредельным изменениям своего состояния и сохранять, тем самым, целостность структуры.

Обработка данных заключается в их аналитическом или статистическом выравнивании. В случае если данные представляют собой временной ряд (т.е. характеризуют развитие какого-либо процесса во времени), используется аналитическое выравнивание с помощью различных кривых, уравнения которых при соблюдении ряда условий можно применить и для прогнозирования. В случае если данные представляют собой выборку, используется статистическое выравнивание с помощью различных распределений, которые позволяют ответить на вопрос о вероятностях наступления различных событий.

Вопрос о выборе вида кривой или распределения является основным при выравнивании данных, поскольку ошибка в его решении всегда оказывается более значимой по своим последствиям, чем ошибка, связанная со статистическим оцениванием параметров.

Выбор кривой или распределения можно осуществлять различными способами. Однако независимо от того, какой способ будет принят, всегда является целесообразным предварительный анализ содержательной сущности изучаемого процесса с целью раскрытия физического механизма, генерирующего данные, и оценки степени его устойчивости в условиях действия возмущений.

Практически это позволяет сократить число кривых или распределений, которые выступают в качестве альтернативных при непосредственном исследовании данных. Однако для данных,

полученных в процессе исследования или функционирования сложных систем, основа для содержательного анализа часто отсутствует в силу сложности протекающих в них процессов или носит лишь общий (концептуальный) характер.

Кроме этого, СМС, как и большинство сложных систем, относятся к классу так называемых «шумящих», т.е. к системам, в которых выходные данные, характеризующие состояние, являются случайными даже тогда, когда входные данные неслучайны. Это означает, что фиксированным значениям данных на входе СМС практически всегда соответствуют случайные значения данных на выходе, отражающие их неопределенность. Причем степень неопределенности данных тем больше, чем сильнее влияние «шумовых» свойств. В результате обработка выходных данных для решения различных практических задач (прежде всего задач повышения эффективности функционирования) возможна только на основе применения методов, которые позволят решить проблему отображения закономерностей их появления на выходе СМС.

Представленные материалы были положены в основу разработки методов, которые позволяют проводить оценивание и анализ состояния СМС и протекающих в ней процессов, связанных с обнаружением зарождающихся изменений, имеющих место как при нормальном состоянии СМС, так и при развитии в ней дефектов.

Методы анализа данных, представленных временными рядами, позволяют оперативно обнаруживать, оценивать значимость отклонения траектории эволюции состояния СМС от границ области, характеризующей его как нормальное (области работоспособности) и использовать полученную информацию для целей управления. Чем больше отклонение будет незначимым, тем эффективнее были мероприятия, направленные на управление состоянием.

В основу *метода обобщенного критерия* положены перевод траектории эволюции состояния СМС в числовое пространство критерия, более эффективно реагирующего на возникновение напряженных ситуаций, связанных с отклонениями траектории от заданного направления, и непараметрическая процедура «ящик с усами» для ее коррекции, гарантированно обеспечивает стабилизацию не только размерной, но и геометрической точности изготовленных деталей за счет компенсации на основе подналадки не только систематической, но и случайной функциональной составляющих погрешности обработки, возникающих под влиянием процессов средней скорости (износ инструмента и тепловые деформации элементов конструкции СМС) (рис.2).

Метод энтропийного критерия, основанный на оценке целостности СМС (под которой в теории информации понимается количественное выражение того состояния, в котором СМС находится с учетом имеющихся взаимосвязей между ее элементами, но которое не является

состоянием самих элементов, если рассматривать их отдельно друг от друга) и статистическом анализе, позволяет заблаговременно и достоверно обнаруживать момент возникновения разладки процесса функционирования СМС, например, по интегральным показателям вибросигналов о колебаниях, возникающих в динамической системе, с использованием статистики Херста и оценки степени значимости приращения целостности состояния разладки (рис.3).

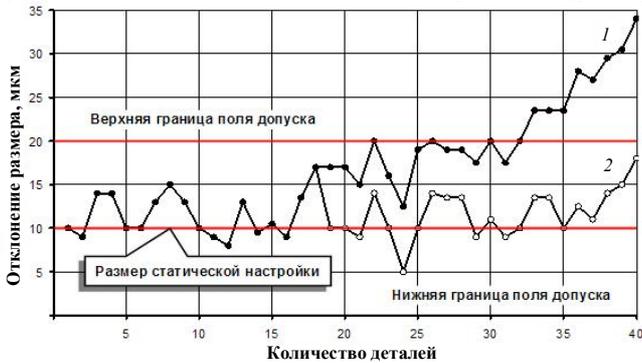


Рис. 2. Точностные диаграммы отклонений размеров деталей, изготовленных без управления (1) и с моделированием управления точностью на основе подладки по методу обобщенного критерия (2)



Рис. 3. Графическая интерпретация решения задачи об идентификации разладки процесса функционирования СМС: разладка наступает при 5-ти выбросах статистики Херста за границы поля допуска

Метод комбинированного критерия, основанный на положении о том, что появление разладки вызывает значимые изменения свойств временного ряда воздействующих на СМС возмущений (а, следовательно, и их дисперсии), вычисления решающей функции и показателя качества ее траектории, а также интеграла функции Грина, отображающей взаимосвязь выходного параметра СМС с входными (возмущениями), позволяет идентифицировать как параметрические, так и функциональные изменения ее состояния (рис.4).

Метод асимптотических критериев, основанный на положении о том, что если состояние СМС в процессе функционирования претерпевает существенные изменения, то траектория эволюции ее состояния будет представлять собой чисто случайные колебания временного ряда значений характеризующих

траекторию выходных параметров (например, отклонений размеров изготовленных деталей), и сопровождаться выбросами за границы допустимых областей их изменения, число которых будет пропорционально интенсивности возмущений (т.е. дисперсии), позволяет определять сроки проведения работ по техническому обслуживанию СМС с целью предотвращения возможностей появления у нее отказов, осуществлять оперативную оценку качества проведенных работ, а также оценивать целесообразность проведения обслуживания в принципе в случае, если дальнейшая эксплуатация СМС перестает быть оправданной экономически (рис.5).

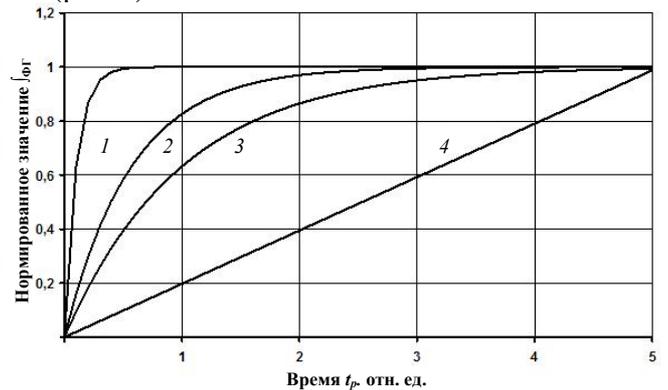


Рис. 4. Реализации процесса сходимости интеграла функции Грина для нормального состояния (1), ситуаций возникновения параметрических (2) и функциональных (3) изменений состояния СМС и возникновения отказа (4)

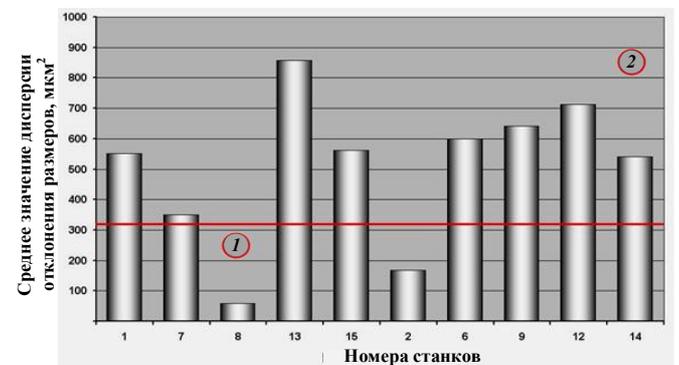


Рис. 5. Результаты оценки состояния автоматических токарных станков методом асимптотических критериев:

1, 2 – области устойчивого функционирования и необходимости проведения капитального ремонта, соответственно

Методы анализа данных, представленных статистическими выборками, позволяют установить закон их распределения. В первом случае (**метод информационного критерия**) для этого вычисляется количество содержащейся в данных о состоянии СМС информации, как меры снятия с них неопределенности (рис.6).

Во втором случае (**метод остаточного критерия**) формируется система условий, связанных с вычислением коэффициентов избы-

точности, ранговой корреляции Спирмэна и непараметрического аналога t -критерия Стьюдента, характеризующих оставшуюся неснятой исходную неопределенность с данными (т.е. точность процедуры их математического описания). С помощью этих методов можно решать задачи, связанные не только с вычислением показателей надежности и эффективности использования СМС в составе автоматизированных комплексов, но и задач управления самими комплексами на организационно-технологическом уровне (оперативно-производственное планирование) и уровне оперативно-диспетчерского регулирования хода производственного процесса (выполнение плановых заданий).

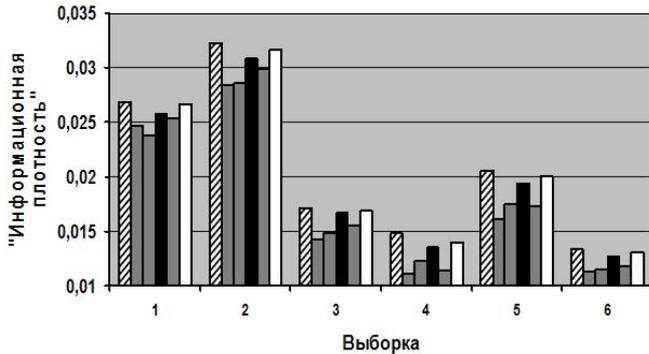


Рис. 6. Результаты идентификации закона распределения данных об отказах СМС:

штрихованные – эмпирическое распределение; белые – распределение Вейбулла (наилучшее, поскольку имеет максимальное значение информационной плотности, т.е. снимает неопределенность с данных в максимальной степени); черные – экспоненциальное распределение; серые – другие распределения

С помощью **метода экстремального критерия**, в основу которого положено моделирование многообразия траекторий, по которым может развиваться эволюция какого-либо случайного процесса, с помощью смешанной дискретной модели авторегрессии со скользящим средним (АРСС-модели) и статистического оценивания его результатов с помощью распределений экстремальных значений типа I или III, были проиллюстрированы возможности прогнозирования состояния основных элементов СМС – шпиндельного узла и режущего инструмента, оказывающих непосредственное влияние не только на параметры точности изготавливаемых деталей, но и на техническое состояние СМС.

Применительно к шпиндельному узлу полученные результаты показали (рис.7), что разработанный метод позволяет более эффективно решать вопросы, во-первых, диагностирования состояния и оценки качества работ по техническому обслуживанию и профилактическим ремонтам существующих шпиндельных узлов на основе анализа круглограмм изготовленных деталей, во-вторых, оценки эффективности технических решений при проектировании новых конструкций, в частности по результатам программных испытаний их опытных образцов.

Применительно к режущему инструменту полученные результаты показали, что разрабо-

танный метод позволяет с погрешностью не более 8 % прогнозировать интервалы времен достижения износом предельного значения (рис.8).

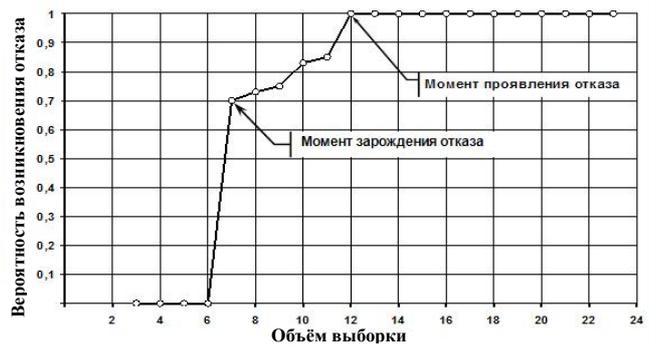
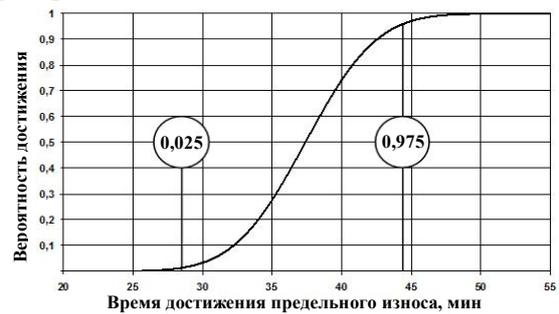
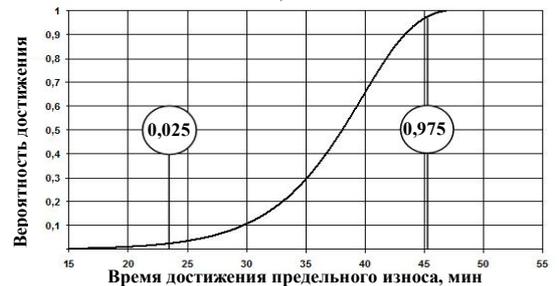


Рис. 7. Результаты прогнозирования параметрического отказа шпиндельного узла методом экстремального критерия



а)



б)

Рис. 8. Результаты идентификации (а) и прогнозирования с помощью метода экстремального критерия (б) распределения и 95% интервала времени достижения предельного износа инструментом из быстрорежущей стали

Результаты практической апробации методов были положены в основу создания алгоритмов обработки и анализа данных, представленных временными рядами и статистическими выборками. Положительным моментом алгоритмов является то, что все их шаги, в том числе принятие решений, выполняются автоматически, что исключает возможность возникновения ошибочных результатов или их неверной интерпретации. В связи с этим алгоритмы могут быть реализованы программно и интегрированы в структуру программно-математического обеспечения как систем управления СМС и систем управления комплексами, в составе которых они эксплуатируются, так и автоматизированных испытательно-диагностических комплексов и автоматизированных систем научных исследований (табл.1).

1. Использование методов на различных этапах жизненного цикла СМС

№	Уровни управления	Решаемые задачи	Источники данных	Метод
Проектирование и изготовление				
1	Программные испытания	1. Отработка и оценка эффективности новых конструктивных решений.	Испытательно-диагностические комплексы и АСНИ	Экстремального и энтропийного критериев
Эксплуатация				
1	Непосредственное управление	1. Диагностическая задача ЧПУ (в режиме тестирования геометрической задачи).	Датчики обратной связи приводов подач по положению (фотоэлектрические, индуктивные, лазерные)	Энтропийного и комбинированного критериев
		2. Технологическая задача ЧПУ (в режиме управления точностью по текущим и выходным данным).	Датчики режимов (сил, температуры, мощности, вибраций, давления), датчики касания, ручное измерение	Обобщенного и экстремального критериев
2	Групповое управление	Мониторинг СМС, входящих в группу (информация о техническом состоянии в режиме фиксации отклонения их параметров от норм).	Данные о контроле точности изготовленных деталей и периодическом контроле состояния	Энтропийного, комбинированного и асимптотических критериев
3	Оперативное управление (в реальном времени)	Пересоставление расписания с учетом складывающейся производственной ситуации.		
4	Организационно-технологическое управление	1. Формирование расписания работы СМС по исходным данным. 2. Выработка рекомендаций о необходимых изменениях исходных данных. 3. Составление графика проведения технического обслуживания СМС.	Данные о контроле точности изготовленных деталей, отказах и продолжительностях проведения ремонтных работ	Асимптотических критериев, экстремального, информационного и остаточного критериев

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бушнев, В.В., Евстафиева, С.В., Молодцов, В.В. Моделирование контуров управления следящего привода подачи // СТИН. – 2016. – №3. – С. 7–14.
2. Рогов, В.А., Чудаков, А.Д. Средства автоматизации производственных систем машиностроения: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 2005. – 399 с.
3. Бушнев, В.В., Кузнецов, А.П., Сабиров, Ф.С., Хомяков, В.С., Молодцов, В.В. Проблемы точности и эффективности современных металлорежущих станков // СТИН. – 2016. – №2. – С. 6–16.
4. Филимонов, Н.Б. Методологический кризис «всепобеждающей математизации» современной теории управления // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2016. – Т.17. – №5. – С. 291–300.
5. Справочник по теории автоматического управления: под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
6. Ханаев, М.М. Асимптотические методы и устойчивость в теории нелинейных колебаний: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1988. – 184 с.
7. Кононов, Д.Е., Легаев, В.П., Генералов, Л.К. Экспериментальные исследования влияния моделируемых корректирующих воздействий на точность токарной обработки на станках с ЧПУ // СТИН. – 2012. – №1. – С.21–23.

REFERENCES

1. Bushuev, V.V., Yevstafieva, S.V., Molodtsov, V.V. *Control Contour Simulation of Feed Servo Drive* // STIN. – 2016. – No. 3. – pp. 7-14.
2. Rogov, V.A., Chudakov, A.D. *Automation Means of Engineering Production Systems: manual*. – M.: Higher School, 2005. – pp. 399.
3. Bushuev, V.V., Kuznetsov, A.P., Sabirov, F.S., Khomyakov, V.S., Molodtsov, V.V. *Problems of Accuracy and Efficiency of Modern Machine-Tools* // STIN. – 2016. – No. 2. – pp. 6-16.
4. Filimonov, N.B. Methodological crisis of “all-conquering mathematization” of modern management theory // *Mechatronics. Automation. Management*. – 2016. – Vol. 17. – No. 5. – pp. 291-300.
5. *Referenced Book on Automated Management Theory: under the editorship of A.A. Krasovsky*. – M.: Science, 1987. – pp. 712.
6. Khanaiev, M.M. *Asymptotic Methods and Stability in Theory of Nonlinear Oscillations: manual*. – M.: Higher School, 1988. – pp. 184.
7. Kononov, D.E., Legaev, V.P., Generalov, L.K. *Experimental Investigations of Modeled Correcting Impacts upon Turning Accuracy on NC Machines* // STIN. – 2012. – No. 1. – pp. 21-23.

Рецензент д.т.н. Н.В. Бекренёв

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбова.

Сдано в набор 10.12.2017. Выход в свет 31.01.2018.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.

Тираж 500 экз. Свободная цена.



Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16