

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 2 (92)

2019

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Поletaев В.А., Орлов А.А. Выбор стратегий электроэрозионной обработки перфорационных отверстий в турбинных лопатках ГТД. 3

Лебедев В.А., Тамаркин М.А., Бойко М.А. Энергетическое условие эффективной виброочистки изделий на этапе их подготовки к утилизации. . . 8

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Ямников А.С., Волков Д.П. Модификация схемы резания у червячных фрез для формообразования многозаходных винтовых выступов на прессовой оправке. 16

Ворожцова Н.А., Горбунов А.С., Макаров В.Ф. Обеспечение качества зубчатого венца цилиндрических колес при обработке комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом. 22

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ И МОДУЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Ситников А.А., Собачкин А.В., Камышов Ю.Н. Проектирование технологических процессов изготовления и ремонта деталей с износостойкими покрытиями. 29

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОДГОТОВКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Бочкарев П.Ю., Бокова Л.Г. Состояние и направления развития в области обеспечения технологичности конструкции изделий. 37

Фролов Е.Б., Паршина И.С., Зайцев А.С., Климов А.С. Индустрия 4.0: «Цифровой двойник» как средство повышения эффективности производственной системы. 42

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

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «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. (г. Москва)

Председатель редакционного совета

чл.-кор. РАН ПРИХОДЬКО В.М. (г. Москва)

Зам. председателя редакционного совета

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

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. 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)

д.т.н., проф. КУЗЬМИН С.В. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. ЛАВРИНЕНКО В.Ю. (г. Москва)

д.т.н., проф. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)

акад. РАН ЛЫСАК В.И. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

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

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

д.т.н., проф. ОВЧИННИКОВ В.В. (г. Москва)

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. ФАТЮХИН Д.С. (г. Москва)

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

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

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

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

д.т.н., проф. ШЛЯПИН А.Д. (г. Москва)

Зам. главного редактора

ДЮБКОВА Н.В.

DOI:10.30987/issn.2223-4608

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогам: «Роспечать» 79195, «Пресса России» 39536).

Тел. редакции: 8-903-572-87-39

E-mail: naukatm@yandex.ru

www.ntmash.tu-bryansk.ru

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-66087 от 10 июня 2016 года

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 2 (92)

2019

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.,prof. SUSLOV A.G. (Moscow)

Chairman of Editorial Committee

m.-corr. RAS PRIHOD'KO V.M. (Moscow)

Chairman Assistant

d.en.s.,prof. GRIGOR'YANTS A.G. (Moscow)

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. 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)

d.en.s.,prof. KUZMIN S.V. (Volgograd)

d.en.s.,prof. LAVRINENKO V.Yu. (Moscow)

d.en.s.,prof. LARIN S.N. (Tula)

Acad. RAS LYSAK V.I. (Volgograd)

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

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

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

d.en.s.,prof. OVCHINNIKOV V.V. (Moscow)

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. 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. SHLYAPIN A.D. (Moscow)

Deputy chief editor

DJUBKOVA N.V.

DOI:10.30987/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: 8-903-572-87-39

E-mail: naukatm@yandex.ru

www.ntmash.tu-bryansk.ru

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

Registration certificate

ПИ № ФС77-66087 от 10.06.2016

CONTENTS

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

Poletaev V.A., Orlov A.A. Strategy choice for punch electro-erosion treatment in turbine blades of gas turbine engines. 3

Lebedev V.A., Tamarkin M.A., Boiko M.A. Energy condition of efficient product vibratory cleaning at stage of product preparation to utilization. 8

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF MACHINING

Yamnikov A.S., Volkov D.P. Cutting procedure modification in hob cutters for multiple-thread spiral projection shaping on mandrel. 16

Vorozhtsova N.A., Gorbunov A.S., Makarov V.F. Quality assurance of ring gear in cylindrical wheels at processing with combined grinding-polishing worm disk. 22

FUNCTION-ORIENTED AND MODULAR TECHNOLOGIES

Sitnikov A.A., Sobachkin A.V., Kamyshev Yu.N. Design of engineering processes for manufacturing and repair of parts with wear-resistant coatings. 29

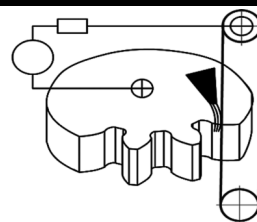
TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATED CONTROL

Bochkaryov P.Yu., Bokova L.G. State and directions of development in field of product design manufacturability assurance. 37

Frolov E.B., Parshina I.S., Zaitsev A.S., Klimov A.S. Industry 4.0: «Digital Counterpart» as means for effectiveness increase of production system 42

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

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



УДК 621.9.048.4

DOI: 10.30987/

В.А. Полетаев, д.т.н.

(ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева», 152394, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53)

А.А. Орлов, к.т.н.

(ПАО «ОДК-Сатурн», 152903, Ярославская обл., г. Рыбинск, пр. Ленина, 163)

E-mail: poletaev@rsatu.ru

Выбор стратегий электроэрозионной обработки перфорационных отверстий в турбинных лопатках ГТД

В статье рассмотрены различные варианты технологических процессов изготовления перфорационных отверстий лопаток турбин. Сопоставлены технологические процессы электроэрозионной обработки, основанные на последовательной и одновременной прошивке отверстий в проточной части лопаток турбин, определены рациональные области их применения.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка; прошивка (прожиг) перфорационных отверстий; лопатки турбин; электроэрозионные станки; мультиэлектроды.

V.A. Poletaev, Dr. Sc. Tech.

(FSBEI HE "Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk", 53, Pushkin Str., Rybinsk, 152394),

A.A. Orlov, Can. Sc. Tech.

(PPC "ODK-Saturn", 16, Lenin Avenue, Rybinsk, Yaroslavl region, 152903)

Strategy choice for punch electro-erosion treatment in turbine blades of gas turbine engines

In the paper different versions of engineering procedures for manufacturing punches in turbine blades are considered. The engineering procedures of electro-erosion treatment based on consecutive and simultaneous punch broaching in a flowing part of turbine blades are compared, and the efficient fields of their used are defined.

Keywords: electro-erosion treatment; punch broaching (burning-through); turbine blades; electro-erosion machines; multi-electrodes.

Основными узлами газотурбинных двигателей (ГТД) являются лопаточные колёса турбин и компрессоров, образующих ротор и статор двигателя. Технологические характеристики ГТД (экономичность, КПД и т.д.), в первую очередь, зависят от качества изготовления лопаточного колеса, как в целом, так и каждой лопатки в отдельности.

При этом трудоемкость изготовления лопаток достигает 45...50 % от общей трудоемкости изготовления всех деталей ГТД. Более то-

го, развитие авиационных газотурбинных двигателей идет по пути постоянного повышения рабочих температур, что требует использования новых материалов и проектирования деталей с эффективным охлаждением.

Использование в ГТД лопаток турбин, охлаждаемых через внутренние полости, требует изготовления на проточной части лопаток значительного количества сквозных отверстий малого диаметра 0,5...0,7 мм. Отверстия располагаются в несколько рядов на проточной

части лопаток турбин от хвостовика к периферии. В зависимости от размеров проточной части лопаток, их количество может составлять несколько десятков (сотен) отверстий расположенных в два и более ряда, от края входной кромки в сторону выходной по спинке и корыту проточной части лопатки [1].

Применение жаропрочных никелевых и кобальтовых сплавов при изготовлении лопаток турбин существенно ограничивает изготовление данных отверстий с помощью различных методов механической обработки. В настоящий момент определяющим способом изготовления таких отверстий является электроэрозионная обработка (ЭЭО) – прошивка отверстий [2].

Электроэрозионная обработка, используя в своей основе единый электрофизический процесс, реализуется при различных технологических схемах обработки. Для реализации каждой схемы существует специальное технологическое оборудование. Причем на каждом предприятии авиационного и энергетического машиностроения существует весь набор технологических машин, способных реализовать ту или иную схему обработки, каждая из которых приводит к достижению требуемого результата.

В связи с этим перед разработчиком технологического процесса постоянно возникает проблема выбора стратегии (технологической схемы) ЭЭО перфорационных отверстий в лопатках турбин. При этом технолог, как правило, располагает следующим набором технологического оборудования, которое в целом можно разделить на три группы:

1. Копировально-прошивочные электроэрозионные станки, например, Mitsubishi мод. EA28, CHMER мод. CM434, Agie Form 20/30, станки советского производства мод. 4E723, 4B723 и т.д. Данное оборудование осуществляет ЭЭО отверстий (прошивку) при вертикальном перемещении суппорта, несущего инструмент, который может быть сложной формы, в том числе профильный. Рациональной областью применения данного типа станков является обработка профильных карманов, канавок, занижений, литников, глухих отверстий, штамповой оснастки. При этом эффективность использования данных станков для обработки перфорационных отверстий считается недостаточной из-за невысокой производительности.

2. Электроэрозионные сверлильные станки (супердрели), например, Sarix мод. SX-200, MACHLine, Agie мод. DRILL 300 и т.д. Дан-

ное оборудование осуществляет ЭЭО при вертикальном перемещении суппорта (шпинделя) с вращающимся электродом. Электрод, как правило, полый, вращается вокруг своей оси и перемещается в координатах X , Y , Z , что позволяет осуществлять планетарное движение вокруг оси формируемого отверстия. Основная область использования – выполнение операций по обработке различных перфорационных отверстий. Современные станки позволяют обрабатывать отверстия диаметром от 0,1 до 6,0 мм [3].

3. Электроэрозионные проволочно-вырезные станки, например, Agie мод. CUT 30, Mitsubishi мод. MV2400S, ONA мод. AV130, АРТА мод. 453ПРО и т.д. осуществляют обработку (вырезку, раскрой) деталей с помощью бесконечного проволочного электрода путем его перемещения по осям X , Y , Z . Данное оборудование предназначено для вырезки различных профильных элементов наружного и внутреннего контура детали и может использоваться как для выполнения предварительных, так и окончательных операций. Например, отрезки технологических прибылей; разрезки собранных узлов; вырезки уступов для фиксации блоков сопловых аппаратов; профилирования сотовых уплотнений и т.д.

Предварительный, качественный анализ возможностей данного оборудования показывает, что для выполнения перфорационных отверстий наиболее предпочтительным, с точки зрения затрат на подготовку производства, является выбор в пользу электроэрозионных станков типа «супердрель». Здесь затраты на подготовку технологической операции и сроки изготовления опытного образца минимальны.

Однако поочередная обработка отверстий в условиях ужесточения требований к величине преобразованного слоя и шероховатости поверхности существенно увеличивает технологический цикл изготовления деталей, а также приводит к увеличению себестоимости изготовления. К тому же использование данного типа оборудования при серийном производстве лопаток турбины требует наличия дополнительных функций (например, замера и припасовки детали, орбитальной разбивки), что также приводит к существенному увеличению затрат.

С этой точки зрения, электроэрозионные копировально-прошивочные станки более эффективны в силу ограниченности своих технологических возможностей. Они более просты, не имеют большого количества управ-

ляемых координат, но обладают возможностью осуществления обработки с помощью профильных электродов гребенчатого типа или мультиэлектродов.

Данное преимущество позволяет вести обработку нескольких отверстий. При этом мультиэлектродов может быть установлено на вертикальном суппорте или шпинделе станка несколько, что позволяет вести обработку одновременно нескольких деталей. Естественно, затраты на изготовление такого инструмента и оснастку не сопоставимы с затратами на очередную обработку (прошивку) отверстий одним электродом. В связи с этим, для принятия решения о стратегии осуществления ЭЭО отверстий в лопатках ГТД необходим анализ затрат на осуществление той или иной технологической схемы, оценка себестоимости изготовления детали по сравниваемым вариантам.

На ОДК «Сатурн» был проведен такой анализ. При этом сравнивались различные схемы ЭЭО при прошивке отверстий в лопатках турбин диаметром от 0,5 до 0,7 мм; на глубину 4,0...5,0 мм. Отверстия расположены на входной кромке лопаток турбин, изготовленных из сплава ЖС6К; количество изготовленных отверстий 20 шт. в одном ряду; количество рядов от 3 до 5. Шероховатость поверхности внутри отверстий $Ra = 3,2$ мкм, преобразованный слой не более 0,1 мм.

Анализировался следующий алгоритм подготовки производства ЭЭО отверстий (рис. 1).

Для реализации обеих технологических схем прошивки отверстий при подготовке производства требуется:

1. Рабочие приспособления. Здесь возможны два варианта:

- использование специализированных наклонно-поворотных (глобусных) столов, имеющих две управляемые оси перемещения деталей;

- использование специальных приспособлений в виде угловых подставок (угольников).

Оба типа оснастки имеют базовые поверхности, позволяющие совместить приспособления с системой координат станка (нулевой точкой).

2. Инструментальная оснастка. Здесь для станков, осуществляющих прошивку отверстий, используют универсальные конструкции державок в виде цанг и направляющих (аналог конструктивных втулок). Для одновременной обработки отверстий используют специальные державки для крепления мультиэлектродов. Конструкция державки определяется количеством прожигаемых отверстий.

3. Электроды-инструменты. Для станков, реализующих поочередную прошивку по одному отверстию, инструмент выполняют в виде полой трубки, обычно из латуни. Для многоступенчатой обработки – это набор цилиндрических электродов, собираемых на державке в единый комплект (гребенку). Количество трубок соответствует количеству прошиваемых отверстий.

4. Управляющие программы перемещений инструмента при прожиге отверстий, карты наладки многоинструментальной оснастки, операционные и контрольные карты, средства контроля.

Анализ необходимого объема технологической подготовки производства показывает, что в случае наличия наклонно-поворотного стола затраты на оснастку, а также разработку управляющих программ и карт наладок для обоих типов станков будут примерно одинаковыми. При этом следует учитывать, что обработку деталей с большим количеством перфорационных отверстий, расположенных под разными углами, целесообразно выполнять на станках с наклонно-поворотным столом.

Обработка лопаток с несколькими рядами отверстий, распределенными по всей поверхности проточной части, в случае отсутствия специализированного наклонно-поворотного стола требует изготовления нескольких комплектов оснастки. Причем число комплектов будет равно количеству рядов отверстий. При этом затраты на технологическую подготовку производства вырастут многократно, а стоимость оснастки может сравниться по стоимости с оснащением станка наклонно-поворотным столом.

В случае равенства затрат на техническую оснастку разница в подготовке рассматриваемых вариантов прожига отверстий сводится к определению расхода электродов на каждом типе оборудования. Необходимое количество электродов установлено авторами на основе собственного опыта по прошивке перфорационных отверстий в лопатках турбин и анализе ЭЭО отверстий, изложенных в исследованиях [3]. Это количество может быть рассчитано на основе следующего выражения:

$$N = \frac{n_{\text{отв}} n_{\text{дет}} \times h \times \left(\frac{i}{100} \times n_{\text{пр}} + k_{\text{п}} \right)}{\left(L_{\text{о}} - L_{\text{ц}} - L_{\text{н}} - L_{\text{хх}} \right)}, \quad (1)$$

где N – требуемое количество электродов; $n_{\text{отв}}$ – количество обрабатываемых отверстий;

$n_{ДЕТ}$ – количество обрабатываемых деталей;
 $n_{ПР}$ – количество отверстий, обработанных одним электродом; h – глубина обработки, мм;
 i – значение износа электрода, %; $k_{П}$ – коэффициент подторцовки (подрезки) рабочей час-

ти электрода; L_0 – длина прожигаемого отверстия, мм; $L_{Ц}$ – длина цанги для зажима электрода, мм; $L_{Н}$ – длина направляющей электрода, мм; L_{xx} – расстояние от направляющей до поверхности детали, мм.

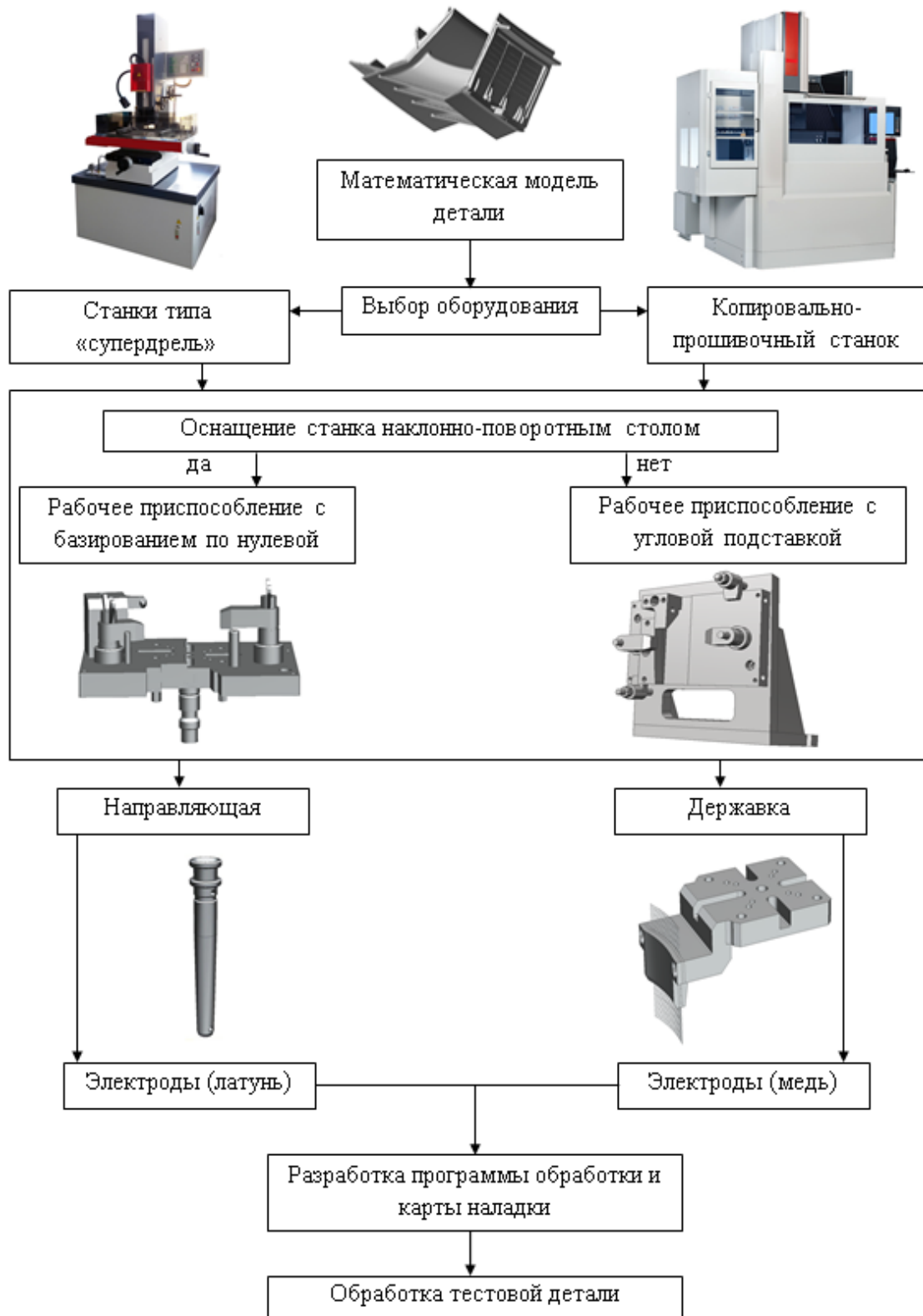


Рис. 1. Алгоритм технологической подготовки производства для электроэрозионных станков при обработке перфорационных отверстий

Использование данного выражения (1) позволяет проводить достоверные расчеты количества требующихся электродов. Так, при очередной прошивке лопаток из четырех рядов отверстий количеством по 20 шт. в каждом, диаметром 0,5 мм на длину 5 мм требуется электрод длиной 400 мм. Однако некоторые модели электроэрозионных сверлильных станков, например, Winbro мод. HSD6, Elenix мод. CT1200FX, позволяют устанавливать электрод длиной до 600...700 мм. Поэтому при наличии возможности надо стремиться к установке электродов максимальной длины, так как в этом случае общая длина электрода, с учетом его части используемой для закрепления в цанге, по отношению к его рабочей длине будет минимальна.

На копировально-прошивочных станках целесообразно использовать медные или вольфрамовые электроды. При этом их износ существенно ниже латунных. Используя выражение (1) можно определить количество отверстий, выполненных одним электродом. Так, медным электродом с рабочей длиной 80 мм можно будет выполнить 15...18 отверстий, а вольфрамовым – 25...30 отверстий.

Время обработки отверстий с учетом получения указанных выше требований на «супердрели» составит приблизительно 2,0...2,5 мин на одно отверстие и 40...50 мин на ряд в целом. При этом время обработки ряда отверстий на копировально-прошивочном станке будет сравнимо с «супердрелью» и составит примерно 50...60 мин на ряд или 2,5...3,0 мин на одно отверстие.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что вариант применения копировально-прошивочных станков для обработки перфорационных отверстий наиболее целесообразен в условиях серийного производства.

Оптимальным является использование данного варианта прошивки при изготовлении одного-двух рядов отверстий с помощью вольфрамовых электродов.

Использование станков типа «супердрель» целесообразно при обработке лопаток с большим числом перфорационных отверстий от 3 рядов до 15 и более. В данном случае для получения максимального эффекта станки должны быть оснащены наклонно-поворотными столами, сменщиками инструмента или электродов, а также системами автоматического замера и последующей припасовки.

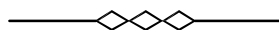
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Физико-химические** методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Изд. Дрофа, 2002. – 656 с.
2. **Поletaев В.А.** Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
3. **Смоленцев В.П.** «Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. – М.: Высшая школа, 1983. – 247 с.

REFERENCES

1. *Physical-Chemical Methods of Processing in Gas Turbine Engine Manufacturing / under the B.P. Saushkin.* – M.: Drofa Publishing House, 2002, - pp. 656.
2. *Poletaev V.A. Technology of Blade Automated Manufacturing for Gas Turbine Engines.* – M.: Mechanical Engineering, 2006. – pp. 256.
3. *Smolentsev V.P. "Electro-Physical and Electro-Chemical Methods for Material Treatment.* – M.: Higher School, 1983. – pp. 247.

Рецензент д.т.н. А.И. Болдырев



УДК 621.7.023
DOI: 10.30987/

В.А. Лебедев, к.т.н.,
М.А. Тамаркин, д.т.н.,
(Донской государственный технический университет, 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
М.А. Бойко, к.т.н.
(Азовский технологический институт (филиал Донского государственного
технического университета))
E-mail: va.lebedev@yandex.ru

Энергетическое условие эффективной виброочистки изделий на этапе их подготовки к утилизации

Рассмотрен один из основных этапов подготовки изделий к утилизации, предусматривающий их очистку от загрязнений. Показано, что наиболее перспективными методами очистной обработки являются механохимические методы очистки, основанные на применении различного спектра колебаний обрабатывающих сред. Предложено энергетическое условие эффективности, которое позволяет для заданных загрязнителей и материалов изделия осуществлять разработку и оптимизацию технологического процесса виброочистки, а также зависимость для оценки её продолжительности.

Ключевые слова: утилизация; очистка; загрязнения; виброобработка; адгезия; кавитация; обрабатывающая среда.

V.A. Lebedev, Can. Sc. Tech.,
M.A. Tamarkin, Dr. Sc. Tech,
(Don State Technical University, 1, Gagarin Square, Rostov-upon-Don, 344010)
M.A. Boiko, Can. Sc. Tech.
(Azov Technological Institute (Branch of Don State Technical University))

Energy condition of efficient product vibratory cleaning at stage of product preparation to utilization

One of the main stages of product preparation to the utilization providing for product decontamination is considered. It is shown that the most promising decontamination methods are mechanical-chemical methods for cleaning based on the application of different oscillation ranges of processing environment. There is offered an energy condition of effectiveness which allows carrying out the development and optimization of a vibro-cleaning technological process for specified pollutants and product material and also dependence for the assessment of its duration.

Keywords: utilization; cleaning; vibration treatment; adhesion; cavitation; processing environment.

Введение

Утилизация представляет собой комплекс технологических, конструкторских и организационных мероприятий, направленных на восстановление или придание рабочего ресурса объектам материального производства, а также на использование их по новому назначению с минимальными затратами энергии и материалов, либо на переработку с целью получения образцов для последующего использования его в качестве материальных ресурсов, в какой-либо отрасли производства или при выработке энергии с минимальной экологической вредностью.

Важнейшими технологическими этапами, определяющими жизненный цикл изделия

(ЖЦИ) на стадии утилизации, являются подготовительные операции. Благодаря многостадийной очистке и мойке, чередующейся с разборкой изделия, а также с дефектацией и сортировкой, обеспечивается эффективность организации и подготовки изделия или их составных частей к дальнейшей утилизации.

Очистная обработка как один из основных этапов утилизации изделий

Изделиям машиностроения приходится работать в различных условиях. В этом случае загрязняются как внешние объекты, так и внутренние поверхности изделия.

Загрязнения образуются не только за счет контакта с почвой, растениями, топливно-

смазочными материалами, а также при переменных температурных режимах, при наличии трения между деталями, при взаимодействии деталей между собой и с рабочей средой и при влиянии ряда других факторов поверхности сопрягаемых деталей.

Они снижают устойчивость защитно-декоративных покрытий, повышают скорость коррозионных процессов, снижают уровень культуры технического обслуживания и ремонт машин. В конечном итоге служат одной из причин, приводящей к понижению надежности машин и агрегатов и их жизненного

цикла.

В основу механизма их образования положена адгезия к исходной поверхности. На рис.1 приводится классификационное описание различных видов загрязнения изделий машиностроительного производства [1]. Эти загрязнения появляются за счет различных физико-химических процессов, а также разных температурных режимов работы отдельных групп деталей и встречаются частично или полностью в изделиях сельскохозяйственной техники, автомобилях и др. в течение их жизненного цикла.

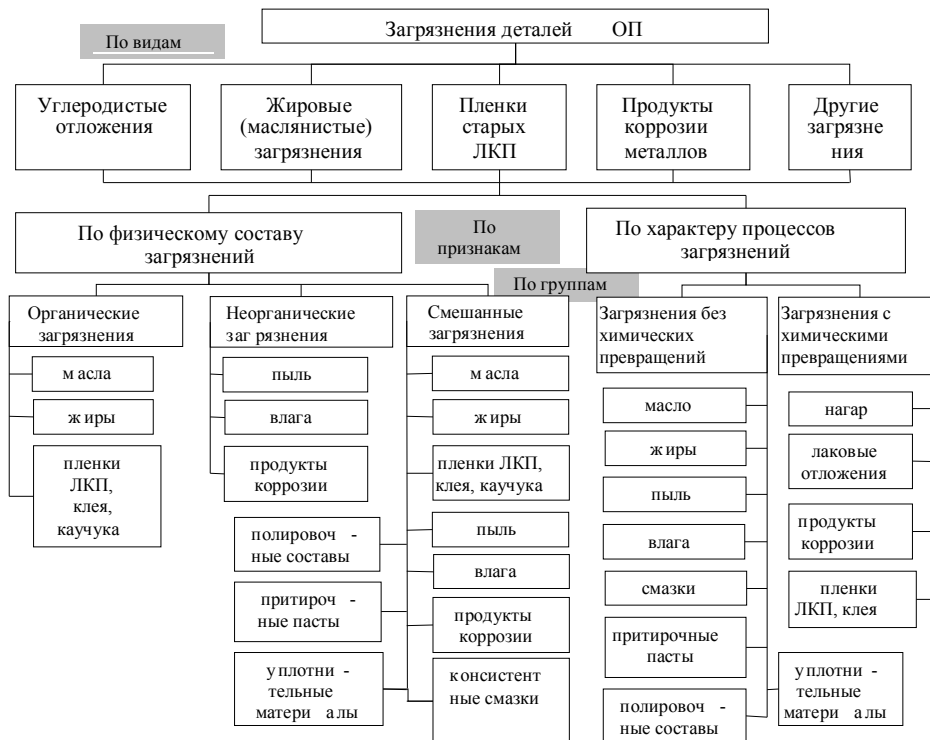


Рис. 1. Классификации основных загрязнений деталей изделий машиностроительного производства

Постоянное совершенствование технологий очистки и мойки остается одной из актуальных задач утилизации изделий машиностроения. Способ очистки зависит от вида загрязнения очищаемого изделия (состава материала, из которого изготовлена деталь, ее формы), свойств очищающих агентов (их состава, физического состояния), плотности загрязнения и др.

Очищающая среда может быть твердой, жидкой, газообразной или смешанной. Отдельные моечные операции совмещают с обезжириванием, т.е. с удалением масел и жиров с поверхностей деталей. Современные способы очистки загрязненных изделий предусматривают комплексное механическое, химическое и физико-химическое взаимодей-

ствие моющих растворов с загрязнениями и очищаемой поверхностью.

Наиболее перспективными методами очистной обработки являются механо-химические методы очистки, основанные на применении различного спектра колебания обрабатывающих сред, такие как вибрационная и ультразвуковая обработка [2].

Процесс удаления загрязнений при вибрационной обработке в общем случае обусловлен наличием двух основных его элементов: механического воздействия в виде микроударов частиц рабочей среды и смывания загрязнений циркулирующим моющим раствором. Встряхивание всей массы загрузки, а также переменные ускорения, вызванные вибрационным характером движения рабочей камеры

с частотой 5...50 Гц и амплитудой до 5 мм, способствуют отрыву сравнительно крупных масс (частиц) загрязнений, с меньшей силой сцепленных с очищаемой поверхностью.

В результате соударения деталей с частицами рабочей среды происходит образование первичных трещин, которые при повторном воздействии ударов приводят к расслоению и отделению загрязнений от поверхности детали. При выполнении процесса с промывкой жидкостью, попадая в образовавшиеся трещины и расслоения, ускоряет процесс очистки.

Таким образом, перечисленные факторы создают предпосылки для удаления сравнительно крупных и менее плотно прилипших к металлической поверхности частей загрязнений, обеспечивая как бы макроочистку.

Макроочистка происходит в первый период обработки. При этом удаляется 60...75 % всей очищаемой массы. Оставшаяся часть загрязнений удаляется преимущественно под действием микроударов частиц рабочей среды, осуществляющих как бы процесс микроочистки поверхности, завершая удаление наиболее плотных слоев скопившихся на поверхности загрязнений. При этом разрушение и диспергирование загрязнений происходит в результате ударного и царапающего действия частиц рабочей среды.

Существенную роль при этом играет царапающее действие частиц рабочей среды, имеющих твердость режущих (царапающих) элементов (абразивных зерен) большую, чем разрушаемый материал. Наличие абразивной среды обеспечивает более интенсивное удаление загрязнений, что является следствием относительно большей твердости абразивных гранул, чем твердость дроби, выштамповки и других металлических частиц рабочей среды.

При добавлении соответствующих химических веществ ТЖ приобретает свойства растворять загрязнения, и, таким образом, процесс вибрационной очистки деталей от загрязнений может быть дополнен третьим элементом – растворением загрязнений.

Следовательно, при вибрационной обработке имеет место протирание поверхности (динамический контакт частиц рабочей среды с очищаемой поверхностью) и перемешивание всей массы рабочей среды и деталей, прополаскивание деталей в моющем растворе в результате встряхивания, разрыхление загрязнений и ослабление их связи с поверхностью детали вследствие действия химически активных веществ.

В работе [8] показано, что наложение ульт-

развуковых колебаний способствует повышению интенсивности вибрационной обработки, и как следствие повышению эффективности виброочистки.

В зависимости от характера загрязнений, материала и формы обрабатываемых деталей условия вибрационной очистки (режим, рабочая среда, моющие и растворяющие жидкости) могут быть разнообразными.

Энергетическая модель виброочистки изделий от загрязнений

Удаление загрязнений – это всегда в той или иной мере затрата работы на отделение загрязнения от очищаемой поверхности. При этом задача сводится к преодолению сил сцепления между соприкасающимися телами, которые определяются энергией взаимодействия частиц загрязнения, как между собой, так и на границе раздела этих тел.

В общем виде формулу для вычисления сил F_3 , N , затрачиваемых на разрушение загрязнений и отделение их от очищаемой поверхности [3] можно представить в следующем виде:

$$F_3 = W \cdot S, \quad (1)$$

где W – адгезия загрязнения, МПа; S – поверхность контакта загрязнения (площадь поверхности загрязнения), m^2 .

Загрязнения, образующиеся на поверхностях деталей и изделий с точки зрения адгезионного взаимодействия, могут быть трех видов: жидкости, пленки и частицы. Адгезионное взаимодействие загрязнений с поверхностью определяется методами количественной оценки этого взаимодействия при помощи адгезионной прочности.

Адгезия жидкости, пленок и частиц может быть оценена по силе и работе, которые необходимо приложить для нарушения адгезионного взаимодействия, т.е. для отрыва. Прочность адгезионных связей различных типов загрязнений (жидкостей, пленок, частиц) будет определяться свойствами их межмолекулярного взаимодействия [4]. Соответственно адгезия будет отличаться количественно для загрязнений, различных по своей природе.

Адгезию взаимодействия частиц загрязнения между собой и с твердой поверхностью можно оценить из соотношения:

$$W = m g / s, \quad (2)$$

где m – масса частиц загрязнения, кг; s – фак-

тическая площадь контакта, m^2 ; q – ускорение свободного падения, m/c^2 .

В свою очередь адгезия частиц различается в воздушной (газовой) и жидкой средах. Если высота слоя жидкости в зазоре между контактирующими телами превышает высоту мениска, образующегося при смачивании соприкасающихся тел, то адгезия рассматривается как жидкостная [4]. Удаление жидкостных загрязнений с поверхности нельзя осуществить теми методами, которые применяются в случае адгезии частиц, т.е. путем приложения внешней силы, превышающей адгезионное взаимодействие [5]. Под действием силы происходит деформация жидкости и изменение площади ее контакта с поверхностью.

Адгезия пленок количественно определяется при помощи методов, основанных на отрыве пленок. Величина адгезии пленок не поддается точному расчету [3]. Работа, необходимая для отрыва может быть определена непосредственно экспериментально с учетом индивидуальных свойств материалов.

Если рассматривать процесс очистки как процесс разрушения под действием определенных сил, превышающих адгезионные силы, то при прочих равных условиях работа сил очистки должна быть больше адгезии загрязнителя:

$$F_o \geq W S. \quad (3)$$

При этом необходимо совершить работу достаточную для полного отделения загрязнения от очищаемого тела. Обеспечить данную работу эффективно можно в условиях вибрационной обработки комплексным воздействием гранулированной рабочей среды и активной технологической жидкости. При виброобработке очистка поверхностей (эрозия загрязнения), диспергирование твердых частиц и эмульгирование осуществляются, в основном, двумя характерными для неё факторами: ударно-импульсным силовым воздействием твердых частиц рабочей среды и гидродинамической кавитацией, обусловленной акустическим воздействием ударных волн.

Рассмотрим влияние этих факторов на процесс очистки от загрязнений поверхности деталей.

Скорость соударения частиц рабочей среды с обрабатываемой поверхностью деталей определяется по известной формуле [2]:

$$V_{ч.р.с} = 2\pi A f K_V, \text{ м/с}; \quad (4)$$

где A, f – амплитуда, м, и частота, Гц, колеба-

ний рабочей камеры соответственно; K_V – коэффициент потери скорости; l – расстояние от стенки рабочей камеры до рассматриваемой точки (частицы рабочей среды).

Функциональная зависимость усилий динамического воздействия частиц рабочей среды на поверхность обрабатываемых деталей от условий проведения процесса описывается эмпирическими уравнениями:

– при обработке свободно нагруженных деталей

$$F_{св} = 6V_{ч.р.с} \left(\frac{1}{K} \cdot m_1 \cdot \delta_s \cdot R \cdot K_m \cdot K_D \cdot B \right)^{0,5}; \quad (5)$$

– при обработке закрепленных деталей

$$F_{зак} = 6V_{ч.р.с} \left[\frac{1}{K} m_1 \cdot \delta_s \cdot R \cdot K_m \cdot K_D \left(1 - \frac{3}{8} K_1 \right) \right]^{0,5}, \quad (6)$$

где m_1 – масса частицы рабочей среды, кг; δ_s – предел текучести рабочей среды, Па; R – радиус частицы рабочей среды, м; K_m – коэффициент присоединенной массы; K_D – коэффициент, учитывающий деформирующие свойства стенок рабочей камеры; K – коэффициент повторных ударов; K_1 – коэффициент восстановления; B – коэффициент, учитывающий количество энергии удара, идущей на отскок и на перемещение обрабатываемой детали.

Силы соударения изменяются в широких пределах в зависимости от режима колебаний и характеристики рабочей среды, достигая 5...50 Н и более.

Контактные давления P_q , МПа, в зоне соударения определяются из уравнения

$$P_q = \frac{3}{2} \frac{F}{\pi \cdot a \cdot b}, \quad (7)$$

где F – сила соударения, Н; a и b – размеры полуосей контактной площадки, формируемой на поверхности частицами рабочей среды, м.

При вибрационной обработке наиболее характерным является соударение сферической поверхности с плоскостью, когда $a = b$. В этом случае формула для определения размеров полуосей площадки отпечатка упрощается и принимает вид:

$$a = 0,0677 \cdot [2 \cdot F \cdot R]^{\frac{1}{3}}. \quad (8)$$

Вибрационная очистка, как правило, осуществляется в условиях непрерывной подачи в рабочую камеру технологической жидкости требуемого по условиям обработки состава

[2]. Применение технологической жидкости обеспечивает удаление продуктов загрязнения с поверхности детали. Путём регулирования уровня жидкости в рабочей камере стабилизируется интенсивность очистки. Таким образом, наличие жидкости в рабочей камере и на поверхности деталей является тем необходимым условием, при котором активируются процессы кавитации, вызывающие гравитационную эрозию загрязнения поверхности деталей.

Перемещающиеся под действием акустических течений тонкодисперсные частицы загрязнения, наряду с основными частицами рабочей среды, попадая в зону действия ударных волн, возникающих при схлопывании кавитационных пузырьков, приобретают высокие скорости и обеспечивают дополнительные разрушения загрязнений за счёт удара о поверхность.

В работах [6, 7] установлено, что кавитационное разрушение эффективно тогда, когда процесс протекает при повышенном, по сравнению с атмосферным, статическим давлением. При вибрационной обработке высокое гидростатическое давление внутри массы загрузки, совершающей циркуляционное движение в рабочей камере, обусловлено высокой плотностью контакта частиц рабочей среды, как между собой, так и с обрабатываемыми деталями. Кроме того, гидростатическое давление непосредственно зависит от динамического состояния вибрационной технологической системы, которое в значительной мере определяется амплитудными и частотными параметрами.

На загрязнённых поверхностях всегда имеются концентраторы напряжений в виде микротрещин, неровностей поверхности и т.п. Под действием интенсивных микропотоков жидкости с кавитационными пузырьками (кавернами) проникает в поры, трещины, под отслоившиеся части загрязнения, где при их схлопывании возникает мощное ударное локальное давление с сильной неравномерностью.

Это вызывает появление в слое загрязнений дополнительных трещин и следов эрозии, способствующих скорейшему разрушению загрязнений. Кроме того, разрушающее действие каверн может проявиться и при её расширении. В этом случае каверна при резком расширении своими границами может производить удары по окружающей жидкости, которые могут передаваться разрушаемому материалу (загрязнению).

Во время схлопывания кавитационный пузырек излучает ударную волну, которая в окрестности схлопывающегося пузырька может быть достаточно сильной, чтобы сжать ближайшие зародыши до ещё меньшего объёма. После прохождения ударной волны эти зародыши разрываются, и создается цепочка схлопывания [7].

Действующую нагрузку в контакте можно рассчитать аналитически, как эквивалентное напряжение отображающее энергию силового воздействия на микрочастицы, находящиеся в зоне схлопывания кавитационного пузырька. Согласно исследованиям [6] удельное давление $P_{\text{кав}}$, МПа, развиваемое кавитационными пузырьками радиусом R_{max} , можно вычислить по формуле

$$P_{\text{кав}} \approx \frac{4}{3} \pi R_{\text{max}}^3 \cdot p_{\text{г}}, \quad (9)$$

где R_{max} – максимальный радиус кавитационного пузырька в момент схлопывания; $p_{\text{г}}$ – давление газа в полости пузырька;

Принимая что $p_{\text{г}} = p$, где p – гидростатическое давление в окружающей жидкости, можно записать

$$P_{\text{кав}} \approx \frac{4}{3} \pi R_{\text{max}}^3 \cdot p. \quad (10)$$

В работе [6] показано, что размер пузырька увеличивается по закону:

$$R = \sqrt{\frac{2p}{3\rho_{\text{ж}}}} \cdot t_m, \quad (11)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости; t_m – время роста кавитационной полости до схлопывания.

Эта зависимость позволяет оценить максимальный радиус кавитационного пузырька R_{max} .

Число разрушающих загрязнения ударов составляет лишь небольшую часть от числа схлопывающихся пузырьков. В зависимости от начальных параметров развития кавитации (скорости потока, размеров каверн, и т.д.) может развиваться или не развиваться достаточно высокое давление при схлопывании на загрязнённой поверхности. Также может оказаться, что центр схлопывания расположен слишком далеко от поверхности и образующаяся ударная волна не способна произвести разрушение.

Наиболее сильное воздействие на загрязнение обуславливается действием микроструек, образующихся при схлопывании пузырьков. Схлопывание пузырька происходит в со-

тые и тысячные доли секунды, поэтому окружающая пузырек жидкость занимает его место с большой скоростью, что приводит к возникновению местного кумулятивного удара жидкости. Кумулятивные струйки разрушают загрязнение на поверхности твердого тела за счет кинетической энергии жидкости. Проникающая в полость каверны при ее разрушении жидкость производит удар, который можно приближенно оценивать по формуле, приведенной в работе [6]:

$$P_{\text{кум}} = v\sqrt{\rho_{\text{ж}}\beta}, \text{ МПа}, \quad (12)$$

где v – скорость проникновения струи в полость каверны; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости; β – модуль сжатия жидкости.

Согласно данным из работы [7] скорость кумулятивной струи определяется из соотношения

$$v = \sqrt{\frac{52p}{3\rho_{\text{ж}}}}, \quad (13)$$

Модуль сжатия жидкости представляет собой относительное изменение объема жидкости, приходящееся на единицу изменения давления:

$$\beta = \frac{\Delta V}{\Delta p_{\text{г}} \cdot V}, \quad (14)$$

где ΔV – объем воздействующих кавитационных пузырьков; V – объем всех кавитационных пузырьков.

Разрушение загрязнений происходит под действием многократных кратковременных импульсов напряжения. Для разрушения загрязнения недостаточно захлопывания одиночного пузырька, а необходимо захлопывание в одном и том же месте ряда пузырьков. В качестве параметра, характеризующего воздействие кавитации, принимается безразмерная величина – индекс кавитации, предложенная в работе [6]:

$$k = \frac{\Delta V}{V}.$$

Так как кавитационные полости могут занимать (относительно объема всей жидкости) объем от 0 до всего объема, индекс кавитации будет лежать в пределах $0 \leq k \leq 1$. Количество кавитационных пузырьков в единице объема жидкости и интенсивность ударных волн, возникающих при их захлопывании, определяют эрозионную активность моющей среды. При недостаточном темпе образования пузы-

рей или при полном их отсутствии разрушение не происходит. Принимая идеальное условие протекания процесса очистки ($k = 1$), получим максимальную эрозионную активность моющей жидкости.

Таким образом, эффект разрушения загрязнения от гравитационного воздействия в процессе виброочистки будет обусловлен давлением от каждого схлопнувшегося пузырька как действия давления ударной волны от расширения и схлопывания, так и от действия кумулятивной струи, умноженное на количество схлопывающихся пузырьков K на локальном участке площади загрязнения. То есть

$$P_{\text{г}} = (P_{\text{кав}} + P_{\text{кум}})K, \quad (15)$$

где $K = 3\Delta V/4\pi R_{\text{max}}^3$.

Рост теплопроводности и уменьшение газосодержания с повышением температуры окружающей жидкости частично объясняют наличие максимума кавитационной эрозии [8]. При движении стационарного потока жидкости в местах сужения потока, где скорость возрастает, давление в жидкости падает, в этих местах появляются кавитационные полости. Образование зон разного давления в потоке происходит за счет различных криволинейных течений.

Для оценки возможности возникновения кавитации из работы [7] используется величина k – число кавитации, определяемое по формуле

$$k = \frac{p - p_{\text{г}}}{0,5\rho_{\text{ж}}v^2}, \quad (16)$$

где v – скорость потока жидкости.

Из формулы (16) следует, чем больше величина k , тем меньше вероятность возникновения кавитации.

Таким образом, из результатов проведенных исследований можно сделать вывод, что виброочистка поверхности непосредственно зависит от работы силы воздействия на загрязнение, которая, в свою очередь, зависит от динамической активности частиц рабочей среды и гравитационной активности технологической жидкости. В общем виде энергетическое условие виброочистки поверхностей детали от загрязнения можно представить в виде:

$$P_{\text{г}} + P_{\text{кав}} + P_{\text{кум}} > W. \quad (17)$$

Используя энергетическое условие, рассмотрим одну из основных технологических задач, связанную с оценкой продолжительности виброочистки загрязнённой поверхности.

Оценка продолжительности виброочистки загрязнённой поверхности

В общем виде уравнение для оценки продолжительности вибрационной обработки загрязнённой поверхности можно представить как

$$\tau_p = \frac{P_{кр}}{\dot{P}} = \frac{P_{кр} \partial t}{\partial P}, \tag{18}$$

где $P_{кр}$ – критическое значение функции, контролирующей разрушение загрязнения; \dot{P} – скорость роста этой функции, $\partial P / \partial t$.

В качестве функции P будем рассматривать удаление слоя загрязнения с поверхности детали. Тогда уравнение продолжительности виброочистки примет вид

$$\tau_p = \frac{Q_{кр}}{\gamma_0}, \tag{19}$$

где $Q_{кр}$ – объём загрязнённого слоя, который необходимо удалить с поверхности; γ_0 – скорость разрушения загрязнённого слоя в процессе виброочистки.

В процессе обработки загрязнённая поверхность детали непрерывно подвергается динамическому воздействию абразивных гранул и гравитационной активности технологической жидкости. Равномерность обработки загрязнённой поверхности будет обеспечена только тогда, когда каждый условно выделенный на загрязнённой поверхности единичный элемент поверхности будет подвергнут разрушению и как следствие очищению. Поэтому интенсивность удаления загрязнений с поверхности при ВиО можно вполне объективно оценить, смоделировав процесс обработки единичного элемента поверхности.

Если принять за единичный элемент площадь квадрата упаковки абразивных гранул

обрабатывающей среды на поверхности со стороны равной диаметру описанной окружности радиусом R , то зависимость для оценки скорости удаления загрязнений с поверхности в процессе вибрационного воздействия потока абразивных гранул и гравитационной активности технологической жидкости, по аналогии с зависимостью предложенной в работе [9] для съёма металла, можно представить в виде:

$$\gamma_0 = B_1 B_2 f q, \text{ кг/с} \tag{20}$$

где B_1 – геометрическая вероятность события, заключающегося в том, что любая точка квадрата упаковки за один цикл подвергается энерго-силовому воздействию массы абразивных гранул и кавитационных пузырьков; B_2 – вероятность события, заключающегося в том, что взаимодействие абразивной частицы и кавитационных пузырьков с поверхностью детали приведет к разрушению загрязнения; f – частота колебаний рабочей камеры, с^{-1} ; q – величина удаления загрязнения при единичном акте взаимодействия абразивной гранулы и гравитационной активности технологической жидкости с загрязнённой поверхностью детали, кг.

Представленная зависимость (20) получена из условия подобия протекания процессов, как на всей площади загрязнённой детали $S_{дет.}$, так и на площади, ограниченной квадратом упаковки абразивных гранул.

Поскольку при виброочистке процесс ударно импульсного воздействия является ведущим для определения параметров, входящих в расчётную модель (20), воспользуемся зависимостями предложенными в работе [9], представив их в следующем виде:

$$P_1 = \frac{\pi \cdot a^2}{\pi a^2 + 8Ra + 4R^2}; \quad P_2 = 0,67; \tag{21}$$

$$q = 15.5 k_c k_3 R^3 \left(k_m^{0.5} P_{max} \sin \beta \sqrt{\frac{\zeta \cdot \rho_4}{M \cdot HV}} \right)^{\frac{5}{2}} (ctg \beta - \mu) \rho_3, \tag{22}$$

где k_c – коэффициент загрязнённости поверхности; k_3 – коэффициент, учитывающий влияние зернистости абразивной частицы на фактическую площадь контакта; k_m – коэффициент, учитывающий влияние соседних частиц при обработке; ρ_3 – плотность загрязнённого слоя; P_{max} – максимальное энерго-силовое воздействие абразивной гранулы и гравитационной активности технологической жидкости на загрязнённую поверхность; β – угол соударения абразивных частиц; μ – коэффициент трения абразивного зерна по загрязнённому слою; ρ_4 – плотность абразивных частиц; HV – твёрдость загрязнённого слоя; ζ – податливость загрязнённого слоя; M – приведённая масса абразивных частиц, воздействующих на загрязнённую поверхность.

С учётом (17) формула (22) для расчёта величины удаления загрязнения при единичном акте взаимодействия абразивной гранулы и гравитационной активности технологической жидкости с загрязнённой поверхностью детали будет иметь вид:

$$q = 15.5k_c k_3 R^3 \left(k_m^{0.5} (P_u + P_{\text{кав}} + P_{\text{кум}}) \sin \beta \sqrt{\frac{\zeta \cdot \rho_u}{M \cdot HV}} \right)^{\frac{5}{2}} (\text{ctg} \beta - \mu) \rho_3. \quad (23)$$

Массу загрязнённого слоя толщиной ΔL , которую необходимо удалить с площади квадрата упаковки можно оценить по зависимости

$$Q = 4R^2 \Delta L \rho_3. \quad (24)$$

Пользуясь зависимостями (19), (20), (24), получим формулу определения времени виброочистки для удаления с поверхности загрязнённого слоя:

$$T = \frac{4R^2 \Delta L \rho_3}{B_1 B_2 f q}. \quad (25)$$

Заключение

Предложенные энергетическое условие и расчётные зависимости можно использовать при отработке технологии виброочистки для заданных загрязнителей и материалов изделия при решении конкретной прикладной задачи, а также разработки и оптимизации процесса виброочистки изделий; описания и обоснования воздействия механохимических явлений на интенсификацию процесса очистки с целью выявления технико-экономического эффекта от использования вибрационного способа обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козлов, Ю.С., Кузнецов, О.К., Тельнов, А.Ф. Очистка изделий в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1982. – 260 с.
2. Бабичев, А.П. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок) / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Л.К. Гиллеспи др.; под ред. д-ра техн. наук, проф. А.П. Бабичева. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 289 с.
3. Зимон, А.Д. Адгезия жидкости и смачивание – М.: Химия, 1974. – 416 с.
4. Смирнов, Н.С., Простаков, М.Е., Липкин, Я.Н. Очистка поверхности стали. – М.: Металлургия, 1987. – 232 с.
5. Дерягин, Б.В., Чураев, Н.В., Муллер, В.М. Поверхностные силы. – М.: Наука, 1985. – 398 с.

6. Розенберг, Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука. Кн. 3. Физические основы ультразвуковой технологии. – М.: Наука, 1970. – 689 с.

7. Агранат, Б.А. Ультразвуковая технология. – М.: Металлургия. 1974. – 504 с.

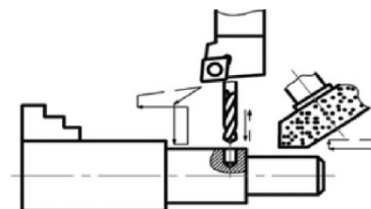
8. Лебедев, В.А., Вяликов, И.Л. Оценка эффективности влияния ультразвуковых колебаний на повышение интенсивности вибрационной отделочной обработки деталей // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – № 4(34). – С. 32-43.

9. Тамаркин, М.А., Тищенко, Э.Э., Виноградов, Д.В. Расчет технологических параметров при ЦРО // Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении / Сб. ст. по материалам Всерос. науч.-техн. конф., Н. Новгород; Арзамас, 2002. – С. 141-145.

REFERENCES

1. Kozlov, Yu.S., Kuznetsov, O.K., Telnov, A.F. *Product Decontamination in Mechanical Engineering*. – M.: Mechanical Engineering, 1982. – pp. 260.
2. Babichev, A.P. *Vibration Technological Use in Operations of Parts Finish-Cleaning (Cleaning, Washing, Burrs and Barbs Elimination, Edge Processing)* / A.P. Babichev, P.D. Motrenko, L.K. Gillespie [et al.]; under the editorship of A.P. Babichev. – Rostov-upon-Don: Publishing Center of DSTU, 2010. – pp. 289.
3. Zimon, A.D. *Liquid Adhesion and Wetting* – M.: Chemistry, 1974. – pp. 416.
4. Smirnov, N.S. Prostakov, M.E., Lipkin, Ya.N. *Steel Surface Decontamination*. – M.: Metallurgy, 1987. – pp. 232.
5. Deryagin, B.V., Churaev, N.V., Muller, V.M. *Surface Forces*. – M.: Science, 1985. – pp. 398.
6. Rosenberg, L.D. *Physics and Engineering of Power Ultrasonic Technology*. – M.: Science, 1970. – pp. 689.
7. Agranat, B.A. *Ultrasonic Technology*. – M.: Metallurgy. 1974. – pp. 504.
8. Lebedev, V.A., Vyalikov, I.L. Assessment of ultrasonic oscillation impact effectiveness upon intensity increase of parts vibration finishing // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – No.4 (34). – pp. 32-43.
9. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Vinogradov, D.V. Efficient technologies in mechanical engineering and instrument making / *Proceedings of the All-Russian Scientific-Tech. Conf.*, Nizhny Novgorod; Arzamas, 2002. – pp. 141-145.

Рецензент д.т.н. Д.С. Фатюхин



УДК 621.914.6; 621.9.025; 621.9.022.2
DOI: 10.30987/

А.С. Ямников, д.т.н.
(ФГБОУ ВО Тульский государственный университет, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92),
Д.П. Волков, к.т.н.
(ООО Производственное предприятие Мехмаш, г. Тула, Новомосковское шоссе, 58)
E-mail: yamnikovas@mail.ru; dreamslider@mail.ru

Модификация схемы резания у червячных фрез для формообразования многозаходных винтовых выступов на прессовой оправке

Описана прогрессивная технология формообразования винтовых канавок на внутренних цилиндрических поверхностях с применением операции прессования через кольцевую матрицу на винтовой прессовой оправке. Представлены исследования и даны предложения по совершенствованию процесса зубофрезерования винтовых выступов на оправках с помощью фрез с модифицированной схемой резания.

Ключевые слова: винтовые прессовые оправки; червячные фрезы; модифицированная схема резания; износ инструмента; режущие кромки.

A.S. Yamnikov, Dr. Sc. Tech.
(FSBEI HE Tula State University, 92, Lenin Avenue, Tula, 300012)
D.P. Volkov, Can. Sc. Tech.
(PC Manufacturing Company Mechmach, 58, Novomoskovskoye Highway, Tula)

Cutting procedure modification in hob cutters for multiple-thread spiral projection shaping on mandrel

An efficient technology for helical groove shaping on inner cylindrical surfaces with the use of a pressing operation through a ring matrix on a spiral press mandrel is described. There are presented investigations and offers are given to update spiral projection gear milling in mandrels with the aid of milling cutters with a modified cutting procedure.

Keywords: spiral press mandrels; hob cutters; modified cutting procedure; tool wear; tool tips.

Введение

В машиностроении приходится, в некоторых случаях, изготавливать детали, имеющие форму цилиндра, на внутренних поверхностях которого выполнены углубления в виде наклонных разнонаправленных винтовых канавок (рис. 1).

Пересекающиеся канавки 2 создают сетку ромбов 3, распределенных на внутренней поверхности корпуса 1 изделия. Пересекающиеся канавки обеспечивают требуемое дробление корпуса при повышении давления во

внутреннем объеме.

Винтовые впадины наносят обжатием заготовки корпуса изделия на винтовой оправке через кольцевую матрицу на прессе [1]. Зубья винтовой прессовой оправки, имеющие треугольную форму в нормальном сечении, расположены по винтовой линии на его цилиндрической поверхности. В работе [1] не обоснованы требования к конструкции винтовой оправки, поэтому в работах [2 – 4] создана методика расчета диаметров инструмента для получения цилиндрических заготовок и параметров многозаходных винтовых выступов.

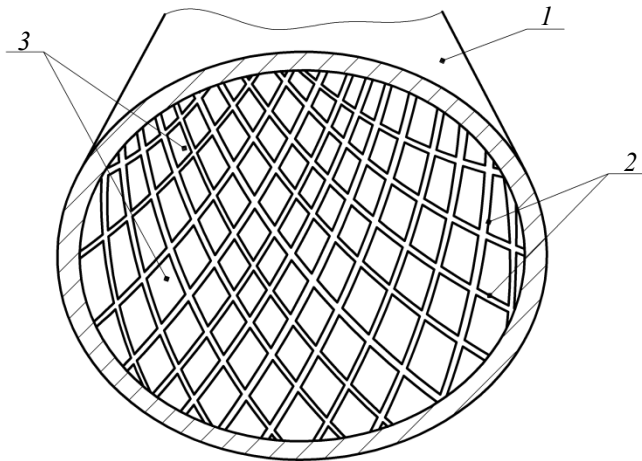


Рис. 1. Схема расположения впадин на внутренней поверхности

Винтовые оправки имеют большую длину, в несколько раз превышающую их диаметр, и зубья, расположенные по всей длине их рабочей части. Эти качества приближают их по технологии изготовления к шлицевым валам и косозубым зубчатым колесам.

В работах [5 – 9] рассмотрены технологические аспекты изготовления винтовых прессовых оправок. В работе [9] отмечается, что для формообразования многозаходных винтовых поверхностей на прессовых оправках, предназначенных для получения винтовых канавок на внутренних поверхностях оболочек, наиболее эффективным для всех типов производства является фрезерование методом обката червячными фрезами.

Разработка модифицированной схемы резания

При нарезании зубчатых профилей червячными фрезами так же, как и при нарезании зубострогальными резцами, задействованы две или три режущие кромки лезвия [6]. Процессы резания и образования стружки имеют некоторые отличия при обработке зубьев червячной фрезой и трапецидальным резцом. Но общие принципы стружкообразования позволяют исследовать этот процесс для червячных фрез, взяв за основу рассмотренный ранее процесс снятия стружки трапецидальным резцом [6].

Износ зубьев червячных фрез происходит как по передней, так и по задней поверхности (рис. 2). В ходе работы на передней поверхности образуются лунки. Она наиболее выражена на вершинной кромке, снижая ее прочность [10]. На входной кромке также присутствует

лунка, но она менее выражена, чем на вершинной. На выходной кромке можно наблюдать только следы износа. Крайне интенсивный износ по вершинной кромке свидетельствует о тяжелых условиях работы и стружкообразования.

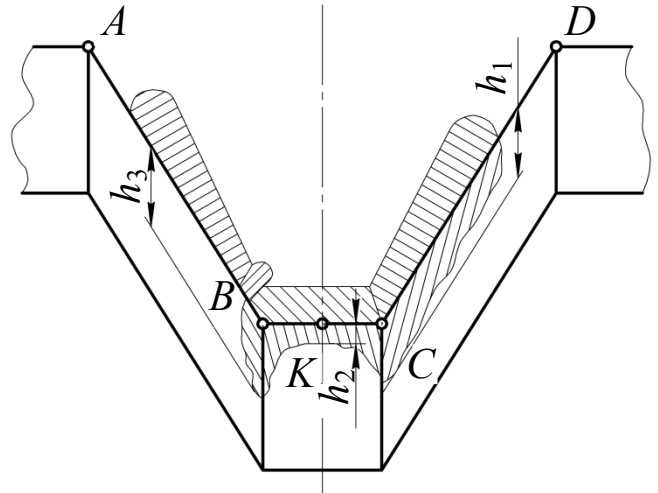


Рис. 2. Распределение износа по задней и передней поверхностям червячной фрезы

По задней поверхности большой износ наблюдается по входящей кромке, которая хоть и срезает меньшие по толщине слои, чем вершинная, но имеет меньшие задние углы и более интенсивную деформацию срезаемого слоя. Наиболее сильно изнашивается задняя поверхность у выходной вершинной кромки. На рис. 3 изображены кривые износа по задним поверхностям входной h_1 , вершинной h_2 и выходной h_3 режущих кромок зубьев фрезы в характерных точках (см. рис. 2).

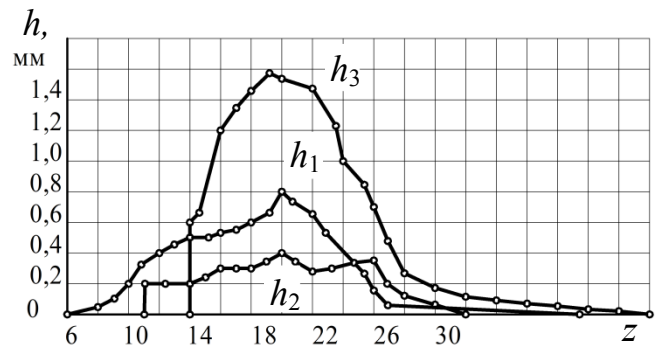


Рис. 3. Степень износа задней поверхности зубьев червячной фрезы

Сопоставление графиков на рис. 3 показывает неравномерность износа зубьев, в зависимости от его расположения на витке и неравномерность износа задних поверхностей

относительно друг друга.

Подобный износ может наблюдаться, если слой, срезаемый выходной кромкой червячного инструмента, меньше радиуса скругления режущих кромок. В этом случае резания не будет, а будет происходить вдавливание металла в обрабатываемую поверхность, сопровождаемое большим давлением на заднюю поверхность режущей кромки. Но такого рода износ не может быть объяснен таким образом, так как при сошлифовывании участков, не участвовавших в резании (зубья 16, 18, 20, 22), был получен удвоенный износ по зубьям 15, 17, 19 и 21.

Аналогично с нарезанием впадин трапецидальным резцом [6], при резании червячным инструментом может образовываться как монолитная стружка, так и с разрывом. В большинстве случаев при срезании стружки зубьями червячной фрезы толщины стружек будут не одинаковыми со стороны входной и выходной кромки. В результате этого происходит отклонение схода стружки от нормали к режущим кромкам. При этом в зависимости от толщины стружки деформация по режущим кромкам так же будет отличаться.

Даже при незначительном изменении угла схода стружки деформация слоя, срезаемого входной кромкой уменьшится и возрастет на выходной. Рост деформации вызывает давление на переднюю поверхность, что увеличивает износ, поэтому он на выходной кромке может быть больше, чем на входной кромке. Значительный износ передней и задней поверхности выходной кромки является следствием интенсивной деформации сдвига срезаемого слоя.

В отличие от трапецидального резца, стружка, срезаемая боковыми кромками зубьев фрезы не одинакова. Так, у входной кромки толщина стружки увеличивается к вершине зуба (рис. 4), а у выходной – к основанию.

Увеличенная толщина стружки у вершины входной кромки способствует тому, чтобы воспринять силу, необходимую для сдвига слоя материала. При этом нормальные напряжения в зоне точки *C* меньше предела текучести, так как не происходит смятия по смежной боковой поверхности. Стружка имеет монолитный вид. Срезаемый слой подвергается только деформации сдвига, отсутствует смятие стружки, приводящее к разрушению кромок. Так как стружка имеет большую толщину, она отклоняется в сторону выходной кромки, уменьшая сдвиг и отодвигая лунку ближе к выходной кромке. Входная кромка

работает в относительно благоприятных условиях, износ по задней поверхности протекает медленнее.

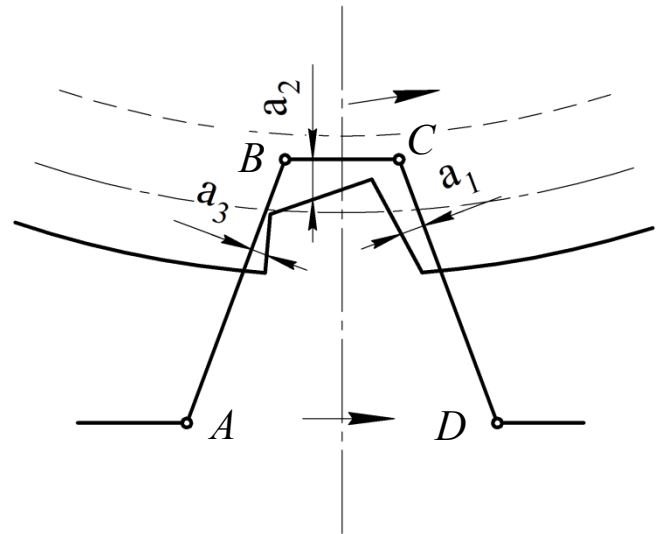


Рис. 4. Схема неравномерности толщины слоя, срезаемого зубьями фрезы

Обратная ситуация наблюдается на выходной кромке в районе точки *B*. Ее малая толщина у вершины способствует образованию разрыва стружки. В зоне взаимного давления стружек от вершинной и выходной кромок нормальные напряжения превышают предел текучести. Смежная с режущей кромкой боковая поверхность стружки сминается и разрывается, происходит отклонение ее схода от режущей кромки. Слой металла, срезаемый выходной кромкой, сильно деформирован, наибольшие деформации наблюдаются у смежной боковой поверхности. Так как более толстая стружка, срезаемая входной кромкой, отклоняет стружку от выходной кромки, то условия резания усложняются, деформация смятия в области сопряжения выходной и вершинной кромок возрастает.

В результате такого большого давления наблюдается повышенный, относительно других участков, износ. Следовательно, образование стружки с разрывом в рассмотренном участке ведет к тяжелым условиям обработки, прорыву режущей кромки, интенсивному износу поверхности и появлению локального износа, раньше времени приводящему к выходу инструмента из строя.

Исследования в области нарезания зубчатых профилей фрезами со скорректированными схемами резания показали, что их применение позволяет получить более точный профиль зубьев в сравнении со стандартными фрезами [10].

Эксперименты подтверждают повышение точности при применении вершиннонагруженной и прогрессивной схем резания относительно стандартной. С увеличением подачи наблюдается рост погрешности, однако, по сравнению со стандартными схемами, при применении измененных схем резания требуемую точность обработки можно достичь при большей подаче.

Установлено [10], что при некотором увеличении величины огранки при применении прогрессивной схемы резания, общая погрешность профиля окажется меньше, чем при применении стандартной схемы.

Применение вершиннонагруженной и прогрессивной схем резания практически не оказывает влияния на шероховатость поверхности, в отличие от направления подачи. При попутном фрезеровании для всех схем резания наблюдается снижение высоты микронеровностей. Наибольшее влияние направление подачи оказывает при обработке стандартными фрезами, и наименьшее – при обработке вершиннонагруженными и прогрессивными фрезами.

Исходя из сказанного, целесообразно применить для обработки винтовых многозаход-

ных канавок червячную однозаходную фрезу с прогрессивной схемой резания. Методика проектирования таких фрез, в том числе и для обработки впадин с прямолинейным профилем, как с прямолинейными, так и с винтовыми образующими, не имеет принципиальных отличий от проектирования стандартных фрез. Определение параметров этих фрез ведется по справочной литературе и общим рекомендациям, принятым на различных предприятиях. Но наличие модифицированных (одновременно зауженных и завышенных) зубьев у фрез с прогрессивной схемой резания привносит некоторые особенности в процесс их проектирования. Так, например, для сокращения трудоемкости изготовления фрез, число их зубьев принимаем четным: в рассматриваемом случае равным 14.

Рассчитав размеры зубьев фрезы с немодифицированным профилем, задаемся значениями завышения e_1 и заужения на сторону e_2 высотных зубьев по табл. 1 [10]. Величины этих параметров выбираются исходя из высоты зуба нарезаемого профиля, числа зубьев обрабатываемого изделия и числа заходов фрезы.

1. Значения завышения e_1 и заужения на сторону e_2 высотных зубьев

Высота зуба h , мм	Число зубьев, n	Номинальное завышение e_1 , мм		Номинальное заужение e_2 , мм	
		Однозаходная	Двухзаходная	Однозаходная	Двухзаходная
2,0...6,6	любое	0,20	0,30	0,15	0,20
7,0...8,8	15<	0,30	0,40	0,20	0,25
9,0...13,2	>15	0,20	0,30	0,15	0,20
13,2...15,4	15<	0,40	0,60	0,25	0,35
15,5...22,0	>15	0,30	0,40	0,20	0,25

Приведенные в табл. 1 значения получены эмпирическим путем для червячной фрезы с числом зубьев $z_0 = 12$. Они могут быть скорректированы в случае, если число зубьев проектируемой фрезы отличается от используемого в ходе проведения эксперимента. В этом случае указанные в таблице значения должны быть умножены на коэффициент K :

$$K = \frac{12}{z_0}$$

По результатам расчетов и, исходя из проведенных исследований, была разработана методика и спроектирована червячная однозаходная фреза для обработки винтовой оправки с прогрессивной схемой резания (табл. 2, рис. 5, рис. 6).

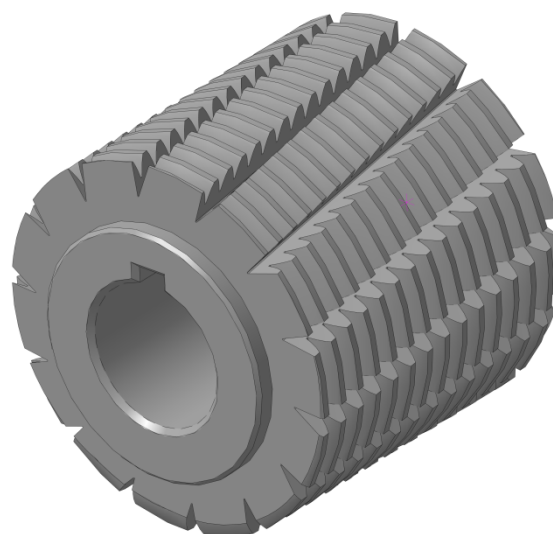


Рис. 5. 3D – модель червячной однозаходной фрезы с прогрессивной схемой резания

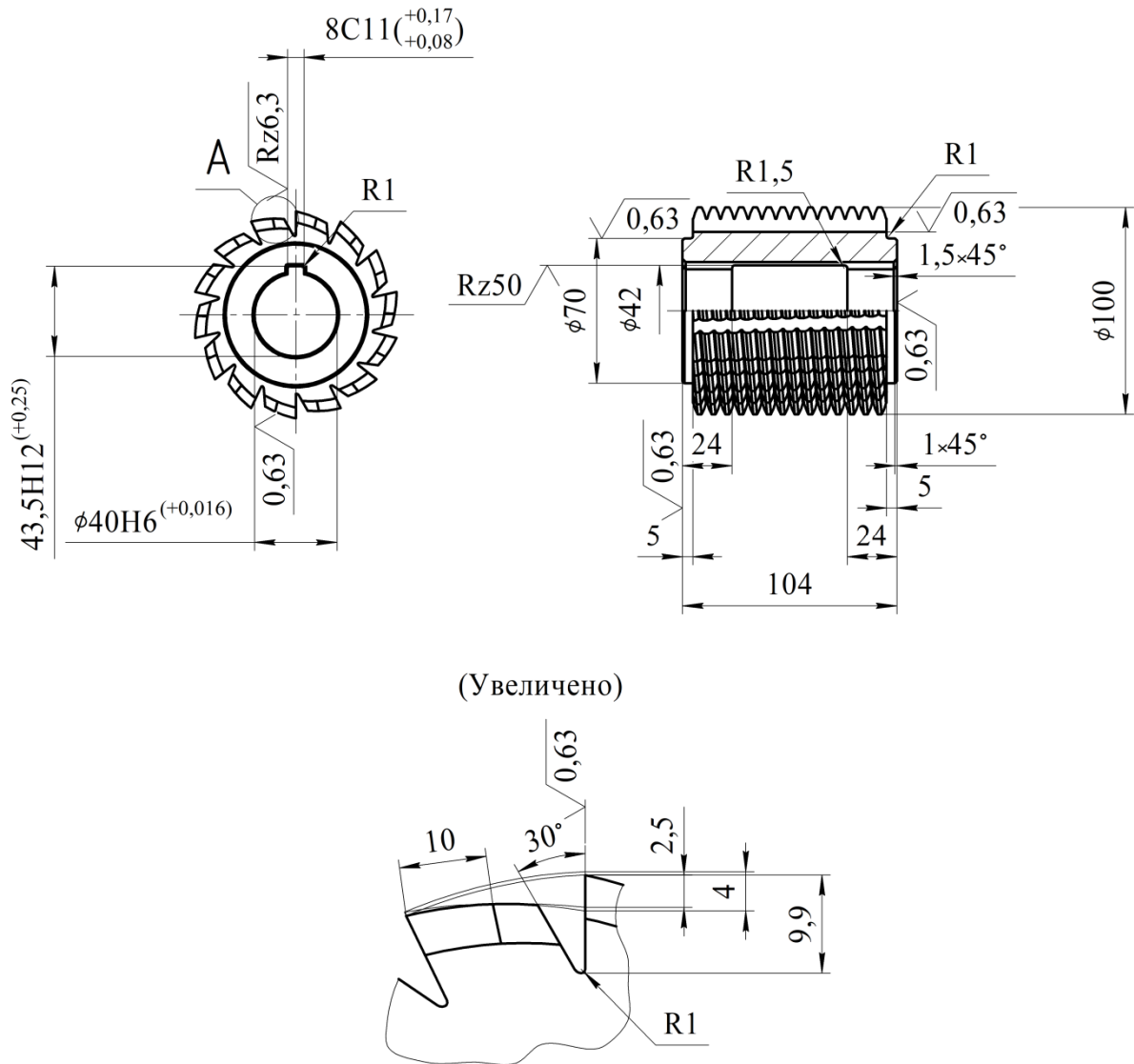


Рис. 6. Конструкция червячной однозаходной фрезы с прогрессивной схемой резания

2. Конструктивные параметры червячной однозаходной фрезы с прогрессивной схемой резания

Ход витков	P_z	7,964
Направление витков	-	правое
Начальный диаметр фрезы	d_{0H}	94,122
Угол подъема витков на начальном цилиндре	λ_H	$1^\circ 25' 12''$
Направление стружечных канавок	-	левое
Число стружечных канавок	z_Φ	14
Отклонение осевого шага между тремя зубьями	f_{px0}	0,036
Угол наклона стружечных канавок на начальном цилиндре	ω	$1^\circ 25' 12''$
Угол установки оси фрезы при обработке винтовой оправки	λ_H	$31^\circ 25' 12''$
Класс точности	-	B
Отклонение от прямолинейности передней поверхности на рабочей высоте зуба	f_γ	0,050
Разность соседних окружных шагов стружечных канавок	f_{u0}	0,050
Накопленная погрешность окружных шагов стружечных канавок	f_{p0}	0,100
Отклонение направления стружечных канавок на длине 100 мм	f_x	$\pm 0,100$
Отклонение профиля фрезы по нормали	f_{f0}	$\pm 0,015$
Отклонение винтовой линии на одном обороте	f_{h0}	0,025
Отклонение осевого шага	f_{px0}	$\pm 0,018$

Закключение

В производстве с любым объемом выпуска для нарезания канавок целесообразно использовать многолезвийные инструменты червячного типа.

Для достижения положительного эффекта при обработке канавок этими инструментами необходимо разработать новые рациональные схемы резания, конструкции режущих инструментов и оснастки.

Применение прогрессивной схемы резания червячными фрезами с модифицированными зубьями снижает силы резания, повышает стойкость инструмента, улучшает точность обработки и качество получаемой поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2248514 РФ, МПК7 В 42F 12/24. Корпус осколочного боеприпаса / Анпилогов О.А., Казаков И.В., Кузнецов В.П., Макаровец Н.А., Рожков В.В., Серегин Н.А.; заявитель и патентообладатель Серегин Н.А. - № 2001122099; заявл. 09.08.01; опубл. 20.03.05, Бюл. №8. - 9 с.
2. Волков, Д.П. Повышение точности формообразования многозаходных винтовых выступов на прессовой оправке: дис. ... канд. техн. наук. - Тула, - 2012. - 210 с.
3. Ямников, А.С., Волков, Д.П., Маликов, А.А. Формообразование многозаходных винтовых выступов на прессовой оправке: монография. - Тула: Изд-во ТулГУ. 2016. - 141 с.
4. Волков, Д.П., Ямников, А.С. Методика расчета диаметров инструмента для получения цилиндрических заготовок // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 2: в 2 ч. - 2010. - Ч 1. - С. 140-146.
5. Волков, Д.П., Ямников, А.С. Технологическое обеспечение качества винтовых прессовых оправок // Вестник машиностроения. - 2016. - № 3. - С. 55-58.
6. Ямников, А.С., Волков, Д.П. Влияние угла профиля передней поверхности резца на степень деформации сдвига // Научно-технические технологии в машиностроении. - 2017. - №6 (72). - С. 14-20.
7. Ямников, А.С., Волков, Д.П. Изготовление винтовых выступов на пуансоне // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2011. - № 4/3 (288). - С. 99-104.
8. Волков, Д.П., Ямников, А.С. Технологические аспекты изготовления и контроля винтовых пуансонов //

Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2011. - № 6-2 (290). - С. 66-72.

9. Волков, Д.П., Ямников, А.С. Комплексная технология изготовления винтовых прессовых оправок // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 11: в 2 ч. - 2012. - Ч 1. - С. 292-298.

10. Медведицкий, С.Н. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами. - М.: Машиностроение, 1981. - 105 с.

REFERENCES

1. Pat. 2248514 RF, IPC7 B 42F 12/24. Fragmentation ammunition shell / Anpilogov O.A., Kazakov I.V., Kuznetsov V.P., Makarovets N.A., Rozhkov V.V., Seregin N.A.: Seregin N.A. - applicant and patent holder - 2001122099; applied: 09.08.01; published 20.03.05, *Bull. No.8.* - pp. 9.
2. Volkov, D.P. Accuracy increase in multi-thread spiral projection shaping on press mandrel: *Thesis for Can. Sc. Tech. Degree.* Tula, - 2012. - pp. 210.
3. Yamnikov, A.S., Volkov, D.P., Malikov, A.A. *Multi-Thread Spiral Projection Shaping on Press Mandrel: monograph.* - Tula: Publishing House of TulaSU. 2016. - pp. 141.
4. Volkov, D.P., Yamnikov, A.S. Procedure for tool diameters computation to obtain cylindrical blanks // *Proceedings of TulaSU. Engineering Sciences. Issue2: in 2 Parts* - 2010. - Part 1. - pp. 140-146.
5. Volkov, D.P., Yamnikov, A.S. Technological support of helical press mandrels quality // *Bulletin of Mechanical Engineering.* - 2016. - No.3. - pp. 55-58.
6. Yamnikov, A.S. Volkov, D.P. Profile angle impact of cutter front face upon shift deformation degree // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* - 2017. - No.6 (72). - pp. 14-20.
7. Yamnikov, A.S., Volkov, D.P. Helical projection manufacturing on punch // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology.* - 2011. - No.4/3 (288). - pp. 99-104.
8. Volkov, D.P., Yamnikov, A.S. Technological aspects in manufacturing and control of helical punches // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology.* - 2011. - No.6-2 (290). - pp. 66-72.
9. Volkov, D.P., Yamnikov, A.S. Complex technology in manufacturing helical press mandrels // *Proceedings of TulaSU. Engineering Sciences. Issue 11: in 2 Parts* - 2012. - Part 1. - pp. 292-298.
10. Medveditskov, S.N. *High-Performance Gear Cutting with Millers.* - M.: Mechanical Engineering, 1981. - pp. 105.

Рецензент д.т.н. А.С. Янюшкин

УДК 621.91
DOI: 10.30987/

Н.А. Ворожцова, аспирант,
А.С. Горбунов, ведущий специалист
(АО «Редуктор-ПМ», г. Пермь, Комсомольский проспект, 93)
В.Ф. Макаров, д.т.н.
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Комсомольский проспект, 93)
E-mail: makarovv@pstu.ru

Обеспечение качества зубчатого венца цилиндрических колес при обработке комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом

Приведены результаты исследований технологических возможностей финишного зубошлифования зубчатого венца цилиндрических колес комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом с обеспечением геометрической точности и параметров качества поверхностного слоя. Даны сравнительные результаты экспериментальных исследований структуры поверхностной микротвердости, глубины ее залегания и поверхностных остаточных напряжений при финишной обработке зубчатых колес зубохонингованием и зубополированием.

Ключевые слова: зубошлифование; зубохонингование; геометрическая точность; качество поверхностного слоя; комбинированный червячный круг.

N.A. Vorozhtsova, Post graduate student,
A.S. Gorbunov, Leading expert,
(PC "Reducer-PM", 93, Komsomolsky Avenue, Perm)
V.F. Makarov, Dr. Sc. Tech.
(Perm National Research Polytechnic University, 93, Komsomolsky Avenue, Perm)

Quality assurance of ring gear in cylindrical wheels at processing with combined grinding-polishing worm disk

The investigation results of technological potentialities in the finish gear grinding of a ring gear of cylindrical wheels with the combined grinding-polishing worm disk with the assurance of geometrical accuracy and quality parameters of a surface layer are shown. The comparative results of experimental investigations of the structure of surface micro-hardness, its depth and surface residual stresses at cog-wheels finish processing with gear honing and gear polish are given.

Keywords: gear grinding; gear honing; geometrical accuracy; surface layer quality; combined worm disk.

Цилиндрические зубчатые колеса для авиационной промышленности изготавливают согласно ГОСТ 1643-81 по 5, 6, 7-й степеням точности. Рассмотрим обеспечение точности и качества поверхностного слоя зубчатого венца на примере цилиндрического колеса с числом зубьев $z = 29$; модулем $m = 6$; углом профиля зубьев $\alpha = 28^\circ$; шириной зубчатого венца $b = 48$ мм; диаметром делительной окружности $d = 181,1$ мм.

Основные конструкторско-технологические требования, предъявляемые к зубчатому венцу, изготовленному по 5-й степени точности:

– допуск на погрешность профиля зуба $Fa \leq 6$ мкм;

– допуск на погрешность направления зуба $Fb \leq 8$ мкм;
– радиальное биение зубчатого венца $Fr \leq 25$ мкм;
– модификация головки зуба $fKo \leq 35 \pm 1$ мкм;
– накопленная погрешность $Fp \leq 25$ мкм;
– шероховатость боковых поверхностей профиля зубьев $Ra \leq 0,16$ мкм;
– твердость цементированной поверхности $HRC \geq 61$.

Серийный технологический процесс с финишными операциями зубошлифования и зубохонингования обеспечивает вышеуказанные требования по 5-й степени точности. Опера-

ция зубошлифования обеспечивает точность формы и расположения рабочих профилей зубьев зубчатого венца с шероховатостью поверхностей $Ra = 0,2 \dots 0,3$ мкм. Для достижения требуемой величины параметра шероховатости $Ra = 0,16$ мкм выполняют операцию зубохонингования алмазным зубчатым хонем, который срезает неровности поверхности на профиле зуба, оставшиеся с предыдущей операции зубошлифования.

Однако финишная операция зубохонингования имеет недостатки: низкая производительность на устаревшем оборудовании; нестабильность качества и поставок алмазных хоней; использование в качестве смазочно-охлаждающей жидкости смеси керосина с минеральными маслами, что представляет собой опасность возгорания паров, и наносит вред здоровью персонала.

В связи с обозначенными недостатками операции зубохонингования, выявлена задача обеспечения требуемой шероховатости профиля зубьев в процессе зубошлифования без применения дополнительной операции. Для реализации поставленной задачи был разработан специальный комбинированный червячный круг, состоящий из шлифовальной и полировальной части. Таким образом, появилась возможность объединить два процесса шлифования и полирования в один.

С целью исследования технологических возможностей финишного зубошлифования специальным комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом зубчатый венец цилиндрических колес был обработан по двум вариантам:

1) серийный технологический процесс: зубошлифование на станке Reishauer RZ basic червячным шлифовальным кругом Norton 1 300×125×160, $m = 6$, $a = 28^\circ$, 3GG 3NQW80J8VS3 63 m/s методом обката + зубохонингование алмазным эластичным зубчатым хонем (рис. 1, а) производства г. Львов с характеристикой рабочего слоя: связка P18, марка ACM, зернистость 28/20, концентрация алмазного порошка 100% на станке 5B913;

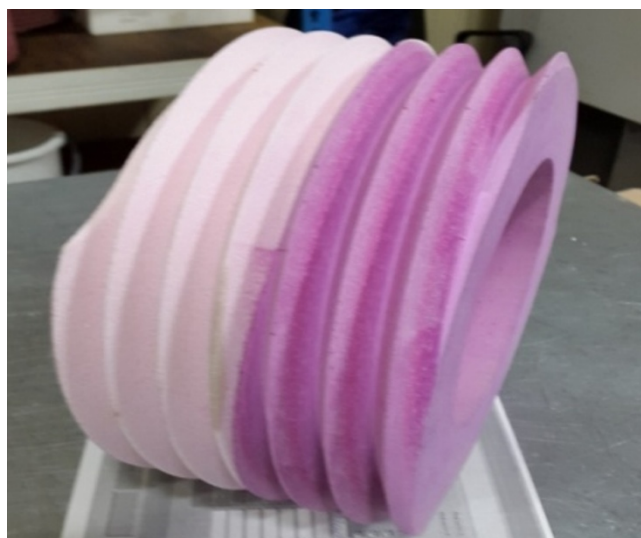
2) зубошлифование + зубополирование методом обкатного шлифования комбинированным червячным кругом Reishauer AG 1 275×125×160, $m = 6$, $a = 28^\circ$, A 80 G 8 V 0167/EK800 72 m/s (рис. 1, б) на станке Reishauer RZ basic.

Шлифование зубчатого венца по второму варианту осуществлялось за счет ступенчатого снятия припуска и постепенного смещения зоны контакта детали с кругом от

шлифовальной к полировальной части. Параметры процесса зубошлифования представлены на рис. 2.



а)



б)

Рис. 1. Инструменты для финишных операций:

а – алмазный эластичный зубчатый хонь;
б – комбинированный шлифовально-полировальный червячный круг

Если режимы резания для операции финишного зубошлифования первой частью комбинированного шлифовально-полировального червячного круга можно взять с серийной операции зубошлифования, то для полировальной части круга необходимо найти такие параметры процесса шлифования, которые бы обеспечивали достижение необходимой величины микронеровности профиля зубьев без снижения достигнутых параметров качества на стадии зубошлифования. Для решения данной задачи были определены варьируемые параметры 5-й ступени: количество ходов и сдвиг шифтинга. Остальные параметры процесса оставались

неизменными.

Полученные результаты по двум вариантам обработки зубчатого венца сведены в табл.1. Параметры точности зубьев зубчатого колеса и погрешности профилей зубьев исследовали

на координатно-измерительной машине Р-40 фирмы Klingelnberg. Исследования параметров шероховатости профилей зубьев осуществлялись с применением профилометра фирмы MAHR Surf M300 C.

REISHAUER

Название загот 0309 / Satellit Инф загот 1 m6.0, EW28, z29 Инф загот 3 SLS m6.0, EW28, 3GG
 Инф загот 2 DKS Инф загот 4

Параметр шлиф

Сум подач рад: 0,480
 норм:

Ступень активна **Ступень V**

Дополн путь - конец положение хода

Маятниковое движение

	Ступень 1	Ступень 2	Ступень 3	Ступень 4	Ступень 5
Число ходов	1	2	1	1	4
Число оборотов шлиф круга 1/мин	-2470	-2470	-2470	-2470	-2500
Радиальн подача на раб ход мм	0,165	0,100	0,065	0,030	0,005
Скорость радиальн подачи мм/мин	60,0	60,0	60,0	1,5	1,5
Подача Z1 мм/об	0,50	0,50	0,50	0,10	0,60
Подача Y1 мм/ммхода	-0,045	-0,040	-0,030	-0,025	0,000
Сдвиг шифтинга мм	0,000	0,000	18,000	-18,000	0,500
Охлаждающее масло %	100	100	100	100	100
Накопл радиальная подача мм	0,165	0,200	0,065	0,030	0,020

Встреч шлиф - без МОС

Рис. 2. Параметры зубошлифования комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом

1. Результаты контроля параметров точности и шероховатости профиля зубьев

Операция	Параметры процесса полирования		Параметры точности, мкм								Ra, мкм
			точности шага			погрешности про-филя			погрешности направления		
	сдвиг шифтинга, мм	кол-во проходов	Fr	Fp	fp	Fa	ffa	fKo	Fb	ffb	
з/шлифование	-	-	5,3	3,5	2,3	2,8	2,9	36	4,3	2	0,34
з/хонингование	-	-	4,2	4,2	0,7	5,1	5,1	35,4	4,7	2,7	0,16
з/шлифование + з/полирование №1	0	2	4,2	4,8	0,8	3,8	3,9	31,8	3,3	2,0	0,25
з/шлифование + з/полирование №2	0	3	5,3	3,5	2,3	1,8	1,7	36,0	1,0	0,9	0,2
з/шлифование + з/полирование №3	+0,5	3	7,6	8,1	1,1	2,8	2,0	31,7	2,6	1,9	0,14
з/шлифование + з/полирование №4	-0,5	3	7,9	8,0	0,9	4,7	2,0	32,1	1,8	1,4	0,17
з/шлифование + з/полирование №5	+0,5	4	3,8	5,8	1,2	1,6	1,6	32,9	3,2	1,8	0,095

Погрешности геометрических параметров после операции финишного зубошлифования комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом меньше чем при серийном технологическом процессе. Это объясняется снижением шероховатости поверхности профиля зуба до $Ra = 0,095$ мкм и исключением погрешностей изготовления алмазного хона.

Для проведения исследований физико-механических параметров качества поверхностного слоя – микротвердости и микроструктуры зубчатого венца цилиндрических колес, обработанных по двум схемам, на электроэрозионном станке с ЧПУ фирмы Sodick (Япония) вырезались образцы в виде одного зуба (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Схема вырезки образцов для контроля микротвердости и микроструктуры:

а – общий вид цилиндрического колеса; б – общий вид образца

Внешний вид исследован с помощью стереомикроскопа Stemi 2000-C. Металлографические исследования микрошлифов осуществлены на оптическом инвертированном микроскопе Axivert 40 MAT. Оценка микротвердости проведена по кривым распределения микротвердости методом восстановленного отпечатка по шкале Виккерса с помощью микротвердомера MICROMET 5104. Все приборы оснащены фотокамерой и программой анализа изображений Thixomet PRO. Также выполняли контроль прижогов методом травления и методом регистрации шумов Баркгаузена [1].

Микроструктура цементированного слоя после зубошлифования, зубополирования и зубохонингования не изменяется и является удовлетворительной, состоит из высокоуглеродистого мелкоигольчатого мартенсита. Микроструктура сердцевины 18X2H4АШ удовлетворительная, состоит из низкоуглеродистого мелкоигольчатого мартенсита. Микроструктура поверхностного слоя образцов, прошедших газовую цементацию приведена на рис. 4.

График распределения микротвердости образцов после газовой цементации и последующей механической обработки по серийному технологическому процессу и экспериментальному варианту приведен на рис. 5.

В результате исследования микротвердости цементированной поверхности зубчатого венца установлено, что требование $HRC \geq 61$ выполнено для двух вариантов обработки. Минимальное значение по шкале Виккерса не менее $HV \geq 715$. Твердость при зубохонинговании начинает приближаться к минимальному значению на расстоянии 395 мкм от поверхности. Микротвердость образцов после зубохонингования (головки правой и головки левой) на расстоянии 20 мкм от поверхности отличается на 40 единиц. Микротвердость правой и левой ножки на этом же расстоянии от поверхности отличается на 5 единиц.

Если сравнить микротвердость на правых головках после зубохонингования и зубополирования, то после зубополирования микротвердость не больше 55 единиц. В то же время как левая головка после зубохонингования на 40 единиц больше чем после зубополирования. Несущественный разброс значений микротвердости в пределах одного образца обусловлен неоднородностью нанесения покрытия и погрешностью измерения. Наиболее заметный перепад

значений твердости образцов, обработанных с различной финишной операцией, ожидаем, так как детали из которых они вырезаны проходили химико-термическую обработку в разных партиях. Поэтому можно сделать

вывод, что отличие твердости на образцах по двум маршрутам обработки не является существенным и объясняется тем, что детали проходили процесс цементации в различных партиях.

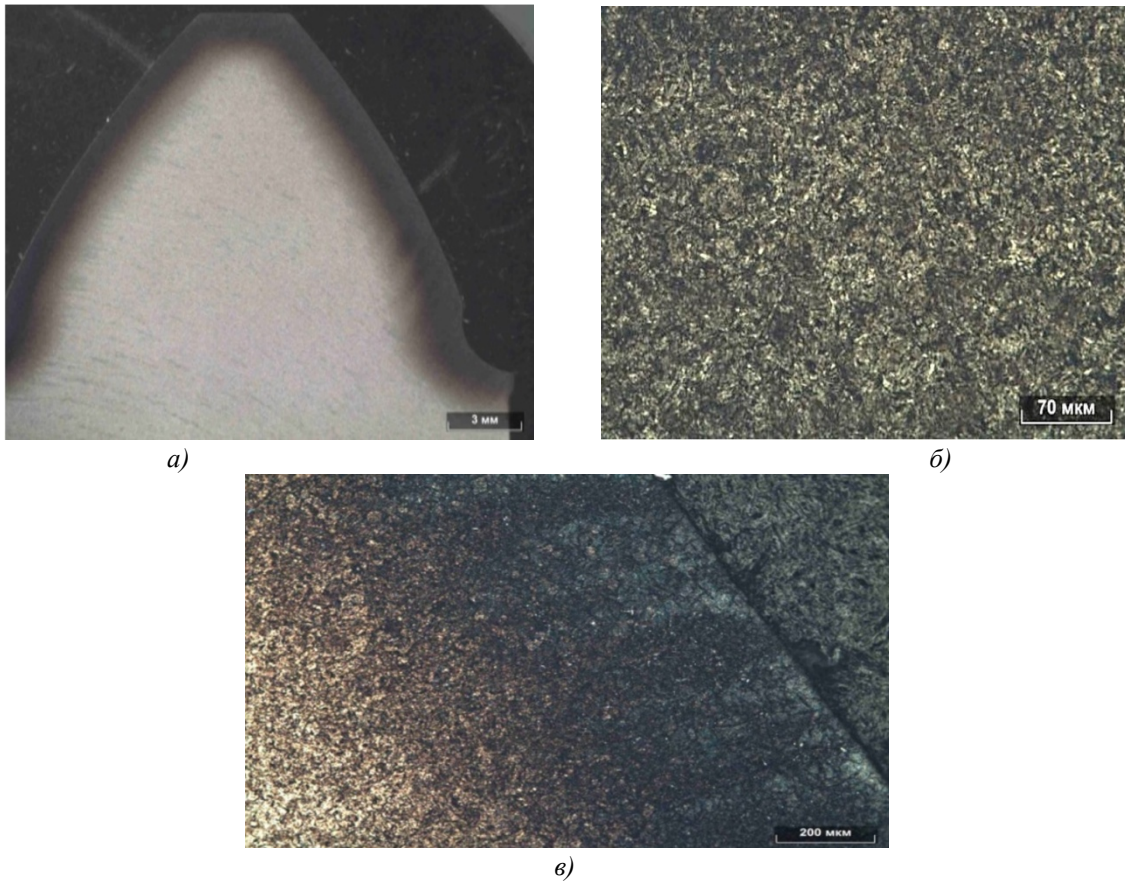


Рис. 4. Микроструктура образцов:

а – общий вид; б – микроструктура цементированного слоя; в – микроструктура пограничной зоны

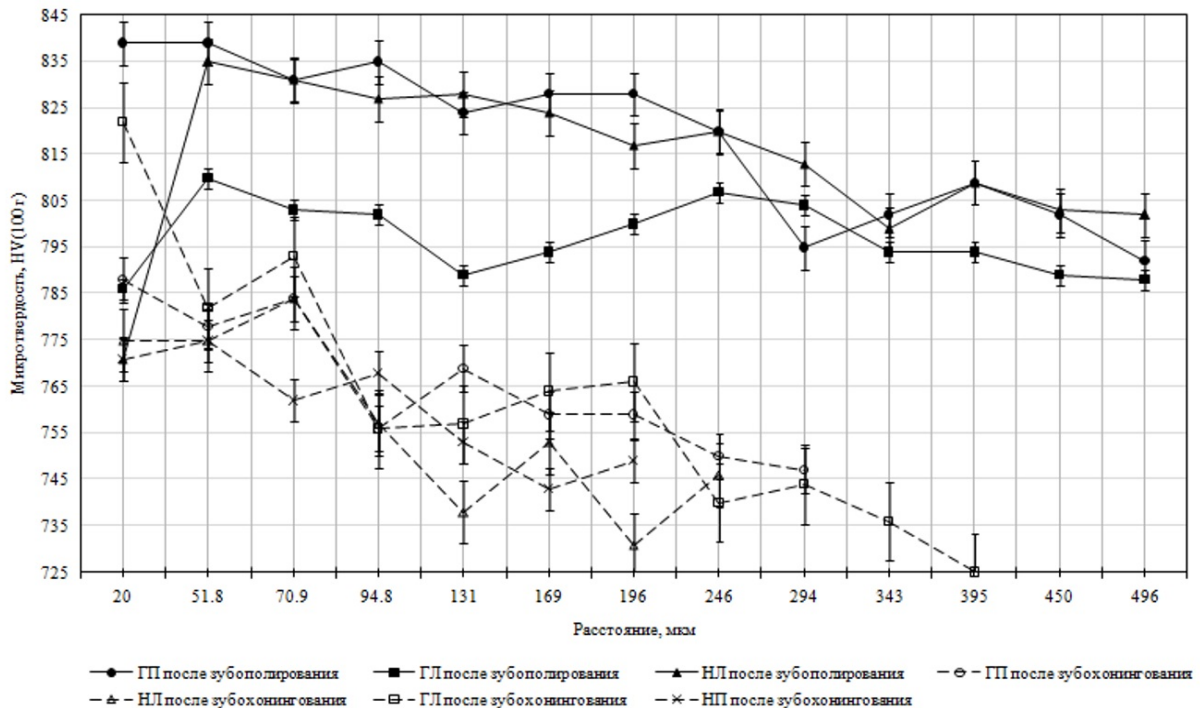


Рис. 5. График распределения микротвердости цементированной поверхности зуба

Для исследования остаточных напряжений разрушающим методом Н.Н. Давиденкова на установке ПИОН-2 по методике ПИ 1.4.804-84 (НИАТ-1985 г.) вырезались образцы из

боковых эвольвентных поверхностей зубьев электроэрозионным методом согласно схеме, изображенной на рис. 6.

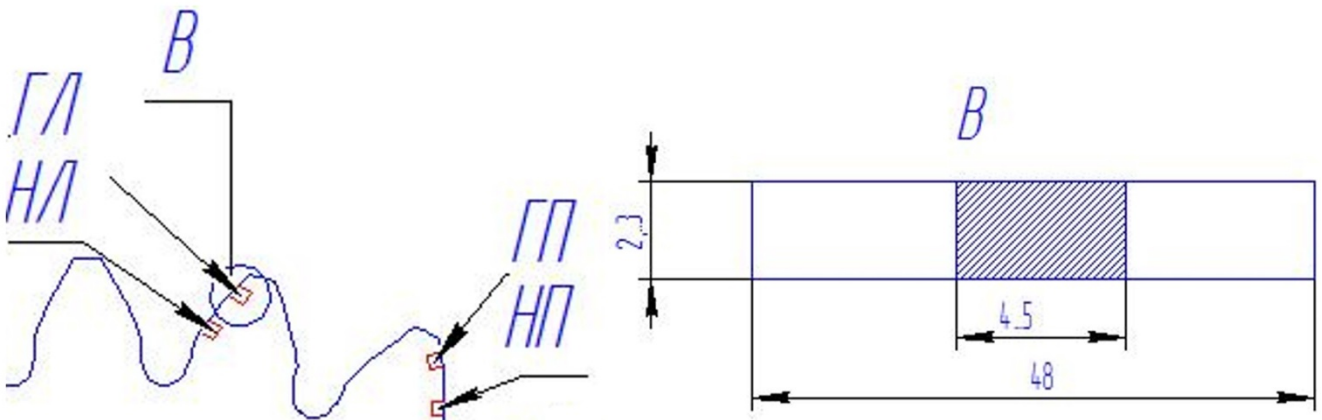


Рис. 6. Схема вырезки образцов для измерения остаточных напряжений:

Г – головка; Н – ножка; Л – левая; П – правая сторона

На рис. 7 изображены эпюры остаточных напряжений образцов головки и ножки с правой и левой сторон после зубополирования и зубохонингования.

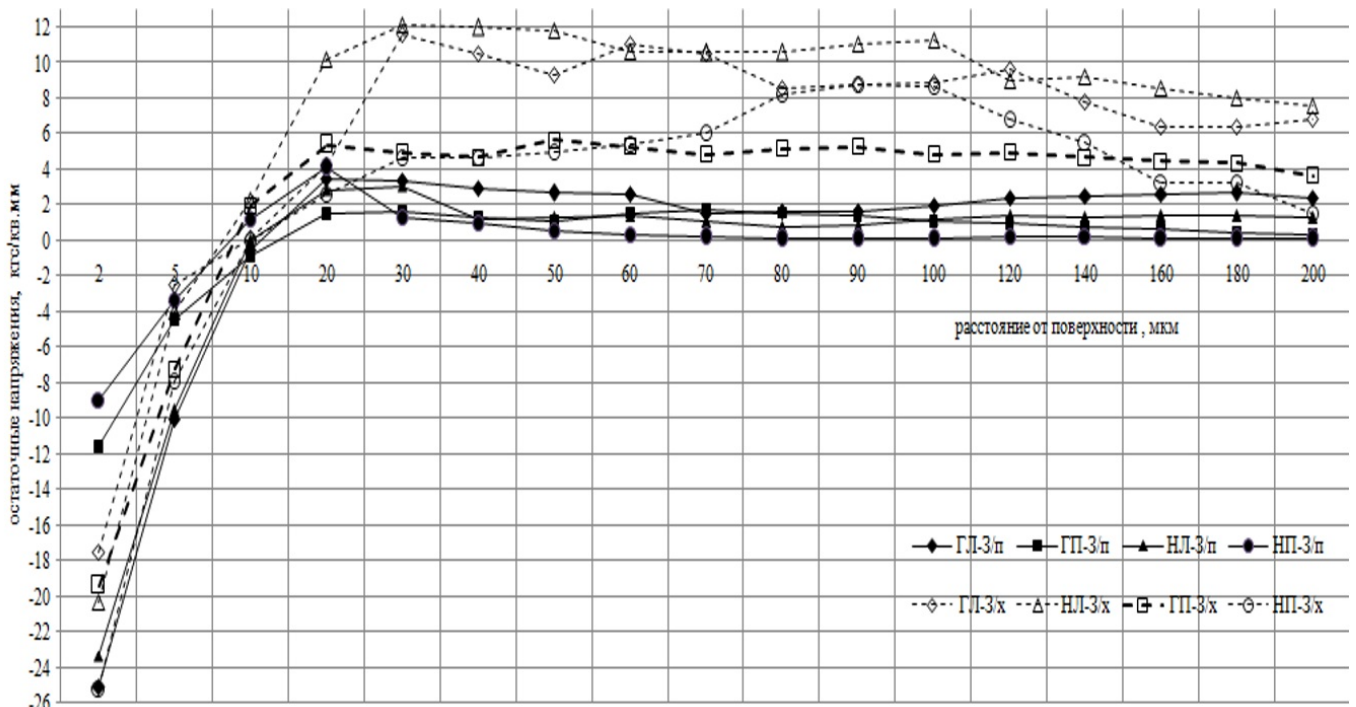


Рис. 7. Эпюры распределения остаточных напряжений на образцах

В поверхностном слое зубьев образуются сжимающие напряжения не зависимо от финишной операции. Существенной разницы по величине и характеру распределения остаточных напряжений по глубине между образцами на головке и ножке зубьев с левой и правой стороны не выявлено. Наибольшие

сжимающие напряжения обнаружены на левой ножке после зубополирования и на правой ножке после зубохонингования, а наименьшие – при операции зубошлифования. Наибольшие растягивающие напряжения обнаружены на левой ножке после зубохонингования. В целом распределения

остаточных напряжений на образцах с одного зуба после операции зубополирования наиболее благоприятны, так как имеют минимальные растягивающие напряжения на большем расстоянии от поверхности.

В результате исследования технологических возможностей финишного зубошлифования зубчатого венца цилиндрических колес комбинированными шлифовально-полировальными червячными кругами получены требуемые параметры качества поверхностного слоя и геометрической точности.

Процесс зубошлифования комбинированными шлифовально-полировальными кругами позволяет снизить Fa погрешность профиля с 5,1 до 1,6 мкм, в том числе за счет снижения величины шероховатости с $Ra = 0,16$ мкм до $Ra = 0,095$ мкм. При этом физико-механические параметры качества поверхностного слоя – остаточные напряжения, микротвердость и микроструктура соответствуют заданным требованиям. Таким образом, применение новой технологии чистовой обработки будет способствовать повышению надежности и долговечности работы цилиндрических зубчатых колес.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбунов, А.С., Макаров, В.Ф., Ворожцова, Н.А. Формирование параметров качества поверхностного слоя зубьев спирально-конических шестерен с учетом влияния технологической наследственности // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – № 4(46). – С. 40-47.
2. Ширяев, А.А., Макаров, В.Ф., Горбунов, А.С. Исследование возможности контроля прижогов в шестернях методом регистрации шумов Баркгаузена // Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. – № 2. – С.82-87.

REFERENCES

1. Gorbunov, A.S., Makarov, V.F., Vorozhtsova, N.A. Quality parameter formation in surface layer of helical-bevel gear teeth taking into account technological heredity impact // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. - 2015. - No.4 (46). - pp. 40-47.
2. Shiryaev, A.A., Makarov, V.F., Gorbunov, A.S. Investigation of burn control possibility in gears through Barkhausen methods of noise recording // *Dynamics of Systems, Machinery and Mechanisms*. - 2018. - No.2. - pp. 82-87.

Рецензент д.т.н. В.И. Свирицев

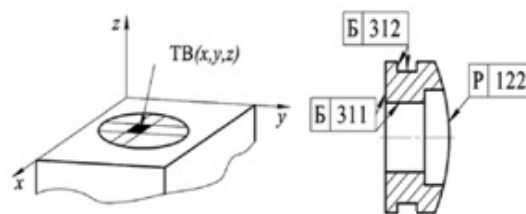
Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru



УДК 621.9.65
DOI: 10.30987/

А.А. Ситников, д.т.н.,
А.В. Собачкин, к.т.н.,
Ю.Н. Камышов, к.т.н.
(ФГБОУ ВО Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова,
656038, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 46)
E-mail: altgtu@list.ru

Проектирование технологических процессов изготовления и ремонта деталей с износостойкими покрытиями

Разработана расчетная методика, позволяющая устанавливать межоперационные размеры и припуски на механическую обработку нанесенного покрытия, определять маршрут обработки основного материала, а также обосновывать формирование групп деталей по конструктивно-технологическим признакам и по ремонтным размерам. В статье приведены методики расчета толщины слоя покрытия в зависимости от износа деталей. Разработана схема к расчету толщины остаточного слоя покрытия. Получено выражение для расчета толщины слоя покрытия. Получены теоретические зависимости и методики расчета, что позволяет решить весь комплекс задач, возникающих при размерном анализе технологических процессов изготовления деталей с покрытиями.

Ключевые слова: износ; толщина слоя; напыление покрытия; механическая обработка детали; остаточный слой.

A.A. Sitnikov, Dr. Sc. Tech,
A.V. Sobachkin, Can. Sc. Tech.,
Yu.N. Kamyshev, Can. Sc. Tech.

(FSBEI HE Polzunov State Technical University of Altay, 46, Lenin Avenue, Barnaul, Russia, 656038)

Design of engineering processes for manufacturing and repair of parts with wear-resistant coatings

A computation procedure is developed allowing the definition of inter-operation dimensions and allowances for machining coating applied and also the definition of the route for basic material machining and the substantiation of the parts group formation according to design-technological signs and repair dimensions. In the paper there shown procedures for the computation of coating thickness depending on parts wear. There is developed a circuit to the computation of a coating residual layer. An expression for the computation of coating thickness is obtained. Theoretical dependences and computation procedures are obtained that allows solving the whole problem complex arising at the dimension analysis of engineering processes of manufacturing parts with coatings.

Keywords: wear; layer thickness; sputtering; part machining; residual layer.

Важный вопрос, который приходится решать при изготовлении деталей с покрытиями – это установление размеров минимальной толщины остаточного слоя P_{\min} . Существуют разные подходы к определению P_{\min} . В основе каждого из них лежит необходимость включения в данную величину слоя покрытия $P_{\text{п.и.}}$,

обеспечивающего эксплуатационный срок [1, 2].

На практике, когда речь заходит о долговечности машин, требуется установить величину предельного износа U_{\max} [3]. В этом случае можно выделить три варианта определения толщины покрытия на износ $P_{\text{п.и.}}$:

1. Толщина слоя покрытия равна величине предельного износа. В процессе эксплуатации происходит полный износ нанесенного слоя, в результате машина не может больше работать.

2. Толщина слоя покрытия больше величины предельного износа. Однако в процессе эксплуатации остаточный слой приводит к попаданию машины и узлов в зону интенсивного износа.

3. Толщина слоя покрытия больше величины предельного износа и определяется из расчета допустимых или регламентируемых пределов износа.

В узлах трения, где используют покрытия, чаще всего, применяется третий вариант. В этом случае детали восстанавливают при периодических плановых ремонтах. Тогда толщина остаточного слоя покрытия должна обеспечить условия эксплуатации и получение ремонтных размеров ($r_{max1}, r_{min1} \dots r_{maxk}, r_{mink}$). Толщина покрытия $P_{p,min}$ (рис. 1), обеспечивающая межремонтный период, определяется износом детали между двумя плановыми ремонтами $U_{м.п.}$ и минимальным суммарным припуском на обработку покрытия $Z_{\Sigma min}$.

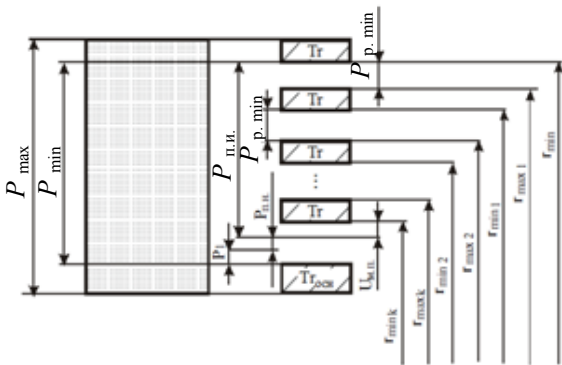


Рис. 1. Схема к расчету толщины остаточного слоя покрытия

С учетом вышеизложенного выражение для расчета толщины слоя покрытия, рассчитанного на изнашивание, можно записать в следующем виде:

$$P_{п.и.} = (k + 1) \cdot c \cdot p_a^m \cdot v^n \cdot T_1 + k(Z_{\Sigma min} + Tr), \quad (1)$$

где T_1 – длительность межремонтного периода; k – количество ремонтных размеров.

Дополнительная толщина покрытия $P_{п.и.}$ (см. рис. 1) должна быть достаточной для нормального функционирования изделия при достижении детали предельно допустимого износа. Ее величина определяется в зависимости от условий работы детали. Например, по данным профессора Крагельского И.В. [2],

при работе в условиях трения предельный максимальный износ не должен превышать 80 % толщины износостойкого слоя. Таким образом на величину $P_{п.и.}$ приходится всего 20 % от общего слоя.

В состав слагаемых выражения для определения минимальной толщины остаточного слоя покрытия должна входить величина переходного слоя P_1 между материалом покрытия и основы. Данная величина определяется особенностями процесса нанесения плазменного покрытия или создается целенаправленно.

Одной из особенностей процесса нанесения плазменных покрытий, является нестабильность физико-механических свойств по толщине нанесенного слоя (рис. 2) [4].

Покрытие имеет пористую структуру, причем распределение пор по объему неравномерно. Наибольшей пористостью обладают слои, прилегающие к основе, и поверхностные слои.

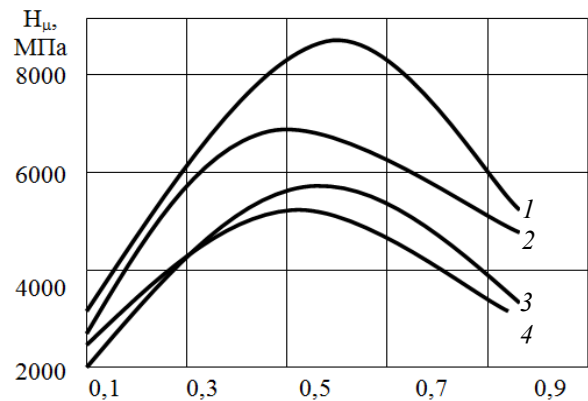


Рис. 2. Распределение микротвердости по толщине покрытия:
1 – ПГ-10Н-01; 2 – ПГ-12Н-01; 3 – ПГ-12Н-02;
4 – ПГ-АН9

Например, при напылении покрытий из порошков системы Ni–Cr–B–Si, образовавшиеся в материале окислы металлов растворяются с образованием стекловидных шлаков, всплывающих на поверхность покрытия.

При этом формируется переходная зона, представляющая собой сплав материала покрытия и основы. Структура зоны – это твердый раствор Ni–Cr с включением соединений металлов, имеющих высокую твердость. Таким образом, переходный слой между материалами основы и покрытия отличается химическим составом, структурой и свойствами, отличными от материала покрытия. В связи с этим данный параметр необходимо учесть при

определении толщины остаточного слоя покрытия.

Величина переходного слоя зависит от множества факторов: режимов напыления, свойств материалов основы и наносимого покрытия и ряд других. В настоящее время нет методик расчета P_1 .

Размер переходного слоя можно определить экспериментально. Так, например, для целой группы плазменных покрытий из порошков системы Ni–Cr–B–Si (см. рис. 2) величина переходного слоя должна лежать в пределах 0,2...0,3 мм. Именно в этом диапазоне происходит резкое снижение пористости, микротвердости и других свойств указанных покрытий.

Известно так же, например [5], что при напылении покрытия из оксида алюминия толщина переходного слоя не превышает 0,1 мм. В других литературных источниках, посвященных исследованию физико-механических свойств покрытий и, в частности, переходной зоны, ее размеры лежат в интервале 0,1...0,3 мм. Поэтому для размерных расчетов, если нет точных экспериментальных данных, можно принимать вышеуказанные пределы.

Рассмотрим второй случай. Очень часто на практике нанесения газотермических покрытий переходная зона формируется целенаправленно. Например [6], путем напыления молибденом и плакированным порошком системы Ni–Al на поверхности основного металла формируется тонкое покрытие с шероховатой поверхностью, на которую затем наносят слой основного покрытия. Такие подготовительные покрытия получили название подслоя. Основным функциональным назначением подслоя является формирование прочной связи с основой и внешним слоем [7]. В качестве материалов для нанесения подслоя используют композиционные порошки (80% Ni – 20% Al; 95% Ni – 5% Al) или сплавов (ПН70Ю30, ПН85Ю15, ПН55Т45 и др.). Для практических целей следует назначать толщину подслоя 0,03...0,13 мм.

Таким образом, минимальная толщина покрытия, оставшегося после механической обработки, является суммой трех составляющих:

$$P_{\min} = P_{\text{п.и.}} + P_{\text{п.н.}} + P_1. \quad (2)$$

Кроме P_{\min} необходимо регламентировать и максимальную толщину остаточного слоя покрытия. Если нет никаких жестких ограничений по колебанию физико-механических свойств покрытия по глубине, ее величину можно определять из расчета технологических

операционных цепей. Максимальная толщина остаточного слоя покрытия P_{\max} непосредственно зависит от требуемой точности готовой детали Tr и точности изготовления основы $Tr_{\text{осн}}$:

$$[P_{\max}] = (r_{\max} + \rho_{\text{д max}}) - (r_{\text{осн min}} + \rho_{\text{осн min}}), \quad (3)$$

где $\rho_{\text{д max}}$, $\rho_{\text{осн min}}$ – максимальное и минимальное радиальное биение детали на финишной операции и окончательной обработки основы соответственно.

В большинстве случаев величина P_{\max} должна четко оговариваться. По данным литературы [8], колебание минимальной толщины оставшегося после обработки слоя покрытия не должно превышать 0,05 мм на сторону.

Другой пример, для детали с плазменным покрытием ПГ-10Н-01, по условиям эксплуатации, необходимо обеспечить минимальную толщину после механической обработки 0,8 мм и микротвердость поверхностного слоя не ниже 6000 МПа (см. рис. 1).

Для выполнения этих требований максимальная толщина P_{\max} должна быть не больше 0,9 мм. В этом случае максимальная толщина, которая остается после финишной обработки, должна быть больше минимальной на величину запаса определяемого физико-механическими свойствами напыленного материала $P_{\text{з.с.}}$:

$$P_{\max} = P_{\min} + P_{\text{з.с.}}. \quad (4)$$

Других рекомендаций, уточняющих данный параметр, в литературе нет. Поэтому для размерных расчетов допуск на колебание остаточного слоя покрытия следует принимать равным 0,05...0,1 мм. Причем, чем выше пористость сформированного материала, тем жестче должен быть допуск.

Для получения требуемых эксплуатационных свойств деталь с покрытием подвергают механической обработке. В связи с этим необходимо нанести слой больше, чем P_{\max} , который бы обеспечил условия для последующей обработки. Минимальная толщина покрытия $P_{\text{н min}}$, наносимого на деталь, взаимосвязана с точностью его нанесения $Tr_{\text{н}}$, припуском на последующую обработку покрытия Z_{\max} и минимально необходимой толщиной после окончательной обработки соотношением [9]:

$$P_{\text{н min}} = P_{\min} + Z_{\max} - Tr_{\text{н}}. \quad (5)$$

Величина максимального $P_{\text{н max}}$ и минимального слоя $P_{\text{н min}}$, определяются в результате расчета технологических операционных цепей. При этом следует отметить, что для некоторых покрытий при напылении одним и

тем же материалом увеличение толщины слоя приводит к снижению прочности сцепления последнего с основой [6]. Это вызвано значительными остаточными напряжениями, возникающими в материале покрытия при напылении и способствующими отслоению покрытия от основы. Например, для плазменного покрытия на основе оксида алюминия максимальная толщина нанесенного слоя не должна превышать 0,9 мм.

Размеры остаточного слоя покрытия следует определять, исходя из функционального назначения детали и физико-механических

свойств материала, полученного в результате нанесения покрытия.

Рассмотрим расчет межоперационных размеров и припусков при проектировании технологических процессов изготовления деталей с покрытиями. В зависимости от имеющегося набора исходных данных изменяется методика расчета межоперационных размеров и припусков при проектировании технологических процессов изготовления деталей с покрытиями.

Рассмотрим, какие возникают при этом вопросы. Размерные схемы представлены на рис. 3.

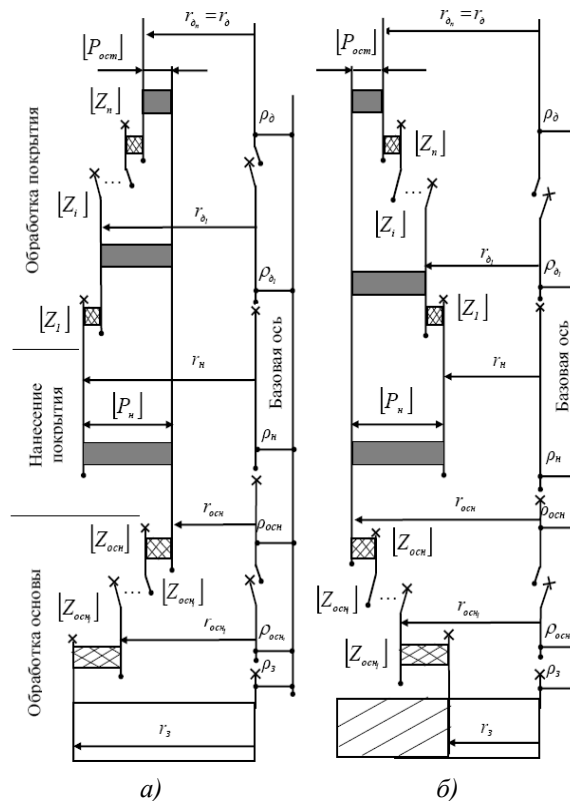


Рис. 3. Размерные схемы диаметральных размеров: а – для вала; б – для отверстия

Задача 1. При проектировании технологического процесса изготовления детали с покрытием технологически обычно известен размер детали r_d , его предельные отклонения верхнее es и нижнее ei , шероховатость обработанной поверхности, минимальная толщина остаточного слоя покрытия P_{min} , физико-механические свойства покрытия и основного материала.

Особенностью данного примера является то, что у толщины остаточного слоя покрытия оговаривается только нижняя граница P_{min} . Точностные параметры детали заданы чертежом. Возникает вопрос о необходимой точности обработки основы. По существующим на практике рекомендациям [3], чем хуже обработана основа, тем меньше затраты на меха-

ническую обработку, и, кроме того, выше прочность сцепления материалов покрытия и основы. В этом случае основным критерием для назначения допуска на размер основы выступает шероховатость ее поверхности, а метод обработки выбирается исходя из общего маршрута изготовления детали. Однако следует помнить, что чем ниже точность изготовления основы, тем больший слой покрытия потребуются нанести и тем длиннее будет маршрут его обработки.

Порядок расчета данной технологической размерной цепи производится по способу координат середин полей допусков.

1) Определяются координаты середин полей допусков составляющих звеньев – детали $e_m r_d$, основы $e_m r_{ост}$, пространственных откло-

нений $e_m \rho_{\text{осн}}$ и $e_m \rho_{\text{д}}$.

2) Рассчитывается координата середины поля рассеяния замыкающего звена $e_m [P_{\text{ост}}]$.

3) Рассчитываются половины полей допусков составляющих звеньев.

4) Определяется половина поля рассеяния толщины остаточного слоя покрытия.

5) Определяется номинал толщины остаточного слоя покрытия

$$[P_{\text{ост}}] = P_{\text{мин}} - e_m P_{\text{ост}} + \frac{TP_{\text{ост}}}{2}. \quad (6)$$

$$\frac{\omega [P_{\text{н}}]}{2} = t \cdot \sqrt{\lambda_{r_{\text{н}}}^2 \cdot \left(\frac{Tr_{\text{н}}}{2}\right)^2 + \lambda_{r_{\text{осн}}}^2 \cdot \left(\frac{Tr_{\text{осн}}}{2}\right)^2 + \lambda_{\rho_{\text{н}}}^2 \cdot \left(\frac{T\rho_{\text{н}}}{2}\right)^2 + \lambda_{\rho_{\text{осн}}}^2 \cdot \left(\frac{T\rho_{\text{осн}}}{2}\right)^2}; \quad (8)$$

3. Верхнее и нижнее отклонения замыкающего звена:

$$es [P_{\text{н}}] = e_m P_{\text{н}} + \frac{\omega P_{\text{н}}}{2}, \quad (9)$$

$$ei [P_{\text{н}}] = e_m P_{\text{н}} - \frac{\omega P_{\text{н}}}{2}. \quad (10)$$

4. Определяется номинал толщины нанесенного слоя $[P_{\text{н}}]$.

Задача 2. Непостоянство физико-механических свойств по глубине нанесенного слоя может привести к тому, что при изготовлении остаточный слой покрытия окажется в зонах с пониженными механическими свойствами. В таких условиях работоспособность детали будет снижена. Действительно, если ограничиться набором исходных данных, как в задаче 1, такая ситуация непременно возникнет. Чтобы избежать подобного, необходимо ужесточить требования к остаточному слою покрытия. Кроме регламентации минимальной толщины $P_{\text{мин}}$, следует задаться и максимальной $P_{\text{макс}}$.

Предварительно задаться точностью обработки основы не представляется возможным, так как в качестве исходных данных выступают предельные размеры остаточного слоя покрытия и точностные параметры готовой детали:

$$[P_{\text{ост}}] = r_{\text{д}} - r_{\text{осн}} \pm (\rho_{\text{д}} + \rho_{\text{осн}}), \quad (11)$$

где $r_{\text{д}}$ – размер детали, мм; $r_{\text{осн}}$ – размер основы, мм; $\rho_{\text{д}}$ – пространственное отклонение детали с обработанным покрытием, мм; $\rho_{\text{осн}}$ – пространственное отклонение обработанной основы, мм; относительно точностных параметров обработки основы (метод максимума-минимума):

$$(Tr_{\text{осн}} + T\rho_{\text{осн}}) = T[P_{\text{ост}}] - (Tr_{\text{д}} + T\rho_{\text{д}}), \quad (12)$$

где $Tr_{\text{д}}$ – допуск на размер детали, мм;

6) На основании уравнения размерной цепи рассчитывается номинал размера основы $r_{\text{осн}}$.

Далее производится расчет размеров наносимого слоя покрытия:

1. Координата середины поля допуска нанесенного слоя $e_m [P_{\text{н}}]$;

2. Половина поля рассеяния замыкающего звена:

– по методу максимума-минимума:

$$\frac{\omega [P_{\text{н}}]}{2} = \frac{Tr_{\text{н}}}{2} + \frac{Tr_{\text{осн}}}{2} + \frac{T\rho_{\text{н}}}{2} + \frac{T\rho_{\text{осн}}}{2}, \quad (7)$$

– по вероятностному методу:

$Tr_{\text{осн}}$ – допуск на размер основы, мм; $Tr_{\text{д}}$ – допуск на пространственные отклонения детали, мм; $T\rho_{\text{осн}}$ – допуск на пространственные отклонения основы, мм.

В случае расчета по вероятностному методу уравнение (12) примет вид:

$$(\lambda_{r_{\text{осн}}}^2 \cdot T^2 r_{\text{осн}} + \lambda_{\rho_{\text{осн}}}^2 \cdot T^2 \rho_{\text{осн}}) = \frac{T^2 [P_{\text{ост}}]}{t^2} - (\lambda_{r_{\text{д}}}^2 \cdot T^2 r_{\text{д}} + \lambda_{\rho_{\text{д}}}^2 \cdot T^2 \rho_{\text{д}}) \quad (13)$$

или

$$(T^2 r_{\text{осн}} + T^2 \rho_{\text{осн}}) = \frac{T^2 [P_{\text{ост}}]}{1,44} - (T^2 r_{\text{д}} + T^2 \rho_{\text{д}}). \quad (14)$$

На основании результатов расчета (уравнения (12) или (14)) по таблицам статистической точности в соответствии с параметрами точности назначается метод окончательной обработки основы.

Дальнейший порядок расчетов по определению параметров припуска на обработку покрытия и основы и толщины наносимого слоя покрытия производится аналогично методике, представленной в задаче 1.

Уравнения (12)–(14) устанавливают взаимосвязь между требованиями к точности обработки детали с покрытием, точности обработки основы и колебанием толщины остаточного слоя, и на этапе конструирования появляется возможность прогнозировать условия изготовления детали. Рассмотрим два крайних случая, возникающих при определенном сочетании величин составляющих этих уравнений.

Первый случай. Допуск на толщину остаточного слоя покрытия меньше или равен сумме параметров точности на готовую деталь:

$$T[P_{\text{ост}}] \leq (Tr_{\text{д}} + T\rho_{\text{д}}). \quad (15)$$

Тогда в соответствии с равенством (18) параметры точности основы ($Tr_{\text{осн}} + T\rho_{\text{осн}}$) должны быть равны нулю или иметь отрицатель-

ный знак, то есть изготовить деталь при таком сочетании исходных данных невозможно.

Второй случай. Допуск на толщину покрытия больше требований точности, предъявляемых к детали:

$$T[P_{\text{ост}}] > (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}). \quad (16)$$

Данное выражение является необходимым условием при изготовлении детали с покрытием. Для этого случая возможны три различных варианта соотношения параметров точности.

1. Основа и готовая деталь будут обработаны с одинаковой точностью, т.е.

$$(Tr_{\text{осн}} + Tr_{\rho_{\text{осн}}}) = (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}), \quad (17)$$

если

$$T[P_{\text{ост}}] = 2 \cdot (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}). \quad (18)$$

2. Основа будет обработана с точностью ниже, чем деталь

$$(Tr_{\text{осн}} + Tr_{\rho_{\text{осн}}}) > (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}), \quad (19)$$

$$T[P_{\text{ост}}] > 2 \cdot (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}). \quad (20)$$

Таким образом, чтобы уменьшить затраты на изготовление основы, необходимо стремиться к соблюдению условия (19) при назначении допусков на размеры детали и толщину остаточного слоя.

3. Основа будет изготовлена с более высокой точностью, чем точность готовой детали с

$$\left(\frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{t} \right)^2 - (\lambda_{r_d}^2 \cdot (Tr_d)^2 + \lambda_{\rho_d}^2 \cdot (Tr_{\rho_d})^2) \geq (\lambda_{r_{\text{осн}}}^2 \cdot (\omega r_{\text{осн}}^3)^2 + \lambda_{\rho_{\text{осн}}}^2 \cdot (\omega \rho_{\text{осн}}^3)^2). \quad (27)$$

В данных неравенствах (зависимости (26) и (27)) параметры точности $(Tr_d + Tr_{\rho_d})$ и минимальная толщина остаточного слоя P_{min} (соответственно материал покрытия и метод его нанесения) назначаются исходя из условий эксплуатации детали в узле. В зависимости от физико-механических свойств выбранного материала устанавливается максимальная толщина остаточного слоя P_{max} . Однако, если в результате расчетов оказывается, что изготовить основу с соответствующей если точностью $\omega r_{\text{осн}}^3$ и $\omega \rho_{\text{осн}}^3$ в данных производственных условиях не представляется возможным, то тогда необходимо принимать решение о замене материала покрытия или методе его нанесения. Таким образом, существует тесная связь между технологическими особенностями изготовления композиции «деталь – покрытие», ее физико-механическими свойствами и условиями эксплуатации.

Неравенства (26) и (27) позволяют прогнозировать условия изготовления основы, и на этапе разработки конструкции детали обосновано

покрытием:

$$(Tr_{\text{осн}} + Tr_{\rho_{\text{осн}}}) < (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}), \quad (21)$$

если

$$T[P_{\text{ост}}] < 2 \cdot (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}). \quad (22)$$

Точность обработки основы – величина ограниченная. Поэтому имеет смысл говорить об экономической точности или достижимой точности в условиях конкретного производства, т.е. должно соблюдаться условие:

$$(Tr_{\text{осн}} + Tr_{\rho_{\text{осн}}}) \geq (\omega r_{\text{осн}}^3 + \omega \rho_{\text{осн}}^3). \quad (23)$$

Тогда выражение (21) переписывается так:

$$(Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}) > (Tr_{\text{осн}} + Tr_{\rho_{\text{осн}}}) \geq (\omega r_{\text{осн}}^3 + \omega \rho_{\text{осн}}^3). \quad (24)$$

Достаточное условие, которое необходимо выполнять при назначении допусков на деталь с покрытием, имеет вид:

$$T[P_{\text{ост}}] - (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}) \geq (\omega r_{\text{осн}}^3 + \omega \rho_{\text{осн}}^3), \quad (25)$$

или (в соответствии с уравнением (16)):

$$P_{\text{max}} - P_{\text{min}} - (Tr_{\delta} + Tr_{\rho_{\delta}}) \geq (\omega r_{\text{осн}}^3 + \omega \rho_{\text{осн}}^3). \quad (26)$$

Применение метода неполной взаимозаменяемости (вероятностный расчет) позволяет существенно расширить допуски на обработку по сравнению с допусками устанавливаемыми расчетом на максимум-минимум. В этом случае неравенство (26) запишется в следующем виде:

вано производить выбор материала покрытия и метод его нанесения. Несоблюдение данных условий потребует увеличения трудоемкости обработки основы или может возникнуть ситуация, при которой изготовить детали с покрытием будет невозможно.

Задача 3. Очень часто при изготовлении деталей с покрытиями приходится ограничивать максимальную толщину наносимого слоя $P_{\text{н max}}$. Это вызвано тем, что при нанесении в покрытии создаются внутренние напряжения, которые при определенной толщине слоя могут привести к его отслаиванию от основы. В этом случае задача решается через предельные размеры, а в качестве исходных данных известно: предельные размеры детали $r_{\text{д max}}$ и $r_{\text{д min}}$; $\rho_{\text{д max}}$ радиальное биение обработанной поверхности и $\rho_{\text{д min}}$; предельные размеры основы, соответственно $r_{\text{осн max}}$ и $r_{\text{осн min}}$, $\rho_{\text{осн max}}$ и $\rho_{\text{осн min}}$; допуск на размер поверхности детали с покрытием $Tr_{\text{н}}$ (назначенный для предельно возможного размера детали после нанесения покрытия $r_{\text{н max}} = r_{\text{осн max}} + P_{\text{н max}}$).

Последовательность расчета для схемы, представленной на рис. 3:

1) Так как размеры детали и параметры толщины остаточного слоя покрытия заданы

конструктором, вначале следует определить, как и во втором примере, размеры основы.

2) В соответствии с параметрами точности готовой детали намечается маршрут ее обработки. Соответственно рассчитываются минимально необходимые припуски Z_{\min} для каждой операции и устанавливаются размеры допусков на межоперационные размеры Tr_i . Размерные цепи толщины нанесенного слоя и припуска на его обработку являются параллельно связанными. Несколько размерных цепей, имеющих одно или несколько общих звеньев, называются параллельно связанными. Данное понятие было введено профессором Балакшиным Б.С. Для этих цепей общее звено – радиус основы. В этом случае необходимо решить систему уравнений:

а) для наружных поверхностей:

$$\begin{cases} [Z_{\min_n}] = (r_{d \min_{n-1}} + \rho_{d \min_{n-1}}) - (r_{d \max_n} + \rho_{d \max_n}) \\ r_{d \max_{n-1}} = r_{d \min_{n-1}} + Tr_{d_{n-1}} \\ \vdots \\ [Z_{\min_1}] = (r_{n \min} + \rho_{n \min}) - (r_{d \max_1} + \rho_{d_1 \max}) \\ r_{n \max} = r_{n \min} + Tr_n \\ [P_{n \max}] = (r_{n \max} + \rho_{n \max}) - (r_{очн \min} + \rho_{очн \min}) \end{cases}, (28)$$

б) для внутренних поверхностей:

$$\begin{cases} [Z_{\min_n}] = (r_{d \min_n} + \rho_{d \min_n}) - (r_{d \max_{n-1}} + \rho_{d \max_{n-1}}) \\ r_{d \max_{n-1}} = r_{d \min_{n-1}} + Tr_{d_{n-1}} \\ \vdots \\ [Z_{\min_1}] = (r_{d \min_1} + \rho_{d_1 \min}) - (r_{n \max} + \rho_{n \max}) \\ r_{n \max} = r_{n \min} + Tr_n \\ [P_{n \max}] = (r_{очн \max} + \rho_{очн \max}) - (r_{n \min} + \rho_{n \min}) \end{cases}. (29)$$

Решением данных систем является условие, устанавливающее взаимосвязь между максимальной толщиной нанесенного слоя, остаточного слоя, точностными возможностями процесса нанесения покрытия и маршрутом обработки покрытия:

$$[P_{n \max}] - [P_{очн \max}] \geq \sum_{i=1}^n Z_{\min_i} + \sum_{i=1}^{n-1} (Tr_i + Tr_{p_i}) + (Tr_n + Tr_{p_n}), (30)$$

где n – количество операций обработки покрытия.

Невыполнение данного условия требует корректировки маршрута обработки покрытия или изменения условий его нанесения.

3) Если условие выполняется, тогда в соответствии с намеченным маршрутом рассчитываются межоперационные размеры и припуски на обработку покрытия.

4) Рассчитать максимальный припуск для черновой обработки покрытия на основе существующих данных не представляется возможным, так как в размерную цепь входит

максимальный радиус детали с нанесенным покрытием и величина его неизвестна. Кроме того, $r_{n \max}$ является составляющим звеном цепи. Необходимо совместно решить эти два уравнения относительно максимального радиуса детали после нанесения покрытия. Определим размеры нанесенной поверхности из уравнений:

$$r_{n \max} + esp_n = [P_{n \max}] + r_{очн \min} + eip_{очн}, (31)$$

$$r_{n \max} + esp_n = [Z_{\max_1}] + r_{d \min_1} + eip_{d_1}. (32)$$

Приравняв правые части, получим уравнение для расчета максимального припуска на первой операции обработки покрытия:

$$[Z_{\max_1}] = [P_{n \max}] + (r_{очн \min} + eip_{очн}) - (r_{d \min_1} + eip_{d_1}). (33)$$

5) Определить максимальный радиус детали после нанесения покрытия (уравнение (39)).

6) Минимальный радиус детали после нанесения покрытия рассчитывается из уравнения:

$$r_{n \min} = [Z_{\min_1}] + (r_{d \max_1} + esp_{d_1}) - eip_n. (34)$$

7) Завершается расчет параметров операции нанесения покрытия определением минимальной толщины нанесенного слоя.

8) На последнем этапе вычисляются припуски на обработку основы и размеры заготовки.

По приведенной методике производится размерный анализ технологического процесса изготовления для случая, когда у детали обрабатываются наружные поверхности вращения.

Для внутренних поверхностей:

$$[Z_{\max_1}] = [P_{n \max}] - (r_{очн \max} + esp_{очн}) + (r_{d \max_1} + esp_{d_1}), (35)$$

$$r_{n \min} = (r_{d \max_1} + esp_{d_1}) - [Z_{\min_1}] - eip_n. (36)$$

Задача 4. Процесс нанесения покрытия сопровождается выделением большого количества тепла, приводящего к нагреву основы. Существуют рекомендации, по которым для обеспечения требуемого качества сцепления покрытия с основным материалом при напылении температура основы не должна превышать 260 °С. Однако в ряде случаев такой температурный режим не всегда удается выдержать, что приводит к ее существенным деформациям. Тогда при напылении могут произойти необратимые изменения размеров. Данное явление должно быть учтено при расчете межоперационных размеров и припусков.

Величины погрешностей, возникающих при нагреве основного металла, могут быть определены экспериментально. В настоящее время такие исследования отсутствуют, поэтому в данном примере примем наихудший вариант – смещение поверхности основы за

счет ее раздутия на величину α . Изменение размеров основы, в первую очередь, повлияет на параметры размерной цепи – толщины остаточного слоя покрытия и толщины напыленного слоя.

Для измененных условий вычисления начинаются также с размерной цепи толщины остаточного слоя покрытия, которая примет вид:

$$[P_{\text{ост}}] = r_d - r_{\text{осн}} \pm (\rho_d + \rho_{\text{осн}}) - \alpha, \quad (37)$$

тогда допуск на толщину остаточного слоя:

$$(Tr_{\text{осн}} + T\rho_{\text{осн}}) = T[P_{\text{ост}}] - (Tr_d + T\rho_d) - T\alpha, \quad (38)$$

В случае расчета по вероятностному методу получим уравнение:

$$(\lambda_{r_{\text{осн}}}^2 \cdot T^2 r_{\text{осн}} + \lambda_{\rho_{\text{осн}}}^2 \cdot T^2 \rho_{\text{осн}}) = \frac{T^2 [P_{\text{ост}}]}{t^2} - (\lambda_{r_d}^2 \cdot T^2 r_d + \lambda_{\rho_d}^2 \cdot T^2 \rho_d + \lambda_{\alpha}^2 \cdot T^2 \alpha) \quad (39)$$

Уравнения (38) и (39) позволяют рассчитать параметры точности основы и соответственно установить метод ее финишной обработки.

Рассмотрим уравнения, в которых необходимо учесть величину α .

Условия (26) и (27) соответственно переписываются так:

$$P_{\text{max}} - P_{\text{min}} - (Tr_d + T\rho_d + T\alpha) \geq (\omega r_{\text{осн}}^3 + \omega \rho_{\text{осн}}^3), \quad (40)$$

$$\left(\frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{t} \right)^2 - (\lambda_{r_d}^2 \cdot (Tr_d)^2 + \lambda_{\rho_d}^2 \cdot (T\rho_d)^2 + \lambda_{\alpha}^2 \cdot (T\alpha)^2) \geq (\lambda_{r_{\text{осн}}}^2 \cdot (\omega r_{\text{осн}}^3)^2 + \lambda_{\rho_{\text{осн}}}^2 \cdot (\omega \rho_{\text{осн}}^3)^2). \quad (41)$$

В размерную цепь толщины нанесенного слоя может быть включена погрешность, вызванная температурными деформациями. Тогда неравенство (30) примет следующий вид:

$$[P_{\text{нmax}}] - [P_{\text{остmax}}] \geq \sum_{i=1}^n Z_{\text{min}_i} + \sum_{i=1}^{n-1} (Tr_i + T\rho_i) + (Tr_n + T\rho_n) - \alpha_{\text{min}} \quad (42)$$

Уравнения для расчета максимального припуска на первой операции обработки покрытия:

– для наружных поверхностей:

$$[Z_{\text{max}_1}] = [P_{\text{нmax}}] + (r_{\text{оснmin}} + e\rho_{\text{осн}}) + \alpha_{\text{min}} - (r_{\text{дmin}_1} + e\rho_{\text{д}_1}), \quad (43)$$

– для внутренних поверхностей:

$$[Z_{\text{max}_1}] = [P_{\text{нmax}}] + (r_{\text{дmax}_1} + e\rho_{\text{д}_1}) + \alpha_{\text{min}} - (r_{\text{оснmax}} + e\rho_{\text{осн}}) \quad (44)$$

Представленные теоретические зависимости и методики расчета позволяют решить

весь комплекс задач, возникающих при размерном анализе технологических процессов изготовления деталей с покрытиями: рассчитать межоперационные размеры и припуски на обработку покрытия и основы; установить возможность изготовления детали с заданными техническими условиями; уточнить допуски на толщину покрытия и размеры детали.

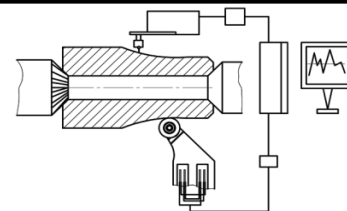
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. / В 2-х кн. Кн. 1.; под ред. Крагельского, И.В., Алисина, В.В. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.
2. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. / В 2-х кн. Кн. 2.; под ред. Крагельского, И.В., Алисина, В.В. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.
3. Харламов, Ю.А. Обработка резанием деталей с покрытиями. – М.: Машиностроение, 1990. – 68 с.
4. Клименко, С.А., Муковоз, Ю.А., Полонский, Л.Г., Мельничук, П.П. Точение износостойких защитных покрытий. – Киев: Техніка, 1997. – 142 с.
5. Кулагин, С.П., Леонов, С.Л., Новоселов, Ю.К., Татаркин, Е.Ю. Технологическое обеспечение качества изготовления деталей с износостойкими покрытиями. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1993. – 209 с.
6. Хасуй, А., Моригаки, О. Наплавка и напыление / пер. с яп. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
7. Борисов, Ю.С., Борисов, А.Л. Плазменные порошковые покрытия. – Киев: Техніка, 1986. – 223 с.
8. Сонин, В.И. Газотермическое напыление материалов в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
9. Карпунин, М.Г., Любинецкий, Я.Г., Майданчик, Б.И. Жизненный цикл и эффективность машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 312 с.

REFERENCES

1. Friction, Wear and Lubrication. Reference book / In 2 Books. Book1; under the editorship of Kragelsky, I.V., Alisin, V.V. – M.: Mechanical Engineering, 1978. – pp. 400.
2. Friction, Wear and Lubrication. Reference book / In 2 Books. Book1; under the editorship of Kragelsky, I.V., Alisin, V.V. – M.: Mechanical Engineering, 1979. – pp. 358.
3. Kharlamov, Yu.A. Coated Parts Cutting. – M.: Mechanical Engineering, 1990. – pp. 68.
4. Klimentko, S.A., Mukovoz, Yu.A., Polonsky, L.G., Melnichuk, P.P. Wear-Resistant Protective Coating Turning. – Kiev: Engineering, 1997. – pp. 142.
5. Kulagin, S.P., Leonov, S.L., Novoselov, Yu.K., Tatarkin, E.Yu. Quality Technological Support in Manufacturing Parts with Wear-Resistant Coatings. – Novosibirsk: Publishing House of NSTU, 1993. – pp. 209.
6. Hasui, A., Morigaki, O. Weld Deposition and Sputtering / transl. from Japanese. – M.: Mechanical Engineering, 1985. – pp. 240.
7. Borisov, Yu.S., Borisov, A.L. Plasma Powder Coatings. – Kiev: Engineering, 1986. – pp. 223.
8. Sonin, V.I. Gas Thermal Material Sputtering in Mechanical Engineering. – M.: Mechanical Engineering, 1973. – pp. 216.
9. Karpunin, M.G., Lyubinetzky, Ya.G., Maidanchik, B.I. Machine Life and Effectiveness. – M.: Mechanical Engineering, 1989. – pp. 312.

Рецензент д.т.н. А.О. Горленко



УДК 621.7:658.1
DOI: 10.30987/

**П.Ю. Бочкарев, д.т.н.,
Л.Г. Бокова, к.т.н.**

(ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.», 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)
E-mail: bpy@mail.ru; bokovalg@mail.ru

Состояние и направления развития в области обеспечения технологичности конструкции изделий

Рассмотрено состояние подходов и методик оценки технологичности изделий на настоящее время. Приведены источники информации и нормативно-справочной литературы по видам, показателям и методам обработки конструкции детали на технологичность. Представлены современные направления научных исследований в области обеспечения технологичности конструкции изделия.

Ключевые слова: технологичность конструкции изделий; обработка конструкции изделия на технологичность; методы оценки технологичности конструкции изделий; показатели технологичности; производственная технологичность изделий.

**P.Yu. Bochkaryov, Dr. Sc. Tech.,
L.G. Bokova, Can. Sc. Tech.**

(FSBEI HE "Gagarin State Technical University of Saratov", 77, Polytechnicheskaya Str, Saratov, 410054)

State and directions of development in field of product design manufacturability assurance

A present state of approaches and procedures for the assessment of product manufacturability is considered. There are shown sources of information and regulatory-reference literature on types, indices and methods of part design optimization for manufacturability. Current directions in scientific investigations in the field of manufacturability assurance of a product design are presented.

Keywords: product design manufacturability; product design optimization for manufacturability; methods for assessment of product design manufacturability; product manufacturability.

Технологичность, как совокупность свойств изделия, определяющих приспособленность его конструкции к достижению оптимальных затрат ресурсов при его производстве, ремонте и утилизации, является суммарным индикатором качества проектных решений создания техники. Основопологающие подходы к исследованиям в области обеспечения технологичности конструкции изделий (ТКИ) отражены в сформированных известными учеными понятиях и определениях (табл.1), позволяющих проследить эволюцию развития одного из базовых разделов техноло-

гии машиностроения как науки.

Технологичность изделия охватывает совокупность ее свойств, проявляемых в возможности оптимизации затрат труда, средств, материалов и времени при технической и технологической подготовке производства, изготовлении, эксплуатации и ремонте по сравнению с совокупностью соответствующих свойств однотипных конструкций изделий одинакового назначения при обеспечении заданных показателей качества и определенных условий изготовления, эксплуатации и ремонта.

1. Хронологическая последовательность понятий и определений технологичности

Понятие или определение технологичности	Автор(ы)
В широком смысле под технологичностью конструкции понимают такую, которая обеспечивает возможность наиболее экономичного изготовления деталей при требуемом качестве и заданном масштабе выпуска и серийности.	Балакшин Б.С., 1950 г.
Технологичность конструкции изделия, совокупность свойств конструкции изделия, которые обеспечивают его изготовление, ремонт и техническое обслуживание по наиболее эффективной <u>технологии</u> по сравнению с однотипными конструкциями того же назначения при одинаковых условиях их изготовления и эксплуатации и при одних и тех же показателях качества. Применение эффективной технологии предполагает оптимальные затраты труда, материалов, средств, времени при <u>технологической подготовке производства</u> , в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта, включая подготовку изделия к функционированию, контроль его работоспособности, профилактическое обслуживание.	Яновский Г.А. Методика обработки конструкций на технологичность и оценки уровня технологичности изделий машиностроения и приборостроения. – М., 1973.
Технологичность конструкции изделия (технологичность) – совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, техническом обслуживании и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ.	ГОСТ 14.205-83. Технологичность конструкций изделий. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
Технологичной признается конструкция, ориентированная на технологический процесс, обеспечивающий требуемые значения критериев качества изделия при лучших показателях эффективности производства, к которым, как известно, относятся трудоемкость, материалоемкость и себестоимость изделия.	Стрелец А.А., Фирсов В.А. Размерные расчеты в задачах оптимизации конструкторско-технологических решений. – М.: Машиностроение, 1988. – 120 с.
Технологичность – это совокупность свойств изделия, определяющих приспособленность его конструкции к достижению оптимальных затрат ресурсов при его производстве, ремонте и утилизации.	Технологичность конструкций изделий: справочник / под общ. ред. Ю.Д. Амирова. 2-е изд., перераб. и доп.–М.: Машиностроение, 1990. –768 с.
Технологичность – соответствие изделия требованиям производства и эксплуатации. Технологичность обеспечивается при разработке конструкции изделия. Технологичной называется такая конструкция изделия или составляющих его элементов (деталей, сборочных единиц), которая обеспечивает заданные эксплуатационные качества продукции и позволяет при данной серийности изготавливать её с наименьшими затратами труда, материалов.	Большой энциклопедический политехнический словарь. – М., 2004.

К условиям изготовления или ремонта относят: тип, специализацию и организацию производства, годовую программу и повторяемость выпуска, применяемые технологические процессы. Требования к технологичности конструкции изделия обуславливаются видом изделия (деталь, сборочная единица, комплекс, комплект), объемом выпуска, типом производства, которые предопределяют степень технологического оснащения, механизации и автоматизации технологических процессов и специфику всего производства [5].

Технологичность конструкции изделия отражает не функциональные свойства изделия, а свойства его как объекта производства и эксплуатации. Изделие можно считать технологичным, если оно не только соответствует современному уровню техники, экономично и удобно в эксплуатации, но в нем учтены и возможности применения наиболее эконо-

мичных, производительных процессов изготовления, ремонта и утилизации. Из этого следует, что технологичность – понятие комплексное. С другой стороны, технологичность – понятие относительное, так как при разной программе выпуска изделия технологии изготовления и ремонта существенно различаются [3].

Целью обеспечения технологичности является придание конструкции изделия такого комплекса свойств, при котором достигаются оптимальные значения затрат всех видов ресурсов при производстве, эксплуатации и ремонте изделия для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ.

Задачи технологичности конструкции изделий: прогнозирование, установление и применение базовых показателей ТКИ для данного вида изделий; обработка конструкции изделия

на технологичность при технической подготовке производства; совершенствование условий выполнения работ при производстве, эксплуатации и ремонте; количественная оценка ТКИ; технологический контроль конструкторской документации.

Значительный вклад в развитие отработки конструкции изделия на технологичность внес Ю.Д. Амиров [3], который вместе с другими авторами [5, 6] выполнил систематизацию отработки конструкции изделий на технологичность в соответствии с этапами жизненного цикла изделия от создания эскизного проекта до эксплуатации, предложил показатели и способы оценки ТКИ [1, 2].

Под оценкой ТКИ подразумевается комплекс взаимосвязанных мероприятий, включающих последовательное выявление, ТКИ в целом или отдельных рассматриваемых ее свойств, сопоставление выявленных свойств данного изделия со свойствами изделия, конструкция которого принята в качестве базы для сравнения, и представление результатов сопоставления в форме, приемлемой для принятия управленческих решений по совершенствованию конструкции разрабатываемого изделия.

В зависимости от используемых средств оценки применяют инженерно-расчетные и инженерно-визуальные методы оценки ТКИ. В зависимости от используемых методов оценки различают количественную и качественную оценку ТКИ [1 – 3].

Выбор показателей технологичности для отдельных этапов проектирования и с учетом объекта производства выполняется на основе требований, установленных ГОСТ 14.201-83 [1]:

- Технологичность конструкции изделия – понятие относительное. Технологичность одной и той же машины будет разной для различных типов производства (единичного, серийного и массового) и для предприятий с различными производственными возможностями (с различным оборудованием). Развитие техники меняет уровень технологичности конструкции. Нетехнологичные конструкции могут стать вполне технологичными при новых методах обработки.

- Технологичность конструкции изделий – понятие комплексное, так как конструкцию нельзя рассматривать изолированно. Отработанная на технологичность конструкция подготовки не должна усложнять последующую механообработку. Нужно стремиться получить наименьшую трудоемкость и себестоимость изготовления машины в целом.

- Понятие технологичности конструкции изделий распространяется также на область их эксплуатации. Конструкция машин должна быть удобной для обслуживания и ремонтнопригодной, т.е. должна обеспечивать легкость и удобство разборки и сборки, узлового ремонта частей машин.

Обеспечение ТКИ является функцией подготовки производства, предусматривающей взаимосвязанное решение конструкторских и технологических задач, направленных на повышение производительности труда, достижение оптимальных трудовых и материальных затрат и сокращение времени на производство, в том числе монтаж вне предприятия-изготовителя, техническое обслуживание и ремонт изделия [3, 6].

Комплекс мероприятий по обеспечению технологичности проводится на всех этапах проектирования и включает: отработку конструкции изделия на технологичность на всех стадиях конструкторской разработки изделия при технологической подготовке производства и определенных условиях при изготовлении изделия; совершенствование условий выполнения работ при производстве, эксплуатации и ремонте изделий; количественную оценку ТКИ; технологический контроль конструкторской документации; подготовку и внесение изменений в конструкторскую документацию по результатам технического контроля; обеспечение достижения базовых значений показателей технологичности.

Система обеспечения ТКИ должна предусматривать возможность принятия решений как по конструкции изделия, так и по условиям его производства. Отработку конструкции изделия на технологичность при выполнении конструкторских работ проводят на основе комплексного использования известных методов и приемов конструирования, обеспечивающих технологическую рациональность и типизацию конструкции изделия. Характеристика наиболее распространенных методов и приемов, используемых при отработке конструкции изделия на технологичность, и общие рекомендации по их применению представлены в работах [3 – 5, 9].

Технологический процесс сборки включает в себя совокупность операций установки, соединения, формообразования и прочих операций, в результате выполнения которых отдельные элементы конструкции, входящие в сборочную единицу, занимают относительно друг друга требуемое положение и соединяются способами, указанными в чертежах

изделия.

Для обеспечения технологичности конструкции сборочной единицы в процессе конструирования изделия должны быть выполнены следующие условия [3]: полная взаимозаменяемость деталей и узлов сборочной единицы, т.е. конструктивное оформление деталей и узлов, исключающее подгоночные работы в процессе установки; обеспечение удобного подхода при использовании монтажно-сборочных инструментов и приспособлений; обеспечение возможности применения прогрессивных средств технологического оснащения; обеспечение применения дифференцированных схем сборки за счет рационального членения изделия на агрегаты, секции, узлы и детали.

Геометрические формы элементов конструкции сборочной единицы должны быть, по возможности, простыми. Сложные геометрические формы усложняют процесс сборки, так как требуют использования специализированного или специального нестандартного технологического оборудования, инструмента и приспособлений для сборочных работ и контроля качества сборки.

Эффективными методами повышения технологичности конструкции сборочной единицы являются типизация и унификация конструктивных компоновок, узлов и деталей в пределах однотипных групп объектов производства. Унификация и стандартизация элементов сборочных единиц должны ограничивать применение типоразмеров таких конструктивных элементов, как болты, заклепки, штифты, пружины, резьбы, модули зубчатых колес, диаметры отверстий и т.п.

Исследования в области обеспечения технологичности конструкции изделий в настоящее время включают как совершенствование системы показателей, так и методических принципов оценки ТКИ, связанных с современным развитием производственных комплексов и конструкторско-технологической подготовки.

Под научным руководством профессора Б.М. Базрова (ФГБУН ИМАШ им. Благонравова) [10, 11] исследуются влияние размерных цепей на трудоемкость изготовления и технологичность, связи между коэффициентами технологичности и видами трудоемкости изготовления изделий, разработан метод расчета уровня технологичности конструкции изделия посредством суммирования коэффициентов технологичности, базирующийся на учете степени влияния коэффициентов.

В современных условиях быстрого развития информационных технологий и научно-технического прогресса возникает необходимость комплексного преобразования элементов производства и эксплуатации изделий, перехода от разрозненных технологий и технических средств к целостным системам, охватывающим конструирование изделия, технологическую подготовку производства, изготовление и эксплуатацию изделия.

Общим недостатком традиционных методов обеспечения и оценки ТКИ является отсутствие системной связности между ними и неадекватность расчётных методик с реальными факторами и процессами, определяющими ТКИ. Этому недостатку лишены методы, используемые в интегрированных автоматизированных системах обработки информации. Интеграция автоматизированных систем различного назначения в единую автоматизированную систему является основным направлением их развития [8], обеспечивающим за счет гибкости принятия в кратчайшие сроки комплексного решения проектно-конструкторских, технологических и управленческих задач.

Наиболее важным фактором, оказывающим влияние на качество изделия, а также эффективность его производства, эксплуатации и ремонта, является производственная технологичность изделия. При обеспечении производственной технологичности наибольший интерес представляют проектные решения, принимаемые в автоматизированном режиме на основе базы данных о реальных технологических возможностях оборудования и складывающейся производственной ситуации.

Оценка производственной технологичности с применением ряда показателей [7] (рис. 1) определяет не абстрактную технологичность деталей, а технологичность для конкретной производственной системы, что делает более корректным прогноз эффективности функционирования производственной системы при изготовлении деталей.

Автоматизация оценки технологичности конструкции изделий является одной из важнейших задач современной технологии машиностроения [8], а процедуру оценки технологичности следует рассматривать как важный этап технологической подготовки производства. Решение данной задачи необходимо осуществлять в рамках создания комплексной автоматизированной системы технологической подготовки производства, которая позволит смоделировать множество возможных вариан-

тов технологических процессов изготовления заданных изделий и сформировать рекомендации либо по совершенствованию конструкции изделия, либо по изменению средств тех-

нологического оснащения с целью обеспечения производственной технологичности и повышения эффективности функционирования производственной системы.

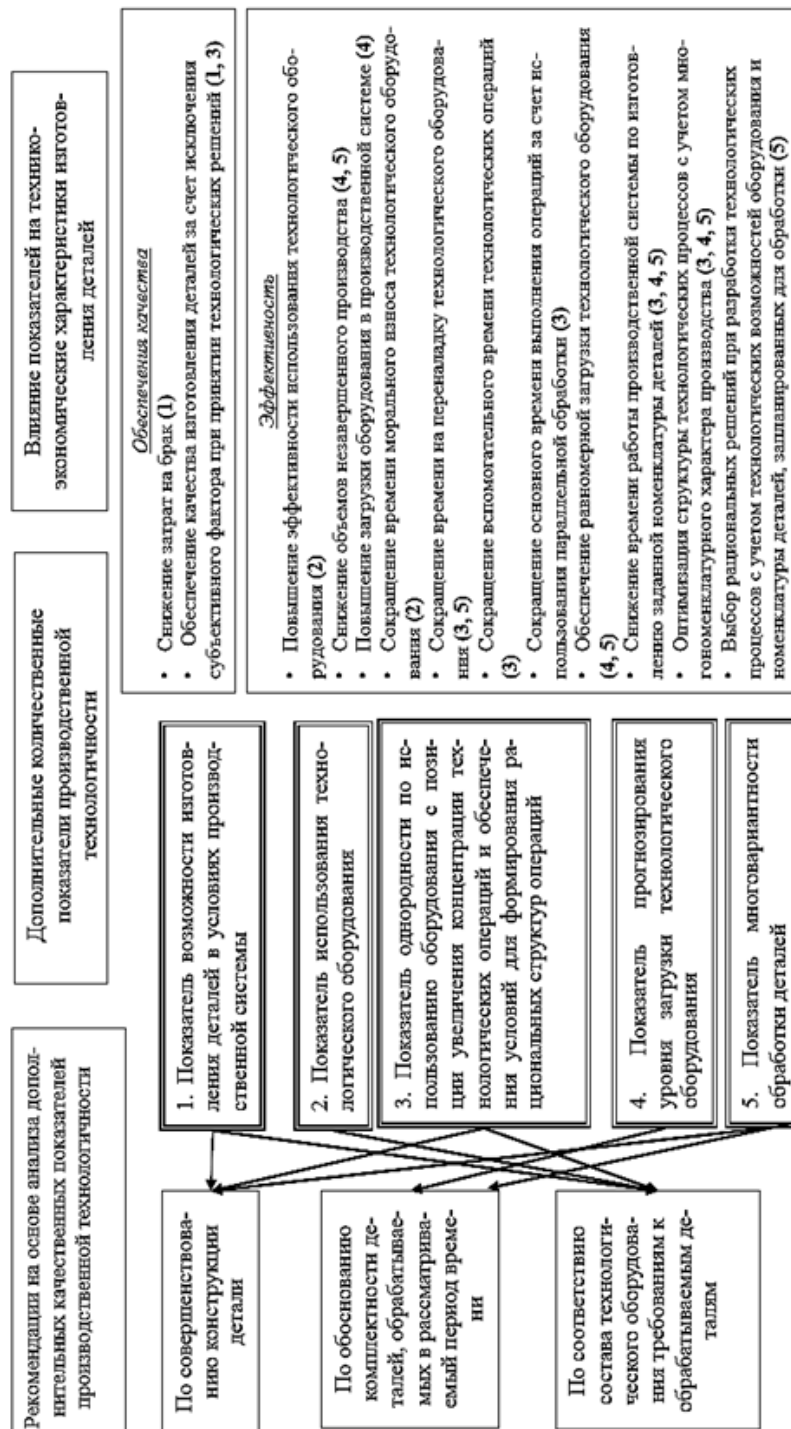


Рис. 1. Использование количественных показателей производственной технологичности

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 14.205-83. Технологичность конструкций изделий. Термины и определения.: Изд. офиц. Взамен ГОСТ 18831-73. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 5 с.
 2. ГОСТ 14.201-83*. Обеспечение технологичности конструкции изделий. Общие требования: Изд. офиц. Взамен ГОСТ 14.201-73. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 9 с.

3. Технологичность конструкций изделий: справочник / под общ. ред. Ю.Д. Амирова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 768 с.
 4. МР 186-85. Обеспечение технологичности конструкции изделий машиностроения и приборостроения. Методические рекомендации: Изд. офиц. – М.: ВНИИНМАШ, 1985. – 52 с.
 5. Яновский, Г.А. Методика отработки конструкций на технологичность и оценки уровня технологичности

изделий машиностроения и приборостроения – М.: ВНИИ-ИНМаш, 1973. – 102 с.

6. **Генкин, С.И.** Методы оценки технологичности конструкций изделий машиностроения. – М.: ВНИИИНМаш, 1974. – 173 с.

7. **Бочкарев, П.Ю.** Оценка производственной технологичности: учеб. пособие / П. Ю. Бочкарев, Л. Г. Бокова. – СПб.: Изд-во "Лань", 2017. – 132 с.

8. **Соломенцев, Ю.М.** Информационно-вычислительные системы в машиностроении CALS-технологии / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, В.В. Павлов [и др.]. – М.: Наука, 2003. – 292 с.

9. **Сафонов, С.В.** Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий. – Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2015. – 225 с.

10. **Базров, Б.М.** Проблема обеспечения технологичности изделия // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – №4(58). – С. 30-34.

11. **Базров, Б.М.** Технологичность конструкции изделия и ее оценка // Вестник машиностроения. – 2018. – №6. – С. 47-50.

REFERENCES

1. RSS 14.205-83. *Product Design Manufacturability. Terms and Definitions*: Official Edition. Instead of RSS 18831-73. – М.: Standards Publishers, 1983.

2. RSS 14.201-83*. *Assurance of Product Design Manufacturability. General Requirements*: Official Edition instead of RSS 14.201-73. – М.: Standards Publishers, 1983, - pp. 9.

3. *Product Design Manufacturability*: reference book / under the general editorship of Yu.D. Amirov. – 2-d edition re-

vised and supplemented. – М.: Mechanical Engineering, 1990. – pp. 768.

4. MR 186-85. *Product Design Manufacturability Assurance of Engineering and Instrument Making. Methodical Recommendations*: Official Edition. – М.: AURIMach, 1985. – pp. 52.

5. Yanovsky, G.A. *Procedure of Design Optimization for Manufacturability and Manufacturability Assessment of Engineering Products and Products of Instrument Making* – М.: AURIMach, 1973. – pp. 102.

6. Genkin, S.I. *Methods for Assessment of Engineering Product Manufacturability*. – М.: AURIMach, 1974. – pp. 173.

7. Bochkaryov, P.Yu. *Assessment of Manufacturability: manual* / P.Yu. Bochkaryov, L.G. Bokova. – S-Pb.: "Lan" Publishers, 2017. – pp. 132.

8. Solomentsev, Yu.M. *Information-Computer Systems in Mechanical Engineering CALS-Technologies* / Yu.M. Solomentsev, V.G. Mitrofanov, V.V. Pavlov [et al.]. – М.: Science, 2003. – pp. 292.

9. Safonov, S.V. *Technological Support of Product Operation Characteristics*. – Voronezh: IPC VSU, 2015. – pp. 225.

10. Bazrov, B.M. Problem in support of product manufacturability // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.4 (58). – pp. 30-34.

11. Bazrov, B.M. Manufacturability of product design and its assessment // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2018. – No.6. – pp. 47-50.

Рецензент д.т.н. Б.М. Базров

УДК 658.512

DOI: 10.30987/

Е.Б. Фролов, д.т.н.,
И.С. Паршина, аспирант,
А.С. Зайцев, магистр

(Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
103155, Россия, г. Москва, Вадковский пер.3а)

А.С. Климов, аспирант
(ФГАУН Институт конструкторско-технологической информатики РАН,
127055, Москва, а/я 24, ИКТИ РАН)
E-mail: fobos.mes@gmail.com

Индустрия 4.0: «Цифровой двойник» как средство повышения эффективности производственной системы

Цифровое предприятие является частью концепции Индустрия 4.0 (Industry 4.0), которая позволяет в течение всего жизненного цикла продукта рассматривать организацию производства и управление цепочкой создания изделий на новом уровне. Это полностью автоматизированное цифровое производство, которое в режиме реального времени управляется интеллектуальными системами в непрерывном взаимодействии с внешней средой.

Ключевые слова: Индустрия 4.0; цифровой двойник; MES; коэффициенты ОЕЕ и МСЕ.

E.B. Frolov, Dr. Sc. Tech.,

I.S. Parshina, Post graduate student,

A.S. Zaitsev, Master,

(Moscow State Technological University "STANKIN", 3a, Vadkovsky Side Str, Moscow, Russia, 103155)

A.S. Klimov, Post graduate student

(FSAIN Institute of Design-Technological Informatics of RAS, IDTI RAS, p.o.b. 24, Moscow, 127055)

Industry 4.0: «Digital Counterpart» as means for effectiveness increase of production system

A digital enterprise is a part of the (Industry 4.0) Concept which allows considering the production organization and control of product manufacturing procedure at a new level during the whole product life. It is a completely automated digital production which is controlled in real-time by intelligence systems in constant interaction with external environment.

Keywords: Industry 4.0; digital counterpart; MES; OEE and MCE coefficients.

Каждое современное предприятие проходит свой путь в трансформации к концепту четвертой промышленной революции Индустрия 4.0, а успешность такого перехода может оцениваться с помощью так называемого «индекса зрелости» (Maturity Index), разработанного Industrie 4.0 acatech.

В целом процесс перехода делится на несколько этапов. Наиболее интересным этапом (в рамках данной статьи) представляется этап «Обозримость» (Visibility), так как именно он отражает в себе создание виртуального двойника предприятия как его цифрового отображения. Последнее обеспечивается такими информационными системами как PLM (Product Lifecycle Management), ERP (Enterprise Resource Planning) и MES (Manufacturing Execution Systems). Основной же проблемой здесь является сбор достоверных данных, обеспечиваемый системами класса MDC/MDA (Machine Data Collection/Machine Data Acquisition) или SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), с использованием промышленного интернета (IoT - Internet of Things) [1, 2, 4].

Машиностроительная отрасль в данный момент находится в стремительном развитии, что предполагает баланс между использованием инноваций и своевременным выпуском продукции на рынок с сохранением бюджета. Чаще всего продукция, созданная на основе новых разработок, на этапе выпуска своих прототипов отражает ошибки, сделанные на этапе проектирования, что считается самым собой разумеющимся, как издержками использования новых технологий.

Цифровая трансформация предприятия – это преобразование структуры, процессов и бизнес-модели компании. На рис. 1 представ-

лены области трансформации и их направления. Понятие цифровой трансформации предприятия включает в себя рассматриваемые в данной работе «цифровые двойники» как самих изделий, так и производственной системы, в которой эти изделия изготавливаются [1, 9].

Понятие «цифрового двойника» (Digital Twin) является основой современного цифрового предприятия. Для более четкого понимания концепции использования «цифрового двойника» в производстве будем последовательно переходить от его описания к понятиям цифровой цепочки и «цифрового двойника» производственной системы на примере концепции «умного завода» (Smart Factory) [2, 4].

«Цифровой двойник» изделия – виртуальная модель, которая на микро- и макроуровне либо описывает реально существующий объект (выступая как дубль готового конкретного изделия), либо служит прототипом будущего объекта. При этом любая информация, которая может быть получена при тестировании физически существующего изделия, должна быть получена и на базе тестирования его «цифрового двойника», иллюстрация концепции цифрового двойника изделия показана на рис. 2.

Этап эскизного проектирования уже позволяет с помощью «цифрового двойника» создать множество вариантов разрабатываемого изделия для их оценки и выбора наилучшего из разнообразных технических решений. «Цифровой двойник» изделия применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия, включая проектирование, производство, эксплуатацию и утилизацию. Сейчас распространена классификация, включающая три типа двойников изделия: цифровые двойники-

прототипы (Digital Twin Prototype, DTP), цифровые двойники-экземпляры (Digital Twin

Instance, DTI) и агрегированные двойники (Digital Twin Aggregate, DTA) [3, 4].

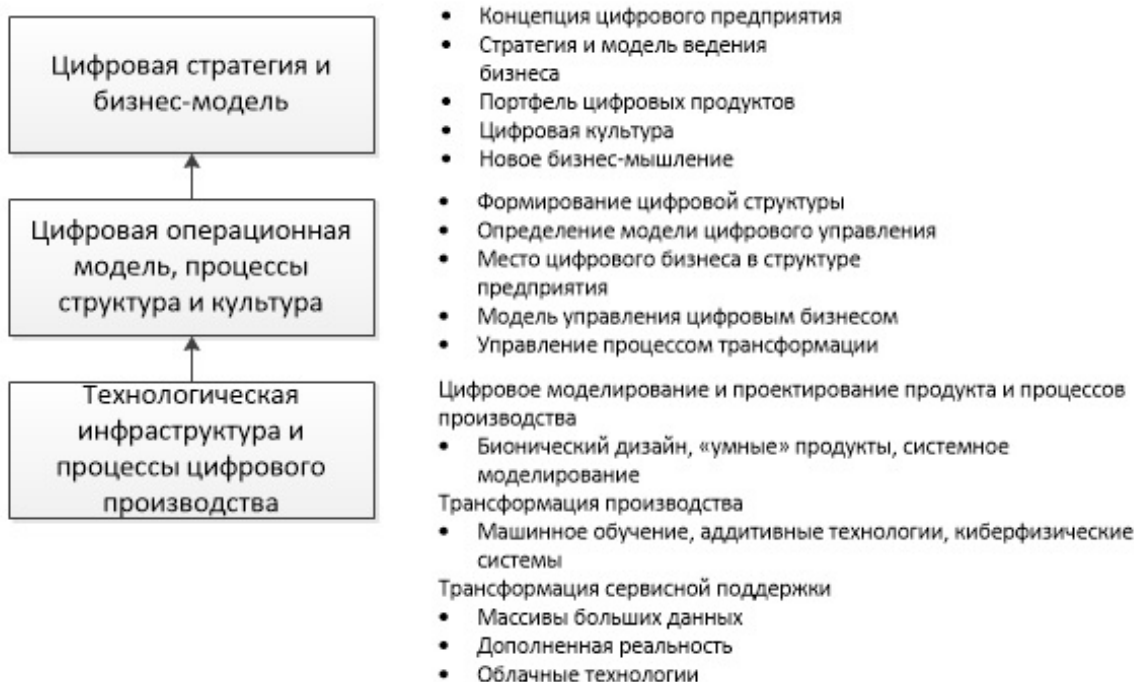


Рис. 1. Области информационной трансформации и их направления

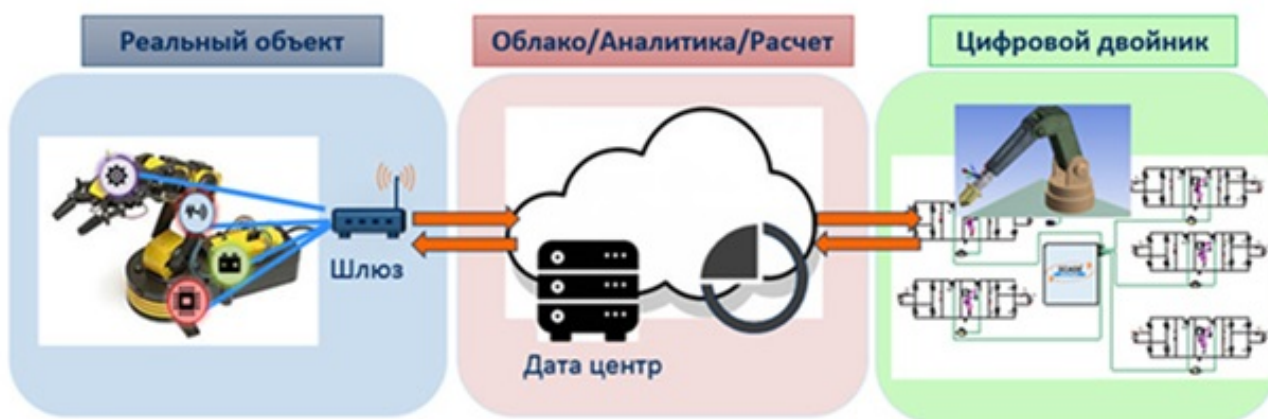


Рис. 2. Концепция цифрового двойника изделия

На следующем этапе – этапе технического проектирования полученная модель может дорабатываться и уточняться, и именно в конце данного этапа получается конечный «цифровой двойник» изделия.

На этапе изготовления «цифровой двойник» изделия помогает определять требуемые допуски, характеристики и т.д.

На этапе эксплуатации изделия его «цифровой двойник» может быть использован для реализации обратной связи с разработкой и изготовлением изделий, диагностикой и прогнозированием неисправностей, повышением эффективности работы, перекалибровкой, выявления новых потребностей потребителя.

Таким образом, «цифровой двойник» изделия – это полномасштабная модель конкретного инженерно-технического объекта, которая получает результаты моделирования в максимально короткое время, что позволяет инженерам проводить всевозможные тесты, изменяя лишь введенные параметры. Данная технология обладает рядом преимуществ [2, 10]:

- виртуальный ввод в эксплуатацию – нет необходимости создавать сразу прототип, можно исследовать длительные и динамические нагрузки на цифровом двойнике;
- онлайн-диагностика – запуск «цифрового двойника» изделия вместе с реальным физическим объектом для диагностики

возникающих динамических изменений;

- виртуальные датчики – динамическая реакция «цифрового двойника» обусловлена определенными физическими законами, поэтому можно его использовать на этапе диагностики изделия для подмены неисправного датчика на время ремонта, либо для того, чтобы вообще исключить этот датчик из процесса;
- профилактическое обслуживание – влияние различных нагрузок на срок службы деталей и узлов моделируемого изделия;
- инструмент продаж – «цифровой двойник» изделия может быть использован для оценки требования заказчика.

Впоследствии на основании понятия цифрового двойника изделия появилось понятие «цифровая технологическая цепочка», которая объединяет в себе сотрудников, системы и оборудование, сохраняя актуальность информации на всех этапах изготовления деталей. Ее также называют «цифровым двойником» производственной системы.

Такой подход позволяет оптимизировать производственные процессы, снизить себестоимость и сократить сроки выполнения производственных заказов. Например, внесение изменений в конструкцию (на этапе использования «цифрового двойника» изделия) автоматически передается на все этапы процесса проектирования и изготовления, исключая ручной ввод данных [8]. Также повторное использование оптимальных рабочих процессов на этапе эксплуатации «цифрового двойника» производственной системы – это прямой путь к повышению производительности и качества [1, 9].

«Цифровой двойник» производственной системы включает в себя [4, 8]:

- инжиниринговую модель ПС, содержащую цифровое описание ресурсов предприятия, структуру станочной системы, средства технологического оснащения, номенклатуру и технологии изготовления изделий, систему сбора информации о текущем состоянии оборудования.
- эксплуатационную модель ПС, являющуюся цифровой платформой для описания логической архитектуры предприятия, формирования планов-графиков изготовления изделий, межцеховой и внешней кооперацией, включая регламенты технического обслуживания и ремонта оборудования. Математическому описанию также подлежат динамика внутрицеховых материальных потоков, на основе цифровизации которых формируются оптимальные производственные расписания

выполняемых работ.

Наиболее сложным для практической реализации является эксплуатационная модель «цифрового двойника» ПС, на которую, в частности, возлагаются следующие функции:

- проводить необходимые расчеты для принятия управленческих решений;
- отображать в режиме реального времени производственные процессы, протекающие в производственной системе;
- проводить различные эксперименты «что если» путем математического моделирования производственных процессов.

Важнейшим требованием к производственной системе является возможность эффективного пооперационного планирования на основе многокритериальной оптимизации [6, 7].

Оперативное планирование цифрового производства осуществляется за счет расчета детального расписания выполняемых работ, которое формируется с использованием ряда альтернативных оптимизационных критериев [5].

На рис. 3 приведен пример критериев, используемых для составления производственных расписаний российской MES-системой «ФОБОС» (ИКИ РАН).

Цифровое моделирование и управление внутрицеховыми материальными потоками осуществляется средствами MES-систем в диспетчерском контуре управления. Для этих целей в online режиме контролируется текущее состояние производства. Для оценки эффективности цифрового производственного процесса используют два численных показателя [3, 7]:

- всеобщая эффективность станочной системы – коэффициент OEE (Overall Equipment Effectiveness) – показатель плотности загрузки оборудования;
- эффективность операционного цикла – коэффициент MCE (Manufacturing Cycle Effectiveness) – показатель скорости обработки деталей и сборочных единиц в производственных подразделениях предприятия.

Общая эффективность оборудования является показателем, с помощью которого анализируется поведение «цифровой модели» производственной системы, в частности, измеряется доля планируемого производственного времени, которое приходится на изготовленные детали без учета незавершенного производства

Приведем формулу для расчета коэффициента OEE:

$$OEE = K_{вр} K_{пр} K_{кач} = \frac{\sum_j [\Phi_{врj} - Пр_j]}{\sum_j [\Phi_{врj}]} \times \frac{\sum_i [T_i \text{ Выр}_i]}{\sum_j [\Phi_{врj} - Пр_j]} \times \frac{\sum_i [T_i (\text{Выр}_i - Б_i)]}{\sum_i [T_i \text{ Выр}_i]}$$

где $K_{вр}$ – коэффициент времени (доступность); $K_{пр}$ – коэффициент производительности (эффективность работы); $K_{кач}$ – коэффициент качества (уровень качества); j – количество единиц оборудования; $\Phi_{врj}$ – фонд времени работы j -й единицы оборудования (время рабочей смены); $Пр_j$ – простой j -й единицы обо-

рудования, в том числе плановые (ППР, наладка и пр.); i – количество продуктов, производимых на данной единице оборудования; T_i – такт выпуска i -го продукта; Выр_i – количество изготовленного i -го продукта в ние $\Phi_{вр}$; $Б_i$ – количество брака i -го продукта изготовленного в течение $\Phi_{вр}$; $\sum_j [\Phi_{врj} - Пр_j]$ – время, имеющееся для выпуска продукции на j -й единице оборудования; $\sum_i [T_i * \text{Выр}_i]$ – количество времени, потраченного на производство продукции; $\sum_i [T_i * (\text{Выр}_i - Б_i)]$ – количество времени, потраченного на производство годной продукции.

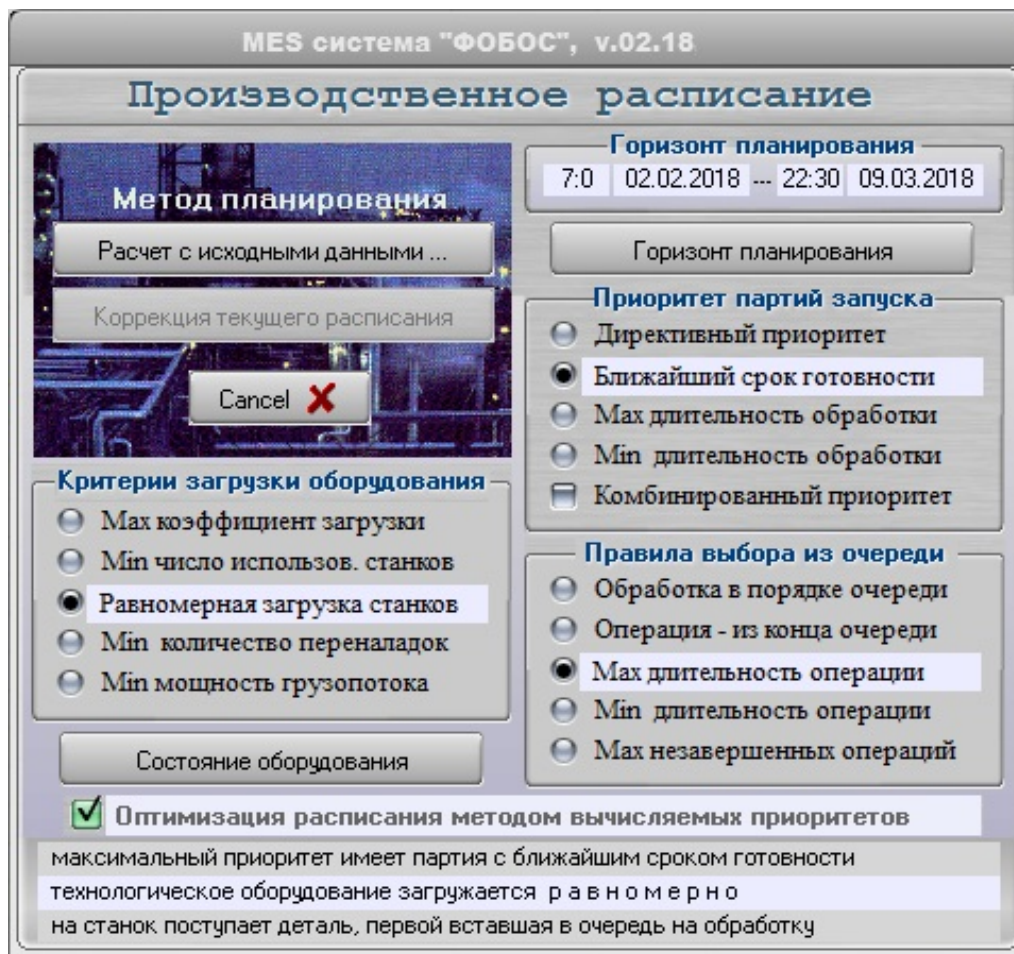


Рис. 3. Критерии расчета производственного расписания (многокритериальная оптимизация)

Коэффициент МСЕ – второй показатель, описывающий цифровую модель производства, вычисляется как отношение трудоемкости технологических операций, выполняемых при обработке изделий, к времени пребывания этих изделий в соответствующих производственных подразделениях.

Таким образом, если коэффициент ОЕЕ характеризует плотность загрузки технологического оборудования, моделируемого в цифре, то коэффициент МСЕ является характеристи-

кой скорости обработки выполняемых заказов, динамику материального потока в «цифровом двойнике» производственной системы.

Коэффициент МСЕ вычисляется по формуле [5, 6]:

$$MCE_{ik} = \frac{T_{ik} * \text{Выр}_{ik}}{\sum_j \Phi_{врj}}$$

где Выр_{ik} – выработка k -го производственного участка по деталям, входящим в i -й продукт; T_{ik} – такт выпуска i -й продукции на участке k ;

$F_{врj}$ – фонд времени работы j -й единицы оборудования.

Еще одним важным понятием, присущим «цифровому двойнику» – эксплуатационной модели производственной системы, является понятие текущего состояния обрабатываемого заказа. Для машиностроительных производств мелкосерийного и единичного типа типичным представлением такого состояния (состояния обработки заказа) может служить график пооперационной обработки деталей и сборочных единиц, входящих в заказ (рис. 4).

Значение коэффициента МСЕ является характеристикой скорости прохождения дета-

лей, входящих в конкретный заказ, через определенный производственный участок [3, 5].

В заключение можно сказать, что понятия «цифровой двойник», «цифровой процесс» и «цифровая производственная система» являются неразрывными и вытекающими друг из друга понятиями. Они являются одной из основ концепции «Индустрия 4.0», а именно ее третьего этапа [9, 10]. Использование подхода «цифровых двойников» позволит гарантированно изготавливать изделия, отвечающие всем требованиям заказчика, а также увеличить прибыльность и эффективность отечественных машиностроительных предприятий.

СОСТОЯНИЕ ЗАКАЗА № 200.021/3

Обозначение ПС - 0006

Наименование изделия Кабина

Плановые сроки изготовления 17.10.2016 - 11.11.2016

Фактические сроки готовности 17.10.2016 - 15.11.2016 - отставание 4 дня

Запланировано партий / ДСЕ 39 / 107 количество операций 269

Расчетные сроки пооперационной обработки ДСЕ заказа на 23.10.2016

Код наименования операции	кол-во	трудоемкость	начало - окончание	отработано	МСЕ
0418 комплектование	1	0,02 час.	10.11.2016 - 10.11.2016	0,00 %	100
0108 слесарная обработка	43	110,88 час.	17.10.2016 - 14.11.2016	10,40 %	67,47
4110 токарная чистовая	9	21,75 час.	20.10.2016 - 14.11.2016	18,77 %	45,82
4131 круглошлифовальная	15	10,18 час.	21.10.2016 - 14.11.2016	10,97 %	27,24
4130 пл.шлифовальная чистовая	25	23,65 час.	21.10.2016 - 15.11.2016	3,88 %	41,83
4142 заточная	1	1,58 час.	15.11.2016 - 15.11.2016	0,00 %	100
9170 термическая резка	13	8,60 час.	18.10.2016 - 18.10.2016	100,00 %	100
5010 термообработка (отжиг)	10	170,00 час.	18.10.2016 - 19.10.2016	100,00 %	100
4260 фрезерная черновая	25	55,00 час.	19.10.2016 - 31.10.2016	50,24 %	59,3
4130 пл.шлифовальная черновая	17	16,70 час.	20.10.2016 - 03.11.2016	19,36 %	42,6
5030 термообработка (закалка)	36	612,00 час.	19.10.2016 - 07.11.2016	16,67 %	100
4223 координатно-расточная	15	74,30 час.	26.10.2016 - 10.11.2016	0,00 %	61,26
5050 термообработка (отпуск)	4	68,00 час.	18.10.2016 - 24.10.2016	75,00 %	100
4234 фрезерная с ЧПУ	7	75,60 час.	21.10.2016 - 08.11.2016	0,00 %	67,38
7500 электроэрозионная	2	18,00 час.	07.11.2016 - 08.11.2016	0,00 %	76,47
4260 фрезерная чистовая	5	11,65 час.	24.10.2016 - 04.11.2016	0,00 %	39,57
4285 пило-отрезная	23	19,02 час.	18.10.2016 - 19.10.2016	100,00 %	100
4110 токарная черновая	17	27,12 час.	20.10.2016 - 21.10.2016	100,00 %	100
4132 внутришлифовальная	1	0,58 час.	25.10.2016 - 25.10.2016	0,00 %	100
Итого:	269	1324,63 час.	17.10.2016 - 15.11.2016	31,86 %	
Без учета кооперации:	219	474,63 час.	Готовность в среднем на	47,32 %	52,89

Частично запланированных партий ДСЕ нет
 Текущий дефицит ДСЕ нет
 Эффективность операционного цикла (МСЕ) 52,89 %

Рис. 4. Пример текущего состояния производства (состояние заказа)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соломенцев, Ю.М., Фролов, Е.Б. «Цифровой двойник» производственной системы – перспективный инструмент повышения эффективности станочного парка машиностроительного предприятия // Станочный парк. – 2018. – № 8. – С. 36-39.
2. Грюнвальд, А. Создание цифрового завода будущего // САПР и графика. – 2018. – № 3. – С. 68-69.
3. Фролов, Е.Б., Залыгин, А.Р., Нестеров, А.В. Исполнительные производственные системы – инструмент эффективного управления машиностроительным предприятием // Генеральный директор. – 2013. – №2. – С. 76-79.
4. Соломенцев, Ю.М., Фролов, Е.Б. «Цифровой двойники» изделия и производственной системы // Генеральный директор. – 2018. – № 8. – С. 18-25.
5. Фролов, Е.Б., Загидуллин, Р.Р. MES-системы как они есть или эволюция систем планирования производства // Генеральный директор. – 2008. – № 4. – С. 84-91.
6. Zagidullin R., Frolov E. Control of manufacturing production by means of MES systems // Russian Engineering Research, 2008, Vol. 28, No. 2, pp. 166–168. Allerton Press, Inc., 2008.
7. Фролов, Е.Б., Загидуллин, Р.Р. Оперативно-календарное планирование и диспетчирование в MES-системах // Станочный парк. – 2008. – № 11. – С. 22-27.
8. Долгов, В.А., Кабанов, А.А. Основные подходы к формированию информационной модели производственно-технологической системы машиностроительного предприятия // Автоматизация. Современные технологии. – 2018. – №4. – С. 178-184.
9. Ингеманссон, А.Р. Характеристика, состав, механизмы функционирования и современные аспекты внедрения цифровых производственных систем в машиностроение // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2018. – № 8(86). – С. 25-32.
10. Цифровые двойники: создание интеллектуальной продукции – своевременно и в рамках бюджета [Электронный ресурс] // Rockwell Automation. – 2018. Режим доступа: <https://www.rockwellautomation.com>. – (Дата обращения: 27.10.2018).

REFERENCES

1. Solomentsev, Yu.M., Frolov, E.B. “Digital counterpart” of production system – promising tool for machinery effectiveness increase of engineering enterprise // *Machinery*. – 2018. – No.8. – pp. 36-39.
2. Gruenwald, A. Formation of future digital enterprise // *CAD and Graphics*. – 2018. – No.3. – pp. 68-69.
3. Frolov, E.B., Zalygin, A.P., Nesterov, A.V. Executive production systems – tool of efficient control of engineering enterprise // *Director General*. – 2013. – No.2. – pp. 76-79.
4. Solomentsev, Yu.M., Frolov, E.B. “Digital counterparts” of product and production system // *Director General*. – 2018. – No.8. – pp. 18-25.
5. Frolov, E.B., Zagidullin, R.R. MES-systems as they are or evolution of production planning system // *Director General*. – 2008. – No.4. – pp. 84-91.
6. Zagidullin R., Frolov E. Control of manufacturing production by means of MES systems // *Russian Engineering Research*, 2008, Vol. 28, No. 2, pp. 166–168. Allerton Press, Inc., 2008.
7. Frolov, E.B., Zagidullin, R.R. Operational and calendar planning and managing in MES-systems // *Machinery*. – 2008. – No.11. – pp. 22-27.
8. Dolgov, V.A., Kabanov, A.A. Basic approaches to information model formation of production-technological system of engineering enterprise // *Automation. Modern Technologies*. – 2018. – No.4. – pp. 178-184.
9. Ingemansson, A.R. Characteristics, structure, mechanisms of functioning and modern aspects of digital production system introduction in mechanical engineering // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.8 (86). – pp. 25-32.
10. Digital Counterparts: creation of intelligent products – timely and within budget [Electronic resource] // Rockwell Automation. – 2018. Access mode: <https://www.rockwellautomation.com>. – (Address date: 27.10.2018).

Рецензент д.т.н. Е.А. Саксонов

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"
 Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
 ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
 Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru
 Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбова.

Сдано в набор 10.01.2019. Выход в свет 28.02.2019.
 Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.
 Тираж 500 экз. Свободная цена.

12+

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии
 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
 "Брянский государственный технический университет"
 241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16