

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 4 (82)

2018

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Шумячер В.М., Славин А.В., Кадильников А.В. Проектирование абразивного инструмента на основе данных автоматизированного мониторинга процесса шлифования 3

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОДГОТОВКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Базров Б.М. Проблема оценки геометрической точности детали 8

Чигиринский Ю.Л. Математические методы в технологическом проектировании 13

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ С ЧПУ И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ

Макаров В.Ф., Никитин С.П. Повышение эффективности профильного глубинного шлифования лопаток турбин на многокоординатных станках с ЧПУ 21

Козлов А.М., Малютин Г.Е. Управление процессом чистовой обработки поверхностей сложной формы на фрезерных станках с ЧПУ 29

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ МЕЖДУНАРОДНЫХ НАУЧНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ И СЕМИНАРОВ

Васильев В.А., Александрова С.В. Управление качеством, подготовка кадров и организация конкурентоспособного высокотехнологичного производства 38

Федонин О.Н., Киричек А.В., Петрешин Д.И. Технологическое повышение эксплуатационных свойств деталей машин 43

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 «Научноёмкие технологии в машиностроении», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

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. БОЧКАРЁВ 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.А. (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

информации ПИ № ФС77-66087 от 10 июня 2016 года

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 4 (82)

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: naukadm@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 OF MACHINING

Shumyacher V.M., Slavin A.V., Kadilnikov A.V. Abrasive tool design based on automated monitoring data of grinding 3

TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATED CONTROL

Bazrov B.M. Problems in estimate of parts geometrical accuracy 8

Tchigirinsky Yu.L. Mathematical methods in technological design 13

PROCESSING ON NC MACHINE TOOLS AND MACHINING CENTERS

Makarov V.F., Nikitin S.P. Efficiency increase in profile deep grinding of turbine blade on NC multi-axes machines 21

Kozlov A.M., Malyutin G.E. Complex surface finishing control on NC milling machines 29

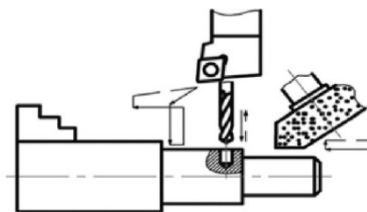
PLENARY REPORTS OF INTERNATIONAL CONFERENCES AND SEMINARS

Vasiliev V.A., Alexandrova S.V. Quality control, staff training and organization of competitive and advanced technology production 38

Fedonin O.N., Kirichek A.V., Petreshin D.I. Technological increase of machinery operation properties 43

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 621.923

DOI: 10.12737/article_5aacd85759b3d2.20343595

В.М. Шумячер, д.т.н.,

(ФГБУ ВО Волгоградский государственный технический университет,
400005, Россия, Волгоград, пр. им. Ленина, 28),

E-mail: vms22@yandex.ru

А.В. Славин, д.т.н.,

(Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов,
105005, Россия, Москва, ул. Радио, д. 17),

E-mail: slavina@viam.ru

А.В. Кадильников, к.т.н.

(ФГБУ ВО Волгоградский государственный технический университет,
400005, Россия, Волгоград, пр. им. Ленина, 28)

E-mail: zakaz@intelectdom.ru

Проектирование абразивного инструмента на основе данных автоматизированного мониторинга процесса шлифования

Описан разработанный, изготовленный и апробированный авторами автоматизированный измерительный комплекс (АИК) «Шлифование», решающий задачу мониторинга процесса шлифования на всех этапах абразивной обработки и дающий возможность осуществления корректировки на всех этапах технологического процесса с учетом свойств абразивного инструмента, смазочно-охлаждающих технологических средств, а также режимов обработки. Принцип работы автоматизированной системы основан на статистическом анализе выходных энергетических параметров работы технологического оборудования.

Ключевые слова: шлифование; диспергирование; удельная энергия диспергирования; структурно-механические свойства.

V.M. Shumyacher, D. Eng.,

(FSBI HE Volgograd State Technical University, 28, Lenin Avenue, Volgograd, Russia 400005)

A.V. Slavin, D. Eng.,

(All-Russian Research Institute of Aircraft Materials, 17, Radio Str., Moscow, Russia 105005)

A.V. Kadilnikov, Can. Eng.

(FSBI HE Volgograd State Technical University, 28, Lenin Avenue, Volgograd, Russia 400005)

Abrasive tool design based on automated monitoring data of grinding

An automated measuring complex (AMC) "Grinding" developed, manufactures and approbated is described, which solves a problem of grinding process monitoring at all stages of abrasion and gives an opportunity to carry out an adjustment at all stages of an engineering process taking into account both the properties of an abrasive tool, cooling engineering mixtures, and also machining modes. The principle of the automated system operation is based on the statistical analysis of output energy data of manufacturing equipment operation.

Keywords: grinding; dispersion; specific energy of dispersion; structural and stress-strain properties.

Повышение качества выпускаемой продукции на предприятиях машиностроительной отрасли связано с постоянным ростом требо-

ваний к точности геометрии и размеров деталей, качеству их рабочих поверхностей.

В этой связи особенно важной проблемой

является повышение эффективности финишных процессов обработки, в ходе реализации которых достигаются заданные параметры деталей машины и механизмов. В отечественной индустрии до 30 % металлообработки осуществляется абразивным инструментом. При производстве подшипников, деталей двигателей, топливной аппаратуры до 70 % составляет абразивная обработка. Как показывает анализ зарубежной практики, объем абразивной обработки достигает более 50 % в технологии производства машин и механизмов.

Отечественными и зарубежными учеными выполнено значительное число исследований в области абразивной обработки, которые позволили сформировать научные основы шлифования, разработать модели управления этими процессами [1].

Вместе с этим отсутствует методология проектирования абразивного инструмента, позволяющая вести целенаправленный выбор характеристик шлифовального круга (твердость, структура, пористость материала, форма абразивных зерен, связки), обеспечивающего требуемые технологические показатели: режущая способность, стойкость, шероховатость абразивной поверхности.

В отсутствии обоснованной методологии проектирования абразивного инструмента с требуемыми показателями потребители вынуждены применять универсальные шлифовальные круги, выпускаемые отечественными предприятиями, которые не позволяют достигнуть нужного результата.

При выборе импортного абразивного инструмента отечественные потребители сталкиваются с серьезной проблемой, сущность которой заключается в том, что ведущие мировые производители практикуют специализацию под конкретную операцию, выполняемую на заданном оборудовании.

Вследствие этого резко возрастают издержки на предприятиях, эксплуатирующих абразивный инструмент, снижается производительность и качество обработки. Предприятия абразивной отрасли при выполнении заказа на выпуск шлифовальных кругов имеют минимум информации об условиях его эксплуатации и ориентируются на рекомендации по изготовлению универсальной продукции.

Попытки производителей шлифовальных кругов наладить их производство на основе результатов стендовых испытаний в значительной степени неуспешны, т.к. расхождение в показателях абразивной обработки в лабораторных и производственных условиях весьма

значительно. Шлифовальный круг является сложной многопараметрической системой, которая взаимодействует с обрабатываемой заготовкой и обеспечивает заданный съем металла, шероховатость поверхности и требуемые физико-механические показатели: микротвердость, износостойкость, виброустойчивость. Согласно существующих представлений основой составляющей абразивного инструмента является абразивный материал, от взаимодействия которого с обрабатываемой поверхностью заготовки зависит эффективность обработки.

Информация о принципах выбора структурно-механических характеристик шлифовального круга: твердость, номер структуры, вид связки носит размытый общий характер.

На основании изложенного можно констатировать, что разработка научных основ проектирования абразивного инструмента с заданными эксплуатационными показателями является важной и актуальной проблемой, требующей решения в короткий срок.

Работы, выполняемые за последние 30 лет позволили получить данные о математическом описании взаимосвязей: характеристики поверхностного слоя круга (ПС) – структурные параметры его матрицы, математических моделей связей: показатели процесса шлифования – характеристика поверхностного слоя круга – параметры структуры матрицы [2]. В работах описана теория взаимодействия абразивных зерен и связки при изготовлении абразивных инструментов.

Предпринята попытка описания основ создания высокоэффективных абразивных инструментов на основе представления физико-химической механики материалов [3, 4].

Разработаны феноменологические модели структурообразования черепка шлифовального круга, установлены закономерности, возникающих при эксплуатации и термообработке инструмента, напряжений и трещинообразования.

Авторами в работе [5] показано, что в зависимости от требований к показателям эксплуатации инструмента должны быть реализованы те или иные структурно-механические характеристики шлифовального круга. Для профильного шлифования деталей топливной, гидравлической, пневматической аппаратуры необходимы шлифовальные круги с высокой твердостью и плотностью, имеющие хорошую кромкостойкость. Заточка лезвийного инструмента реализуется кругами с низкой твердостью и плотностью.

Глубинное шлифование с высокими скоростями реализуется при использовании инструмента с низкой твердостью, но высокопористого и прочного. Доводочные процессы выполняются инструментом с высокой упругостью, прочностью и износостойкостью. Согласно существующим представлениям, формирование структуры абразивного инструмента реализуется на операциях формования и термообработки. При формовании заготовки шлифовального круга наряду с формообразованием абразивной смеси происходит распределение ее составляющих: связки и абразивных зерен, т.е. фиксация структуры. Между частицами дисперсной фазы образуются коагуляционные обратимые контакты, которые под воздействием температуры обжига трансформируются в конденсационные (необратимые). В результате инструмент приобретает окончательные структурно-механические параметры: плотность, прочность, пористость.

На основании проведенного анализа исследований процессов абразивной обработки можно отметить, что реализуемый сегодня технологический подход по выбору рациональных характеристик шлифовального круга, базирующийся на проведении стендовых испытаний в широком диапазоне режимных факторов шлифования образцами, выпускаемыми на основании рекомендаций, не учитывает изменений, происшедших в станкостроении и абразивной промышленности.

На практике, на конкретной операции шлифования при заданных режимах методом перебора инструмента с разными характеристиками, выбирается шлифовальный круг, обеспечивающий требуемые производительность и качество. Вполне очевидно, что данный метод весьма дорогостоящий, а главное не позволяет ответить на запросы производителей абразивного инструмента, которые хотят располагать информацией о требуемых характеристиках шлифовального круга.

Для решения этой проблемы необходимо разработать надежный метод и средства мониторинга процесса шлифования в реальном производстве. Информация, полученная при мониторинге реального процесса, должна позволить назначать требуемые характеристики инструмента, обеспечивающие производительность и качество шлифования.

Нормирование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов является сложной задачей вследствие широкого спектра видов шлифования, реализуемых на различных станках. Для решения задачи мониторинга

процесса шлифования с учетом указанных выше особенностей в Научно-технологическом центре ВНИИАШ авторами был разработан и изготовлен автоматизированный измерительный комплекс (АИК) «Шлифование». Данный комплекс позволяет вести мониторинг процесса шлифования на реальном оборудовании в условиях производства. В качестве показателя, характеризующего работу шлифовального круга, была принята удельная энергия диспергирования, определяемая как отношение затраченной на удаление заданного припуска энергии к его объему. Использование этого показателя доказано многочисленными исследованиями процессов обработки, изнашивания разных материалов [6].

АИК «Шлифование» состоит из датчика тока двигателя привода шлифовального круга, бесконтактных датчиков продольного и поперечного перемещения инструмента. Датчики подключены к контроллеру, который соединен с сенсорной панелью.

Программный комплекс АИК позволяет рассчитывать значения удельной энергии диспергирования E металла за цикл обработки детали с временным шагом 0,01 с и выводить на панель график функции $E = f(t)$, а также износа инструмента.

На рис. 1 представлен вид протоколов исходных данных, выводимых на сенсорную панель.

В результате проведения мониторинга процесса шлифования с помощью АИК «Шлифование» представляется возможным получить информацию о значении удельной энергии диспергирования, характере ее изменения в течение цикла обработки.

Взаимодействия шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью приводит к воздействию на рабочую поверхность инструмента высокочастотных знакопеременных нагрузок. Гетерогенность структуры шлифовального круга является причиной непостоянства его прочности в разных частях рабочей поверхности. Как результат происходит развитие микротрещин в мостиках связки и абразивных зернах.

Период стойкости шлифовального круга между правками обеспечивается соотношением между процессами затупления абразивных зерен и обновления их режущих граней за счет микроскола изношенной части абразива под действием сил шлифования. Абразивный инструмент должен обладать структурой с определенным соотношением прочности абра-

живного зерна и силой его удержания в связке. В связи с этим необходимо обеспечить контроль и управление процессом развития под нагрузкой микротрещин в матрице инструмента и в абразивных зернах.

В рамках кинетической модели разрушение композитов начинается при достижении критического напряжения [7], оцениваемого по зависимости:

$$K_{Ic} = \lambda_1 (1 - \Pi) K_{Ic_0} + \lambda_2 \Pi \sigma \sqrt{d_0} \quad (1)$$

где λ_1 и λ_2 – константы; Π – объемная доля пор в композите; d_0 – средний диаметр пор; K_{Ic_0} и σ – вязкость разрушения и прочность частиц дисперсной фазы (зерен).

Как следует из (1) увеличение вязкости разрушения и прочности абразивных зерен приводит к росту K_{Ic_0} .

В соответствии с ранее разработанной методологией оценки физико-механических характеристик абразивных зерен и значительным объемом экспериментальных данных представляется возможным прогнозировать значения K_{Ic} для материала шлифовальных кругов [8].

Эффективная работа разрушения пористого композита определяется из зависимости [7]:

$$\gamma_F = \gamma_{F_0} \exp(-c\Pi) \quad (2)$$

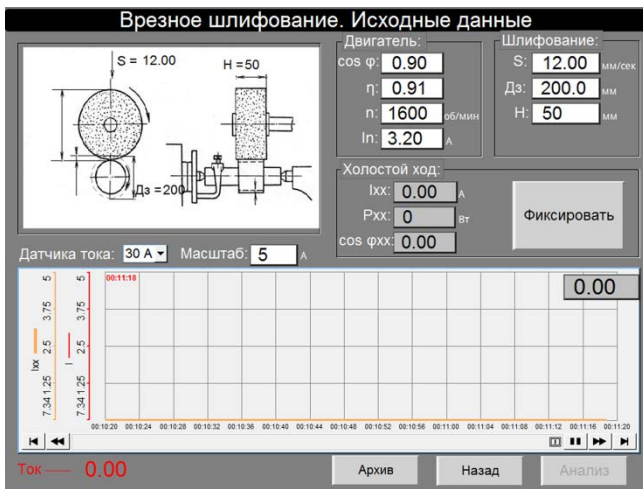
где γ_{F_0} – удельная работа разрушения беспористого тела; c – константа.

В зависимости от структурно-механических характеристик абразивного инструмента: вязкости разрушения, эффективной работы разрушения, прочности связки и абразивного зерна, пористости и размера пор преобладает один из видов разрушения шлифовального круга при его эксплуатации: развитие межзеренных трещин в мостиках связки или контакте ее с абразивом или разрушение самих зерен. Тепло, выделяющееся в контакте «круг – заготовка» передается композиту, что вызывает развитие растягивающих напряжений, а так как коэффициенты термического растяжения (КТР) зерна и связки не равны, в матрице развиваются микротрещины.

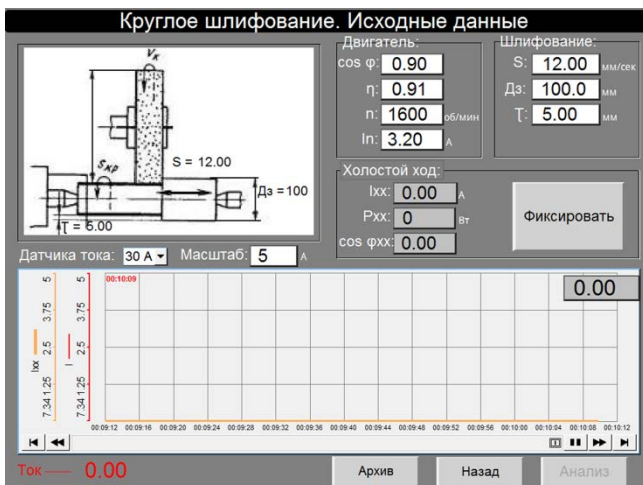
Согласно нашим исследованиям, деформация абразивного круга в пределах дуги контакта с обрабатываемой поверхностью можно рассчитать с помощью зависимости

$$\varepsilon = \frac{3 - \Pi(1 - \Pi)}{36\mu_0(1 - \Pi)^2} \left(\frac{\Pi}{1 - \Pi} + 4 \right) \sigma_z \quad (3)$$

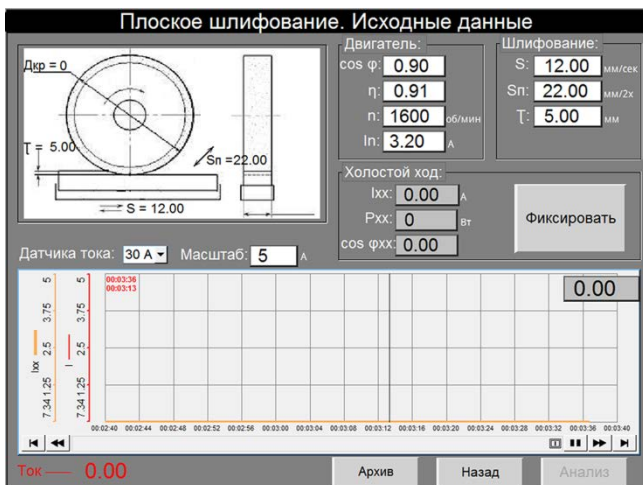
где μ_0 – модуль упругости связки; σ_z – напряжение от действия составляющей силы резания P_z .



а)



б)



в)

Рис. 1. Протоколы исходных данных АИК: а – врезное шлифование; б – круглое шлифование; в – плоское шлифование

Полученные с помощью АИК значения энергии диспергирования металла E и износа круга используются для определения структурно-механических характеристик инструмента: модуля упругости связки, критического коэффициента интенсивности напряжений (1).

Экспериментальная проверка предложенной методологии проектирования шлифовального круга на основе мониторинга процесса шлифования с помощью автоматизированного измерительного комплекса (АИК) была реализована при шлифовании отверстия кольца подшипника из стали ШХ15 кругами:

1.57×63×2025AF80J6V80 м/с,
1.57×63×2025AF80H7V80 м/с,
1.57×63×2025AF80H6V80 м/с.

В результате проведенных испытаний установлено, что не один из испытанных кругов не обеспечивает достижение требуемых качества и производительности.

Обработка данных мониторинга позволила рассчитать структурно-механические характеристики кругов, которые обеспечат требования техпроцесса.

Расчет величины деформации ε (3), эффективной работы разрушения композита (2), коэффициента интенсивности напряжений (1) позволил, используя данные работы [8], рассчитать рецептуру высокоэффективного круга: материал абразивного зерна, зернистость, фракции зернового состава, структуры, твердость, количество и вид порообразователя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Байкалов, А.К. Введение в теорию шлифования материалов. – Киев: Наукова думка, 1978. – 207 с.
2. Курдюков, В.И. Научные основы проектирования, изготовления и эксплуатации абразивного инструмента: дисс.... докт. техн. наук. – Курган, 2000. – 496 с.
3. Курдюков, В.И. Научные основы проектирования абразивных инструментов / В.И. Курдюка. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2005. – 159 с.
4. Носов, Н.В. Повышение эффективности и качества абразивных инструментов путем направленного регулиро-

вания их функциональных показателей: дисс.... докт. техн. наук. – Самара, 1997. – 452 с.

5. Славин, А.В., Шумячер, В.М. Механо-химические процессы взаимодействия абразивного инструмента и заготовки при шлифовании металла // Технология машиностроения. – 2008. – №1. – С.29–32.

6. Поверхностная прочность материалов при трении / Под общ. ред. д-ра техн. наук Б.И. Костецкого. – Киев: Техніка. – 1976. – 285 с.

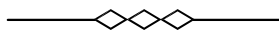
7. Красулин, Ю.Л., Баринов, С.М., Иванов, В.С. Структура и разрушение материалов из порошков тугоплавких соединений. – М.: Наука, 1985. – 146 с.

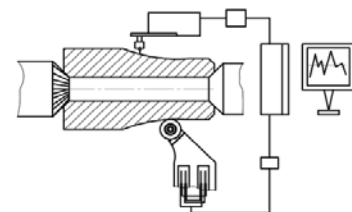
8. Пушкарев, О.И., Шумячер, В.М. Методы и средства контроля физико-механических характеристик абразивных материалов: монография. – Волгоград: ВолгГАСУ. 2004. – 144 с.

REFERENCES

1. Baikalov, A.K. *Introduction to Theory of Material Grinding*. – Kiev: Scientific Thought, 1978. – pp. 207.
2. Kurdyukov, V.I. Scientific fundamentals of design, manufacturing and operation of abrasive tool: *D. Eng. Degree Thesis*. – Kurgan, 2000. – pp. 496.
3. Kurdyukov, V.I. *Scientific Fundamentals of Abrasive Tool Design* / V.I. Kurdyukov. – Kurgan: Publishing House of Kurgan State University, 2005. – pp. 159.
4. Nosov, N.V. Abrasive tools efficiency and quality increase by directed adjustment of their functional indices: *D. Eng. Degree Thesis*. – Samara, 1997. – pp. 452.
5. Slavin, A.V., Shumyacher, V.M. Mechanical and chemical processes of abrasive tool and blank interaction at metal grinding // *Engineering Techniques*. – 2008. – No.1. – pp. 29–32.
6. *Material Surface Strength at Friction* / under the general editorship of B.I. Kostetsky, D. Eng. – Kiev: Technique. – 1976. – pp. 285.
7. Krasulin, Yu.L., Barinov, S.M., Ivanov, V.S. *Structure and Destruction of Refractory Powder Compound Materials*. – M.: Science, 1985. – pp. 146.
8. Pushkaryov, O.I., Shumyacher, V.M. *Methods and Means of Abrasive Physical and Stress-Strain Characteristics Control*: monograph. – Volgograd: VolgaSASU. 2004. – pp. 144.

Рецензент д.т.н. В.А. Носенко





УДК 621.9.06

DOI: 10.12737/article_5aacd85793bdc2.44830790

Б.М. Базров, д.т.н.
(ФГБУН ИМАШ РАН им. Благодравова,
Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д.4)
E-mail: modul_lab@mail.ru

Проблема оценки геометрической точности детали

Приведен анализ метода оценки геометрической точности детали, включая следующие этапы: измерение поверхностей детали, отображение результатов измерения, определение размеров поверхностей и их относительного положения, определение баз отсчета погрешностей и определение погрешностей поверхностей. Показаны недостатки, приводящие к накоплению суммарной погрешности оценки, входящей в противоречие с высокоточными измерительными средствами.

Ключевые слова: точность; погрешность; геометрия; деталь; поверхность; профиль; форма; размер.

B.M. Bazrov, D. Eng.
(Blagoravov FSBIS IMACH RAS, 4, Small Kharitonievsky Lane, Moscow, 101990 Russia)

Problems in estimate of parts geometrical accuracy

The paper reports the analysis of the method for parts geometrical accuracy definition which includes the following stages: part surfaces measurement, a representation of measurement results and their relative position, a definition without errors count and a definition of surface errors. There are shown drawbacks of stages enumerated such as a neglect of measurement base surface errors, an ambiguity of measurement base positions regarding surfaces under control, use of bases of error account and criteria for errors estimate irrespective of surface operation functions.

A multi-gradation of the method for the estimate of a part error resulting in the accumulation of total error is shown.

Keywords: accuracy; error; geometry; part; surface; profile; form; dimension.

Геометрическая точность машин и механизмов является одним из важнейших показателей их качества, где важную роль играет геометрическая точность деталей.

Оценка геометрической точности машин, механизмов, деталей важна для ее достижения при их изготовлении.

Рассмотрим процесс оценки геометрической точности детали.

Надо отметить, что требования к геометрической точности деталей неуклонно растут и уже определяются сотыми долями микрометра и выше.

При оценке точности геометрии детали на этом уровне возникает противоречие между методом оценки точности и средствами измерения геометрии детали, когда погрешности,

вносимые методом, превышают погрешности вносимые средствами измерения.

В связи с этим представляет интерес анализ метода оценки точности детали. Процесс оценки точности детали включает следующие этапы:

- измерение геометрии поверхностей детали;
- графическое отображение результатов измерений геометрии поверхностей;
- определение размеров поверхностей, характеристик формы поверхностей и относительного положения поверхностей;
- определение погрешностей размеров, формы и относительного положения поверхностей детали.

Рассмотрим каждый этап.

Этап 1. Измерение геометрии поверхностей детали осуществляется посредством измерения расстояний точек поверхности относительно измерительной базы. И чем больше число контрольных точек, тем полнее определяется геометрия поверхности.

При этом на погрешность измерения геометрии поверхности влияют погрешности ее форм, выступающих в роли измерительной базы у детали и стола, на котором устанавливается деталь (рис. 1, а) для измерения точек поверхности детали, заданной на чертеже в виде плоскости.

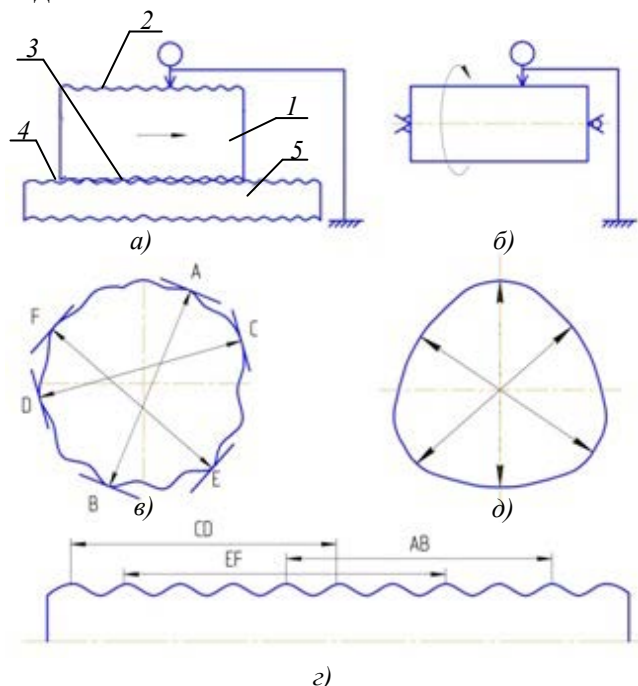


Рис. 1. Схемы измерения поверхностей детали:
 а – реальные поверхности измерительной базы детали и установочной базы стола;
 1 – деталь; 2 – контролируемая поверхность; 3 – измерительная база; 4 – установочная поверхность стола; 5 – стол;
 б – измерение радиус-вектора поверхности вращения;
 в – измерение профиля поперечного сечения цилиндрической поверхности; г – развертка профиля поперечного сечения; д – измерение трёхгранной огранки

При измерении геометрии поверхности вращения применяются два способа: измерение радиус-вектора (рис. 1, б); измерение микрометром расстояния между противоположными точками профиля поперечного сечения (рис. 1, в). Правильным следует признать первый способ.

При втором способе измерения в качестве измерительной базы выступают точки самого профиля. На практике считается, что такая схема измерения обеспечивает измерение диаметрального размера в разных направле-

ниях. В действительности происходит измерение отрезков между двумя противоположными точками, которые в общем случае не пересекаются в одной точке, как это видно на рис. 1, в. В результате происходит непрерывная смена измерительной базы и не происходит измерение геометрии поверхности. Это наглядно видно на рис. 1, г, где показана развертка профиля, на которой представлены отрезки, приведенные на рис. 1, в.

При таком способе измерения возможен случай, когда все отрезки одинаковы по величине и пересекаются в одной точке, в результате чего делается вывод, что формой профиля является круг, а на самом деле это трехгранная огранка (рис. 1, д).

Этап 2. При измерении геометрии поверхностей детали графическое отображение результата представляют в виде отклонений формы поверхностей в увеличенном масштабе.

При отображении результатов измерения геометрии поверхностей вращения возникает искажение реальной формы, получившее название масштабного эффекта.

Установим природу этого явления на примере отображения результатов измерения профиля поперечного сечения цилиндрической поверхности детали на кругломере. Результаты измерения представляются в виде круглограммы.

Круглограмма строится по отклонениям радиус-вектора в увеличенном масштабе, т.е.

$$R_{ki} = (R_{gi} - r) K_m,$$

где R_{ki} – радиус-вектор i точки профиля круглограммы; R_{di} – радиус-вектор i точки профиля детали; r – радиус, вычитаемый из каждого R_{gi} ; K_m – масштабный коэффициент.

При таком построении круглограммы нарушается условие подобия, т.к. из каждого R_{gi} вычитается постоянная величина [1]. Это приводит к тому, что форма профиля на круглограмме не соответствует форме реального профиля детали.

С целью доказательства нарушения условия профиля рассмотрим несколько примеров.

Процесс измерения профиля детали на кругломере начинается с центрирования детали относительно оси вращения измерительного шпинделя до достижения минимальной величины радиального биения.

На рис. 2 показаны две круглограммы профиля детали, имеющие форму круга. В первом случае (рис. 2, а) центр измерения профиля детали совпал с центром круга и потому круг-

лограмма (рис. 2, б) имеет форму круга, т.к. $R_d = \text{const}$. Во втором случае (рис. 2, в) центр измерения не совпал с центром круга и круглограмма имеет форму «кардиоиды» (рис. 2, з).

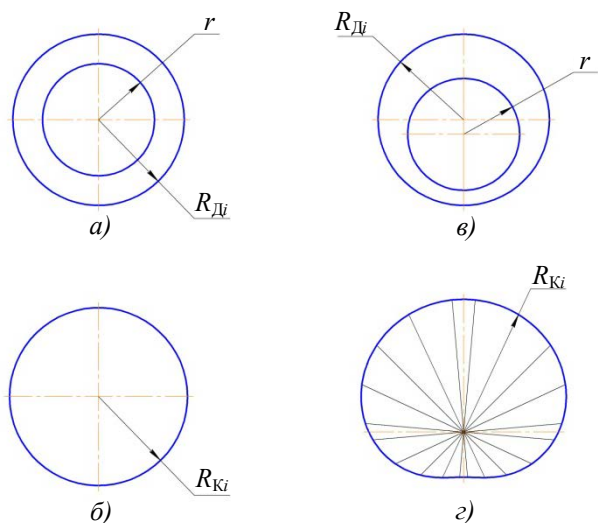


Рис. 2. Круглограммы круга:

а – центр, совпадающий с центром круга; б – в форме круга; в – центр, не совпадающий с центром круга; з – в форме «кардиоиды»

Другой пример: на рис. 3 показаны круглограммы профиля детали, имеющего форму в виде эллипса. На рис. 3, а показан эскиз профиля, имеющего форму эллипса с центром построения круглограммы, совпадающего с центром пересечения осей эллипса, а на рис. 3, б – круглограмма. На рис. 3, в показано положение центра записи круглограммы, несовпадающего с точкой пересечения осей, а на рис. 3, з показана круглограмма. В обоих случаях форма круглограммы имеет вогнутости, в то время как у эллипса форма выпуклая.

В общем случае возможна такая форма профиля детали, у которой может быть несколько центров, относительно которых величина радиального биения одинаково минимальна. В таких случаях круглограммы одной и той же формы профиля детали, записанные от разных центров, будут разными.

Такой же результат может быть получен из-за погрешности центрирования, из-за которой возможно измерение одного и того же профиля от разных центров.

Этап 3. Как отмечалось ранее, геометрическая точность детали характеризуется точностью размеров поверхностей, их формы и относительного положения. Надо отметить, что под размером понимается расстояние между двумя точками поверхности (ей).

Проблема выбора двух точек заключается в том, что, во-первых, размер и форма поверх-

ности неразрывно связаны между собой, отсюда понятие размера относительное и, во-вторых, реальная поверхность детали существенно отличается формой от поверхности заданной на чертеже.

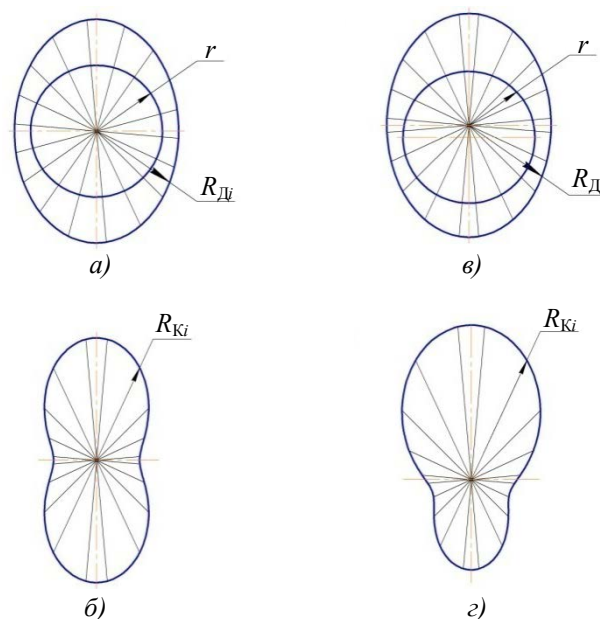


Рис. 3. Круглограммы эллипса:

а – центр, совпадающий с точкой пересечения осей эллипса; б – при совпадении центра с точкой пересечения осей эллипса; в – центр, не совпадающий с точкой пересечения осей эллипса; з – при несовпадении центра с точкой пересечения осей эллипса

Рассмотрим пример определения положения плоской поверхности А относительно плоской поверхности Б заданного чертежом (рис. 4, а), которое описывается величиной угла α и размером между ними.

В этом случае надо установить правила определения размера между плоскостями А и Б. Это может быть, например, максимальный или минимальный размер.

При определении размера между реальными поверхностями А и Б (рис. 4, б) возникает задача построения на них плоскостей для определения угла и размера. Положение этих плоскостей неоднозначно, т.к. на реальных поверхностях можно построить множество плоскостей.

На рис. 4, в показан пример профиля поперечного сечения реальной детали, на котором построены две прилегающие прямые. Так же и относительно профиля поперечного сечения цилиндрической поверхности можно построить множество, например, прилегающих окружностей (рис. 4, з). После построения базы отсчета, например, прилегающих плоскостей, переходят к определению размеров.

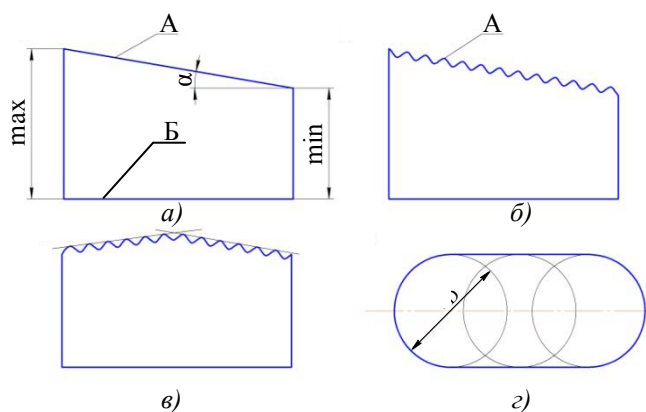


Рис. 4. Схемы определения размеров поверхности детали:

a – плоская поверхность А, заданная на чертеже; *б* – реальная поверхность А; *в* – прямые прилегающие линии поверхности к реальной поверхности; *г* – прилегающие окружности отверстия

Стандартом [2] предлагается единое решение – это построение прилегающей плоскости или цилиндра независимо от служебного назначения поверхностей.

В связи с этим рассмотрим следующий пример.

На рис. 5 показаны три варианта взаимодействия двух деталей.

В первом случае (рис. 5, *a*) деталь 2 совершает возвратно-поступательное движение относительно детали 1. По мере их функционирования неровности будут сглаживаться, поэтому в качестве размеров деталей в данном случае можно принять расстояния между их основаниями и дном впадин неровностей.

Во втором случае (рис. 5, *б*) детали 1 и 2 соединяются, тогда в качестве размеров деталей можно предложить расстояния между средними линиями, проходящими через неровности поверхностей и основаниями деталей.

Если детали 1 и 2 исполняют роль контактов в электрической цепи (рис. 5, *в*), то в качестве размеров деталей следует принять расстояния между основаниями деталей и вершинами неровностей.

Итак, различие процессов, в которых участвуют одни и те же детали требует принимать в качестве размеров детали расстояние между разными точками поверхности (ей).

При определении диаметрального размера у поверхностей вращения, например, цилиндрической поверхности, стандартами России, Британии, Канады применяются разные цилиндры, а в поперечном сечении – разные окружности: прилегающая (описанная, вписанная), средняя, определяемая по сумме наи-

меньших квадратов отклонений точек профиля, две concentric окружности с минимальным расстоянием между ними. Отсюда в общем случае у одного и того же профиля величина диаметра может быть разной.

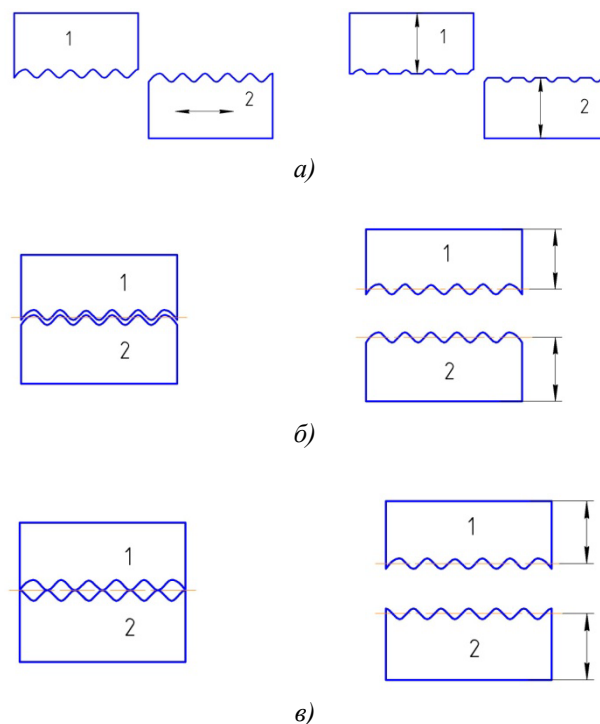


Рис. 5. Простановка размеров деталей 1 и 2 в зависимости от участия их в рабочем процессе:

a – возвратно-поступательное движение детали 2 относительно детали 1 и их размеры; *б* – соединение деталей 1 и 2 и их размеры; *в* – участие деталей 1 и 2 в замыкании–размыкании электрической цепи и их размеры

Общим недостатком перечисленных окружностей является их независимость от служебного назначения поверхности детали.

Из изложенного следует, что размеры поверхности или размеры, определяющие относительное положение поверхности, должны быть разными в зависимости от ее служебного назначения.

Этап 4. При определении погрешности размера поверхности или ее относительного положения измеренная величина размера сравнивается с заданной величиной размера.

Надо отметить, что в зависимости от того, что принимается за размер, у одной и той же поверхности детали или ее относительного положения погрешность размера будет разной.

При определении погрешности формы поверхности за погрешность принимается максимальное отклонение точек поверхностей

от выбранной базы отсчета.

Например, под погрешностью формы профиля поперечного сечения цилиндрической поверхности принимается максимальное отклонение точек профиля от окружности, выбранной в качестве базы отсчета.

Здесь погрешность формы одного и того же профиля будет зависеть от выбранной базы отсчета, например, прилегающей или средней окружности. Выбор базы отсчета должен определяться служебным назначением поверхности.

Другой причиной разной погрешности одной и той же поверхности (профиля) является неоднозначность их положения относительно поверхности, т.е. может быть у одной и той же поверхности несколько, например, прилегающих окружностей с одинаковой величиной диаметрального размера (см. рис. 4, в); также неоднозначно положение средней окружности и двух концентричных.

Выбор критерия оценки погрешности формы поверхности тоже должен определяться ее служебным назначением.

Рассмотрим два профиля поперечного сечения, приведенные на рис.6. Оценка погрешности формы профиля осуществляется одинаково – по максимальному отклонению точек профиля от окружности.

В первом случае (рис. 6, а) максимальное отклонение точек профиля равно Δ_1 , а во втором случае (рис. 6, б) Δ_2 , при этом $\Delta_1 < \Delta_2$. При условии, что Δ_1 равно допуску будет означать, что во втором случае деталь будет бракованной.

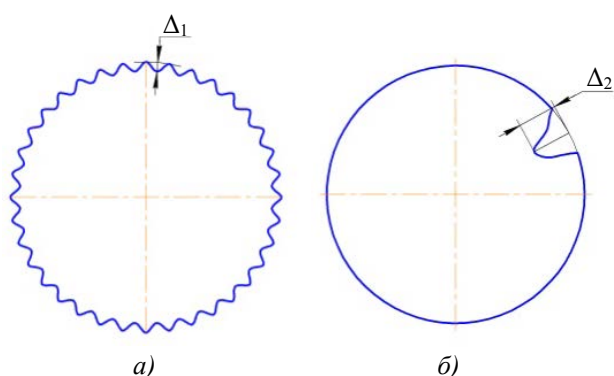


Рис. 6. Профиль поперечного сечения цилиндрической поверхности детали:
а – профиль 1; б – профиль 2

Если в качестве деталей выступают детали плунжерной пары, то требования к точности формы профиля назначаются исходя из допустимой площади зазора впадин, обеспечивающей допустимый объем утечки рабочей среды.

Исходя из этих соображений, первая деталь (см. рис. 6, а) окажется бракованной, а вторая (см. рис. 6, б) – годной, т.к. в этом случае площадь впадин у нее будет меньше.

Из изложенного следует, что метод оценки геометрической точности детали является многоступенчатым, это приводит к накоплению погрешностей измерения, суммарная величина Δ_{Σ} которых определяется из равенства:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_5,$$

где Δ_1 – погрешность измерения геометрии поверхности детали; Δ_2 – погрешность отображения результатов измерения геометрии поверхности; Δ_3 – погрешность выбора базы отсчета размера и формы поверхности; Δ_4 – погрешность построения базы отсчета на реальной поверхности детали; Δ_5 – погрешность выбора критерия оценки отклонения формы погрешности детали.

В некоторых случаях оценка геометрической точности детали осуществляется, минуя непосредственное измерение точности детали.

Например, при сборке плунжерной пары одну из деталей подбирают таким образом, чтобы объем утечки рабочей среды был в пределах допуска.

Недостатком такого способа является отсутствие информации о геометрии детали, что препятствует совершенствованию технологии ее изготовления по снижению погрешности.

Выводы

1. Метод оценки геометрической точности детали является многоступенчатым, что приводит к накоплению погрешности измерения.
2. Совершенствование метода оценки геометрической точности детали должно базироваться на установлении связей между погрешностями геометрии детали и ее служебным назначением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базров, Б.М. Расчет точности машин на ЭВМ. – М.: Машиностроение. 1984. – 256 с.
2. ГОСТ 10356-63 «Отклонение формы и расположения поверхностей. Основные определения. Предельные отклонения». Москва, – 1963.

REFERENCES

1. Bazrov, B.M. *Machine Accuracy Computation*. – M.: Mechanical Engineering. 1984. – pp. 256.
2. RSS 10356-63 “*Deviation of Surface Form and Location. Basic Definitions. Limiting Deviations*”. Moscow, - 1963.

Рецензент д.т.н. В.Г. Митрофанов

Ю.Л. Чигиринский, д.т.н.

(ФГБУ ВО Волгоградский государственный технический университет,
400005, Россия, Волгоград, пр. им. Ленина, 28)

E-mail: julio-tchigirinsky@yandex.ru

Математические методы в технологическом проектировании

На основании анализа задач технологического проектирования показана возможность формализации начальных стадий технологической подготовки металлообрабатывающего производства за счет применения алгебраических структур дискретной математики, методов и алгоритмов теории вероятностей, теории сетей и графов, теории нечетких множеств.

Ключевые слова: технологическое проектирование; обеспечение точности и качества; математические методы; дискретная математика; алгебра логик; теория нечетких множеств.

Yu.L. Tchigirinsky, D. Eng.

(FSBI HE Volgograd State Technical University, 28, Lenin Avenue, Volgograd, Russia, 400005)

Mathematical methods in technological design

On the basis of the analysis of technological design problems there is shown a possibility for the formalization of initial stages of metal-working production technological preparation at the expense of algebraic structures of discrete mathematics, methods and algorithms of the probability theory, the theory of networks and graphs, the theory of fuzzy sets.

Keywords: technological design; accuracy and quality support; mathematical methods; discrete mathematics; logic algebra; theory of fuzzy sets.

Введение

Традиционная [7] последовательность проектирования технологии производства выстроена от формообразования к обработке, затем к сборке и испытаниям. При этом может возникнуть ситуация, когда отдельные этапы общего технологического процесса разрознены и не увязаны между собой и конечной целью. В результате возникает несоответствие между требованиями, предъявляемыми к изделию и реально обеспеченными свойствами. Подход [4], предложенный Б.С. Балакшиным и В.И. Комисаровым – от требований, предъявляемых к технологии общей сборки к требованиям процессов выполнения заготовок для деталей машин, – скрывает в себе угрозу того, что качество новой продукции будет определяться уровнем существующего производства. В результате применения каждого из традиционных подходов к технологическому проектированию возникает определенное несоответствие: либо завышенные, заведомо невыполнимые в условиях действующего производства требования, либо снижение требований в соответствии с возможностями производства.

Возможным решением указанной проблемы может быть сквозное [6] технологическое проектирование. По данному принципу технологии предлагается создавать в зависимости от требуемых свойств изделия, «двигаясь» в обратном направлении: от предусмотренных разработчиком свойств изделия к комплексу технических требований для сборки, далее – к предшествующим процессам обработки, и, в конечном итоге, – к процессам формообразования.

Особенность сквозной технологии состоит в том, что она позволяет решить вопрос сопряжения всех звеньев производства в единый технологический процесс, имеющий одну и ту же конечную цель – требуемые свойства изделия.

Для обеспечения заданного в конструкторской документации выходного свойства продукции необходимо обеспечивать это свойство, начиная с материала и первых процессов изменения его форм. Хотя технология реализуется по традиционной схеме – от формообразования, проектирование должно выполняться по-новому – от эксплуатационных

свойств изделия [5].

Необходимо целостное понимание технологии как единой системы, обладающей общими признаками и, следовательно, общими закономерностями развития. Для реализации принципа сквозной технологии надо уже на ранних стадиях проектирования продукции иметь в виду всю совокупность технологических процессов. При этом отличительными новыми свойствами этой совокупности, являющимися результатом реализации принципа сквозной технологии, будут сопряженность процессов и одна и та же конечная цель.

Такой подход требует, чтобы каждый технологический процесс получил своевременное развитие и имел ко времени начала производства новой продукции необходимые качества, обеспечивающие заданные конструкторской документацией характеристики. Для обеспечения такого развития технологии должны базироваться на двух началах:

- закономерность развития создаваемой продукции;
- внутренние закономерности развития самой технологии (вида технологии).

Множество частных (рис. 1) инженерных задач, к последовательному решению которых сводится деятельность специалиста, можно разделить на две группы. В отдельную группу выделяют задачи, решение которых сводится к выполнению расчетов по формулам – так называемые, формализованные (иногда говорят – рутинные) задачи. Именно для решения формализованных проектных задач были разработаны первые САПР, реализованные на промышленном уровне. К числу рутинных задач относятся расчеты по известным методикам, оформление технической документации, а также поиск информации, необходимой для выполнения процесса проектирования.

Современные инженерные задачи имеют, как правило, ситуационный характер, так как для современного производства характерны высокие темпы развития, глубокие изменения технической базы под влиянием технического прогресса, мобильность, скоротечность процессов и, как следствие этого, быстрая смена ситуаций и обстоятельств, в которых осуществляется производство.

В условиях традиционного проектирования большая часть времени отводится на решение задач, которые условно называют неформализованными – задач, для которых не установлены функциональные соотношения или алгоритмы, позволяющие формально, без привлечения интуиции и опыта инженера, получать

решения, отвечающие техническим требованиям.



Рис. 1. Структура технологического проектирования

В самом общем случае проектная деятельность инженера начинается с концептуального выбора технического решения, и эта задача оказывается наиболее трудной в плане формализации. Следует отметить, что в условиях комплексной автоматизации проектных работ удельная доля рутинных проектных манипуляций может быть существенно (до 70...75 %) увеличена – в первую очередь за счет уменьшения трудоемкости решения неформализованных задач.

Основным преимуществом применения математических методов и информационных технологий на этапе концептуального проектирования является возможность проведения всестороннего экономического и технического

анализа альтернативных решений до окончательного утверждения концептуального проекта.

В то же время, следует учесть, что возникновение ошибок, особенно на начальных стадиях проектирования – на этапе принятия концептуального решения, – приводит к резкому увеличению трудоемкости подготовки производства и, как следствие, к запоздалому запуску изделия в производство. Затраты, возникающие в связи с исправлением ошибок, повторными циклами изготовления, испытания и корректировки опытных образцов ведут к серьезным экономическим потерям. Эти соображения и диктуют необходимость поиска формализованных методов решения задач, возникающих на начальных этапах технологического проектирования.

До последнего времени автоматизация труда инженера базировалась на принципах, преимущественно, геометрического моделирования и компьютерной графики. При этом системы компьютеризации труда конструкторов, технологов, технологов-программистов, инженеров-менеджеров и производственных мастеров развивались автономно и инженерные знания – основа проектирования – оставались вне компьютера.

В настоящее время речь идет о комплексной автоматизации и компьютеризации инженерной деятельности на всех этапах (CALS) жизненного цикла изделий. При использовании CALS-технологий основой проектирования является комплексная информационная [5] модель изделия. В современных и перспективных системах автоматизации инженерного проектирования построение информационных моделей базируется на методах дискретной математики и алгебры множеств.

Математическое обеспечение технологического проектирования

Развитие современного производства основывается на целевом применении к решению производственных задач достижений фундаментальных наук. Ранее [10] было определено, что технологическое проектирование является процессом, рассмотрение (и прогнозирование результатов) которого возможно с позиций экономико-математического моделирования. В частности, вполне оправданным является рассмотрение задач технологии как оптимизационных.

Для большинства задач технологического проектирования можно найти множество «корректных» решений, т.е. решений, удовле-

творяющих системе технических ограничений, и выделить в этом множестве оптимальное решение. Основные требования, определяющие «корректность» [1, 2, 6,10] технологического процесса, заключаются в необходимости достижения заданных требований точности и качества изготавливаемых изделий. В качестве критерия оптимизации мы предлагаем, в соответствии с ранее выполненным анализом проблемы, какой-либо из критериев экономического [3, 10] характера, например, себестоимость обработки.

Традиционно разработку технологического процесса механической обработки рекомендуется [7] вести в следующей последовательности: анализ объекта производства; определение типа производства и предварительный, укрупненный выбор оборудования и оснастки; выбор исходной заготовки; анализ возможных способов формообразования отдельных поверхностей; разработка последовательности обработки поверхностей заготовки; выбор технологических баз; уточнение выбора оборудования; разработка планов выполнения отдельных операций.

В основе проектирования технологии механической обработки лежат проблемы формирования заданного качества деталей. Качество большинства изделий машиностроения, в целом, определяется не столько геометрической точностью отдельных поверхностей, сколько точностью взаимного расположения поверхностей – обеспечиваются, в основном, выбором базовых поверхностей на каждом этапе обработки, – и микрогеометрическими и физико-механическими характеристиками обработанных поверхностей, что определяется технологическими режимами и возможностями методов обработки. Здесь же необходимо учитывать и проблемы, связанные с технологической наследственностью. Отметим, что для решения задач выбора последовательности обработки и последовательности перемены баз можно использовать методы дискретной математики.

Наиболее удачной попыткой формализации связей между последовательностью применения методов обработки отдельных поверхностей и точностными показателями изделия в целом является размерный анализ (Ивашенко И.А., Калачев О.Н., Матвеев В.В., Шамин П.Ю. и др.) технологических процессов, позволяющий представить технологическую последовательность в виде системы линейных уравнений. Вычислительный математический аппарат решения таких систем не отличается

особой сложностью и традиционно изучается в курсе высшей математики технического вуза. Этого нельзя сказать о неформализованной задаче генерации системы уравнений по описанию последовательности обработки.

Если рассматривать проектную документацию – технологический маршрут и комплект операционных эскизов – как структурно-временную таблицу, можно представить систему размерных связей технологического процесса в виде неориентированного графа. Тогда, за счет использования основных понятий дискретной математики, задача автоматической генерации системы размерных цепей может быть сведена к известной «задаче Эйлера» или «задаче о кенигсбергских мостах». Используя любой из алгоритмов поиска Эйлеровых путей в графе, можно проверить наличие связей между границами замыкающих звеньев и, таким образом, получить описание графа в виде системы линейных уравнений.

Аналогичные рассуждения можно применить к проблеме нахождения возможных последовательностей методов обработки, обеспечивающих получение поверхностей детали с заданными точностными показателями. В этом случае анализ таблиц точности обработки позволяет построить «граф обработки поверхности», в котором можно искать либо Эйлеровы пути – все возможные последовательности, либо кратчайший (задав критерий длины каждого ребра графа) маршрут, – оптимальную последовательность. Экономический характер подобных задач определяется выбором критерия оптимизации – выше было отмечено, что в качестве критерия правильности чаще всего применяется величина затрат на производство.

Элементарный маршрут обработки отдельной поверхности устанавливаются, исходя из требований рабочего чертежа и характеристик принятой заготовки. По заданному качеству точности и шероховатости поверхности с учетом размера, массы и формы детали выбирают возможные методы окончательной обработки [9]. Особенности выполнения отдельных операций не позволяют дать заключение о точности обработки по аналогии с другими операциями, так как между ними не бывает всестороннего сходства. В частности, отличаются размеры и форма обрабатываемых заготовок, состояние оборудования, режимы обработки и другие технологические факторы. Хотя таблицы (табл. 1) точности [9] дают только общее представление о возможной точности обработки, они необходимы как справочные дан-

ные при проектировании технологических процессов.

1. Пример таблицы точности обработки

Метод обработки		Параметр шероховатости поверхности Ra , мкм	Квалитет точности
Обтачивание	обдирочное	100...50	17–14
	черновое	50...25	14–12
	получистовое или однократное	12,5...3,2	12–10
	чистовое	6,3...1,6	11–7
	тонкое	0,8...0,4	7–6
Шлифование	предварительное	1,6...0,8	8–7
	чистовое	0,8...0,4	7–6
	тонкое	0,4...0,1	5–3

Для упрощения рассмотрим только два критерия: высоту микронеровностей, как показатель качества обработанной поверхности и номер квалитета – показатель точности обработки. Каждый метод обработки определяется диапазоном достижимых показателей качества и точности. Предельные значения диапазона определяются из соображений экономичности (для нижних границ) или достижимости по технологическим возможностям метода – для верхних.

Так, например, обработку поверхности с шероховатостью Ra 1,6 мкм можно выполнять чистовым точением (верхняя граница диапазона), но вероятность получения заданного качества поверхности будет недостаточно высокой – потребуются, вероятно, некоторое занижение режимов обработки, либо использование инструмента со специальной геометрией – что приведет к неоправданному увеличению затрат на обработку. В то же время, использование метода предварительного шлифования (нижняя граница) позволит гарантированно получить требуемое качество поверхности при минимальных затратах на обработку.

Однако следует признать, что надежность справочных данных недостаточно высока. Исследования [11] подтверждают гипотезу о существенности – до 15...40 %, в зависимости от характера справочных величин, – различий однородных данных, взятых из различных источников. Причина такого расхождения лежит, во-первых, в «отраслевой природе» применяемой справочной литературы и, во-вторых, в достоверности статистических методик, используемых при формировании справочных массивов.

Кроме того, недостаточной следует признать также полноту справочной информации. В частности, только в последнее время проблема технологического обеспечения физико-механических характеристик поверхностного слоя сформулирована как глобальная. Об этом говорится в программных документах Национальной Технологической Инициативы (НТИ) в части описания барьеров рынка TechNET.

Как правило, опыт инженера-технолога позволяет дополнить таблицы точности обработки сведениями о возможностях каждого метода обработки в части повышения качества обрабатываемой поверхности или точности выполняемых размеров. В настоящее время эти показатели методов обработки определяются в зависимости от технологических традиций предприятия, эмпирически, с учетом рекомендаций справочной литературы [9], либо, достаточно часто, при проектировании используется субъективный опыт технолога. И в одном и в другом случае вероятны ошибки технологии, выявление и исправление которых становится возможным на самых последних стадиях технологической подготовки производства.

Для примера рассмотрим технологическую цепочку из двух последовательно выполняемых переходов: чернового и получистового точения наружной цилиндрической поверхности. По данным табл. 1, в результате возможно получение поверхности с высотой микронеровностей (по Ra) от 12,5 до 3,2 мкм.

Сравнивая вероятные значения шероховатости по правилам приближенных (1) вычислений – т.е. так, как рекомендовано выполнять расчеты по справочным исходным данным – получим, что высота микронеровностей обработанной поверхности на последнем переходе может уменьшиться в 2...16 раз (9 ± 7).

$$\delta_{IT}^{\min} = IT_i^{\min} - IT_{i-1}^{\max}; \delta_{IT}^{\max} = IT_i^{\max} - IT_{i-1}^{\min} \text{ или}$$

$$\delta_{Ra}^{\min} = \frac{Ra_i^{\min}}{Ra_{i-1}^{\max}}; \delta_{Ra}^{\max} = \frac{Ra_i^{\max}}{Ra_{i-1}^{\min}}. \quad (1)$$

Однако неформальные – сравнение проведем по отдельности (2) для верхних и для нижних границ диапазона – данные говорят, что в данном случае «улучшение» качества поверхности возможно не более чем в 4...8 раз (6 ± 2).

$$\delta_{IT}^{\min} = IT_i^{\min} - IT_{i-1}^{\min}; \delta_{IT}^{\max} = IT_i^{\max} - IT_{i-1}^{\max} \text{ или}$$

$$\delta_{Ra}^{\min} = \frac{Ra_i^{\min}}{Ra_{i-1}^{\min}}; \delta_{Ra}^{\max} = \frac{Ra_i^{\max}}{Ra_{i-1}^{\max}}. \quad (2)$$

Аналогичные рассуждения в отношении точности выполняемых размеров позволяют получить величину уточнения в пределах 1...3 номеров квалитетов (2 ± 1) против формального значения, находящегося в пределах от -1 (снижение точности) до 5 номеров квалитетов (2 ± 3). Очевидно, статистические данные, определенные с размахом значений, больших номинала, заслуживают некоторого недоверия. Проблеме достоверности справочной информации в части повышения качества/точности изделия в процессе обработки посвящены исследования различных технологических научных школ России.

Предположим, однако, что проблема решена. Статистически достоверные данные о повышении качества поверхности и точности выполняемых размеров (уменьшение номера квалитета точности и относительное снижение высоты микронеровностей обработанной поверхности) для каждого технологического метода получены и обоснованы. Тогда можно дополнить существующие справочные массивы этими сведениями (табл. 2). В этом случае появляется возможность применения математических методов для анализа точности обработки.

Для наглядности модифицированная таблица точности представлена в виде, так называемой, «вероятностной» матрицы (рис. 2), представляющей собой формальное описание (матрицу смежности) графа формирования показателей точности/качества обработки поверхности.

Значения величин изменения показателей качества показаны выше «главной диагонали» вероятностной таблицы. Ниже главной диагонали, симметрично этим значениям, приведены вероятностные оценки достоверности изменения качества. Например (см. рис. 2), снижение высоты микронеровностей при чистовом зенкерованием после получистового в 1,12 раза возможно с вероятностью не более 68 %.

Подобная информационная структура создается для каждого нормируемого (и, соответственно, обеспечиваемого при обработке и контролируемого) показателя точности/качества. Например, если конструктор устанавливает требования в отношении квалитета точности и шероховатости поверхности изделия, то результирующий информационный массив должен содержать два «слоя». Если на рабочем чертеже дополнительно установлена норма в отношении глубины, так называемого,

«дефектного» слоя – то информационный массив, на основании которого проектируется последовательность обработки, должен быть трехслойным. Таким образом, граф обработки,

формально описываемый «многослойной» вероятностной таблицей точности, является многомерным.

2. Пример дополненной таблицы точности обработки

Метод обработки		Шероховатость		Точность	
		Ra, мкм	Улучшение	IT	Улучшение
Обтачивание	черновое	50...25	2	14-12	2...3
	получистовое или однократное	12,5...3,2	4...8	12-10	2
	чистовое	0,8...0,4	2...4	7-6	1...4
Шлифование	тонкое	0,4...0,1	2...4	5-3	2...3



Рис. 2. Элементы слоя вероятностной таблицы точности

Для снижения трудоемкости формализованного решения задач маршрутного проектирования предлагается устанавливать доверительную вероятность, определяющую порог значимости изменения величин технологических показателей для каждой пары методов обработки, смежных в маршруте. Использование доверительной вероятности позволяет перейти от математических операций теории нечетких множеств на многомерных алгебраических структурах (рис. 2, табл. 3) к методам логики «исключенного третьего» (операциям классической алгебры логики) на плоском графе (табл. 4).

Поиск возможных маршрутов, в этом случае, может быть выполнен, например, с помощью известного «Алгоритма Дейкстры».

Сетевая модель обработки позволяет учесть величины затрат (энергетических, временных, материальных) на обработку, которые опреде-

ляются в зависимости от вида выполняемой обработки (так же, как в традиционном проектировании) и в зависимости от всех ранее выполненных и последующих технологических операций. Затраты рассматриваются как весовые показатели дуг сети. Аналогичным образом, в качестве весового показателя можно рассматривать и вероятностную оценку достоверности изменения технологического показателя. Суммарный «вес» дуг сети, составляющих маршрут обработки, представляет собой целевую функцию при нахождении оптимального маршрута.

Таким образом, рассматривая задачи технологического проектирования с точки зрения методов теории графов, классической теории множеств и теории нечетких множеств и классической логики, можно установить соответствие между инженерными задачами, решаемыми на начальных стадиях технологической

подготовки производства и т. наз., содержательными постановками задач дискретной тематики:

- размерный анализ технологического процесса – задача Эйлера;
- расчет оптимальной последовательности обработки – задача о потоке минимальной

- стоимости или задача о кратчайшем пути;
- оперативное планирование производства;
- задача о максимальном потоке или задача перераспределения ресурсов;
- выбор оборудования для условий единичного и серийного производства – задача о назначениях.

3. Пример вероятностной таблицы точности (слой «глубина дефектного слоя»)

Предыдущий переход	Фрезерование торцевой фрезой	Технологический допуск, h_c , мм			Достоверность (%) \ изменение h_c (кратность)								
		min	max	сред	следующий переход								
					1			2			3		
		min	max	сред	min	max	сред	min	max	сред	min	max	сред
1	черновое	0,145	0,445	0,295				3,41	3,96	3,81	9,67	6,85	7,38
2	чистовое	0,043	0,113	0,078	99,99						2,83	1,73	1,94
3	тонкое	0,015	0,065	0,040	0,00			99,12					

4. Описание плоского невзвешенного графа (доверительная вероятность 99,00 %)

Предыдущий переход	Фрезерование торцевой фрезой	Технологический допуск, IT			Следующий переход					
		min	max	сред	Логическая возможность изменения IT					
					1		2		3	
		min	max	сред	min	max	сред	min	max	сред
1	черновое	11,71	13,71	12,71			1		0	
2	чистовое	9,71	11,29	10,50	100,00				1	
3	тонкое	6,83	8,5	7,67	0,00		100,00			
Предыдущий переход	Фрезерование торцевой фрезой	Технологический допуск, Ra , мкм			Логическая возможность изменения Ra					
		min	min	min	Логическая возможность изменения Ra					
					1		2		3	
		min	max	сред	min	max	сред	min	max	сред
1		5,69	19,00	12,35			1		0	
2	5,69	1,64	5,13	3,39	99,99				1	
3	1,64	0,51	1,40	0,96	0,00		99,99			
Предыдущий переход	Фрезерование торцевой фрезой	Технологический допуск, h_c , мм			Логическая возможность изменения h_c					
		min	max	сред	Логическая возможность изменения h_c					
					1		2		3	
		min	max	сред	min	max	сред	min	max	сред
1	черновое	0,145	0,445	0,295			1		0	
2	чистовое	0,043	0,113	0,078	100,00				1	
3	тонкое	0,015	0,065	0,040	0,00		99,12			
Предыдущий переход	Фрезерование торцевой фрезой	Матрица смежности плоского графа (логическая возможность изменения всех технологических показателей)								
		1		2		3				
		min	max	min	max	min	max			
		min	max	min	max	min	max			
1	черновое			1		0				
2	чистовое	99,99				1				
3	тонкое	0,00		99,11						

Таким же образом к методам линейного программирования можно свести задачи расчета оптимальных режимов обработки, расчета межоперационных заделов, синхронизации по времени отдельных операций при проектировании поточного производства и т. д.

Таким же образом к методам линейного программирования можно свести задачи расчета оптимальных режимов обработки, расче-

та межоперационных заделов, синхронизации по времени отдельных операций при проектировании поточного производства и т. д.

Часть задач по обеспечению работоспособности машиностроительного производства следует отнести к задачам организационного характера, таким как, например, организация плановых ремонтов оборудования, занятого в производстве. При постановке оборудования

на плановый, а тем более на внеплановый, ремонт возникает необходимость перераспределения загрузки работающего оборудования. Подобная задача решается и в процессе производственной подготовки – при оснащении технологического процесса основным оборудованием и при проектировании планировок и компоновок производственных помещений.

Выводы

1. Применение сетевых математических моделей в сочетании с методами теории вероятностей, классической теории множеств и логической алгебры и теории нечетких множеств для представления информации о процессе обработки и о «мгновенном» состоянии изделия на каждом этапе производства позволяет использовать алгоритмы дискретной математики для формализации и алгоритмизации некоторых задач технологического проектирования.

2. Наиболее подходящей алгебраической структурой для представления процесса механической обработки является «транспортная сеть», представляющая собой взвешенный ориентированный граф с одним «источком» (заготовка) и одним «стоком». Любой узел сети задается некоторым набором параметров, определяющих состояние изделия в соответствующий момент времени («мгновенное» состояние), – например, характеристиками точности размеров, состояния поверхности и др.

3. В зависимости от математической постановки, методы дискретной математики могут рассматриваться как средство решения инженерных задач обеспечения требований качества и точности изделий и задач организационного и технического проектирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/5141.html> – ЭБС «IPRbooks».
2. Технология машиностроения: в 2 т. / А.И. Кондаков, А.С. Васильев и др.; – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 480 с.
3. Численные методы оптимизации: учеб. пособ. / В.И. Рейзлин. – Томск: Изд-во Нац. исслед. Томского политех. ун-та, 2013. – 105 с.
4. Комиссаров, В.И., Леонтьев, В.И. Точность, производительность и надежность в системе проектирования технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
5. Научные основы управления качеством изделий путем модификации поверхностного слоя материалов / С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев, В.В. Золотарев // Научно-технические технологии на современном этапе развития машино-

строения: сб. науч. тр.: Матер. VIII междунар. науч.-техн. конф. (г. Москва, 19-21 мая 2016 г.) / МАДИ. – Москва, 2016. – С. 201–204.

6. Основы автоматизации технологических процессов и производств : учеб. пособ.: в 2 т. / Г.Б. Евгеньев и др.; под ред. Г.Б. Евгеньева. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015.

7. Р 50-54-93-88: Рекомендации. Классификация, разработка и применение технологических процессов. – М.: Издательство стандартов, 1988.

8. Сафонов, С.В., Григорьев, С.Н. Оптимизация выбора технологических процессов на базе принципа подобия в машиностроении // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2 (41). – С. 37–42.

9. Справочник технолога машиностроителя. В 2 т. Т. 1. / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, А.Г. Косилова, Р. К. Мещеряков; под ред. А.М. Дальского. – 5-е изд. – М.: Машиностроение, 2001. 2003. – 910 с.

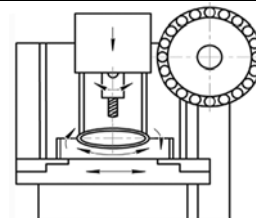
10. Чигиринский, Ю.Л. Математические методы управления процессами механической обработки: монография. – Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 2010. – 139 с.

11. Чигиринский, Ю.Л. Надежность справочных данных, применяемых в технологическом проектировании / Известия ОрелГТУ. Сер. «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – №2-2/274(560). – С. 103–108.

REFERENCES

1. Suslov, A.G. *Parts Surface Engineering* / authors' group under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320. Access mode: <http://www.iprbookshop.ru/5141.html> – EBS «IPRbooks».
2. *Engineering Techniques*: in 2 Vol. / A.I. Kondakov, A.S. Vasiliev et al.; M.: Bauman STU of Moscow, 2016. – pp. 480.
3. *Numerical Methods of Optimization*: manual / V.I. Reizlin. – Tomsk: Publishing House of National Research Polytech. University of Tomsk, 2013. – pp. 105.
4. Komissarov, V.I., Leontiev, V.I. *Accuracy, Productivity and Reliability in System of Engineering Procedure Design*. – M.: Mechanical Engineering, 1985. – pp. 224.
5. Scientific fundamentals of product quality control through modification of material surface layers / S.F. Safonov, V.P. Smolentsev, V.V. Zolotaryov // *Science Intensive Technologies at Current Stage of Mechanical Engineering Development: Proceedings of the VIII-th Inter. Scientif. Tech. Conf.* (Moscow, May 19-21, 2016) / MADI. – Moscow, 2016. – pp. 201-204.
6. *Automation Fundamentals of Engineering Procedures and Productions*: manual: in 2 Vol. / G.B. Yevgenyev et al.; under the editorship of G.B. Yevgenyev. – M.: Publishing House of Bauman STU of Moscow, 2015.
7. R 50-54-93-88: *Recommendations. Classification, Development and Application of Engineering Procedures*. – M.: Standards Publishing House, 1988.
8. Safonov, S.V., Grigoriev, S.N. Optimization of engineering process choice based on principle of similarity in mechanical engineering // *Bulletin of Solovievov State Aircraft Technological Academy*. – 2017. – No.2 (41). – pp. 37-42.
9. *Technologist-Mechanician's Reference Book*. In 2 Vol. Vol.1. / A.M. Dalsky, A.G. Suslov, A.G. Kosilova, R.K. Meshcheryakov; under the editorship of A.M. Dalsky. – 5-th Ed. – M.: Mechanical Engineering, 2001. 2003. – pp. 910.
10. Chigirinsky, Yu.L. *Mathematical Methods of Machining Control*: monograph. – Volgograd: Volgograd State Technical University, 2010. – pp. 139.
11. Chigirinsky, Yu.L. Reliability of reference data used in technological design / *Proceedings of OrelSTU. Series "Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology"*. – 2009. – No.2 – 2/274(560). – pp. 103-108.

Рецензент д.т.н. П.Ю.Бочкарев



УДК 621.92

DOI: 10.12737/article_5aacd857ebb357.07694535

В.Ф. Макаров, д.т.н.,

С.П. Никитин, к.т.н.

(Пермский научный исследовательский политехнический университет,
614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29)

E-mail: makarovv@pstu.ru

Повышение эффективности профильного глубинного шлифования лопаток турбин на многокоординатных станках с ЧПУ

Представлена методика назначения режимов резания при глубинном профильном шлифовании на многокоординатном станке с ЧПУ на основе моделирования термодинамических процессов в зоне резания с целью обеспечения сопротивления усталости лопаток турбин. Приведены математические модели, позволяющие определять прогнозировать динамику упругих, тепловых и рабочих процессов в технологической системе, съем материала, силу резания, температуры в зоне резания и шероховатость каждого элементарного участка профиля поверхности на основе режимов резания, характеристики круга.

Ключевые слова: технология обработки; глубинное шлифование; многокоординатная обработка; динамическая система станка; динамические характеристики.

V.F. Makarov, D. Eng.

S.P. Nikitin, Can. Eng.

(Perm Scientific Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky Avenue, Perm, 614990)

Efficiency increase in profile deep grinding of turbine blade on NC multi-axes machines

The paper reports the procedure of a cutting mode purpose at deep profile grinding on NC multi-axes machines on the basis of the modeling of thermo-dynamic processes in cutting areas with the purpose of ensuring turbine blade fatigue resistance. There are shown simulators allowing the definition and prediction of the dynamics of elastic, thermal and working processes in a technological system, material removal, cutting force, temperatures in the area of cutting and roughness of each elementary area of the surface profile on the basis of cutting modes, disk characteristics.

Keywords: processing technology; deep grinding; multi-axes processing; machine dynamic system; dynamic characteristics.

Одними из самых ответственных, сложных и трудоемких деталей газотурбинного двигателя (ГТД) являются лопатки турбины, которые во многом определяют эффективность работы и долговечность всего двигателя. Лопатки турбин газотурбинных двигателей должны сохранять работоспособность в условиях действия высоких температур (до 1400 °С) и знакопеременных нагрузок. Поэтому в ТУ лопаток турбин ГТД гражданской авиации включено требование по сопротивлению усталости и введен обязательный контроль лопаток на сопротивление усталости по хвостови-

ку (предел выносливости σ_{-1} до 110...140 МПа).

Лопатки имеют сложную пространственную форму (рис.1).

В качестве заготовок используют современные жаропрочные литейные сплавы на никелевой основе (ЖС6У-ВИ, ЖС26, ЖС32, ЧС70 и др.) в виде литых заготовок с направленной кристаллизацией с оставляемым припуском под механическую обработку 1...8 мм. Жаропрочные сплавы отличаются сложным химическим составом (до 20 химических элементов), большим содержанием тугоплавких

материалов (вольфрам до 12 %, молибден до 2,5 %) и наличием карбидов, нитридов и др., отличающихся повышенной твердостью. При изготовлении должна быть обеспечена точность взаимного положения лопаток, прочность их закрепления и долговечность. Базовые поверхности лопатки ГТД имеют жесткие требования по размерной точности и показателям качества поверхностного слоя: отклонения по шагу зубьев хвостовика в пределах 0,02...0,005 мм; угловые параметры на уровне 20...30'; допуски на радиусы составляют 0,05...0,1 мм; параметр шероховатости – Ra 0,63...2,5 мкм; допуски на взаимное расположение поверхностей на уровне 0,01 мм.

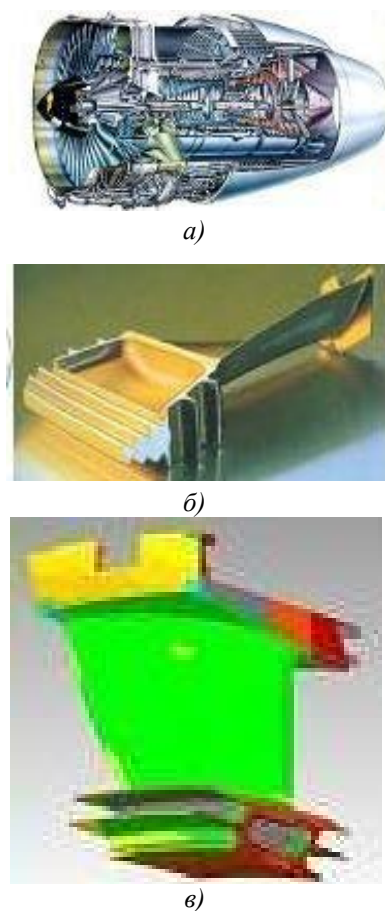


Рис. 1. Общий вид:
 а – газотурбинного двигателя; б – рабочей лопатки;
 в – сопловой лопатки

Для обеспечения данных требований используют механическую обработку. Механическая обработка этих сплавов связана с большой трудоемкостью из-за высокой прочности σ_b , низкой теплопроводности λ и плохой обрабатываемости. Поэтому для окончательной обработки опорных поверхностей рабочих и сопловых лопаток турбин ГТД применяется, главным образом, глубинное шлифование [1, 2]. Для повышения точности, гиб-

кости и производительности обработка осуществляется на многокоординатных обрабатывающих центрах с ЧПУ. При этом возникают проблемы с размерной точностью сложного профиля лопатки, а также с дефектами поверхностного слоя в виде прижогов и трещинообразования на ряде поверхностей [1 – 3]. После усталостных испытаний лопаток в поверхностном слое елочных замков фиксируются трещины, которые направлены перпендикулярно или под некоторым углом (30°) вглубь металла (рис. 2). Протяженность этих трещин достигает 9...12 мм, а глубина составляет 0,1...0,4 мм.

Для обеспечения заданной размерной точности, качества поверхностного слоя и сопротивления усталости лопаток ГТД при обработке приходится реализовывать множество проходов [1], что снижает производительность глубинного шлифования.

На сегодняшний день удалось решить целый ряд научных и производственных проблем глубинного шлифования. Это позволило внедрить на предприятиях авиационной промышленности для обработки замковых и базовых поверхностей турбинных лопаток профильное глубинное шлифование на специализированных многокоординатных станках с ЧПУ с использованием высокопористых кругов [2].

Однако полноценной реализации потенциальных возможностей процесса профильного глубинного шлифования на многокоординатных станках с ЧПУ мешает недостаточная изученность условий резания при одновременном формировании различных участков сложной обрабатываемой поверхности, недостаточный уровень теоретических исследований, моделирования и назначения научно-обоснованных режимов профильного глубинного шлифования.

В настоящее время отсутствуют рекомендации по выбору обоснованных режимов обработки сложных поверхностей методом глубинного шлифования на многокоординатных станках с ЧПУ, обеспечивающих заданные показатели качества поверхностного слоя и сопротивление усталости турбинных лопаток. Отсутствует методика прогноза результатов обработки и назначения научно-обоснованных режимов профильного глубинного шлифования при технологической подготовке производства; нет обобщенного представления процесса профильного глубинного шлифования поверхностей сложного профиля, включающего в себя взаимодействие упругих механических и тепловых процессов в зоне резания.

Отсутствует комплексная термодинамическая модель процесса глубинного шлифования, позволяющая оценить влияние режимов обработки на параметры процесса (съем, силы, температура, тепловые потоки), качество поверхностного слоя и эксплуатационные показатели детали (сопротивление усталости).

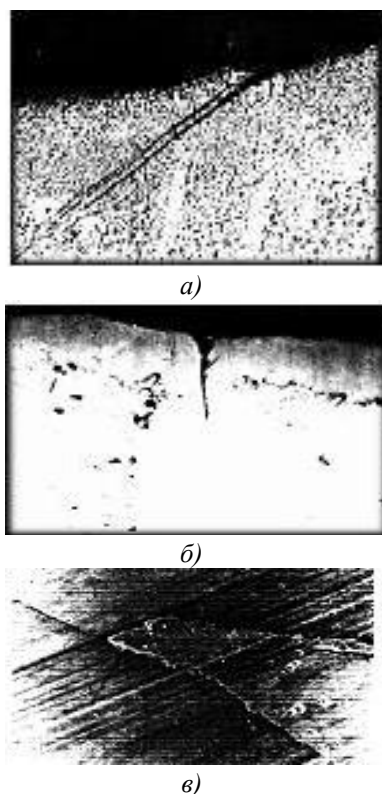


Рис. 2. Микрошлифы усталостных трещин:
a – трещина под углом 30°; *б* – трещина под углом 90°;
в – характер излома трещины

В данной работе предлагается методика технологического обеспечения повышения качества и сопротивления усталости деталей ГТД путем выбора режимов и характеристики профильных кругов при профильном глубинном шлифовании на многокоординатных станках с ЧПУ путем выделения элементарных участков обрабатываемой поверхности и прогноза качества их обработки по математической модели, отображающей термодинамические процессы в зоне резания.

При этом профильное глубинное шлифование на многокоординатных станках с ЧПУ рассматривается с учетом его системных особенностей, таких как: различная фактическая кинематика процесса, переменность контакта инструмента и заготовки, переменность скорости и силы резания, припусков обработки. В рамках исследований процесса формообразования рассматриваются объекты пространства технологического взаимодействия: станок,

приспособление, заготовка, инструмент и процесс резания. Взаимодействие объектов в математической модели отражается в виде связей – геометрических, силовых, упругих, тепловых и др. Для математического описания взаимодействия объектов и связей между ними использован метод элементарных участков поверхности (МЭУП). МЭУП связан с первоначальным разделением обрабатываемой сложной поверхности на элементарные участки, которые отличаются условиями формообразования и последующей разработкой математической модели процесса шлифования для каждого элементарного участка [7, 8].

Обеспечение эксплуатационных характеристик детали и заданных показателей качества поверхностного слоя обрабатываемого профиля возможно при оптимальных значениях параметров процесса шлифования каждого из элементарных участков обрабатываемой поверхности на основе выбора рациональных режимов резания и структуры шлифовального круга на основе прогнозирования параметров обработки по математической модели термодинамических процессов в зоне обработки [8].

Методика назначения рациональных режимов глубинного шлифования поверхностей сложного профиля, обеспечивающая заданную производительность, качество, надежность и долговечность, должна включать 5 этапов (рис. 3).

При разделении процесса формообразования при профильном глубинном шлифовании лопаток ГТД необходимо руководствоваться следующими принципами:

- Обработку сложных поверхностей лопаток представить как композицию элементарных поверхностей профиля, отличающихся схемами формообразования и шлифования.

- Выделяют несколько видов поверхностей, которые определяют форму базовых элементов лопаток: плоские, цилиндрические, кольцевые поверхности и их комбинации, к которым предъявляются заданные требования по точности расположения и качеству поверхностного слоя. Для каждого вида поверхности используют свои схемы шлифования для формирования образующих и направляющих линий формообразования. Поэтому для классификации целесообразно использовать движения формообразования (рис. 4).

- Для большинства схем глубинного шлифования образующая линия получается методом копирования профиля шлифовального круга.



Рис. 3. Этапы назначения рациональных режимов глубинного шлифования поверхностей сложного профиля

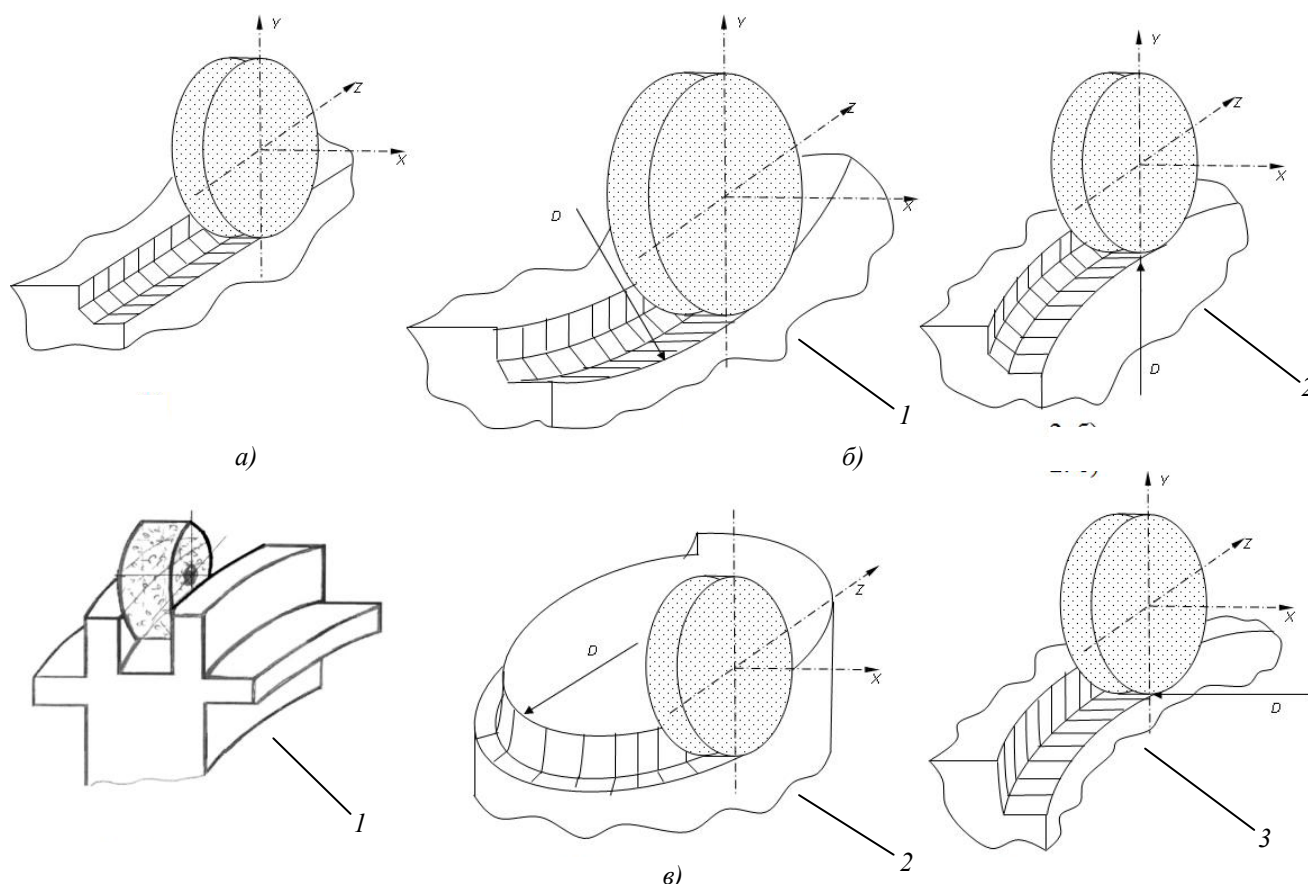


Рис. 4. Схема формообразования плоских поверхностей (а); схема формообразования цилиндрических поверхностей (б);

1 – внутреннее цилиндрическое шлифование; 2 – наружное цилиндрическое шлифование; **схема формообразования кольцевых поверхностей (в):** 1 – схема шлифования кольцевой канавки торцевой поверхностью круга; 2 – формирование внутренней поверхности кольцевой канавки; 3 – формирование внутренней поверхности кольцевой канавки

• Любой сложный профиль можно представить как композицию элементарных участков профиля и простых схем шлифования: 1) прямая образующая линия, производимая периферией круга; 2) прямая образующая линия, производимая торцом круга; 3) прямая образующая линия, производимая наклонной

поверхностью круга.

• Направляющая линия формообразования определяется схемой шлифования: 1) плоское шлифование; 2) внутреннее и наружное цилиндрическое шлифование; 3) шлифование внутренней и наружной поверхности кольцевой канавки торцевой поверхностью круга и др.

Замена реального профиля совокупностью элементарных участков профиля позволит с достаточной точностью выявить различия сил резания, действующих на зерно; упругих и динамических деформаций; величин съема; температур в зоне резания при моделировании процесса глубинного шлифования.

Для каждого элементарного участка поверхности должна быть известна математическая модель кинематики контакта круга и заготовки, определяющая зависимость площади контакта (l, b) от режимов резания (t, S, v) в динамическом режиме [4].

Для процесса формообразования каждого элементарного участка поверхности разрабатывается математическая модель (этап 2). Для адекватного описания глубинного шлифования в математической модели необходимо учесть динамику технологического оборудования, рабочего процесса и тепловых процессов в зоне резания (рис. 5).

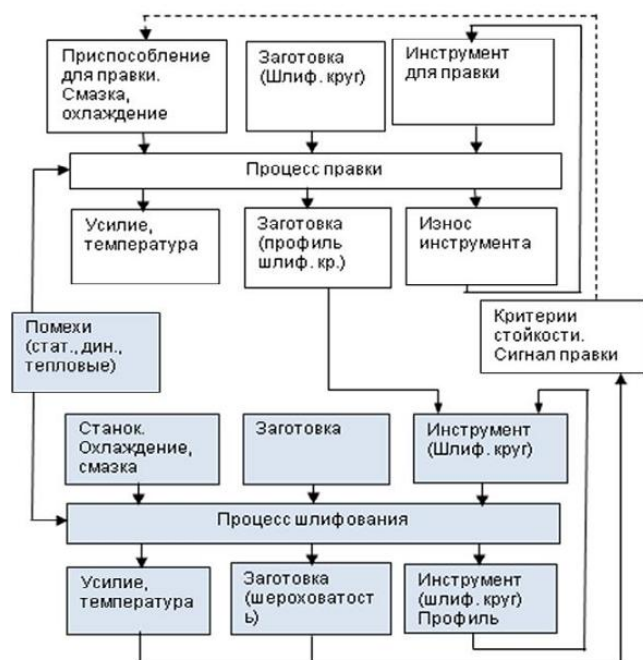


Рис. 5. Динамическая система «станок–заготовка–инструмент» с процессом шлифования и правки (по W. Dietrich)

В данной работе для исследований использована математическая модель технологической системы шлифовального станка, учитывающая взаимодействие упругих, тепловых явлений и процесса резания [5, 6]. Одновременное отображение тепловых и механических процессов вызывает большие сложности, поэтому для построения математической модели предлагается использовать метод прямой аналогии (МПА) [5]. МПА включает в себя:

выявление физических подсистем; разработку расчетной схемы; выделение существенных физических явлений и построение механической цепи для каждой подсистемы; переход от механической цепи к эквивалентной схеме; объединение эквивалентных схем подсистем в единую систему; составление уравнений по единой эквивалентной схеме.

Расчетная схема технологической системы процесса глубинного шлифования представлена на рис. 6: упругая система станка, рабочий процесс, тепловые процессы в зоне резания.

Модель упругой системы станка представлена в виде отдельных сосредоточенных масс, соединенных жесткостями и обладающих определенным демпфированием колебаний. Для сокращения числа степеней свободы и упрощения модели некоторые связи между соседними элементами принимаются абсолютно жесткими, если ожидаемое перемещение по соответствующим координатам мало влияет на относительные смещения шлифовального круга и стола.

Модель рабочего процесса. Шлифование представлено как процесс пластического деформирования и разрушения материалов детали и круга (рис. 7).

Математическая модель подсистемы процесса шлифования представляет собой передаточную функцию апериодического звена. Математическая модель учитывает, что изменения условий обработки (подача, ширина круга, зернистость и т.д.) влияют на силы резания через изменение фактического, а не номинального сечения срезаемого слоя. При этом процессы микрорезания зерен, находящихся в контакте с заготовкой, представлены в следующем виде:

$$P + T_p P = h_{px} x + k_{py} y + h_{py} y + k_{pz} z + h_{pz} z,$$

где k_{px}, k_{py} – коэффициенты резания по осям x, y ; h_{px}, h_{py}, h_{pz} – коэффициенты демпфирования по координатам x, y, z .

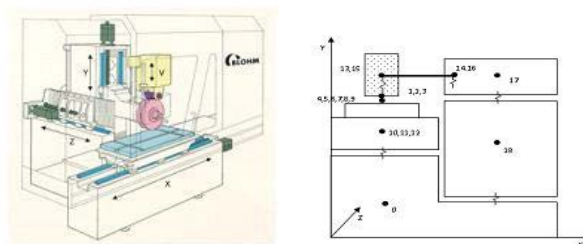


Рис. 6. Компонировка станка и расчетная схема глубинного шлифования

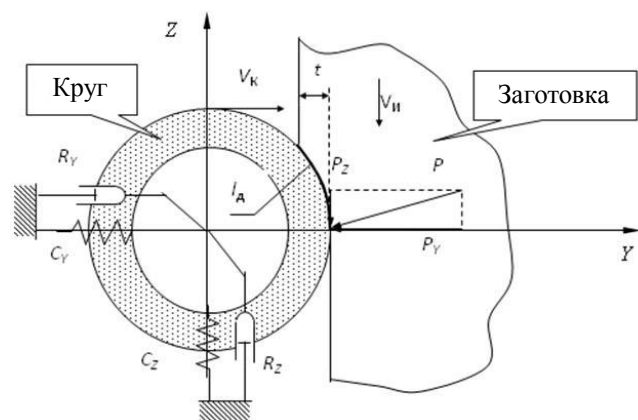


Рис. 7. Схема контакта шлифовального круга с заготовкой

Модель тепловых процессов. Абразивные и алмазные круги, применяемые при шлифовании, являются инструментами со стохастическим (вероятностным) расположением множества элементарных режущих зерен. В месте расположения каждого из зерен с материалом заготовки выделяется теплота, возникающая в процессе срезания отдельной стружки. Расположение этих локальных источников тепловыделения на поверхности контакта между заготовкой и кругом в связи со стохастическим размещением зерен непрерывно меняется во времени. Это приводит к выравниванию температур на всей контактной поверхности заготовки. Выравниванию температур содействует также явление самозатачивания. Эти особенности процесса шлифования позволяют при отображении тепловых процессов ориентироваться на схематизированное зерно с некоторыми усредненными геометрическими параметрами и условиями работы (рис. 8).

Математическая модель тепловых потоков в зоне резания эквивалентного зерна определяет температуры в характерных точках зоны резания: стружка, точка контакта стружки с передней поверхностью зерна, режущее зерно, точка контакта зерна с заготовкой, поверхность заготовки. Потоки тепла между ними определяются соответствующими сопротивлениями. В соответствии с методом МПА, полученные математические модели подсистем объединяются в единую эквивалентную схему с помощью установления связей между ними [5].

Используя методы анализа электрических схем, на основе эквивалентной схемы строится математическая модель в виде дифференциальных уравнений. Далее, используя преобразование Лапласа и переходя в область изображений, получаем математическую модель

в виде структурной схемы, которая отражает динамику упругих и тепловых процессов при шлифовании [7].

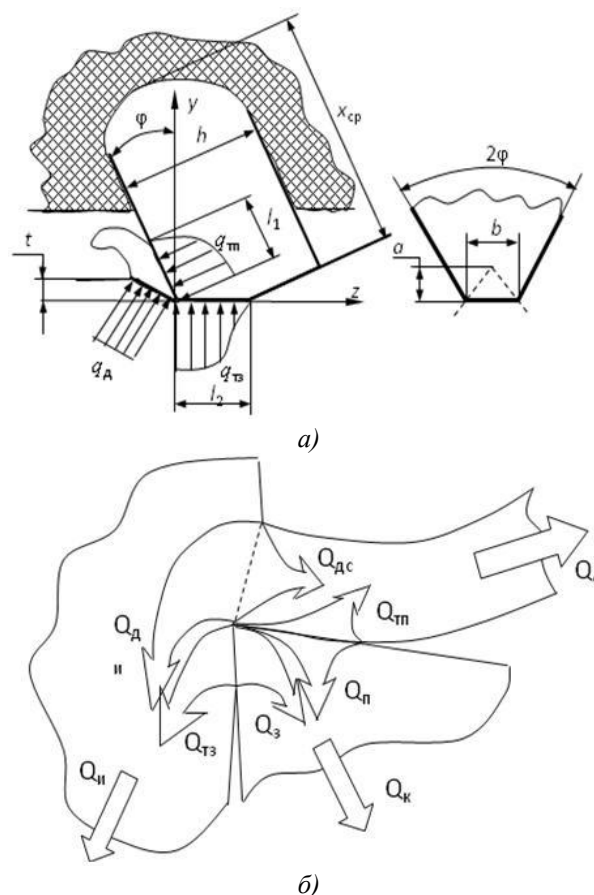


Рис. 8. Режущий выступ зерна и расположение источников тепловыделения (а); схема движения тепловых потоков при шлифовании (б)

Полученные математические модели использовались для исследования процессов глубинного шлифования с помощью оригинальной компьютерной программы PAN.

Математическая модель позволяет в установленном режиме определить силы резания, смещения круга и заготовки в начале резания, температуры в характерных точках и тепловые потоки в зоне резания при заданных исходных режимах резания. По математическим моделям было исследовано поведение термодинамической системы шлифовального станка при переходных процессах и вынужденных колебаниях.

Для обеспечения заданной размерной точности, качества поверхностного слоя, сопротивления усталости лопаток ГТД и максимальной производительности при глубинном шлифовании на многокоординатном станке с ЧПУ необходимо минимизировать количество проходов. Это достигается назначением научно обоснованных режимов резания и ха-

характеристики шлифовального круга при технологической подготовке производства. Для этого нужно спрогнозировать качество каждого из элементарных участков обрабатываемой поверхности при выбранных режимах резания и характеристики круга на основе математического моделирования термодинамических процессов в зоне резания.

При назначении режимов глубинного шлифования лопаток ГТА следует использовать следующие критерии:

- на этапах промежуточных проходов исходить из максимальной производительности процесса обработки (увеличивая фактическую глубину резания), при равенстве параметров шлифования для всех элементарных участков обрабатываемой поверхности (сила резания, величина съема, тепловые потоки и температура в зоне резания), обеспечивающих удаление поврежденного слоя при последующих

проходах.

- на заключительном проходе необходимо задавать режимы резания по критическому элементарному участку обрабатываемой поверхности для обеспечения заданных показателей качества поверхностного слоя и заданные эксплуатационные показатели детали (минимизация погрешности, величины разрушенного слоя, шероховатости, наклепа, остаточных напряжений и предела выносливости).

Последовательность действий по обеспечению сопротивления усталости и качества поверхностного слоя при глубинном профильном шлифовании лопаток ГТД представлена в виде алгоритма назначения режимов глубинного шлифования для каждого прохода на основе моделирования процесса обработки и выделения критического элементарного участка поверхности (рис. 9).

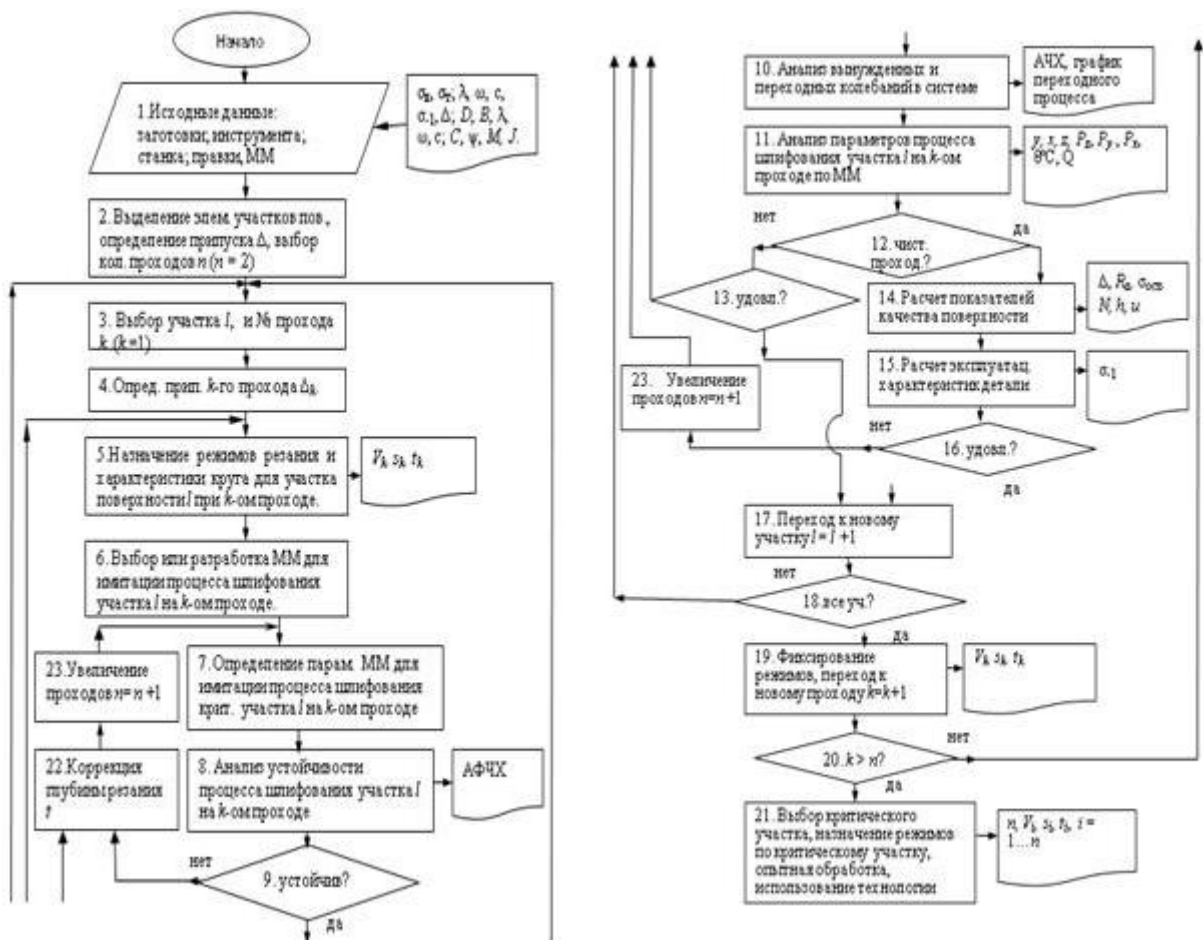


Рис. 9. Алгоритм назначения режимов глубинного шлифования

Первоначально разрабатывается предварительная операционная технология обработки контура сложного профиля на многокоординатном станке с ЧПУ на основе традицион-

ных, сложившихся методик и имеющегося опыта.

Для прогноза устойчивости процесса и показателей качества поверхностного слоя ис-

пользуется математическая модель термодинамической системы глубинного профильного шлифования, которая учитывает динамику механических, тепловых и рабочих процессов при обработке каждой из элементарных поверхностей сложного профиля [5, 6].

В условиях неустойчивости выполнение обработки или достижение заданных параметров качества невозможно, поэтому требуется корректировка исходной технологии [6]. Для преодоления этой проблемы можно снизить глубину шлифования и производить обработку за несколько проходов, что снижает производительность и эффективность глубинного шлифования. Математическое моделирование позволяет добиться устойчивости процесса глубинного шлифования за счет изменения других параметров обработки, в том числе конструктивных параметров технологической системы, при сохранении максимально возможной производительности. Для выявления уровня устойчивости процесса глубинного шлифования при разных режимах шлифования необходимо использовать расчетные АФЧХ и критерий Найквиста.

После корректировки технологии необходимо уточнить математическую модель и заново проверить систему на устойчивость. При обеспечении устойчивости процесса необходимо на основе математической модели получить статические и динамические характеристики, которые будут определять взаимные смещения шлифовального круга и заготовки, текущую глубину резания, колебания силы шлифования и температур в зоне резания [7, 8].

На основе полученной информации можно выделить лимитирующие участки обрабатываемой поверхности, по которым необходимо задать режимы резания и характеристику круга для осуществления операции профильного глубинного шлифования. При необходимости после глубинного шлифования вводится операция поверхностно-пластического деформирования (ПДД) отдельных участков или всей обрабатываемой поверхности.

Выводы

1. Разработана методология выбора режимов резания и характеристики круга при профильном глубинном шлифовании на основе выявления критического участка сложной поверхности и прогноза выходных параметров процесса обработки с целью обеспечения заданных показателей качества поверхностного слоя и эксплуатационных показателей детали;

2. Изложена методика разработки расчетной схемы и задания параметров реального формообразования при реализации профильного глубинного шлифования на многокоординатных станках с ЧПУ на основе классификации поверхностей и дифференциации исходного профиля на элементарные участки поверхности.

3. Предложен и научно обоснован метод представления профильного глубинного шлифования на многокоординатных станках с ЧПУ в виде взаимосвязанных процессов динамического формообразования: упругих динамических колебаний и тепловых процессов в технологической системе;

4. Разработаны математические модели для определения геометрических, силовых, упругих и тепловых характеристик в зоне резания с учетом вариации режимов резания и характеристики шлифовального круга, условий обработки каждого из элементарных участков поверхности сложного профиля.

5. На основе разработанных моделей создан программный комплекс профильного глубинного шлифования на многокоординатных станках с ЧПУ для прогнозирования результатов формообразования и выбора управляющих параметров, предложен алгоритм расчета на ЭВМ для формализации разнородных процессов глубинного шлифования на основе метода прямой аналогии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Макаров, В.Ф.** Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов: учеб. пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 320 с.
2. **Старков, В.К.** Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
3. **Полетаев, В.А., Волков, Д.И.** Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2009. – 272 с.
4. **Новоселов, Ю.К.** Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1972. – 232 с.
5. **Никитин, С.П.** Моделирование процесса резания при шлифовании с учетом взаимодействия упругой и тепловой систем // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т.12. – №4(33). – С. 61–65.
6. **Никитин, С.П.** Теоретическое исследование устойчивости при обработке шлифованием // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17. – №8(61). – С. 38–44.
7. **Макаров, В.Ф., Никитин, С.П.** Влияние условий формообразования на качество поверхностного слоя лопатки при глубинном профильном шлифовании // Науко-

емкие технологии в машиностроении. – 2015. – №8(50). – С. 38–44.

8. Макаров, В.Ф., Никитин, С.П. Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток // Научные технологии машиностроения. – 2016. – №5(59). – С. 17–24.

REFERENCES

1. Makarov, V.F. *Modern Methods of Heat-Resistant Steel and Alloys Efficient Abrasion*: manual. – S-Pb.: “Doe” Publishing House, 2013. – pp. 320.

2. Starkov, V.K. *Grinding with High-Porous Disks*. – M.: Mechanical Engineering, 2007. – pp. 688.

3. Poletaev, V.A., Volkov, D.I. *Deep Grinding of Turbine Blades: Technologist's Library*. – M.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 272.

4. Novoselov, Yu.K. *Surface Shaping Dynamics at Abra-*

sion. – Saratov: Saratov University Publishing House, 1972. – pp. 232.

5. Nikitin, S.P. Simulation of cutting process at grinding taking into account interaction of elastic and thermal systems // *Bulletin of USATU*. – 2009. – Vol.12. – No.4(33). – pp. 61-65.

6. Nikitin, S.P. Theoretical investigation of stability at grinding // *Bulletin of USATU*. – 2013. – Vol.17. – No.8(61). – pp. 38-44.

7. Makarov, V.F., Nikitin, S.P. Shaping condition impact upon quality of blade surface layer at deep profile grinding // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – No.8(50). – pp. 38-44.

8. Makarov, V.F., Nikitin, S.P. Quality and productivity increase at deep profile grinding of turbine blades // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.5(59). – pp. 17-24.

Рецензент д.т.н. С.Г. Бишутин

УДК 621.914

DOI: 10.12737/article_5aacd85821ab73.82562382

А.М. Козлов, д.т.н., Г.Е. Малютин, к.т.н.
(ФГБОУ ВО Липецкий государственный технический университет
398055, Россия, г. Липец, ул. Московская, 30)
E-mail: kam-48@yandex.ru

Управление процессом чистовой обработки поверхностей сложной формы на фрезерных станках с ЧПУ

На основе анализа сил резания, действующих в зоне контакта сферической фрезы с обрабатываемой поверхностью, предложены зависимости для определения технологических параметров. Использование полученных зависимостей позволяет повысить производительность объемного фрезерования зон, оставшихся необработанными после полустого фрезерования без использования дополнительных адаптивных устройств.

Ключевые слова: объемное фрезерование; необработанные зоны; производительность.

A.M. Kozlov, D. Eng. G.E. Malyutin, Can. Eng.
(FSBEI HE Lipetsk State Technical University, 30, Moskovskaya Str., Lipetsk, Russia, 398055)

Complex surface finishing control on NC milling machines

On the basis of the analysis of cutting forces operating in the contact area of a ball mill with the surface under machining there are offered dependences for the technological parameters definition. The use of the dependences obtained allows increasing productivity of volumetric milling areas left unprocessed after semifinish milling without use of additional adaptive devices.

Keywords: volumetric milling; unprocessed areas; productivity.

Фрезерование на станках с ЧПУ характеризуется постоянным изменением траектории перемещения инструмента, что приводит к изменениям геометрии зоны резания, и как следствие, к непостоянству сил резания и погрешности обработки на разных участках обрабатываемых поверхностей. В наибольшей степени это проявляется при обработке вогну-

тых поверхностей, форма которых описывается кривыми второго порядка.

Технологический процесс механической обработки подобных поверхностей, как и любой процесс механической обработки точных поверхностей, разделяется на несколько этапов: предварительная (черновая), послыйная обработка цилиндрическими фрезами; полу-

чистовая и чистовая обработка цилиндрическими фрезами или фрезами со сферическим торцом (радиусные фрезы).

Для сложных поверхностей (с сечением в форме окружности, эллипса, параболы, гиперболы) вблизи дна после черновых проходов формируются необработанные зоны [1 – 4], высота которых определяется по выражению [5]:

$$H = \frac{R_{\text{фр.}} \cdot \text{tg} \left(\arcsin \frac{R_{\text{фр.}}}{R_{\text{пов.}}} \right)}{2} + T, \quad (1)$$

где $R_{\text{фр.}}$ – радиус фрезы применяемой на предварительной операции; $R_{\text{пов.}}$ – радиус участка обрабатываемой поверхности; T – припуск на предварительной операции.

Окончательная обработка вогнутых поверхностей производится сферическими фрезами по траектории, проекция которой образует нормаль – без наклона оси инструмента (рис. 1, а) или с наклоном (рис. 1, б) к обрабатываемой поверхности.

Современные САМ системы (*Computer-aided manufacturing* – система, предназначенная для подготовки управляющих программ) существенно упростили процесс разработки управляющих программ, но при этом не учитываются процессы, происходящие при стружкообразовании. Это приводит к снижению параметров точности и качества обработанных поверхностей, а в некоторых случаях – к поломке дорогостоящего инструмента.

Для повышения эффективности объемного фрезерования на некоторых станках с ЧПУ применяют дополнительные адаптивные устройства, но так как данные устройства работают с некоторым запаздыванием, их применение ограничено. По этой причине, наиболее эффективным методом повышения производительности объемного фрезерования является покадровое управление режимами резания с искаженной траекторией движения инструмента, с компенсацией отжима инструмента от обрабатываемой поверхности.

Разработать управляющую программу для станка с ЧПУ с траекторией движения инструмента с учетом упругих деформаций, то есть отличающейся от траектории соответствующей номинальной поверхности в САМ системах можно двумя способами: изменением 3D модели; изменением параметров инструмента.

Учитывая величину допуска на отклонение формы обрабатываемой поверхности и величину смещения Δ на произвольном участке траектории, можно преобразовать модель об-

рабатываемой поверхности. Но данный способ не находит широкого применения, так как это требует дополнительных временных затрат по изменению модели. Кроме того, операции перестроения не всегда доступны, так как модель детали может не иметь дерева построения, например, импортировалась из другой системы, или в детали могут «вырождаться» отдельные поверхности.

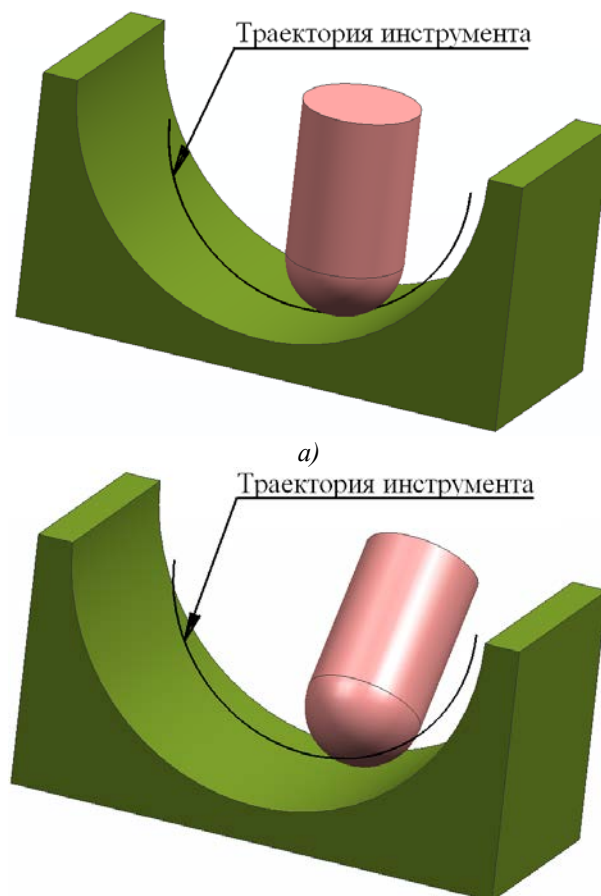


Рис. 1. Схема чистовой обработки:

а – без наклона оси инструмента к обрабатываемой поверхности; б – с наклоном

Разработка управляющих программ в САМ системах производится по 3D моделям, которые строятся по номинальным размерам. Но, как отмечалось ранее, возникающие при резании силы стремятся сместить режущую кромку инструмента от обрабатываемой поверхности, формируя поверхность, отличающуюся от номинальной. Учитывая, что вогнутые поверхности имеют допуск, направленный в деталь (система отверстия), то на практике, для гарантированного обеспечения точности обработки, управляющая программа формируется инструментом с заниженными геометрическими параметрами, а осевое смещение компенсируется «привязкой». Разработанная по-

добным образом управляющая программа при реализации формирует технологическую поверхность, которая расположена «в детали» ниже номинальной поверхности. Силы резания, отгибая инструмент, формируют фактическую поверхность, которая должна находиться в пределах допуска.

Подобный способ управления точностью обработки при объемном фрезеровании вогнутых поверхностей из-за отсутствия расчетной методики производится методом пробных проходов. В этой связи возникает необходимость в аналитическом определении параметров компенсации.

Будем считать, что фактическая образуемая поверхность находится на расстоянии отклонения формы от номинальной поверхности. Тогда

$$D_{\text{фак.}} = D_{\text{тех.}} + 2 \cdot \Delta N + \frac{\Delta T}{2} \Rightarrow$$

$$D_{\text{тех.}} = D_{\text{фак.}} - 2 \cdot \Delta N - \frac{\Delta T}{2}, \quad (2)$$

где $D_{\text{фак}}$ – фактически используемый диаметр инструмента; $D_{\text{тех}}$ – диаметр инструмента используемый при проектировании программы в САМ системе; ΔT – допуск.

Следовательно, чтобы определить величину коррекции инструмента, необходимо знать величину упругих перемещений на произвольном участке обрабатываемой поверхности в зависимости от геометрии зоны резания, и привести ее значение к постоянной величине.

Изменение упругих перемещений зависит от изменения сил, которые зависят от параметров резания, таких как геометрия зоны контакта режущей кромки инструмента с обрабатываемой поверхностью, подачи и скорости. Изменение одного параметра можно компенсировать другим, например, увеличение глубины резания компенсировать уменьшени-

ем подачи.

Аналитические зависимости изменения силы резания от геометрии зоны контакта, подачи и скорости были предложены в работах [1, 2], и определяются по выражениям:

$$dP_z^\Sigma = \sum_{n=1}^z 1,15\sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_g} \frac{a}{\sin \beta_1} \cos \beta R_{\text{фр.}} d\varphi +$$

$$+ 0,252\mu\sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_g} I_z R_{\text{фр.}} d\varphi \quad ; \quad (3)$$

$$dP_x^\Sigma = \sum_{n=1}^z 1,15\sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_g} \frac{a}{\sin \beta_1} \sin \beta \cos \varphi R_{\text{фр.}} d\varphi +$$

$$+ 0,252\sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_g} I_z \cos \varphi R_{\text{фр.}} d\varphi \quad ; \quad (4)$$

$$dP_y^\Sigma = \sum_{n=1}^z 1,15\sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_g} \frac{a}{\sin \beta_1} \sin \beta \sin \varphi R_{\text{фр.}} d\varphi +$$

$$+ 0,252\sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_g} I_z \sin \varphi R_{\text{фр.}} d\varphi \quad , \quad (5)$$

где z – количество зубьев фрезы; σ_i – интенсивность напряжений при резании, Па; a – толщина срезаемого слоя; β_1 – угол наклона плоскости сдвига стружки; β – угол между линией среза и направлением равнодействующей силы R_p ; μ – коэффициент трения; φ – угол профиля фрезы; $R_{\text{фр}}$ – радиус фрезы, мм; l_z – величина износа зуба, мм; φ_n – угол между осью фрезы и верхней точкой пересечения лезвия с заготовкой; φ_n – угол между осью фрезы и нижней точкой пересечения лезвия с заготовкой.

Учитывая, что при скоростях резания от $v = 1000$ м/мин до $v = 0,1$ м/мин и подаче в диапазоне от $S = 0,001$ мм/зуб до $S = 0,2$ мм/зуб, числовые значения следующих выражений:

$$\sin \beta_1 = \sin \left(\arctg \left(\frac{\cos \gamma_\phi}{(\sin(\sqrt{65,79 \cdot S_{\text{зуб}}^{2,0654}})) \cdot (K_{a \max} - 1) + 1) - \sin \gamma_\phi} \right) \right); \quad (6)$$

$$\cos \beta = \cos \left(\frac{50 - \arctg \left(\frac{\cos \gamma_\phi}{(\sin(\sqrt{65,79 \cdot S_{\text{зуб}}^{2,0654}})) \cdot (K_{a \max} - 1) + 1) - \sin \gamma_\phi} \right)}{0,8} \right), \quad (7)$$

находятся в пределах $\sin \beta_1 = (0,54 \dots 0,58)$, $\cos \beta = (0,94 \dots 0,96)$, и интегральная форма неприемлема при применении на станках с ЧПУ, выражения (3) – (5) примут вид [6]:

$$dP_z^\Sigma = 0,252\sigma_i R_{\text{фр.}} (\varphi_n - \varphi_n) \left(15,87 S_{\text{зуб}} \sqrt{\frac{t}{2R_{\text{фр.}}}} + I_z \operatorname{tg} \left(80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right); \quad (8)$$

$$dP_x^\Sigma = 0,252\sigma_i R_{\text{фр.}} (\varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{н}}) \cos \varphi \left(5,24 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{t}{2R_{\text{фр.}}}} + I_3 \text{tg} \left(80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right); \quad (9)$$

$$dP_y^\Sigma = 0,252\sigma_i R_{\text{фр.}} (\varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{н}}) \sin \varphi \left(5,24 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{t}{2R_{\text{фр.}}}} + I_3 \text{tg} \left(80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right), \quad (10)$$

где K – коэффициент усадки стружки.

Для чистовой обработки сферическими фрезами [6, 7]:

$$K = \sin(\sqrt[3]{65,79 \cdot S_{\text{зуб.}}^{2,0654}}) \cdot (K_{a \text{ max}} - 1) + 1, \quad (11)$$

где v – скорость резания, м/мин; $S_{\text{зуб.}}$ – подача инструмента, мм/зуб; $K_{a \text{ max}}$ – максимальный коэффициент усадки стружки, определенный экспериментально.

Ранее было указано, что меняющиеся силы резания приводят к изменению упругих перемещений инструмента, которые определяются по выражениям [2, 3, 4]:

$$\Delta N = \frac{\Delta X \frac{\partial Z}{\partial X} + \Delta Y \frac{\partial Z}{\partial Y} + \Delta Z}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)^2 + 1}}, \quad (12)$$

где ΔX , ΔY , ΔZ – величины упругих перемещений по соответствующим осям;

$\frac{\partial Z}{\partial X}$, $\frac{\partial Z}{\partial Y}$ – частные производные функции $Z = \Phi(X, Y)$ по аргументам X и Y (тангенсы углов наклона касательных к обрабатываемой поверхности).

Величины упругих перемещений определяются по выражениям:

Так как величина осевого упругого перемещения инструмента равна нулю, а

$$J_{\text{пр}} = J_X = J_Y = \frac{\pi D^4}{64} \approx 0,05 D^4 = 0,8 R_{\text{фр.}}^4 \Rightarrow J_{\text{фр.}} = J_X = J_Y = \frac{2,4 E R_{\text{фр.}}^4}{l^3}, \quad (16)$$

то выражение (12) примет вид:

$$\Delta N = \frac{\left((P_Z^\Sigma \sin \psi - P_Y^\Sigma \cos \psi) \frac{\partial Z}{\partial X} + (P_Z^\Sigma \cos \psi + P_Y^\Sigma \sin \psi) \frac{\partial Z}{\partial Y} \right) \frac{l^3}{2,4 E R_{\text{фр.}}^4}}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)^2 + 1}}. \quad (17)$$

Подставляя в полученное уравнение формулы (8) – (10) получим:

$$\begin{aligned} \Delta N_{C1} = & ((0,252\sigma_i R_{\text{фр.}} (\varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{н}}) \left(15,87 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{t}{2R_{\text{фр.}}}} + I_3 \text{tg} \left(80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right) \sin \psi - \\ & - 0,252\sigma_i R_{\text{фр.}} (\varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{н}}) \left(5,24 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{t}{2R_{\text{фр.}}}} + I_3 \text{tg} \left(80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right) \cos \psi) \frac{\partial Z}{\partial X} + \\ & + (0,252\sigma_i R_{\text{фр.}} (\varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{н}}) \left(15,87 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{t}{2R_{\text{фр.}}}} + I_3 \text{tg} \left(80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right) \cos \psi + \end{aligned}$$

$$\Delta X = \frac{P_{\text{поп.}}^X}{J_X}; \quad \Delta Y = \frac{P_{\text{пр.}}^Y}{J_Y}; \quad \Delta Z = \frac{P_{\text{ос.}}^Z}{J_Z}, \quad (13)$$

где $P_{\text{поп.}}^x$, $P_{\text{пр.}}^y$, $P_{\text{ос.}}^z$ – проекции результирующей силы резания на координатные оси станка.

$$P_{\text{поп.}}^x = P_Z^\Sigma \cdot \sin \psi - P_Y^\Sigma \cdot \cos \psi;$$

$$P_{\text{пр.}}^y = P_Z^\Sigma \cdot \cos \psi + P_Y^\Sigma \cdot \sin \psi; \quad P_{\text{ос.}}^z = P_X^\Sigma, \quad (14)$$

где J_X , J_Y , J_Z – жесткость технологической системы по осям.

При механической обработке концевыми фрезами основная доля упругих деформаций приходится на инструмент, по этой причине в дальнейшем будем учитывать только жесткость фрезы. Расчет производится по выражению:

$$J_{\text{фр.}} = \frac{3EJ_{\text{пр}}}{l^3}, \quad (15)$$

где E – модуль упругости первого рода; l – вылет инструмента; $J_{\text{пр}}$ – приведенный момент инерции.

$$+ 0,252\sigma_i R_{\text{фр.}} (\varphi_s - \varphi_n) \left(5,24 S_{\text{зуб.}} \sqrt{\frac{t}{2R_{\text{фр.}}}} + I_3 \text{tg} \left(80 + \lambda - 2 \arcsin \frac{1}{K} \right) \right) \sin \psi \frac{\partial Z}{\partial Y} \times$$

$$\times \frac{l^3}{2,4ER_{\text{фр.}}^4} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)^2 + 1}} \quad (18)$$

где E – модуль упругости первого рода; l – вылет инструмента, мм; $R_{\text{тр.}}$ – радиус траектории движения инструмента, мм [8].

Выражение (18) показывает, что наибольшее значение погрешности размера динамической настройки формируется при обработке ранее необработанной зоны (вблизи дна) на первом проходе. Следовательно, выбор величины коррекции на размер инструмента необходимо проводить для данного участка, а изменение величины погрешности на других участках можно компенсировать изменением режимов резания.

Точность механической обработки зависит от погрешности динамической настройки, и

чтобы обеспечить стабильность точности на всей обрабатываемой поверхности необходимо выполнить условие:

$$\Delta N_1 = \Delta N_2 = \Delta N_3 = \Delta N_i = \text{const} \quad (19)$$

Регулирование погрешности динамической настройки при обработке на станках с ЧПУ наиболее эффективно осуществить управлением подачей, значение которой определяется из выражения (18):

$$S_{\text{зуб.}} = \frac{4,76ER_{\text{фр.}}^3 \Delta N \sqrt{2 \cos^2 \alpha + 1} - I_3 \text{tg}(80 + \lambda) + 9I_3}{\sigma_i (\varphi_s - \varphi_n) l^3 \cos \alpha} \cdot \left(15,87 \sqrt{\frac{t}{2R_{\text{фр.}}}} + 30I_3 \sin \left(\frac{V}{2,23} \right) \right) \quad (20)$$

Прописать расчет подачи по выражению (20) в управляющую программу достаточно сложно, поэтому в операторе САМ системы, подача устанавливается по наиболее загруженному участку, то есть для обработки «дна» – (ранее необработанной зоны), при обработке паза (первый проход).

Для остальных участков подача регулируется корректором:

$$S_i = S_3 K; \quad (21)$$

где S_i – подача на произвольном участке; S_3 – заданная подача; K – параметр коррекции.

Параметр коррекции K при первом проходе (обработка паза) выводится из выражений (21).

Параметр коррекции для произвольной точки при обработке «стенки»:

$$K_i = \frac{S_{\text{зуб.}T6}}{S_{\text{зуб.}i}} = \frac{\frac{4,76ER_{\text{фр.}}^3 \Delta N \sqrt{2 \cos^2 \alpha_{T6} + 1}}{\sigma_i \left(\arcsin \frac{\sqrt{(H_{\text{ок.}T6} - (R_{\text{тр.}T6} - R_{\text{тр.}T6})) (2R_{\text{фр.}} - H_{\text{ок.}T6} - (R_{\text{тр.}T6} - R_{\text{тр.}T6}))}}{R_{\text{фр.}}} \right) l^3} - I_3 \text{tg}(80 + \lambda) + 9I_3}{\left(15,87 \sqrt{\frac{T_{T6}}{2R_{\text{фр.}}}} + 30I_3 \sin \left(\frac{V_{T6}}{2,23} \right) \right)}}{\frac{4,76ER_{\text{фр.}}^3 \Delta N \sqrt{2 \cos^2 \alpha_{T5} + 1}}{\sigma_i ((AR_{\text{тр.}}^{-0,8} + B)) l^3 \cos \alpha_i} - I_3 \text{tg}(80 + \lambda) + 9I_3}{\left(15,87 \sqrt{\frac{T_i}{2R_{\text{фр.}}}} + 30I_3 \sin \left(\frac{V_i}{2,23} \right) \right)}}$$

$$K_i \approx 0,18NR_{\text{фр.}}^{-1,3} \ln(R_{\text{тр.}} + R_{\text{фр.}}). \quad (22)$$

Для ранее необработанной зоны (дно):

$$K_{i+1} \approx (0,006N + 4)R_{\text{фр.}}^{-1,3} \ln(R_{\text{тр.}} + R_{\text{фр.}}). \quad (23)$$

Из выражений (22), (23) следует, что коэффициент регулирования подачи с уменьшением радиуса траектории будет уменьшаться, но при этом необходимо знать значение радиуса и момент, когда инструмент приблизится к необработанному участку.

Траектория управляющей программы обработки состоит из набора точек, по которым проходит инструмент, тогда через предыдущую, текущую и последующую точки можно провести окружность радиусом R (рис. 2) [9, 10]:

$$R_{\text{мп}} = \frac{ABC}{4S}; \quad (24)$$

где A – расстояние от предыдущей до текущей точки; B – расстояние от текущей до последующей точки; A, B – рассчитываются пост-процессором командой «*nom motion distance*»; C – расстояние между предыдущей и последующей точки, определяется по выражению:

$$C = \frac{A2 + B2}{\sin\left(\arctg \frac{A2 + B2}{A1 + B1}\right)}, \quad (25)$$

где $A1$ и $B1$ – проекции расстояний A, B на плоскость YZ ; $A2$ и $B2$ – проекции расстояний A, B на плоскость XY :

$$A1 = A \cos a^\circ, B1 = B \cos a^\circ, A2 = A \sin a^\circ, \\ B2 = B \sin a^\circ. \quad (26)$$

Площадь треугольника

$$S_{\Delta} = \frac{AB \sin c^\circ}{2} \Rightarrow \quad (27)$$

$$\Rightarrow R_{\text{мп}} = \frac{C}{2 \sin c^\circ} = \frac{C}{2 \sin(180 + b^\circ - a^\circ)}$$

$$\text{т.к. } c^\circ = (180 + b^\circ + a^\circ), \quad (28)$$

где a°, b° – углы перемещения инструмента, рассчитываются САМ системой:

$$a^\circ = \arcsin \frac{A1}{A}, b^\circ = \arcsin \frac{B1}{B}; \quad (29)$$

где $A1$ – расстояние между предыдущей и текущей точкой по оси Z (рассчитывает САМ система).

При движении инструмента по заданной

траектории нормаль вектора направления движения и ось инструмента образуют угол, который система САМ может высчитать по выражению:

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{(z2 - z1)}{L_n}, \quad (30)$$

где L_n – длина перемещения, рассчитывается САМ системой (в САМ системе Unigraphics – оператор *nom motion distance*).

По построению угол, при котором инструмент приблизится к ранее необработанной зоне, рассчитывается по выражению:

$$\alpha_2 = 90 - \arcsin \frac{(R_{\text{мп}} - H_1)}{R_{\text{тр}}}, \quad (31)$$

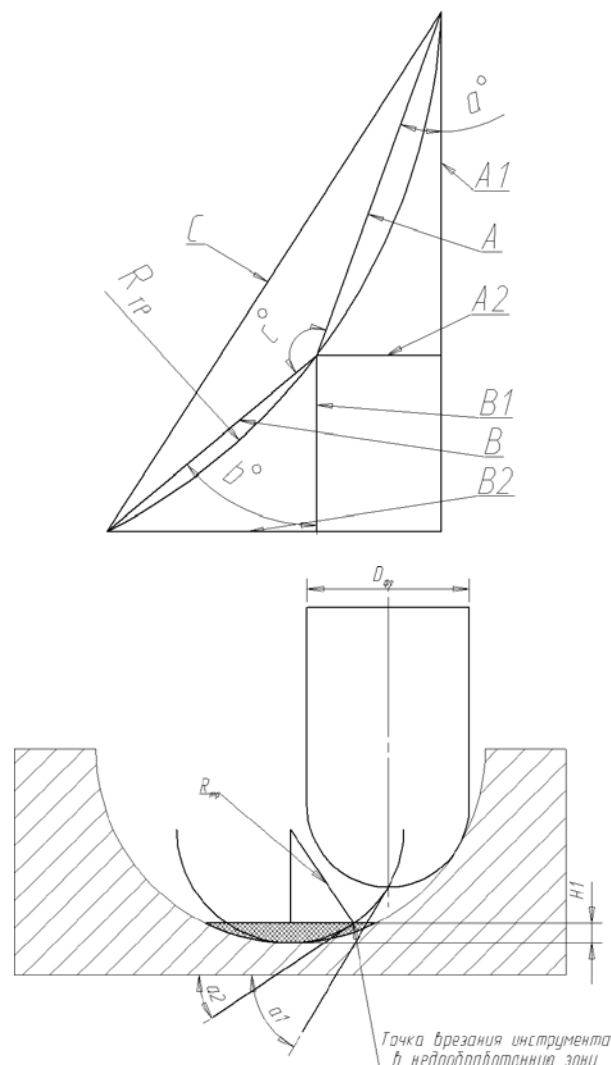


Рис. 2. Схема расчета параметров траектории

При соблюдении условия

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 90 - \arcsin \frac{(R_{\text{тр}} - H_1)}{R_{\text{тр}}}, \quad (32)$$

инструмент приблизится к ранее необработанной зоне.

Предлагаемая методика управления режимами обработки использовалась при разработке транслятора траектории инструмента (постпроцессор) для системы ЧПУ SINUMERIK 840D, при этом часть расчетов при разработке управляющей программы выполняет постпроцессор. Однако функции постпроцессоров имеют ограничения. Например, при расчете радиуса траектории инструмента необходимо знать координаты предыдущей, те-

кущей и последующей точки, две первые точки задаются в постпроцессоре командами «*mot prev pos*» и «*mot pos*» соответственно, но команды описания последующей точки не существует, по этой причине, часть математических вычислений производит система ЧПУ станка.

Рассмотрим пример управляющей программы (табл. 1) для обработки параболической траектории.

1. Сравнения управляющих программ

Управляющая программа с постоянной подачей	Управляющая программа с коррекцией подачи
N310 G54 S1000 M3	N40 G54 S1000 M3
N320 G0 X15. Y0.0 Z-4.365	N50 R101=0.123 R102=5. R103=.25 R105=1000
N330 G1 X14.25 Z-7.21 F6	N80 R1=15.622 R2=16.225 R3=4.365 R4=15.
N340 X13.5 Z-9.801	N90 R5=2.942 R6=75.23 R7=2.845 R8=.75
N350 X12. Z-14.477	N100 R51=14.25 R52=0.0 R53=-7.21
	N101 L400
N610 X-13.5 Z-9.797	
N620 X-15. Z-4.369	N960 R5=5.631 R6=74.552 R7=5.428 R8=1.5
N621 G0 Z200	N970 R51=-15. R52=0.0 R53=-4.369 L400
N670 M5	N980 R1=5.631 R2=74.552 R3=5.428 R4=1.5
N710 M2	N1060 G0 Z200
	N1070 X0 Y0
	N1080 M5
	N1090 M2

Подпрограмма

```
R9=R3+R7 R10=R4+R8 R11=ATAN2(R10,R9) R12=90-R6-R11 R13=SIN(R12) R14=(R1/(2*R13))
R15=R102/(R14+R102) R16=ASIN(R15) R17=TAN(R16) R18=((R102*R17)/2)+R103
R19=(R14-R18)/(R14) R20=ABS(90-ASIN(R19))
IF R6<R20 GOTOF MA2
R21= R105*sin(R6) R22=(0.18*R21)*(R101)*(LN(R14+R102)) R23=5 R24=R22*R23
N6 G1 X=R51 Y=R52 Z=R53 F=R24 GOTOF MA3
MA2: R21= R105*sin(R6) R22=(0.006*R21)*(R101)*(LN(R14+R102)) R23=5. R24=R22*R23
N7 G1 X=R51 Y=R52 Z=R53 F=R24
N8 MA3: M17
```

где N – нумерация кадров; G54 – ноль детали; S1000 M3 – вращение шпинделя по часовой стрелке; G0 – ускоренное линейное перемещение; G1 – линейное перемещение на подаче F; X, Y, Z – координаты точек траектории по осям; M5 – останов шпинделя; M2- конец УП;

$R101=R_{\text{фр}}^{-1,3} = 5^{-1,3} = 0,123$;

R102 – радиус применяемого инструмента;

R103 – заданный припуск предварительной обработки;

R105 – обороты шпинделя, мин⁻¹;

R1=\$mom_mot_dis – определяется параметр A (рис. 4);

R2=((asin((\$mom_pos(2)-\$mom_pre_pos(2))/ \$mom_mot_dis))) – определяется угол α° (рис. 4);

R3=\$mom_mot_dis*(sin((asin((\$mom_pos(2)-\$mom_pre_pos(2))/ \$mom_mot_dis)))) – определяется параметр A1 (рис. 4);

R4=\$mom_mot_dis*(sin((asin((\$mom_pos(2)-\$mom_pre_pos(2))/ \$mom_mot_dis)))) – определяется параметр A2 (рис. 4);

R5=\$mom_mot_dis – определяется параметр B (рис. 4);

R6=((asin((\$mom_pos(2)-\$mom_pre_pos(2))/ \$mom_mot_dis))) – определяется угол β° (рис. 4);

R7=\$mom_mot_dis*(sin((asin((\$mom_pos(2)-\$mom_pre_pos(2))/ \$mom_mot_dis)))) – определяется параметр B1 (рис. 4);

R8=\$mom_mot_dis*(sin((asin((\$mom_pos(2)-\$mom_pre_pos(2))/ \$mom_mot_dis)))) – определяется параметр B2 (рис. 4);

R9=R3+R7 – суммирование параметров A1 и B1;

R10=R4+R8 – суммирование параметров A2 и B2;

R11=ATAN2(R10,R9) – определяется угол между сторонами C и A1;

R12, R13, R14, R15, R16, R17 – составляющие выражения (25);

R18=((R102*R17)/2)+R103 – определяется значение выражения (1);

R19=(R14-R18)/(R14) – определяется радиус траектории, выражение (25)

R20=ABS(90-ASIN(R19)) – определяется значение выражения (32);

R21 – определение скорости резания на произвольном участке;

R22 – определение коэффициента коррекции подачи;

R23 – заданная подача обработки, определяется по «дну»;

R24 – расчетная подача на произвольном участке контура;

R51, R52, R53 – координаты точки по осям X Y Z;

L400 – вызов подпрограммы №400;

M17 – конец подпрограммы.

Управляющая программа работает следующим образом:

- 1) Постпроцессор определяет параметры R1 – R8, R51 – R53;
- 2) Вызывается подпрограмма L400;
- 3) Система ЧПУ станка рассчитывает параметры R9 – R20;
- 4) IF R6 < R20 GOTOF MA2 – сравнение параметров, если угол R6 меньше угла R20, то перейти на кадр с маркером MA2, где определяется подача для участка «дно» и перемещение производится на пониженном режиме, если нет, то следующий кадр определяет подачу на участке «стенка», перемещение производится на повышенном режиме, командой GOTOF MA2 производится переход к кадру M17.

Проверка работоспособности разработанного программного обеспечения производилась на трехосевом вертикально-фрезерном станке 6Б52Ф3 с системой ЧПУ SINUMERIK 802 и на 3D кинематической модели фрезерного станка с системой ЧПУ SINUMERIK 840D. На рис. 3 показана позиция инструмента при обработке вогнутой поверхности на постоянных режимах резания, время одного прохода составило $T = 12$ мин.

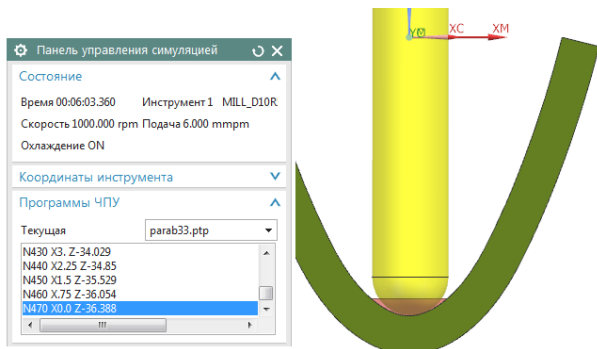


Рис. 3. Обработка с постоянной подачей

На рис. 4 показаны позиции инструмента при обработке вогнутой поверхности на регулируемых режимах резания, время одного прохода составило $T = 1,2$ мин, ниже в 10 раз, в отличие от режима с постоянной подачей.

Экспериментальные исследования по определению влияния меняющихся параметров зоны обработки на силу резания при меняющейся подаче, проводился сферической фрезой фирмы HANITA с геометрическими параметрами: диаметр фрезы $D = 10$ мм; радиус сферы торца $R = 5$ мм; длина режущей части $L_1 = 30$ мм; вылет $L_2 = 50$ мм на вертикально-фрезерном станке 6Б52Ф3.

Образец

Блок 62x40x35, материал – нержавеющая сталь 40X13, твердость 40...45 HRC. Радиус

обрабатываемой поверхности $R_{пов} = 20$ мм. Предварительный припуск на обработку $T = 0,2$ мм. Измерение силы резания производилось динамометром УДМ-600 (рис. 5), показания параметров выводились программой Microsoft Excel.

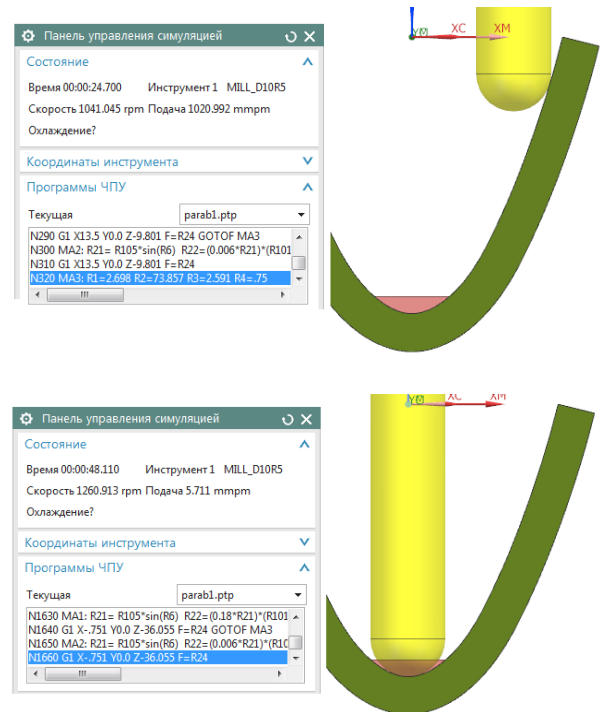


Рис. 4. Обработка с переменной подачей

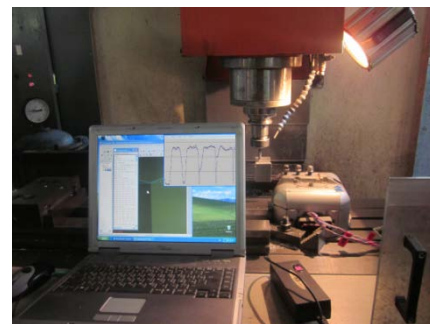


Рис. 5. Экспериментальное оборудование для определения силы резания

По параметрам динамометра, в программе

Microsoft Excel строились графики силы резания в зависимости от времени обработки (рис.6).

Использование предложенной управляющей программы позволило сократить время обработки от 3 до 12 раз, устранить появление брака по отклонению формы [9, 10].

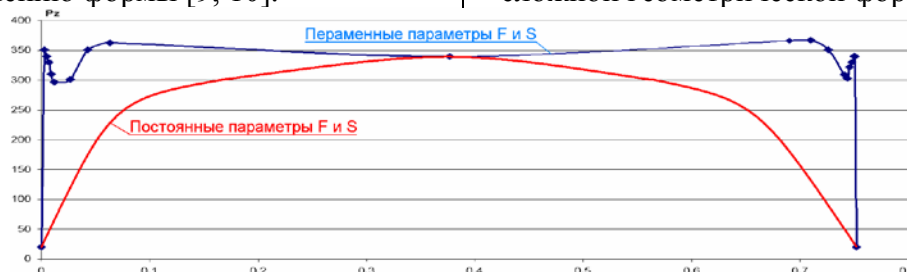


Рис. 6. Изменение силы P_z

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батуев, В.А., Батуев, В.В. Управление подачей с целью обеспечения точности фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ / Сб. тезисов докладов международной научно-технической конференции. — Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2003. — С. 11–12.

2. Батуев, В.В. Обеспечение производительности при чистовом фрезеровании пространственно-сложных поверхностей в условиях заданной точности / Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. — С. 91–94.

3. Гузеев, В.И. Погрешности динамической настройки при обточке фасонных деталей на станках с ЧПУ / Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. Челябинск: ЧПИ, — 1980. — №249. — С.16–18.

4. Гузеев, В.И., Батуев, В.В. Учет влияния следов предшествующей обработки на точность фрезерования пространственно-сложных поверхностей / Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. — С. 115–117.

5. Козлов, А.М., Малютин, Г.Е. Повышение производительности объемного фрезерования необработанных зон. // Сб. науч. статей V Междунар. науч.-техн. конф. «Машиностроение — основа технологического развития России». Курск, 22–24 мая 2013 г. — 2013. — С. 307–310.

6. Козлов, А.М., Малютин, Г.Е. Повышение производительности чистового объемного фрезерования на станках с ЧПУ // Научно-технические технологии в машиностроении. — 2013. — №11(29). — С. 14–18.

7. Козлов, А.М., Малютин, Г.Е. Расчет коэффициента усадки стружки при чистовой обработке сферическими фрезами // Материалы III междунар. научно-практической конференции «21 век: фундаментальная наука и технологии». Москва. 23–24 января 2014 г. — С. 89–94.

8. Малютин, Г.Е. Определение усилий резания при чистовой объемной обработке вогнутых поверхностей сложной формы сферическими фрезами на станках с ЧПУ // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2014. — №4(306). — С. 74–81.

9. Козлов, А.М., Малютин, Г.Е. Повышение эффективности чистового объемного 3D фрезерования на станках с ЧПУ // Научно-технические технологии в машиностроении. — 2014. — №6(36). — С. 39–44.

10. Козлов, А.М., Малютин, Г.Е. Повышение производительности фрезерования вогнутых поверхностей

Проведенные эксперименты подтвердили возможность управления режимами резания в автоматическом режиме, в зависимости от изменения обрабатываемого контура, благодаря которому значительно повысилась производительность чистовой обработки поверхностей сложной геометрической формы.

сложной формы на станках с ЧПУ // Вестник машиностроения. — 2014. — №12. — С.71–75.

REFERENCES

1. Batuev, V.A., Batuev, V.V. Feed control with purpose of ensuring accuracy at special-complex surfaces on NC machines / *Proceedings of the Inter. Scientif.-Tech. Conf.* — Barnaul: Publishing House of Polzunov STU of Altay, 2003. — pp. 11-12.

2. Batuev, V.V. Productivity ensuring at finish milling of special-complex surfaces under conditions of the specified accuracy / *Efficient Technologies in Mechanical Engineering: Proceedings.* — Chelyabinsk: Publishing House of SUSU, 2005. — pp. 91-94.

3. Guzeev, V.I. Dynamic adjustment errors at formed component turning on NC machines / *Finishing Efficient Technology.* Chelyabinsk: ChPI, - 1980. — No.249. — pp. 16-18.

4. Guzeev, V.I., Vatiev, V.V. Account of previous machining marks impact upon accuracy of special-complex surfaces milling / *Efficient Technologies in Mechanical Engineering: Proceedings* — Chelyabinsk: Publishing House of SUSU, 2003. — pp. 115-117.

5. Kozlov, A.M., Malyutin, G.E. Productivity increase at spatial milling of unprocessed areas // *Proceedings of the V-th Inter. Scientif.-Tech. Conf. "Mechanical — Basis of Russia Technological Development"*. Kursk, May 22 – 24, 2013 – 2013. — pp. 307-310.

6. Kozlov, A.M., Malyutin, G.E. Productivity increase at finish spatial milling on NC machines // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* — 2013. — No.11(29). — pp. 14-18.

7. Kozlov, A.M., Malyutin, G.E. Computation of chip shrinkage factor at finishing with ball mills // *Proceedings of the III-d Inter. Scientif.-Pract. Conf. "XXI-st: Fundamental Science and Techniques"*. Moscow. January 23-24, 2014. — pp. 89-94.

8. Malyutin, G.E. Cutting force definition at finish spatial milling of concave complex surfaces with ball mills on NC machines // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology.* — 2014. — No.4 (306). — pp. 74-81.

9. Kozlov, A.M., Malyutin, G.E. Efficiency increase of 3D finish spatial milling on NC machines // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* — 2014. — No.6(36). — pp. 39-44.

10. Kozlov, A.M., Malyutin, G.E. Productivity increase at concave complex surface milling on NC machines. // *Bulletin of Mechanical Engineering.* — 2014. — No.12. — pp. 71-75.

Рецензент д.т.н. А.С. Ямников

УДК 658.562

DOI: 10.12737/article_5aacd858679002.62480776

В.А. Васильев, д.т.н., **С.В. Александрова**, к.т.н.
(ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)», 121552 Москва, ул. Оршанская, 3)
E-mail: vasiliev@mati.ru

Управление качеством, подготовка кадров и организация конкурентоспособного высокотехнологичного производства

Приведен анализ наиболее известных подходов к управлению качеством и организации производства конкурентоспособной продукции, особое внимание уделено проблемам менеджмента качества. Рассмотрены современные методы и инструменты управления качеством, освещаются вопросы подготовки специалистов в области качества с учетом развития перспективных методов управления качеством. Показаны возможные направления совершенствования кадрового потенциала высокотехнологичных отраслей промышленности в области организации производства и управления качеством.

Ключевые слова: качество; глобальное качество; оптимальное качество; современное бережливое производство.

V.A. Vasiliev, D. Eng., **S.V. Alexandrova**, Can. Eng.
(FSBEI HE "Moscow Aircraft Institute (National Research University)", 3, Orshanskaya Str., Moscow 121552)

Quality control, staff training and organization of competitive and advanced technology production

The analysis of the most known approaches to the quality control and organization of competitive product manufacturing is shown, particular attention is paid to the problems of quality management.

There are considered modern methods and tools for quality control, the problems of training experts in the field of quality taking into account development of the promising methods for quality control are covered.

Possible directions for updating staff potential of high-technology branches of industry in the field of production organization and quality control are shown.

Keywords: quality; global quality; optimum quality; modern economical production.

Проблемы качества в современной истории не раз становились главным элементом программ развития в разных странах. Да и в более ранние времена качество определяло путь развития отдельных государств и целых цивилизаций. Разумеется, имеется в виду широкое определение понятия «качество». Можно всю историю человечества рассматривать как развитие качества – качество технологий, качество управления, качество инноваций, качество вооружений, качество труда и конечно качество жизни. История наглядно демонстрирует, что в условиях жесткой конкуренции лишь высокое качество производимой продукции и оказываемых услуг является единственной гарантией успешной деятельности любой организации.

Сегодняшние лидеры в бизнесе – это лидеры в области качества. Качество жизни населения отдельных регионов и стран напрямую связано с качеством производимой ими продукции. Всем очевидно необходимость и важность скорейшего решения проблем в об-

ласти качества для достижения взаимного удовлетворения интересов производителей, потребителей продукции и общества в целом. Экономическое развитие России невозможно без существенного повышения качества отечественных товаров.

В настоящее время многие российские предприятия стоят перед насущной задачей повышения конкурентоспособности своей продукции. Такая ситуация возникла из-за объективной необходимости выхода на новые рынки сбыта своей продукции, в том числе и зарубежные. Но без должного уровня качества выпускаемая продукция не может быть конкурентоспособной. На основе многочисленных данных можно убедиться, что многие отечественные производители неконкурентоспособны на внешних рынках, а зачастую проигрывают иностранным производителям и на отечественном рынке.

В мировой истории есть много примеров успешного развития. Классический пример «экономического чуда» 20 века – восстано-

ление экономики Японии после второй мировой войны. Предельно милитаризованная экономика с широкой сетью сырьевых колоний после войны практически перестала функционировать – исчезли колонии, запрещены военные заказы, нет сырья, технологий, оборудования. Заработать деньги на закупку сырья и других ресурсов можно только за счет экспорта. Но что экспортировать? Только конкурентоспособную на внешних рынках продукцию. Конкурентоспособность обеспечивается низкой ценой и высоким качеством. За счет снижения цены можно короткое время обеспечить превосходство на рынке, но недополученная прибыль тормозит дальнейшее развитие. Простым логическим умозаключением можно сделать вывод – необходимо высокое качество продукции и услуг. И эта идея стала главной для Японии тех и последующих лет.

Аналогичные процессы повторялись и в других странах – например, в Южной Корее. Сейчас нас уже не удивляет тот факт, что лидерами рынка стали Samsung, LG, Kia и другие корейские компании. Достаточно высокие успехи в судостроении.

В России проблема качества тоже решалась и довольно эффективно. Но это происходило в основном административно-государственными методами. Достаточно вспомнить системы БИП, НОРМ, СБТ, КАНАРСПИ и конечно КСУКП. Результат – успехи в космонавтике и ракетной технике: первый спутник, первый космонавт Ю.А. Гагарин, первые стыковки в космосе, выход А.А. Леонова в открытый космос и многое другое. Аналогичные достижения в военной технике, авиационной и атомной промышленности хорошо известны специалистам.

В области потребительских товаров также были хорошие примеры, известные во всем мире: фотоаппараты Zenit, переносные телевизоры, механические наручные часы и др. Проблема состояла в том, что идея качества не была встроена в экономику как элемент конкурентоспособности. Да и конкуренция внутри страны практически отсутствовала в условиях плановой экономики. Приведенные выше примеры получены в результате конкуренции с иностранными товарами и техникой. Отличные отечественные разработки в области управления качеством внедрялись в основном административно-командными методами, без опоры на экономические методы.

Резкий переход от плановой экономики к рыночной в 1990-е гг. привел не к росту качества, а к быстрой деградации промышленности. Ситуацию ухудшил распад Советского Союза с последующим разрывом кооперационных связей, ликвидацией внутриотраслевой кооперации вместе с соответствующими министерствами, закрытием ряда предприятий после приватизации. «Невидимая рука рынка» на этом этапе добила неэффективные производства, а вместе с ними и социальную инфраструктуру. Снижение доходов населения, обесценивание рубля, сбережений и падение качества жизни стало следствием этих процессов.

По замыслу инициаторов быстрых реформ появляющаяся конкуренция сама по себе приведет к развитию экономики и росту качества. Насколько это получилось, можно оценить

сейчас спустя четверть века. Можно посмотреть на другой опыт и результаты позитивных изменений в Китае за тот же период. Молодежь скоро не будет помнить о специфическом качестве китайских товаров.

Отставание качества российских товаров от качества товаров промышленно развитых стран может привести к экономической и социальной катастрофе. Качество потребительской продукции и услуг в нашей стране на протяжении многих лет зачастую было ниже, чем в других развитых странах. Однако это отставание «компенсировалось» высоким качеством и технологическим уровнем продукции военно-промышленного комплекса. С изменением политического строя и падением роли оборонных отраслей промышленности отечественный опыт управления качеством, накопленный десятилетиями, в значительной степени оказался забытым. Мы оказались как бы на пустом месте. Особенно это касается вновь созданных малых и средних предприятий, не имеющих навыков управления качеством. Используемые в нашей стране критерии в области качества, как и прежде, направлены большей частью лишь на производственный процесс и на его продукцию, а система управления качеством и сам человек как потребитель все еще остаются на втором плане.

Не претендуя на полноту набора необходимых отечественной экономике действий, хочется выделить некоторые проблемы. Во-первых, это инновационный подход к развитию. Об этом много говорят, но реально проблема решается очень медленно и не всегда эффективно. Для генерации новых знаний и соответствующих, основанных на них, инновациях необходимы научные исследования и разработки. Но инновационный цикл пока не выглядит законченным.

В советские времена после фундаментальной (академической) и вузовской науки разработка попадала в отраслевой НИИ, где доводилась до готовности к реализации на производстве. Сейчас большинство отраслевых НИИ уже не функционируют, а замены им нет. У вузов и Академии наук нет возможности создавать промышленное оборудование, а у предприятий нет научных кадров. Как результат – широко распространено мнение, подтверждаемое существующей практикой, что новые технологии нужно покупать «в развитых странах». Эта проблема должна решаться на государственном уровне. Без собственных технологий мы будем обречены на вечное отставание, поэтому инновационный путь развития не имеет альтернативы. Но для этого требуется резкое увеличение финансирования научно-исследовательских работ, и не только в форме грантов. Для решения крупных проблем необходимо целевое финансирование научных коллективов.

Во-вторых, кадровое сопровождение инноваций и новых технологий. Реформы в образовании не всегда приносят желаемые плоды. Исчезновение инженеров по многим специальностям из списка выпускников стало неприятным сюрпризом для руководства предприятий. Нужно время, чтобы найти правильную нишу в научно-технической и производственной сфере для бакалавров и магистров.

Многие предприятия по-прежнему ждут молодых инженеров. Заявляемый приоритет мнения работодателей при выборе содержания подготовки на практике тоже не всегда реализуется. Дополнительные трудности связаны с инерционностью образовательных процессов. От момента начала подготовки до защиты дипломной работы проходит 4 – 6 лет. Работодатели обычно хорошо представляют текущие потребности в специалистах, но с трудом прогнозируют на 5 – 10 лет свою деятельность. К тому же многие ориентируются на покупные (в других странах) технологии и соответствующие квалификации выпускников вузов.

В-третьих, проблемы качества. Выше говорилось о путях решения этих проблем в историческом ракурсе. Но сейчас появились новые средства и методы управления качеством. Имеется в виду не только широко распространенные международные стандарты серии ИСО 9000. Они помогают обеспечить нужный уровень качества и показать это потребителю. Разработаны новые отраслевые системы менеджмента качества. Развиваются корпоративные и альтернативные системы. Выбор модели для создания СМК организации или предприятия сейчас огромный. Помочь сделать правильный выбор и показать все возможности менеджмента качества – это задача профессионалов качества.

Важным гарантом достижения современного уровня и стабильности показателей качества продукции, как известно, является функционирование современной системы менеджмента качества, являющейся, по сути, системой менеджмента для руководства и управления организацией применительно к качеству. Очевидным является стремление решать все управленческие задачи оптимальным образом. Но для этого необходимо иметь научно-методическую базу, являющуюся основой для формирования эффективных и научно обоснованных управленческих решений, принимаемых на различных этапах жизненного цикла сложной системы с целью достижения высокого уровня гарантии создания продукции в полном соответствии с установленными требованиями.

Базовая концепция управления организацией, работающей на принципах системы менеджмента качества, – это влияние на процесс, а не только на его результаты. Процессный подход является одним из основополагающих требований современной системы менеджмента качества. Многие из статистических методов управления качеством нацелены именно на управление процессами, а относительно малые затраты на их внедрение и применение и высокая эффективность этих методов позволяют говорить об их интеграции в современную систему менеджмента качества.

Наряду с этим появляется необходимость разработки новых средств, методов и инструментов управления качеством, способных дополнить и развить возможности организации при разработке и функционировании системы менеджмента качества. В настоящее время прослеживается тенденция роста востребованности предприятиями-производителями идей и научно-методических разработок по решению проблемы обеспечения конкурентно-

способности выпускаемой продукции.

Успех в решении проблем качества может быть достигнут только при обеспечении органичного сочетания отечественных и зарубежных научных разработок и накопленного практического опыта.

Развитие цифровых технологий приводит к изменению взглядов на современные производственные технологии. Появляются не только отдельные агрегаты и устройства с числовым программным управлением, но и целые технологические роботизированные комплексы. В таких системах традиционные методы менеджмента качества выглядят архаично и отстают по своим возможностям от технологических процессов. Задача профессионалов в области качества ликвидировать этот разрыв за счет интеграции методов качества с возможностями цифровых технологий.

В большинстве методов и инструментов менеджмента качества используется элемент анализа полученных результатов и последующего (с задержкой во времени) принятия решений. Такой подход еще недавно не вызывал особых неудобств, но сейчас опоздание с принятием нужного корректирующего действия может снизить конкурентоспособность организации. Современные информационные технологии позволяют встроить управление качеством в технологические процессы и управлять качеством в режиме реального времени.

Развитие науки и технологий диктует необходимость в развитии новых методов управления качеством. Наряду с уже имеющимися методами и системами менеджмента качества появляются новые подходы. Далее приведены некоторые направления совершенствования существующих и создания новых инструментов, методов и систем менеджмента качества с учетом развития цифровых (информационных) технологий

Глобальное качество (GlobalQuality)

В первую очередь надо посмотреть на перспективы развития всеобщего управления качеством. За десятилетия существования TQM появилось много новых методов управления качеством, претерпели изменение принципы всеобщего управления качеством. Но самое главное, что пришло понимание неизбежности интеграции управления качеством с другими аспектами деятельности человека.

Уже много лет создаются интегрированные системы менеджмента на основе менеджмента качества (ИСО серии 9000), экологического менеджмента (ИСО серии 14000) и других международных стандартов. Можно предположить, что следующие поколения интегрированных систем будут включать в себя менеджмент безопасности, менеджмент рисков, информационные технологии и др. Таким образом, формируется новая методология – глобальное качество. Эта методология будет учитывать и человеческий фактор, и качество жизни в широком смысле. Пока нет четкой структуры и алгоритмов этой методологии, но ее элементы уже просматриваются.

Оптимальное качество (OptimumQuality)

В теории и практике управления качеством за аксиому принимается непрерывное улучшение качества. Из самого понятия «непре-

рывное» или «постоянное» следует только одно направление изменения – в лучшую сторону, в сторону повышения. С точки зрения математики функции более разнообразны. Можно допустить и наличие экстремумов, а значит и возможные оптимумы. В настоящее время понятие «оптимальное качество» используется по отношению к цене. Эта проблема изучается в экономических дисциплинах, в частности в экономике качества.

Можно рассмотреть возможность достижения оптимального качества с точки зрения потребителей. При этом оптимизация возможна по одному или нескольким показателям качества или по интегральным характеристикам. Спорным и даже парадоксальным может показаться процесс оптимизации качества. Это тема отдельного исследования, но такую возможность нельзя отбрасывать априори. В данной статье сделана попытка предвосхитить развитие науки о качестве. Оптимизация качества – возможное направление развития.

Бережливое производство (Lean Production)

В последние годы стало популярным одно из направлений менеджмента качества – бережливое производство. Это словосочетание можно услышать на предприятиях, в банках и даже в кабинетах высокопоставленных чиновников. В чем привлекательность данного метода? Без значительных затрат можно повысить эффективность производства товаров или услуг. Не нужно закупать новое оборудование, создавать инновации, развивать науку. С точки зрения отдельного предприятия это очень интересный вариант. Убрать лишние процессы, сократить затраты различных ресурсов, получить дополнительную прибыль. Это совпадает с интересами менеджеров, акционеров, сотрудников. Для многих российских предприятий бережливое производство представляет движение вперед к большей эффективности.

Нужно учесть, что бережливое производство как методология создавалось на промышленном предприятии почти полвека назад. Тогда не было современных компьютеров и информационных технологий, многие методы менеджмента качества и организации производства появились позже. Конечно, бережливое производство тоже развивалось. Но пришло время для его интеграции с современными информационными технологиями.

Технология создания, поддержки и применения единой информационной модели на этапах жизненного цикла продукции – от ее проектирования до эксплуатации и утилизации – является основой развития современных технологических процессов и информационных технологий, без которых невозможно создание сложных технических систем (СТС).

Унификация форм представления информационных моделей и способов их обработки является основой, определяющей направление для приложения усилий с целью дальнейшего повышения эффективности технологической подготовки производства со встроенной системой управления качеством и сокращения сроков технологического проектирования, что возможно на основе разработки и внедрения единых методик информационного сопровождения процессов подготовки производства.

Подготовка кадров завтрашнего дня

Известно, что в эпоху перемен «кадры решают все». Не только ресурсы, деньги, инфраструктура, а прежде всего кадры, чтобы реализовать инновационный путь развития. Прежде всего, нужны специалисты, понимающие смысл и технологии, связанные с созданием, внедрением и воспроизводством нововведений, в том числе и в управлении качеством. Стратегию подготовки кадров должны решать не кадровики. Они ориентируются на текущую модель предприятия и экстраполируют ее на перспективу. Поэтому призыв руководствоваться только мнением работодателей при кадровом заказе не совсем корректен. Это заведомо приводит к отставанию от реальной жизни на срок подготовки специалиста. Модель развития определяется внешней средой и должна разрабатываться высшим руководством с опорой на науку.

Обеспечение качества техническими и организационными мерами (контроль, процессный подход и др.) должно дополняться мотивацией персонала. Отсутствие мотивации и низкий моральный уровень неизбежно приводят к снижению качества даже в условиях тотального контроля. Этот тезис можно проиллюстрировать многими историческими примерами от рабовладельческого строя до наших дней.

Качество управления – еще один очень важный аспект управления качеством. Известно эмпирическое правило десятикратного увеличения затрат на исправление ошибок на каждом этапе жизненного цикла изделия (ЖЦИ). Логическим следствием из этого правила является максимальная цена ошибки на начальных стадиях ЖЦИ. Таким образом, наибольшая опасность кроется в неправильно поставленной цели, ошибочно сформулированных задачах.

Для минимизации этих проблем требуется повышать качество управления и качество принимаемых решений. Можно предположить, что высшее руководство (и не только отдельного предприятия или организации) должно иметь соответствующий уровень образования и необходимые компетенции. Обычно это достигается хорошим базовым высшим образованием, врожденными способностями и накопленным опытом. Ускорить этот процесс можно дополнительным повышением квалификации в различных формах.

Говоря о повышении квалификации высшего руководства нужно иметь в виду не только различные краткосрочные курсы, но и серьезное длительное обучение без отрыва от основной работы. Имеется в виду заочное обучение в аспирантуре и работа над диссертацией. Такая подготовка позволяет глубоко систематизировать знания и развить научный подход. Странно, что такой вид интеллектуального развития потенциала руководителей не приветствуется со стороны государства. Вместо поощрения стремления к защите диссертации и приобретения нового уровня квалификации создаются искусственные барьеры на этом пути.

За последние годы резко сократилось количество защит кандидатских и докторских диссертаций по техническим наукам. Планомерно сокращается количество диссертационных со-

ветов, открытие новых становится все более сложным. Благая цель – повышение качества диссертаций, но «с водой можно выплеснуть и ребенка». Здесь можно провести аналогию с борьбой против допинга в спорте – в обоих случаях страдают невинные ученые и спортсмены.

Наибольшую потребность в кадрах высшей квалификации испытывают высокотехнологичные отрасли промышленности – аэрокосмический комплекс, производство военной технической продукции и др. Эти отрасли с трудом выжили после распада Советского Союза и сохранили свой потенциал до наших дней. Их дальнейшее развитие зависит от научной и кадровой поддержки. Отраслевая наука существенно сократилась по сравнению с советским периодом, академическая тоже переживает не лучшие времена. Наука в университетах, которая в развитых странах является мощным источником новых знаний и инноваций, у нас пока далека от такого уровня.

Среди причин можно назвать недостаточное финансирование, неэффективное управление, слабые связи с промышленностью. Но часть этих проблем можно решить без дополнительных затрат одновременно с подготовкой кадров высшей квалификации. Привлечение к научной работе специалистов и руководителей предприятий промышленности укрепляет связи с производством, повышает уровень и эффективность управления за счет новых знаний, увеличивает научный потенциал вузов и создает предпосылки для инновационного развития.

С точки зрения управления качеством перспективными являются специальности 05.02.23. «Стандартизация и управление качеством продукции» и 05.02.22. «Организация производства» (технические науки). По количеству защит диссертаций по данным специальностям можно оценить перспективы развития и повышения качества наших лучших машиностроительных предприятий. Состояние именно этих областей науки определяет конкурентоспособность наших будущих разработок. Что же мы видим сегодня? По специальности 05.02.22. «Организация производства» (технические науки) на сегодняшний день в Москве несколько лет не было ни одного диссертационного совета. Только в этом году создан диссертационный совет на базе МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отмена защит диссертаций с грифом «Для служебного пользования» и отсутствие «закрытых» советов отрезает возможность защиты диссертаций по данным специальностям специалистами «оборонки». В соответствии с действующими правилами защит необходимо опубликовать в интернете не только автореферат, но и полный текст диссертации. Для работ по юриспруденции, философии, социологии это логично, но для технических наук это означает бесплатную раздачу «ноу-хау» всем желающим. Ссылки на зарубежный опыт не учитывают разницу в традициях подготовки диссертаций. Наши диссертанты привыкли в своих работах честно описывать технологические тонкости процессов. Еще одна особенность нашего времени – необходимость для всех членов диссертационных советов регу-

лярно публиковать свои научные результаты в зарубежных изданиях. Это понятное желание чиновников увеличить количество публикаций в международных изданиях, приходит иногда в противоречие с логикой, например для специалистов из «закрытых» советов и организаций. В конце этого раздела возникает риторический вопрос – нам нужны показатели или реальная конкурентоспособность новой техники и технологий? Как говорили ранее – вам ехать или «шашечки»?

Еще одним из перспективных путей повышения кадрового потенциала высокотехнологичных отраслей промышленности может стать сертификация квалификаций. Разрабатываемая (в том числе и авторами статьи) национальная система оценки и сертификации квалификаций призвана обеспечивать поддержание соответствия качества рабочей силы (квалификации работников) потребностям экономики и общества посредством согласования позиций работодателей, системы образования и органов власти в области квалификаций. Основная задача системы – давать объективную, признаваемую всем профессиональным сообществом (работодателями), оценку соответствия квалификации работника (его знаний, умений и компетенций) требованиям производства и бизнеса, установленным соответствующими профессиональными стандартами, и подтверждать готовность работника выполнять конкретные виды трудовой деятельности вне зависимости от места, времени и способа получения квалификации.

Все проблемы можно решить комплексно, и пример такого решения можно найти на кафедре «Управление качеством и сертификация» МАИ (до 2015 г. МАТИ). Кафедра в 2017 г. отметила свое двадцатилетие. Основные научные разработки кафедры связаны с управлением качеством технологических процессов и совершенствованием систем менеджмента качества путем их интеграции с информационными (цифровыми) технологиями. Для решения этих проблем нужен только интеллектуальный потенциал, который формируется уже второе десятилетие. В качестве формального результата можно назвать десятки кандидатских и докторских диссертаций, защищенных сотрудниками и аспирантами кафедры «Управление качеством и сертификация», многочисленные научные исследования по данной проблеме. Накопленный опыт позволяет решать задачи практически любой сложности и получать необходимые инновации.

За время существования кафедры освоена подготовка востребованных специалистов по качеству в рамках различных образовательных программ с получением квалификаций экономист-менеджер и инженер-менеджер. Сейчас ведется подготовка бакалавров и магистров. Среди основных освоенных компетенций можно выделить умение разработать и внедрить СМК; планирование и разработка процессов жизненного цикла продукции; проведение аудита систем менеджмента качества; управление качеством на предприятиях различных сфер деятельности; организация деятельности по обеспечению качества продукции; разработка проектов развития предприятий и стратегий поведения в области качест-

ва и информационных технологий на различных отраслевых рынках; организация деятельности консультационных фирм в области качества; способность разрабатывать варианты управленческих решений и обосновывать их выбор на основе критериев эффективности и результативности.

Подготовка профессионалов качества разного уровня от бакалавра до доктора технических наук – это весомый вклад в развитие Российской экономики. Можно упомянуть консалтинг различного уровня, аккредитацию преподавателей кафедры в качестве экспертов-аудиторов в системе ГОСТ Р, повышение квалификации работников промышленности и т.д. Сотрудники и выпускники кафедры активно участвуют в разработке новых методов и инструментов качества, совершенствуют системы менеджмента качества, реализуют на практике методы повышения конкурентоспособности.

Подводя итог, можно предложить один из возможных путей развития науки, производства и образования в области качества – создание инновационных методологий (глобальное качество, оптимальное качество, современное бережливое производство и др.) с использованием современных методов менеджмента качества, информационных технологий и профессиональным кадровым и научным сопровождением.

менное бережливое производство и др.) с использованием современных методов менеджмента качества, информационных технологий и профессиональным кадровым и научным сопровождением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев, В.А., Одинокоев, С.А., Серов, М.М. Современные методы управления качеством при высокоскоростном затвердевании расплава // *Технология металлов*. 2016. № 9. С. 44 – 48.
2. Васильев, В.А., Александрова, С.В. Управление качеством в современных условиях // *Технология металлов*. 2014. № 9. С. 34 – 43.

REFERENCES

1. Vasiliev, V.A., Odinokov, S.A., Serov, M.M. Modern methods of quality control at high-speed melt solidification // *Metal Technology*. 2016. No.9. pp. 44-48.
2. Vasiliev, V.A., Alexandrova, S.V. Quality control under modern conditions // *Metal Technology*. 2014. No.9. pp. 34-43.

Рецензент д.т.н. В.А. Полетаев

УДК 621.9

DOI: 10.12737/article_5aacd858c344d8.93651834

О.Н. Федонин, д.т.н., А.В. Киричек, д.т.н., Д.И. Петрешин, д.т.н.
(Брянский государственный технический университет, 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)
E-mail: avk.57@yandex.ru

Технологическое повышение эксплуатационных свойств деталей машин

Рассмотрено влияние технологии изготовления на формирование параметров качества поверхностного слоя и обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. Отмечено влияние на эксплуатационные свойства не только режимов, но и технологического способа обработки, даже при обеспечении аналогичных параметров качества поверхностного слоя. Оценено влияние на работу тяжело нагруженных изделий глубины поверхностного упрочнения и строения несущего слоя. Рекомендована многоуровневая организация поверхностных слоев и подслоев, формирование гетерогенных структур, наноструктурирование тонкого поверхностного слоя. Показаны преимущества поверхностного деформационного упрочнения, в том числе с применением волны деформации и в сочетании с последующей химико-термической обработкой материала. Выявлены перспективы применения волнового деформационного упрочнения в аддитивных технологиях прямого послойного синтеза деталей наукоемких изделий.

Ключевые слова: технология; поверхностный слой; эксплуатационные свойства; материал; послойный синтез; упрочнение; гетерогенная структура; пластическое деформирование; волна деформации.

O.N. Fedonin, D. Eng., A.V. Kirichek, D. Eng., D.I. Petreshin, D. Eng.
(Bryansk State Technical University, 7, 50 Years of October Avenue, Bryansk, 241035)

Technological increase of machinery operation properties

Manufacturing technology impact upon quality parameters of a surface layer and ensuring machinery operation properties is considered. An impact upon operation properties not only of modes, but also a technological method of machining, even at ensuring similar parameters of the surface layer quality is emphasized. The impact of a surface strengthening depth and a structure of a supporting layer upon hard-loaded product operation is estimated. A multi-layer organization of surface layers and sublayers, the formation of heterogeneous structures, thin surface layer nano-structuring are recommended. There are shown advantages of surface deformation strengthening including the use of a deformation wave in combination with the further chemical-thermal treatment of material. The prospects of wave deformation strengthening use in additive technologies of the direct layer-by-layer synthesis of parts in science intensive products are revealed.

Keywords: technology; surface layer; operation properties; material; layer-by-layer synthesis; strengthening; heterogeneous structure; plastic deformation; deformation wave.

Современное машиностроение требует непрерывного повышения технического уровня наукоемких изделий. Научно-технический прогресс повсеместно сопровождается требова-

ниями повышения грузоподъемности, производительности и точности машин, оборудования, предъявляет все более жесткие требования к несущей способности, надежности и долговечности, требует существенного (кратного) повышения эксплуатационных свойств деталей машин. Проблема решается как за счет конструирования изделий и применения материалов новых поколений, так и путем создания новых технологий обработки, которые должны не только эффективно использовать эксплуатационные свойства новых материалов, но и усиливать их.

В процессе изготовления достигается не только требуемая геометрическая точность, но и микрогеометрия, напряженное состояние и микротвердость несущих поверхностей деталей машин. К числу наиболее важных достижений технологической науки, открывающих новые возможности повышения надежности и долговечности машин, относятся разработка учения об определяющем влиянии технологии изготовления деталей на эксплуатационные свойства, о качестве поверхностного слоя и качестве обработки, технологической наследственности. По данным исследований Мичиганского университета на предприятиях США еще в 1982 г. качество поверхностного слоя стало таким же важным показателем процесса обработки деталей, как и производительность для 95 % технологических операций.

Российские ученые внесли большой вклад в развитие науки о технологическом обеспечении качества поверхностного слоя и обеспечении эксплуатационных свойств деталей машин. Установлено влияние качества поверхностного слоя на интенсивность приработки и износостойкость, контактную выносливость и усталостную прочность, живучесть, контактную жесткость. Исследованиями Демкина Н.Б., Евстигнеева М.И., Елизаветина М.А., Костецкого Б.И., Крагельского И.В., Кудрявцева И.В., Маталина А.А., Папшева Д.Д., Подзея А.В., Рудзита Я.А., Рыжова Э.В., Серенсона С.В., Сулимы А.М., Сулова А.Г., Федорова В.П. и многих других ученых убедительно доказана взаимосвязь параметров качества контактирующих и сопряженных поверхностей с их эксплуатационными свойствами.

Для характеристики и оценки качества поверхностного слоя традиционно используются параметры химического состава и структурно-фазового состояния, а также экзотермической эмиссии; широкое применение находит оценка качества поверхностного слоя по параметрам шероховатости, степени упрочнения, напряженного состояния.

Известно, что при аналогичных значениях отдельных параметров качества поверхностного слоя деталей машин, но разных технологических способах их обеспечения, наблюдается серьезный разброс данных по эксплуатационным свойствам.

Например, получено обширное экспериментальное подтверждение существенного увели-

чения предела выносливости поверхностного слоя детали, содержащего остаточные напряжения сжатия, полученные в результате деформационного упрочнения. В то же время, ожидаемое повышение усталостной прочности вследствие создания сжимающих остаточных напряжений в процессе термической обработки очень часто не находит экспериментального подтверждения.

Несущая способность поверхностей, имеющих аналогичную твердость и одинаковые характеристики Ra и $Rmax$, но обработанных различными методами, например, шлифованием и поверхностным пластическим деформированием, разная вследствие различных радиусов вершин микронеровностей r , разного расстояния от линии выступов до средней линии Rp , отличающихся значений относительной опорной длины профиля tp поверхности несущего слоя. При аналогичных величинах Ra , $Rmax$ значения r , tp больше, а Rp меньше при обработке поверхностным пластическим деформированием (ППД).

В связи с этим, в Брянском государственном техническом университете получило развитие научное направление, связанное с прямым одноступенчатым исследованием влияния технологических режимов и способов обработки деталей машин на их эксплуатационные свойства. Проведены обширные исследования влияния технологии изготовления на износостойкость и контактную жесткость деталей машин [1, 2].

Наиболее перспективными направлениями дальнейших исследований закономерностей технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин является более глубокое изучение влияния глубины упрочнения и рационального строения несущего поверхностного слоя, поиск нетрадиционных эффективных комбинированных упрочняющих технологий, расширение технологических возможностей и области применения технологий поверхностного упрочнения.

В процессе эксплуатации деталей всегда наиболее нагружен поверхностный слой, электронная структура которого существенно отличается от электронной структуры объема материала. Это позволяет квалифицировать поверхностный слой твердого тела как особое состояние вещества. При деформации материала структурные изменения в поверхностном и приповерхностном слоях протекают с опережением по сравнению с внутренними объемами. За счет более раннего пластического течения и упрочнения, вследствие повышенной плотности дислокаций, приповерхностный слой становится барьером для выхода дислокаций на поверхность из внутренних слоев металла, что предполагает возможность повышения механических свойств материала модификацией его тонких поверхностных слоев [3].

В подавляющем большинстве случаев поверхностный слой деталей работает в условиях сложного напряженного состояния. При интенсивной эксплуатации наиболее нагруженная

точка чаще всего находится не на поверхности, а на некоторой глубине. В связи с этим, весьма заманчивая перспектива повышения свойств исходного материала невысокого качества за счет нанесения тонких твердых покрытий чаще всего нереализуема. Глубина несущего поверхностного слоя детали, формирующегося при изготовлении и эксплуатации, может составлять от десятых долей микрометра до нескольких миллиметров и даже десятков миллиметров.

Применение высокопрочных материалов для изготовления ответственных деталей обеспечивает снижение массы и повышение технико-экономических показателей машин. Однако рост статической прочности металлов сопровождается резким замедлением роста их предела выносливости, более высокой чувствительностью к концентрации напряжений. Чувствительность металла к поверхностным концентраторам напряжений зависит от условий нагружения.

В условиях периодического контактного воздействия, циклического изгиба или кручения, когда поверхностные слои подвергнуты более высокому действию напряжения, чем нижележащие слои, чувствительность к рискам, поверхностным концентраторам увеличивается по сравнению с условиями однородного распределения напряжений по сечению детали в условиях растяжения–сжатия. Наличие грубых рисков на высоконапряженной переходной поверхности зуба, обработанной фрезерованием и шлифованием, вызывает появление и локализацию пластических деформаций, даже если максимальные местные напряжения ниже предела упругости. Такие пластически деформированные объемы в условиях циклических напряжений развиваются в магистральные трещины, приводящие к разрушению.

Исследования контактной выносливости и контактной прочности деталей машин, в том числе деталей зубчатых передач, 90 % которых заменяются по причине контактного разрушения зубьев, показали, что упрочненные (например, ХТО) рабочие поверхности могут подвергаться поверхностным и глубинным контактным разрушениям [4]. Возникновение тех и других может происходить независимо, так как они обусловлены различными факторами. Наиболее опасны глубинные контактные разрушения: они имеют прогрессирующий характер, приводят к отделению крупных частиц металла, интенсивному изнашиванию зубьев. Переход от поверхностного к глубинному разрушению приводит к резкому снижению долговечности.

Аналогичный процесс имеет место и при эксплуатации деталей с упрочняющими покрытиями. Отмечено, что для поверхностей с упрочняющими покрытиями, работающих в условиях высоких контактных нагрузок, правильное назначение толщины и механических характеристик материала основы и покрытия становится определяющим в обеспечении работоспособности поверхностного слоя. В зависимости от толщины и механических свойств упрочненного слоя (покрытия) возможны следующие

механизмы разрушения: пластическое деформирование (продавливание покрытия), отслаивание, возникновение поверхностных трещин и трещин на границе раздела покрытия и основы, формирование мощных концентраторов напряжений, релаксация которых происходит за счет разрушения несущего слоя. Другой проблемой упрочнения поверхностного слоя является то, что при существенном повышении предела текучести и предела прочности происходит одновременное значительное снижение его пластичности. Особенно сильно это проявляется для высокопрочных материалов, поскольку размер критического дефекта в них составляет 1...30 мкм.

Известные технологии обработки и упрочнения, как правило, не позволяют полностью раскрыть потенциал материала. Анализ технологических возможностей способов поверхностного упрочнения свидетельствует об ограниченности каждого.

Прирост прочностных свойств конструкционных материалов за последние десятилетия был обусловлен в основном разработкой сплавов с новым химическим и фазовым составом, но в последние годы наметились новые пути повышения свойств конструкционных материалов за счет целенаправленного формирования интенсивной пластической деформацией микро- и нанокристаллической структуры, позволяющей наряду с повышением прочности и твердости сохранять высокий уровень вязкости и пластичности [5].

В общем случае упрочнением необходимо обеспечить тонкий твердый слой глубиной 5...100 мкм, лежащий на глубоком и градиентно упрочненном переходном подслое. Для повышения нагрузочной способности желательна многоуровневая организация тонких поверхностных слоев и подслоев, позволяющая обеспечивать несколько уровней самоорганизации материала при разрушении. Несущие поверхностные объемы материала должны быть многослойными, гетерофазными, наноструктурированными, границы фаз – размытыми, зубчатыми или игольчатыми. Желательно наличие широкой диффузионной зоны между основой и твердым тонким поверхностным слоем, образование таких гетерофазных структур, в которых нанокристаллы высокопрочной фазы окружены нанопрослойками сдвижнестойчивой фазы – стабилизатора.

Направленному поиску прогрессивных технологий создания градиентного гетерогенного материала, армированного областями высокопрочной фазы, которые окружены пластичными и вязкими прослойками, препятствует сложившийся стереотип необходимости равномерного упрочнения поверхностного слоя, что объясняется неоднозначным влиянием пластичных прослоек на прочностные свойства гетерогенного материала. Свойства гетерогенных материалов в значительной степени определяются не только свойствами каждого компонента, но и их соотношением в композиции, формой,

пространственным расположением, ориентацией частиц более прочной фазы в пластичной матрице.

Для создания композиционного упрочненного слоя, отличающегося наличием регулярных градиентных областей с модифицированным структурно-фазовым состоянием, наиболее перспективными являются технологии, относящиеся к пластическому деформированию.

Исследованиями качества обрабатываемой поверхности и технологии обработки пластическим деформированием занимались А.Ю. Албагачиев, П.Г. Алексеев, А.И. Андрианов, Б.М. Аскинази, А.П. Бабичев, М.А. Балтер, В.А. Белов, А.Г. Бойцов, В.М. Браславский, М.С. Дрозд, М.М. Жасимов, С.А. Зайдес, Е.Г. Коновалов, И.В. Кудрявцев, Н.Д. Кузнецов, А.А. Маталин, А.А. Михайлов, Л.Г. Одинцов, Н.В. Олейник, Д.Д. Папшев, Е.В. Перепичка, В.В. Петросов, В.П. Пономарев, Ю.Г. Проскураков, В.И. Серебряков, В.А. Сидоренко, В.М. Смелянский, А.Г. Суслов, В.М. Торбило, Л.А. Хворостухин, В.И. Цейтлин, П.А. Чепя, Л.М. Школьник, Ю.Г. Шнейдер, Д.Л. Юдин, А.И. Якушев, и др.

Исследования с помощью оптического и электронного микроскопов, рентгеноструктурного и резистометрического анализов, методов внутреннего трения показали, что пластическая деформация способствует повышению плотности и активности взаимодействия дислокаций; интенсификации диффузии атомов примесей; развитию различных стадий деформационного старения; распаду пересыщенного твердого раствора; снижению локальных микронапряжений; уменьшению количества остаточного аустенита [6].

При обработке ППД отсутствуют термические дефекты и шаржирование обрабатываемой поверхности абразивом; обеспечивается минимальная шероховатость поверхности с благоприятной формой микронеровностей и большой долей опорной площади; создаются сжимающие остаточные напряжения; плавно и стабильно повышается микротвердость поверхностного слоя. Комплекс механических свойств после ППД лучше у стали с мартенситной, чем у стали с сорбитной и трооститной структурой. Наибольший эффект от упрочнения ППД достигается для циклически нагружаемых деталей с конструктивными (галтели, выточки, резьбы, зубья, шлицы) или эксплуатационными (царапины, надрезы) концентраторами напряжений.

Предварительная холодная пластическая деформация перед ХТО интенсифицирует диффузионные процессы и позволяет достигнуть более высоких значений концентрации углерода в диффузионной зоне. Проведение ППД перед цементацией позволяет получать структуру с более мелкими карбидными частицами, что повышает эксплуатационные свойства поверхностного слоя. Установлено [7], что поверхностный слой после ППД и ХТО имеет в 2 – 3 раза меньшее содержание остаточного аустенита и более равномерную структуру скрытоигольча-

того мартенсита.

В результате упрочнения ППД становится возможным применение высокопрочных сталей с мартенситной структурой для деталей с высокой концентрацией напряжений, подвергающихся значительным циклическим перегрузкам. По эффективности повышения усталостной прочности концентраторов напряжений ППД превосходит другие виды деформационного и химико-термического упрочнения. При оптимальных режимах ППД долговечность деталей при перегрузках повышается в десятки раз, а предел выносливости в 1,5 – 3 раза.

Из мировой научной и технической практики известно, что получение значительных деформаций, за счет создания больших давлений в области контакта при сравнительно небольшой затраченной мощности, наиболее эффективно ударным нагружением материала. Однако при одной и той же энергии удара в зависимости от способа подвода энергии и применяемой ударной системы достигаются разные результаты. Эффективность динамического нагружения определяется формой импульса, поступающего в очаг деформации.

Проведенные исследования показали, что в ударных системах с промежуточным звеном генерируются плоские акустические волны, которые характеризуются законом изменения сил (амплитуды волны деформации) во времени, максимальным значением сил, временем и периодичностью действия сил (длительность и скажность импульса) и энергией волны деформации.

Волна деформации состоит из потока пролонгированных ударных импульсов (период волны), имеющих головную и хвостовую части. Параметры головной части импульса в основном зависят от геометрических размеров и свойств материала бойка и волновода, скорости удара бойка по волноводу. Хвостовая часть импульса формируется за счет энергии отраженных волн деформации и зависит от упругопластических свойств нагружаемого материала, приведенной кривизны инструмента и обрабатываемой поверхности. Использование хвостовой части позволяет пролонгировать воздействие ударного импульса на материал, интенсифицировать упругопластическую деформацию и в 3–5 раз увеличить количество передаваемой в очаг деформации энергии, по сравнению с ударными системами без промежуточного звена [8, 9].

Статическое поджатие волновода с инструментом к нагружаемой поверхности создает условия для предотвращения преждевременного разрыва контакта в процессе удара, обеспечивая рекуперацию отраженных волн деформации. Большое количество управляемых технологических факторов обеспечивает высокую управляемость и гибкость процесса, широкие возможности варьирования параметрами качества поверхностного слоя.

Для каждого материала существует оптимальная длительность импульса, при достиже-

нии которой обеспечиваются максимальные степень и градиент наклепа. Увеличение количества управляемых технологических факторов обеспечивает высокую гибкость процесса, широкие возможности варьирования параметрами качества упрочненного поверхностного слоя.

Способ позволяет получать на полноразмерных изделиях гетерогенно упрочненную структуру с заданными свойствами, как по глубине, так и вдоль упрочненной поверхности, структурировать на нано уровне наиболее упрочненные области. Электронный микроскоп фиксирует структурные составляющие, размер которых варьируется в диапазоне 30...90 нм [10]. По сравнению со сплошным упрочнением материала, потеря ударной вязкости материала с гетерогенной структурой – менее 5 %, что в 7 раз меньше по сравнению со сплошным упрочнением материала.

Установлена возможность получения глубокого упрочненного слоя 10...15 мм, что в 2 – 3 раза больше, по сравнению с известными способами деформационного упрочнения. Упрочняется не только контактная, но и опорная поверхности в результате действия отраженных волн деформации. На абсолютные значения параметров упрочненного слоя влияют форма и размеры упрочняемого изделия вследствие изменения волновых состояний материала в теле образца, формирования областей концентрации сжимающих и растягивающих напряжений. Следует учитывать и влияние технологической наследственности, сформированной на предшествующих технологических операциях, анизотропии свойств, вследствие направленной деформации зерен. Уникальна возможность снижения, вплоть до ликвидации, анизотропии за счет дробления зерен.

Важной особенностью способа упрочнения ударными волнами деформации является возможность регулирования передаваемой энергии заданному участку поверхности упрочняемого металла, причем размеры такого участка могут варьироваться от 1...2 до 50 мм, что позволяет в широком диапазоне регулировать требуемую глубину, степень и равномерность упрочнения, возможность создания градиентного гетерогенно упрочненного естественно армированного материала [11, 12].

Эффективность волнового деформационного упрочнения, в том числе в сочетании с ХТО (цементацией), определялась экспериментально. В результате гетерогенного упрочнения материала волной деформации, в т.ч. комбинированного, отмечено кратное (в 7–10 раз) повышение долговечности при работе в условиях контактно-усталостного изнашивания [13, 14].

Перспективно применение волнового деформационного упрочнения в процессах прямого послойного синтеза изделий в аддитивных технологиях [15].

Аддитивные технологии уже приобрели статус стратегически важных, приоритетных технологий машиностроения. Существующие на сегодня передовые установки для реализации

аддитивных технологий содержат в своем составе два модуля. Для наращивания используется аддитивный модуль, для выполнения коррекции формы механической обработкой резанием – субтрактивный. Такое сочетание является оптимальным для решения задач формообразования.

Точное получение формы – это важнейшая, но далеко не единственная задача, которая решается при производстве деталей. Важнейшей задачей современных аддитивных технологий является обеспечение качественной структуры материала и высоких эксплуатационных свойств получаемой детали при многократном увеличении производительности.

Высокотемпературное воздействие, которым сопровождается любой из известных аддитивных процессов, негативно сказывается на материале заготовки. Особенности технологии являются обеспечение высокого качества структуры только при весьма низкой производительности и высокой себестоимости процесса. С ростом производительности резко увеличивается количество дефектов структуры, растет пористость, снижаются механические и эксплуатационные свойства.

Процесс аддитивно-субтрактивной обработки, совмещенный с волновым деформационным упрочнением, позволяет структурировать, уплотнить, упрочнить материал выращенного слоя, сформировать вместо растягивающих остаточных напряжений термической природы сжимающие.

Проведены сравнительные исследования по структуре железоуглеродистого материала, полученного аддитивно-субтрактивной технологией и аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологией. Установлено, что в упрочненном материале, в отличие от неупрочненного, практически отсутствуют скрытые полости. Средний размер зерна образца, выращенного по технологии с упрочнением, снижается более чем в 2 раза, а твердость увеличивается в 1,5–2 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000.
2. Рыжов, Э.В., Суслов, А.Г., Федоров, В.П. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2006. – 186 с.
3. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Изд. СО РАН, 2006. – 520 с.
4. Генкин, М.Д., Рыжов, М.А., Рыжов, Н.М. Повышение надежности тяжелонагруженных зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
5. Валиев, Р.З., Александров, И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура, свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
6. Васильева, А.Г. Деформационное упрочнение закаленных конструкционных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 231 с.

7. Папшев, Д.Д., Пронин, А.М., Кубышкин, А.Б. Эффективность упрочнения цементованных деталей машин // Вестник машиностроения. – 1990. – № 8. – С. 61–64.

8. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Лазуткин, А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.

9. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л. Создание поверхностного слоя с высокими эксплуатационными свойствами волновым деформационным упрочнением // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2014. – № 4 (205). – С. 3–7.

10. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Кузьменко, А.П. Использование ударных волн деформации для наноструктурирования металлических материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – № 8 (50). – С. 17–22.

11. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л. Перспективы кратного повышения эксплуатационных свойств естественным армированием металлических материалов при технологическом обеспечении многоуровневой гетерогенной структуры // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 4 (112). – С. 3–10.

12. Kirichek A.V., Solovov D.L. Properties and technology for quasi-composite blanket using natural reinforcement of the metal by strain affected areas // Журнал нано- и электронной физики. 2013. Т. 5. № 4 Part1. С. 04010-1-04010-5.

13. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Баринов, С.В., Силантьев, С.А. Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 7(43). – С. 9–15.

14. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Тарасов, Д.Е. Упрочнение железоуглеродистых сплавов комбинированной обработкой волной деформации и цементацией // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. № 12. – С. 36–39.

15. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Жирков, А.А., Федонин, О.Н., Федонина, С.О., Хандожко, А.В. Возможности аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – № 4 (52). – С. 151–160.

REFERENCES

1. Suslov, A.G. *Quality of Machinery Surface Layer*. – М.: Mechanical Engineering, 2000.

2. Ryzhov, E.V., Suslov, A.G., Fedorov, V.P. Technological support and operation properties increase of parts and their Joints: Technologist's Library. – М.: Mechanical Engineering, 2006. – pp. 186.

3. *Surface Layers and Inner Limits of Partition in Heterogeneous*

Materials / under the editorship V.E. Panin. – Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2006. – pp. 520.

4. Genkin, M.D., Ryzhov, M.A., Ryzhov, N.M. *Heavily-loaded Gearing Reliability Increase*. – М.: Mechanical Engineering, 1981. – pp. 232.

5. Valiev, R.Z., Alexandrov, I.V. *Bulk Nano-structured Metal Materials: Manufacturing, Structure, Properties*. – М.: PC "Academbook", 2007. – pp. 398.

6. Vasilieva, A.G. *Deformation Hardening of Hardened Structural Steel*. – М.: Mechanical Engineering, 1981. – pp. 231.

7. Papshev, D.D., Pronin, A.M., Kubyshekin, A.B. Strengthening efficiency of carbonized machine parts // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 1990. – No.8. – pp. 61-64.

8. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Lazutkin, A.G. Technology and equipment of static-pulse processing with surface plastic deformation: Technologist's Library. – М.: Mechanical Engineering, 2004. – pp. 288.

9. Kirichek, A.V. Soloviyov, D.L. Formation of surface layer with high operation properties through wave deformation strengthening // *Reference Book. Engineering Journal with Appendix*. – 2014. – No.4 (205). – pp. 3-7.

10. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Kuzmenko, A.P. Deformation shock wave use for meta material nano-structuring // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – No.8 (50). – pp. 17-22.

11. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L. Outlooks in multiple increase of operation properties by metal material natural reinforcement at technological support of multi-level heterogeneous structure // *Hardening Technologies and Coatings*. – 2014. – No.4 (112). – pp. 3-10.

12. Kirichek A.V., Soloviyov D.L. Properties and technology for quasi-composite blanket using natural reinforcement of the metal by strain affected areas // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2013. Vol.5. No.4 Part1 C. 04010-1-04010-5.

13. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Barinov, S.V., Silantiev, S.A. Contact endurance increase in machinery through hardening with static-pulse processing // *Hardening Technologies and Coatings*. – 2008. – No.7 (43). – pp. 9-15.

14. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Tarasov, D.E. Iron-carbon alloy hardening by combined processing of wave deformation and carbonizing // *Hardening Technologies and Coatings*. – 2013. No.12. – pp. 36-39.

15. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Zhirkov, A.A. Fedonin, O.N., Fedonina, S.O., Khandozhko, A.V. Potentialities of additive-subtractive hardening technology // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2016. – No.4 (52). – pp. 151-160.

Рецензент д.т.н. А.Г. Суслов

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 29.02.2018. Выход в свет 30.04.2018.

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

12+