

Министерство промышленности Республики Беларусь
Министерство образования Республики Беларусь
Национальная академия наук Беларуси
Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь
Открытое акционерное общество «СтанкоГомель»
Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»

ИННОВАЦИОННОЕ СТАНКОСТРОЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТ

МАТЕРИАЛЫ
III Международной научно-практической
конференции

Гомель, 27–28 ноября 2025 года

Гомель 2026

УДК 621.9.06+621.7/9-52(042.3)

ББК 34.63.52+34.500.9

И66

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, проф. *М. И. Михайлов* (отв. редактор)

д-р техн. наук, проф. *А. В. Пуцято*

А. Л. Железняков

д-р техн. наук, проф. *А. А. Бойко*

канд. техн. наук, доц. *Г. В. Петришин*

И. Ф. Чернейко

Под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. *М. И. Михайлова*

Подготовка и проведение конференции осуществлены на базе
Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого

И66 **Иновационное** станкостроение, технологии и инструмент : материалы
III Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 27–28 нояб. 2025 г. / М-во пром-сти
Респ. Беларусь, М-во образования Респ. Беларусь, Нац. акад. наук Беларуси [и др.] ;
под общ. ред. М. И. Михайлова. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2026. – 112 с.

ISBN 978-985-535-630-2.

Содержатся материалы III Международной научно-практической конферен-
ции по следующим направлениям: автоматизация технологических процессов об-
работки материалов; мехатроника; технические и программные средства автома-
тизации; материаловедение; CAD-, CAM-технологии; энергоэффективные и адди-
тивные технологии.

Для специалистов в области машиностроения.

УДК 621.9.06+621.7/9-52(042.3)

ББК 34.63.52+34.500.9

ISBN 978-985-535-630-2

© Оформление. Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Железняков А. Л.</i> СтанкоГомель – опыт, инновации, бренд	5
<i>Акунец М. Н.</i> Основные направления устойчивого развития Гомельской области на период до 2040 года.....	13
<i>Перетягина Е.</i> Качество – гарантия доверия на мировом рынке.....	15
<i>Хейфец М. Л., Грецкий Н. Л.</i> Перспективы развития станочных комплексов технологического оборудования.....	17
<i>Залесский В. Г., Поболь И. Л., Чернейко И. Ф.</i> Освоение инновационных технологий ФТИ НАН Беларуси в ОАО «СтанкоГомель»	19
<i>Михайлов М. И.</i> Техническое резервирование – основа обеспечения эффективности робототехнических систем	22

Секция I

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ. МЕХАТРОНИКА.

ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

<i>Брешев В. Е., Синдеева Е. В., Николаев А. Ю.</i> Метод исследования средствами САПР динамической устойчивости шпинделя введением тарированной неуравновешенности на 3D-модели его ротора	28
<i>Данилов В. А.</i> Планетарное точение некруглых поверхностей.....	30
<i>Данилов В. А., Данилов А. А.</i> Совмещение кругового и полигонального точения деталей типа тел вращения	33
<i>Данилов А. А.</i> Влияние метода профилирования поверхности на геометрию режущего лезвия инструмента	36
<i>Никитенко Д. В., Михайлов М. И.</i> Алгоритм расчета координат профиля винтовой поверхности в произвольной секущей плоскости	38
<i>Скакун В. В., Джемилов Э. Ш., Джемалядинов Р. М., Теминдаров И. Э.</i> Исследование влияния экологически безопасных смазывающих технологических сред на стойкость инструментов из быстрорежущей стали	42
<i>Джемалядинов Р. М., Егоров Ю. А., Соколенко Б. В., Скакун В. В.</i> Применение сингулярных пучков для неразрушающего контроля шероховатости обработанной поверхности.....	45
<i>Демиденко Н. Е., Демиденко Е. Н.</i> Исследование интенсивности отказов и интегрального показателя надежности узлов обрабатывающих центров SGV720 и SGH500	47
<i>Демиденко Н. Е.</i> Анализ распространенных неисправностей обрабатывающих центров SGV720 и SGH500 в процессе гарантийного обслуживания	50
<i>Процко В. Ю., Стасенко Д. Л.</i> Исследование газового потока при транспортировании частиц	52
<i>Процко В. Ю., Стасенко Д. Л.</i> Влияние струйно-абразивной обработки на поверхности заготовки.....	54
<i>Лепицкий А. П., Кульгейко М. П.</i> Влияние основных конструктивных параметров рабочего пространства магнитного индуктора на производительность магнитно-абразивной обработки.....	57

<i>Матвеевцева М. В., Михайлов М. И.</i> Анализ надежности и рисков токарных резцов при обработке стали 45 на станках с ЧПУ	60
<i>Пивовар С. Н., Митрофанова Г. В.</i> Налоговое стимулирование как инструмент внедрения инновационных технологий в станкостроении	62
<i>Михайлов М. И., Шабакеева З. Я.</i> Исследование жесткости сборных резцов со сменными многогранными пластинами	64
<i>Соловьева Л. Л.</i> Анализ макросреды предприятия с помощью метода EFAS	67

Секция II

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

<i>Дашкевич В. Г., Мышкевич П. С., Судников М. А.</i> Эффективность термодиффузионных алюминидных слоев на углеродистых сталях при работе в условиях повышенных температур	70
<i>Харкевич В. Г., Жигалов А. Н., Жариков А. Н., Башаримов М. В., Капитонов В. А.</i> Разработка температурной модели процесса цинкотермии	72
<i>Харкевич В. Г., Жигалов А. Н., Жолобов Д. А., Черный В. А., Кубраков И. В.</i> Исследование влияния содержания цинка на эффективность разложения твердосплавного лома	74
<i>Харкевич В. Г., Тарасенко В. И., Жигалов А. Н., Черняков Ю. Д., Тропынин П. А.</i> Исследование гранулометрического состава твердосплавного порошка, полученного из разложенного твердосплавного лома	76
<i>Сечко И. А., Посылкина О. И.</i> Многокомпонентные оксикарбидные покрытия на основе Ti–Al–Cr–Fe–Ni, сформированные методом вакуумно-дугового осаждения, для изделий инструментального назначения	79
<i>Атвиновская Т. В., Злотников И. И.</i> Работоспособность деталей из алюминиевых сплавов с упрочненной микродуговым оксидированием поверхностью в узлах трения нефтепромыслового оборудования	81
<i>Поздняков Е. П., Степанкин И. Н., Левкина А. Д., Куис Д. В., Лежнев С. Н.</i> Влияние длительности цементации на износостойкость конструкционных сталей 18ХГТ, 20ХН3А и 16CrMnS5	84
<i>Комаровская В. М., Терещук О. И., Артемчик А. Г.</i> Модернизация газовой системы планарного магнетрона	87

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СООБЩЕНИЯ

<i>Костенко А. И.</i> Новые функциональные возможности систем ЧПУ для станочного оборудования и роботизированных комплексов	90
<i>Самсонов К. О.</i> Зубо-, шлице-, резьбошлифовальный модульный станок с единой базой производства ОАО «Вистан»	96
<i>Карпухин А. В.</i> Современное проектирование и производство отечественных станков	98
<i>Матюк Д. В.</i> Организация производства современного металлорежущего и вспомогательного инструмента на ОАО «Оршанский инструментальный завод»	103
<i>Карпов А. А., Михайлов М. И.</i> Разработка конструкций универсально-сборного комбинированного металлорежущего инструмента	109
<i>Дашкевич В. Г., Мышкевич П. С., Дылевский А. В.</i> Вакуумные ионно-плазменные технологии как инструмент создания специальных многослойных покрытий для аэрокосмического применения	111

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 341.018

СтанкоГомель – ОПЫТ, ИННОВАЦИИ, БРЕНД

А. Л. Железняков

ОАО «СтанкоГомель», Республика Беларусь

Приведены основные виды выпускаемых станков и их технические характеристики.

Ключевые слова: открытое акционерное общество «СтанкоГомель», выпускаемая продукция, основные характеристики.

STANKOGOMEL – EXPERIENCE, INNOVATION, BRAND

A. L. Zheleznyakov

OJSC StankoGomel, the Republic of Belarus

The main types of manufactured machine tools and their technical specifications are presented.

Keywords: StankoGomel Open Joint-Stock Company, manufactured products, main specifications.

Уважаемые друзья!

Рад приветствовать Вас на III Международной научно-практической конференции «Инновационное станкостроение, технологии и инструмент».

Отрадно отметить, что география участников конференции расширяется, в этот раз представлены научные организации, промышленные предприятия и компании из Беларуси, России, Китая.

Всего в конференции участвуют более 50 различных организаций.

История ОАО «СтанкоГомель» начинается с основания в 1885 г. на окраине Гомеля небольшого чугунолитейного предприятия.

Сегодня ОАО «СтанкоГомель» – предприятие с годовым объемом производства более 29,7 млн белорусских рублей.

Преимущества работы с ОАО «СтанкоГомель»:

1. ОАО «СтанкоГомель» – предприятие, дающее гарантию качества.
2. ОАО «СтанкоГомель» – крупнейший представитель машиностроительной отрасли Республики Беларусь. Давно и уверенно работая на рынке, завод заботится о своевременной модернизации производства. Внутренняя политика предприятия, направленная на постоянное движение вперед, позволяет сохранять лидирующие позиции в отрасли.
3. ОАО «СтанкоГомель» выпускает:
 - вертикальные и горизонтальные обрабатывающие центры с ЧПУ;
 - консольно-фрезерные станки с СППУ, TNC и ЧПУ;
 - универсальные консольно-фрезерные станки по лицензии фирмы HECKERT Chemnitzer Werkzeugmaschinen GmbH (Германия);
 - осуществляет восстановление и капитальный ремонт.

4. Ассортимент производимой продукции постоянно расширяется. При производстве соблюдаются основные требования безопасности директив Европейского союза, что позволяет наносить на продукцию маркировку – CE. Все изделия соответствуют требованиям СТБ ISO 9001-2009.

5. ОАО «СтанкоГомель» выпускает оборудование, удостоенное многочисленных наград на отечественных и международных выставках.

6. ОАО «СтанкоГомель» гарантирует своим партнерам долговременное и плодотворное сотрудничество, основанное на опыте, качестве и гибкой ценовой политике.



Рис. 1. Вертикальный обрабатывающий центр для трехсторонней обработки SGV1200-3X

Техническая характеристика SGV1200-3X

Наименование показателя	Значение
1. Рабочая зона	
1.1. Размер поверхности стола, мм	1200(1400)x700
1.2. Наибольшее перемещение рабочих органов станка, мм:	
- поперечное перемещение саней (ось X)	1000
- продольное перемещение траверсы (ось Y)	600
- вертикальное перемещение шпиндельной бабки (ось Z)	600
1.3. Скорость быстрых перемещений, м/мин.	30
2. Главный привод	
2.1. Тип привода	Двухступенчатая коробка скоростей (мотор-шпиндель)
2.2. Инструментальный интерфейс	ISO50, ISO40 (HSK-A100, HSKA63)
2.3. Мощность в режиме S1 (кВт)	15 (26)
2.4. Максимальный момент на шпинделе в режиме S1(Нм)	380 (280, 125)
2.5. Максимальное число оборотов шпинделя	6 000(12 000, 15 000)
3. Рабочий стол	
3.1. Наибольшая масса устанавливаемой заготовки, кг	1000
4. Устройство автоматической смены инструмента (УАСИ)	
4.1. Количество инструментальных ячеек, шт.	20 (30)
4.2. Габаритные размеры инструмента, мм:	
- длина	350
- диаметр без пропуска гнезд	150(105)
- ориентированного, с пропуском гнезд	150
4.3. Наибольшая масса инструментальной оправки, кг.	25 - для ISO50 и HSK-A100, 8 - для ISO40 и HSK-A63
4.4. Время смены инструмента (от стружки до стружки), с.	8



Рис. 2. Вертикальный обрабатывающий центр для пятисторонней обработки SGV720-5X

Техническая характеристика SGV720-5X

Наименование показателя	Значение
1. Рабочая зона	
1.1. Размер поверхности стола, мм	720x720 (Ø800, 630x630)
1.2. Наибольшее перемещение рабочих органов станка, мм:	
- поперечное перемещение сани (ось X)	820
- продольное перемещение траверсы (ось Y)	600
- вертикальное перемещение шпиндельной бабки (ось Z)	600
- наклон стола (ось A)	±120°
- вращение стола (ось C)	360°
1.3. Скорость быстрых перемещений, м/мин.	30
2. Главный привод	
2.1. Тип привода	Двухступенчатая коробка скоростей (мотор-шпиндель)
2.2. Инструментальный интерфейс	ISO50, ISO40 (HSK-A100, HSKA63)
2.3. Мощность в режиме S1 (КВт)	15 (28)
2.4. Максимальный момент на шпинделе в режиме S1(Нм)	380 (280, 125)
2.5. Максимальное число оборотов шпинделя	6 000(10 000, 15 000)
3. Рабочий стол	
3.1. Минимальная дискретность поворота стола	0,001°
3.2. Наибольшая масса устанавливаемой заготовки, кг	500
3.3. Привод стола	Сервопривод + зубчатый редуктор
- наклона стола (ось A)	Сервопривод(прямой)
- вращения стола (ось C)	
3.4. Максимальная скорость, мин ⁻¹	20
- наклона стола (ось A)	30 (50, 60°)
- вращения стола (ось C)	
4. Устройство автоматической смены инструмента (УАСИ)	
4.1. Количество инструментальных ячеек, шт.	20 (30)
4.2. Габаритные размеры инструмента, мм:	
- длина	350
- диаметр без пропуска гнезд	150(105)
- ориентированного, с пропуском гнезд	150
4.3. Наибольшая масса инструментальной оправки, кг.	25 - для ISO50 и HSK-A100, 8 - для ISO40 и HSK-A63
4.4. Время смены инструмента (от стружки до стружки), с.	8

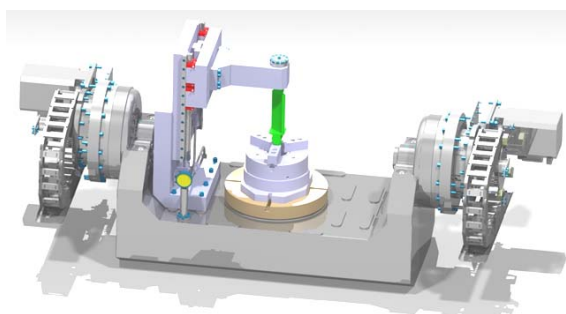
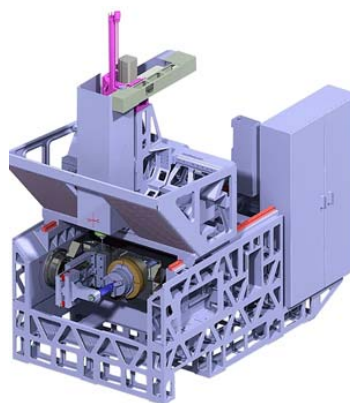


Рис. 3. Вертикальный обрабатывающий центр для пятисторонней обработки с функцией токарной обработки SGT400

Техническая характеристика SGT400

Наименование показателя	Значение
1. Рабочая зона	
1.1. Размер поверхности стола, мм	Ø440
1.2. Наибольшее перемещение рабочих органов станка, мм:	
- поперечное перемещение саней (ось X)	820
- продольное перемещение траверсы (ось Y)	600
- вертикальное перемещение шпиндельной бабки (ось Z)	600
- наклон стола (ось A)	±120°
- вращение стола (ось C)	360°
1.3. Скорость быстрых перемещений, м/мин.	30
2. Главный привод	
2.1. Тип привода	Электрошпindel
2.2. Инструментальный интерфейс	ISO40 (HSKA83)
2.3. Мощность в режиме S1 (КВт)	42
2.4. Максимальный момент на шпинделе в режиме S1(Нм)	200
2.5. Максимальное число оборотов шпинделя	15 000 (20 000)
3. Рабочий стол	
3.1. Минимальная дискретность поворота стола	0,001°
3.2. Наибольшая масса устанавливаемой заготовки, кг	200
3.3. Привод стола	Сервопривод + зубчатый редуктор
- наклона стола (ось A)	Сервопривод(прямой)
- вращения стола (ось C)	
3.4. Максимальная скорость, мин ⁻¹	
- наклона стола (ось A)	20
- вращения стола (ось C)	600
4. Устройство автоматической смены инструмента (УАСИ)	
4.1. Количество инструментальных ячеек, шт.	30
4.2. Габаритные размеры инструмента, мм:	
- длина	350
- диаметр без пропуска гнезд	105
- ориентированного, с пропуском гнезд	150
4.3. Наибольшая масса инструментальной оправки, кг.	10
4.4. Время смены инструмента (от стружки до стружки), с.	8

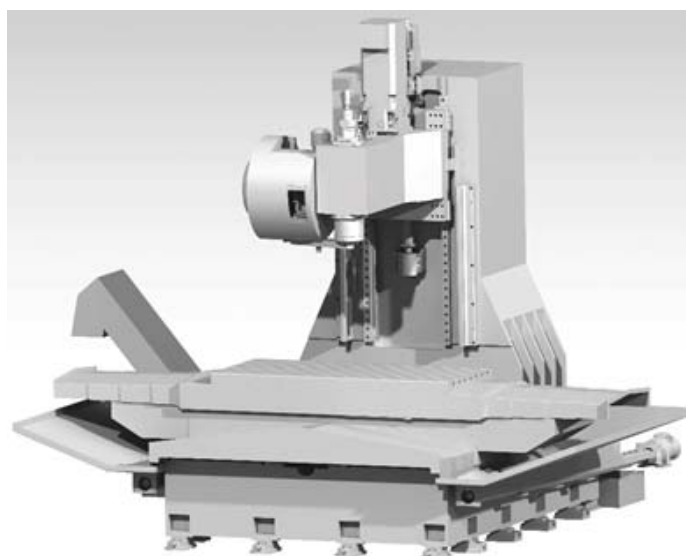


Рис. 4. Вертикальный обрабатывающий центр для трехсторонней обработки SGV1800

Техническая характеристика SGV1800

Наименование показателя	Значение
1. Рабочая зона	
1.1. Размер поверхности стола-спутника, мм	1800x780
1.2. Наибольшее перемещение рабочих органов станка, мм:	
- поперечное перемещение саней (ось X)	1700
- продольное перемещение траверсы (ось Y)	800
- вертикальное перемещение шпиндельной бабки (ось Z)	800
1.3. Скорость быстрых перемещений, м/мин.	30
1.4. Наибольшая масса устанавливаемой заготовки, кг	1500
2. Главный привод	
2.1. Тип привода	Двухступенчатая коробка скоростей
2.2. Инструментальный интерфейс	ISO50 (HSKA100)
2.3. Мощность в режиме S1 (кВт)	22
2.4. Максимальный момент на шпинделе в режиме S1 (Нм)	400
2.5. Максимальное число оборотов шпинделя	6 000
3. Устройство автоматической смены инструмента (УАСИ)	
3.1. Количество инструментальных ячеек, шт.	24
4.2. Габаритные размеры инструмента, мм:	
- длина	400
- диаметр без пропуска гнезд	125
- ориентированного, с пропуском гнезд	250
4.3. Наибольшая масса инструментальной оправки, кг.	20
4.4. Время смены инструмента (от стружки до стружки), с.	8

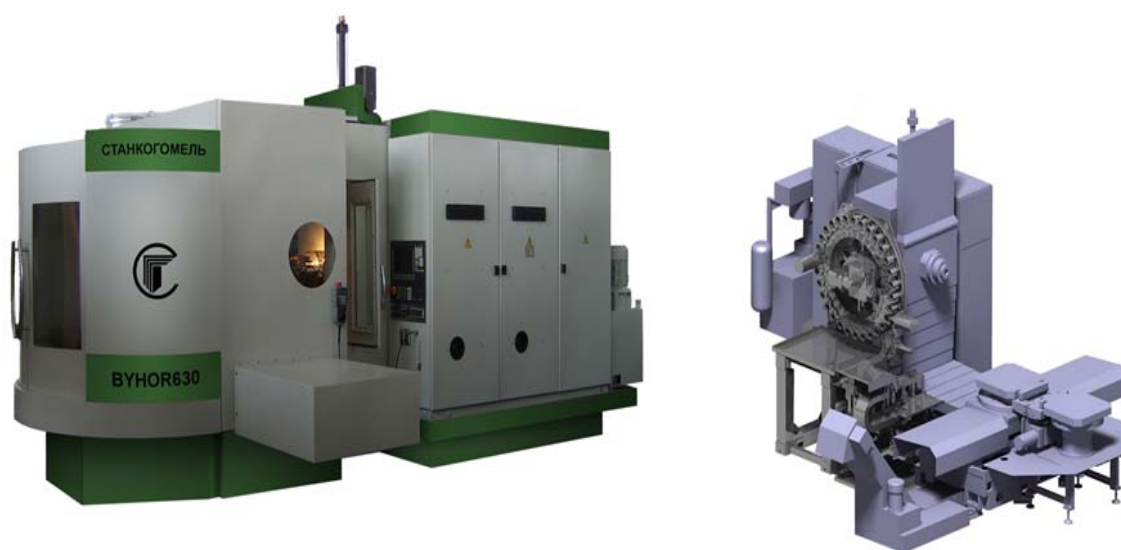


Рис. 5. Горизонтальный обрабатывающий центр BYHOR630

Техническая характеристика BYHOR630

Наименование показателя	Значения
1. Рабочая зона	
1.1. Размер поверхности стола-спутника, мм	630х630 (630х800)
1.2. Наибольшее перемещение рабочих органов станка, мм:	1000
- поперечное перемещение саней (ось X)	750
- вертикальное перемещение шпиндельной бабки (ось Y)	935
- продольное перемещение стойки (ось Z)	380°
- вращение стола (ось B)	30
1.3. Скорость быстрых перемещений, м/мин.	
2. Главный привод	
2.1. Тип привода	Двухступенчатая коробка скоростей
2.2. Мощность в режиме S1 (кВт)	22
2.3. Максимальный момент на шпинделе в режиме S1 (Нм)	700
2.4. Максимальное число оборотов шпинделя	6 000
2.5. Инструментальный интерфейс	ISO50
3. Рабочий стол	
3.1. Минимальная дискретность поворота стола	
- индексированного	1°
- непрерывного вращения	0,001°
3.2. Наибольшая масса устанавливаемой заготовки, кг	800
3.3. Привод поворота стола	Червячный
3.4. Максимальная скорость вращения стола, мин ⁻¹	40
4. Устройство автоматической смены инструмента (УАСИ)	
4.1. Количество инструментальных ячеек, шт.	30 (60)
4.2. Габаритные размеры инструмента, мм:	
- длина	400
- диаметр без пропуска гнезд	125
- диаметр с пропуском гнезд	240
4.3. Наибольшая масса инструментальной оправки, кг.	25
4.4. Время смены инструмента (от стружки до стружки), с.	8

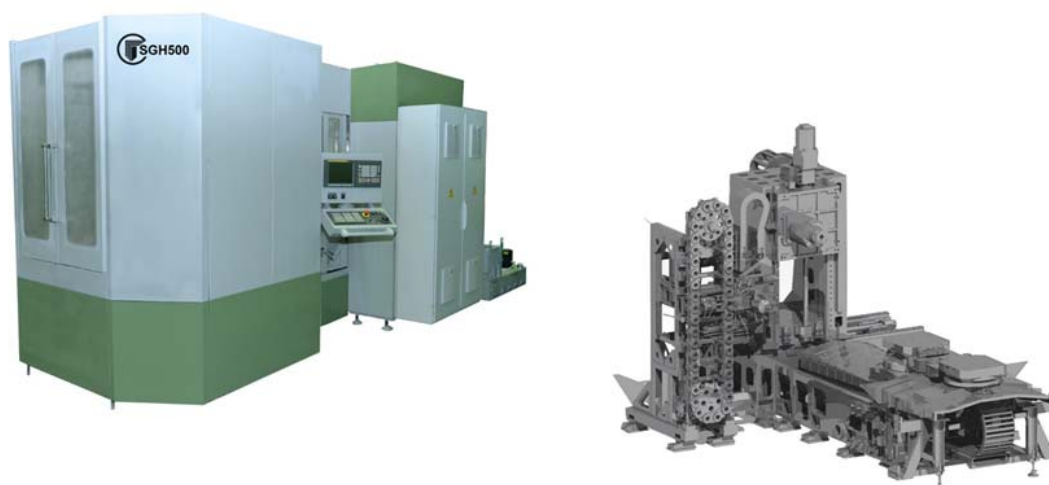


Рис. 6. Горизонтальный обрабатывающий центр SGH500-HP

Техническая характеристика SGH500-HP

Наименование показателя	Значение
1. Рабочая зона	
1.1. Размер поверхности стола-спутника, мм	500x500 (500x830)
1.2. Наибольшее перемещение рабочих органов станка, мм:	
- поперечное перемещение саней (ось X)	800
- вертикальное перемещение шпиндельной бабки (ось Y)	750
- продольное перемещение стойки (ось Z)	880
- вращение стола (ось B)	360°
1.3. Скорость быстрых перемещений, м/мин.	50
2. Главный привод	
2.1. Тип привода	Двухступенчатая коробка скоростей (мотор-шпиндель)
2.2. Мощность в режиме S1 (КВт)	18(28)
2.3. Максимальный момент на шпинделе в режиме S1(Нм)	700(125)
2.4. Максимальное число оборотов шпинделя	6 000 (15 000)
2.5. Инструментальный интерфейс	ISO60 (ISO40)
3. Рабочий стол	
3.1. Минимальная дискретность поворота стола	
- индексированного	1°
- непрерывного вращения	0,001°
3.2. Наибольшая масса устанавливаемой заготовки, кг	700
3.3. Привод поворота стола	Червячный
3.4. Максимальная скорость вращения стола, мин ⁻¹	40
4. Устройство автоматической смены инструмента (УАСИ)	
4.1. Количество инструментальных ячеек, шт.	40 (60)
4.2. Габаритные размеры инструмента, мм:	
- длина	500
- диаметр без пропуска гнезд	125
- диаметр с пропуском гнезд	250
4.3. Наибольшая масса инструментальной оправки, кг.	20
4.4. Время смены инструмента (от стружки до стружки), с.	8

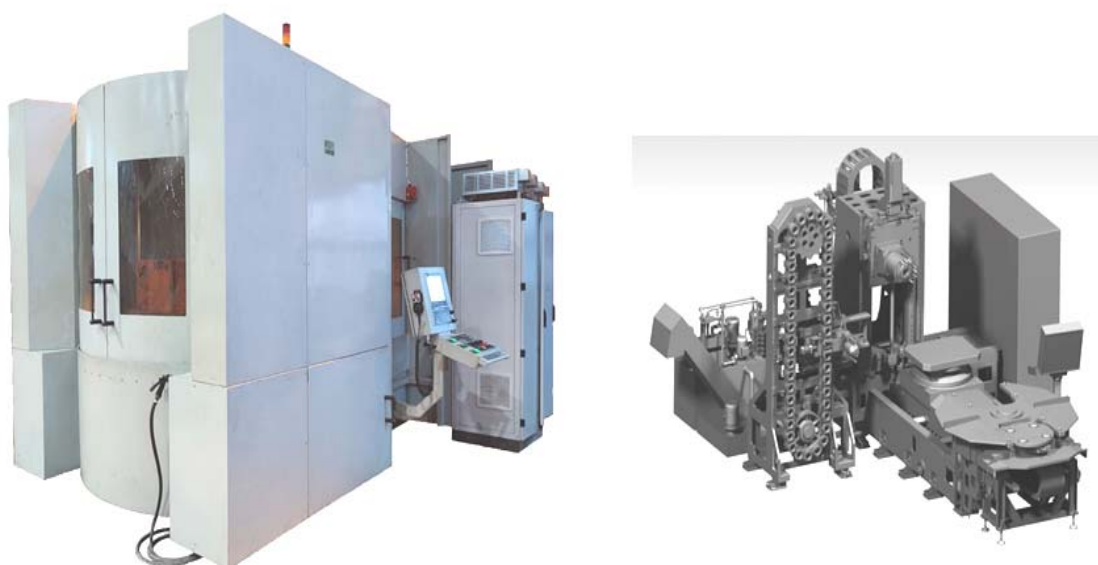


Рис. 7. Горизонтальный обрабатывающий центр SGH630-HP

Техническая характеристика SGH SGH630-HP

Наименование показателя	Значение
1. Рабочая зона	
1.1. Размер поверхности стола-спутника, мм	630х630 (630х800)
1.2. Наибольшее перемещение рабочих органов станка, мм:	
- поперечное перемещение сани (ось X)	1050
- вертикальное перемещение шпиндельной бабки (ось Y)	850
- продольное перемещение стойки (ось Z)	1000
- вращение стола (ось B)	360°
1.3. Скорость быстрых перемещений, м/мин.	50
2. Главный привод	
2.1. Тип привода	Двухступенчатая коробка скоростей
2.2. Мощность в режиме S1 (кВт)	22
2.3. Максимальный момент на шпинделе в режиме S1(Нм)	700
2.4. Максимальное число оборотов шпинделя	6 000
2.5. Инструментальный интерфейс	ISO50
3. Рабочий стол	
3.1. Минимальная дискретность поворота стола	
- индексируемого	1°
- непрерывного вращения	0,001°
3.2. Наибольшая масса устанавливаемой заготовки, кг	1000
3.3. Привод поворота стола	Червячный
3.4. Максимальная скорость вращения стола, мин ⁻¹	20
4. Устройство автоматической смены инструмента (УАСИ)	
4.1. Количество инструментальных ячеек, шт.	44 (60)
4.2. Габаритные размеры инструмента, мм:	
- длина	500
- диаметр без пропуска гнезд	125
- диаметр с пропуском гнезд	250
4.3. Наибольшая масса инструментальной оправки, кг.	20
4.4. Время смены инструмента (от стружки до стружки), с.	8



Рис. 8. Консольно-фрезерные станки

В настоящее время в тесном содружестве с университетами и академическими научными институтами расширяется продукция нашего предприятия.

Основная материальная база предприятия модернизируется, что позволило:

– от внедрения обрабатывающих центров для пятисторонней обработки портального типа и группы токарных обрабатывающих центров с ЧПУ: 1) повысить качество продукции; 2) свести в один технологический цикл механическую обработку – от стадии установки заготовки до получения готового изделия. Это обеспечивает современный подход Done-In-One, что, в свою очередь, в разы сократит производственный цикл изготовления деталей;

– от внедрения группы шлифовальных станков с ЧПУ повысилось качество продукции, в связи с наличием современных систем с ЧПУ. Это позволило автоматизировать процесс шлифования и применить многостаночное обслуживание.

УДК 341.018

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ГОМЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ НА ПЕРИОД ДО 2040 ГОДА

М. Н. Акунец

*Гомельский областной исполнительный комитет,
Республика Беларусь*

Приведены показатели валового регионального продукта, промышленной продукции, продукции сельского хозяйства и товарооборота, основные приоритеты развития.

Ключевые слова: Гомельская область, экономические показатели, приоритеты развития.

KEY DIRECTIONS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE GOMEL REGION TO 2040

M. N. Akunets

Gomel Regional Executive Committee, the Republic of Belarus

The indicators of the gross regional product, industrial output, agricultural output, and trade turnover, as well as the main development priorities, are presented.

Keywords: Gomel Region, economic indicators, development priorities.



Рис. 1. Экономика региона:

a – валовой региональный продукт; *б* – продукция промышленности;
в – продукция сельского хозяйства; *г* – розничный товарооборот;
д – оптовый товарооборот; *е* – инвестиции в основной капитал

Основные результаты к 2040 г.: рост валового регионального продукта в 1,9 раза, расширение экспорта с диверсификацией (страновой и товарной) в 2 раза, рост инвестиций в экономике на 25 %.

К основным приоритетам можно отнести:

- Приоритет 1. Развитие производственного потенциала региона, его технологическое обновление, создание новых производств, обеспечение трудовыми ресурсами:

- дальнейшее развитие ведущих отраслей промышленности;
- повышение эффективности сельскохозяйственного производства и развитие агропромышленной интеграции;
- развитие внешнеэкономической деятельности, углубление промышленной кооперации;
- внедрение современных цифровых технологий;

- Приоритет 2. Формирование благоприятного инвестиционного климата для роста предпринимательской и инновационной активности:

- развитие предпринимательской инициативы;
- ускорение и повышение эффективности научно-инновационного потенциала;
- усиление инвестиционной привлекательности.

- Приоритет 3. Сохранение и умножение человеческого капитала:

- модернизация системы здравоохранения, популяризация здорового образа жизни населения;
- совершенствование образовательной системы;
- рост уровня благосостояния населения, социальной защищенности;

- укрепление традиционных семейных ценностей, культурной идентичности;
 - повышение комфортности среды проживания.
 - Приоритет 4: Повышение экологической устойчивости региона в соответствии с принципами «зеленой» и циркулярной экономики:
 - рациональное производство;
 - развитие сферы сбора и переработки отходов;
 - внедрение технологий устойчивого сельского хозяйства;
 - развитие городов и поселков на основе принципов «зеленого» градостроительства.
 - Приоритет 5: Повышение устойчивости развития территорий, пострадавших в результате катастрофы на чернобыльской АЭС:
 - развитие демографического и трудового потенциала;
 - развитие экономического потенциала;
 - точечная модернизация объектов социальной сферы;
 - повышение эффективности хозяйственного комплекса.
- «Видение будущего» устойчивого развития Гомельской области:
- конкурентоспособный хозяйственный комплекс;
 - комфорт для жизни и ведения бизнеса;
 - высокий уровень доходов;
 - концентрация транспортно-логистических и туристических потоков;
 - повсеместная цифровизация.

УДК 341.018

КАЧЕСТВО – ГАРАНТИЯ ДОВЕРИЯ НА МИРОВОМ РЫНКЕ

Е. Перетягина

*Центр поддержки качества экспортной продукции,
г. Минск, Республика Беларусь*

Приведены глобальные, внешние и внутренние вызовы, а также способы достижения целей.

Ключевые слова: качество, вызовы глобальные, внешние, внутренние, способы достижения целей.

QUALITY – A GUARANTEE OF TRUST IN THE GLOBAL MARKET

E. Peretyagina

Export Product Quality Support Center, Minsk, Republic of Belarus

The article presents global, external, and internal challenges, as well as ways to achieve goals.

Keywords: quality, global, external, and internal challenges, ways to achieve goals.

Глобальные вызовы:

1. Ужесточается глобальная конкуренция: качество становится главным преимуществом.
2. Растут технические барьеры при выходе на внешние рынки.
3. Уровень защиты внутреннего рынка от несоответствующей продукции должен соответствовать требованиям времени.

Внешние вызовы:

1. Поставка большой доли импортной продукции по заниженным ценам, в ущерб качеству и безопасности.
2. Отсутствие в ряде стран-участниц ЕАЭС эффективных механизмов контроля за выдачей разрешительных документов.
3. Низкая эффективность защиты общего рынка от несоответствующей импортной продукции.
4. Сложность выработки единых подходов по снятию технических барьеров стран ЕАЭС.

Внутренние вызовы:

1. Сложность поддержания оптимального соотношения «цена – качество» в новых экономических условиях.
2. Многие руководители рассматривают качество, как затраты, а не как инвестиции в конкурентное преимущество.
3. Самоустранение руководителей от вопросов управления качеством.
4. Низкая результативность внедренных систем менеджмента качества.
5. Нехватка квалифицированных кадров и ученых в области качества и смежных областях.

Способы достижения целей:

1. Создание профильных экспертных групп.
2. Организация регулярных круглых столов и семинаров.
3. Подготовка конкретных предложений по защите рынка от несоответствующей продукции.
4. Подготовка конкретных мероприятий по снижению технических барьеров для экспортной продукции.
5. Аналитическая и образовательная деятельность.
6. Организация системного взаимодействия с национальными и международными организациями в области качества.

Центр поддержки качества продукции может оказать следующие услуги:

1. Практическая работа по расширению экспортных возможностей наших производителей, в том числе через качество.
2. Выработка предложений по гармонизации национальных и евразийских требований к продукции и процедур допуска на рынках экспорта.
3. Организация взаимодействия компетентных организаций по взаимному признанию результатов испытаний и разрешительных документов.
4. Проработка совместно с компетентными органами вопросов признания документов санитарного, ветеринарно-санитарного и фитосанитарного контроля.
5. Подготовка предложений по гармонизации законодательства ЕАЭС в области технического регулирования и СФС-мер с основными торгово-экономическими партнерами.

УДК 621:658:512

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СТАНОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

М. Л. Хейфец, Н. Л. Грецкий

Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск

Проведен комплексный анализ проектирования обрабатывающего оборудования.

Ключевые слова: станочные комплексы, информационные технологии, гибридное производство.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF MACHINE-TOOL COMPLEXES TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

M. L. Kheifets, N. L. Gretskey

Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

A comprehensive analysis of the design of machining equipment was conducted.

Keywords: machine-tool complexes, information technology, hybrid manufacturing.

Совокупность средств производства или производящих машин, включающих технологические, транспортные, энергетические и информационные машины, получила название технологических комплексов. Такие станочные комплексы автономно функционируют и с использованием программного управления, в установленных пределах значений, обеспечивают требуемые характеристики качества изделий [1–4]. Комплексы технологического станочного оборудования прошли в своем развитии ряд этапов. По сравнению с универсальным станочным оборудованием современное компьютерно-управляемое производство, использующее компоненты искусственного интеллекта, позволяет повысить эффективность оборудования в десятки раз при обеспечении все более возрастающих требований к качеству продукции [4].

Началом первого этапа развития технологических комплексов можно обозначить автоматизацию 1970-х гг. на основе числового программного управления. В постиндустриальных странах уже с середины 1980-х гг. наметился переход от обрабатывающих центров к гибким производственным системам с элементами интеллектуального производства [1]. Развитие средств микроэлектроники явилось базой для создания мехатронных систем, которые включают как электромеханическую, так и электронно-управляющую части. Мехатронные системы обеспечивают синергетическое объединение узлов точной механики с электротехническими, электронными и компьютерными компонентами с целью проектирования и производства качественно новых комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциями. Новые этапы развития гибкой автоматизации производственных систем связаны прежде всего с предельной концентрацией средств производства и управления, а также с сокращением сроков конструирования, проектирования, технологической подготовки и изготовления изделий. В результате мехатронные технологические комплексы объединяются в гибридное компактное интеллектуальное производство (CIM – Compact Intelligent Manufacture), базирующееся на сочетании различных интенсивных, в том числе и аддитивных технологий, прогрессивного технологического оборудования и интегрированной системы управления.

Современный уровень развития информационных технологий в промышленности обеспечил переход к использованию технологий создания, поддержки и применения единого информационного пространства во времени на всех этапах жизненного цикла продукции: от ее проектирования до эксплуатации и утилизации, т. е. к CALS-технологиям (Continuous Acquisition and Life-cycle Support). Единое информационное пространство позволяет интегрироваться разрозненным комплексам компактного производства в виртуальное предприятие, создаваемое из различных пространственно удаленных подразделений, которые обладают единой информационной ERP-системой (Enterprise Resource Planning) для использования в компьютерной поддержке этапов жизненного цикла продукции. После пространственно-временной интеграции производственных процессов и жизненного цикла изделий следуют этапы, обеспечивающие компактность производства на основе технологий аддитивного производства (AM – Additive Manufacturing). Аддитивные технологии синтеза композиционного материала и формообразования изделия обеспечивают высокую эффективность за счет сокращения длительности и количества производственно-технологических этапов жизненного цикла изделий. Анализ производства и адресной поставки кастомизированных изделий, с учетом внешней и внутренней логистики предприятий, можно дополнить прогнозом на ближайшее будущее, которое обусловлено новой парадигмой производства, связанной с промышленным интернетом вещей (IIoT – Industrial Internet of Things) и называемой «Индустрия 4.0». В основе зарождающихся этапов новой эпохи лежит массовая компьютеризация и глобализация интернета. Дальнейшее развитие производства прогнозируют на базе машинного обучения (ML – Machine Learning) и искусственного интеллекта (AI – Artificial Intelligence). Сочетание робототехники и 3D-печати на основе машинного обучения с интернетом вещей в глобальной сети и искусственным интеллектом уже сегодня позволяют создавать полностью автоматизированные производства.

Рассматривая комплекс технологического станочного оборудования с позиций компьютеризации производственной деятельности, его модули, узлы и детали следует проектировать как устройства компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ. Анализ процессов производства деталей без использования формообразующей оснастки (3D-печать), в зависимости от агрегатного состояния исходного материала, размерности потоков формообразующей среды и последовательности технологических операций [1, 4], позволяет в виде диаграммы структурных связей описывать совокупность методов прямого «выращивания» изделий. Диаграмма структурных связей представляет собой направленный замкнутый граф и описывает автомат с конечным числом состояний. Вершины графа изображают процессы создания изделий без формообразующей оснастки и представляют логические операции: трансляцию информации; движение потоков вещества и энергии; запуск и остановку автоматического цикла. Описание алгоритмами в соответствии с терминами логических операций процессов 3D-печати дает возможность по диаграмме структурных связей анализировать существующие и разрабатывать новые методы прямого «выращивания» изделий [1, 4]. Проведенный анализ методов прямого «выращивания» деталей машин показал особую перспективность разработки процессов послойного синтеза с управляемым формированием свойств материала потоками энергии. Организация обратных связей при управлении технологическим оборудованием через степени свободы инструментов, частиц наносимого материала и удаляемого слоя, посредством дополнительных воздействий потоками энергии, позволяет управлять устойчивостью процессов формирования поверхностного слоя. Поэтому с учетом контуров связей в технологической системе следует выбирать

системы числового программного управления и проектировать комплекс технологического оборудования как мехатронную систему [1–4].

Комплексный анализ проектирования обрабатывающего оборудования показал, что перспективы применения новых технологий, использующих искусственный интеллект, потоки энергии для интенсификации процессов обработки и модифицирования материалов, должны анализироваться на ранних стадиях проектирования. В этой связи предложено приступить к проектированию мехатронных систем станочных комплексов с анализа структурных связей информационных технологий в гибридном производстве, включающем как традиционные, так и аддитивные технологии, и использовать теплофизические и электрофизические критерии для изучения формирующихся связей в технологической системе.

Л и т е р а т у р а

1. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий, П. А. Витязь, М. Л. Хейфец [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 239 с.
2. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А. М. Русецкий, П. А. Витязь, М. Л. Хейфец [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого, П. А. Витязя, М. Л. Хейфеца. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 316 с.
3. Автоматизация и управление в технологических комплексах / А. М. Русецкий, П. А. Витязь, М. Л. Хейфец [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого, П. А. Витязя, М. Л. Хейфеца. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 375 с.
4. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / С. А. Чижик, П. А. Витязь, М. Л. Хейфец [и др.] ; под общ. ред. М. Л. Хейфеца. – Минск : Беларус. навука, 2019. – 248 с.

УДК 621.791:621.785

ОСВОЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ФТИ НАН БЕЛАРУСИ В ОАО «СтанкоГомель»

В. Г. Залесский, И. Л. Поболь, И. Ф. Чернейко

Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск

Приведен анализ освоения инновационных технологий ФТИ НАН Беларуси в ОАО «СтанкоГомель».

Ключевые слова: инновационные технологии, электронно-лучевая сварка, магнитное воздействие, азотирование, повышение износостойкости.

DEVELOPMENT OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES AT THE PHYSICAL TECHNOLOGY INSTITUTE OF THE NAS OF BELARUS AT JSC “STANKOGOMEL”

V. G. Zalessky, I. L. Pobol, I. F. Cherneyko

*Physicotechnical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk*

An analysis of the development of innovative technologies at the Physical Technological Institute of the NAS of Belarus at JSC “StankoGomel” is conducted.

Keywords: innovative technologies, electron beam welding, magnetic treatment, nitriding, increased wear resistance.

Среди направлений научно-инновационной деятельности ФТИ НАН Беларуси особое место занимают исследования и разработки с использованием высокоэнерге-

тических методов воздействия на металлические материалы с целью улучшения свойств изделий. Для таких методов обработки используется электронно-ионно-плазменное воздействие, нагрев электромагнитными источниками (ТВЧ, лазерным излучением), нанесение упрочняющих покрытий, импульсное магнитное воздействие. По ряду методов обработки достигнуты впечатляющие результаты совместного освоения с промышленными предприятиями страны. История взаимовыгодного сотрудничества института и ОАО «СтанкоГомель» насчитывает десятилетия.

Одно из направлений совместных работ – применение электронно-лучевой сварки (ЭЛС) для изготовления деталей. В соответствии с кооперационным соглашением с компанией HECKERT Chemnitzer Werkzeugmaschinen GmbH (Германия) предприятием (тогда ГСПО им. С. М. Кирова) в 1993 г. была начата подготовка производства широкой гаммы универсальных консольно-фрезерных станков моделей FW, FU, FSS. В соответствии с КД для обеспечения высокого качества станков предусматривалось использование ЭЛС при изготовлении шестерен для такого оборудования. В рамках сотрудничества в ФТИ НАН Беларуси были оптимизированы режимы и в течение нескольких лет выполнялась ЭЛС шестерен FW 400.42.00.010, FU 400.20.55.010 и FU 315.40.00.045, блока шестерен FU 400.11.00.010, втулки соединительной FU 400.20.55.010, муфты кулачковой FU 315.20.00.055.

Электронно-лучевая сварка обладает рядом неоспоримых преимуществ перед другими методами получения неразъемных соединений, прежде всего при сварке деталей ответственного назначения. Возможно сформировать сварные швы глубиной от 1 до 200 мм и более за один проход с «кинжальным» проплавлением (рис. 1, а), а также швы с соотношением ширины к глубине (1–2):1, в том числе из разнородных металлов и сплавов (рис. 1, б).



а)



б)

Рис. 1. Сварные швы, полученные при ЭЛС сталей:
а – 25ХГТ и 40Х толщиной 32 мм; б – 20ХН3А и 25ХГТ, х 200

В настоящее время институт выполняет заказы по ЭЛС для основных машиностроительных предприятий страны, полностью обеспечивая их потребности.

В течение многих лет для ОАО «СтанкоГомель» востребованным процессом поверхностного упрочнения являлось ионное азотирование ряда деталей (шестерня, захват, рейка, вал, скоба, валок зубчатый, вал шлицевый, направляющая), изготавливаемых из сталей 40Х, 18ХГТ, 12ХН3А, 40Х13, 38Х2МЮА. Услуги по их обработке выполнялись в ФТИ НАН Беларуси. Решение по оснащению предприятия собствен-

ным оборудованием вакуумного ионного азотирования было реализовано институтом в 2025 г. (рис. 2).



Рис. 2. Установка ионного азотирования производства ФТИ НАН Беларуси

Диаметр полезного рабочего пространства камеры – 900 мм, высота – 2000 мм. Максимальная масса обрабатываемых деталей – до 1500 кг. Управление работой установки и контроль за ходом процесса обработки осуществляются автоматически по заданной программе посредством программируемого логического контроллера. Функции, выполняемые системой управления: программирование и управление параметрами технологических процессов, регулирование состава технологической атмосферы, расчет технологических режимов обработки, управление исполнительными механизмами, создание и архивирование технологических режимов обработки, диагностика технического состояния всех узлов установки с выводом на панель оператора информации.

В комплект поставленного комплекса ионного азотирования вошла линия обезжиривания, обеспечивающая подготовку поверхности деталей к ионной ХТО.

Для ОАО «СтанкоГомель» отработаны режимы упрочнения перечисленных сталей. Процесс азотирования проводится при температуре 450–570 °С. После обработки достигается глубина азотированного слоя 0,15–0,5 мм, твердость материала поверхности HV₁₀ 600–1200.

Такая обработка способствует значительному повышению износостойкости, сопротивления задиру и усталости изделий. Варьируя состав газа, давление, температуру и время выдержки, можно получать слои заданной структуры и фазового состава на изделиях из сталей, чугунов, сплавов титана. Ионное азотирование деталей позволяет повысить стабильность результатов упрочнения и в 3–4 раза сократить производственные затраты и длительность изготовления изделий.

Кроме ОАО «СтанкоГомель» кастомизированное оборудование ионной ХТО производства ФТИ успешно используется в ОАО «МЗКТ», ОАО «Гомсельмаш», ОАО «БЕЛАЗ», ОАО «МАЗ», ОАО «Могилевлифтмаш», УЧНПП «Технолит», ЗАО «СИПР», ОАО «ОИЗ» и за рубежом.

УДК 621.9.02-192

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ – ОСНОВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

М. И. Михайлов

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Приведена методика оптимизации робототехнической системы с различными видами резервирования.

Ключевые слова: робототехнические системы, эффективность, техническое резервирование.

TECHNICAL REDUNDANCY – THE BASIS FOR ENSURING THE EFFICIENCY OF ROBOTIC SYSTEMS

M. I. Mikhailov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

A methodology for optimizing a robotic system with various types of redundancy is presented.

Keywords: robotic systems, efficiency, technical redundancy.

Анализ исследований, выполненных в ФРГ, США, Швейцарии и других странах, позволил заключить, что эффективное время обработки на традиционных металлорежущих станках и станках с ЧПУ в случае участия человека (оператора) составляет только 6–10 % годового фонда рабочего времени [1–13]. Известно также, что в структуре времени обработки деталей на основе традиционных технологий доля основного времени составляет только около 30 %, а оставшаяся часть приходится на вспомогательное и подготовительно-заключительное время [1, 2] и др.

Кроме того, эффективность работы автоматизированного производства зависит от организации технологического процесса, т. е. от формирования и реализации потоков деталей и инструментов, а также от степени согласованности их взаимодействия. В свою очередь эти потоки формируются в зависимости от степени интеграции оборудования и их можно разделить на участки станков с ЧПУ, гибкие производственные модули (ГПМ), робототехнические системы (РТС) и гибкие производственные системы (ГПС) [10–13].

Для современных робототехнических систем надежность является необходимым условием их использования. Это качество тем важнее, чем сложнее и дороже система.

Современные тенденции обеспечения высокой надежности РТС следующие:

- использование высоконадежных структур РТС;
- использование надежных комплектных систем ЧПУ и приводов;
- применение подсистемы автоматической диагностики функционирования узлов, элементов, а также РТС в целом;
- использование высоконадежных механических элементов РТС;
- блочно-модульное построение узлов, элементов и систем.

Цель работы – повышение надежности робототехнических систем.

Надежность работы РТС исследовалась поэтапно. На каждом этапе обеспечивалось повышение надежности техническими методами.

Используя результаты эксплуатационной надежности отдельных компонентов технологического оборудования и его оснащения, определили наименее надежные составляющие системы РТС. Результаты анализа влияния работоспособности каждого элемента (среднее время безотказной работы i -го элемента T_i ; r_i – риск отказа i -го элемента в рассматриваемый момент времени t) представлены в таблице.

Исходные данные

Номер элемента	Компоненты технологической системы	r_i у. е.	t , мин
1	Накопитель инструмента на станке	200	15
2	Датчики накопителя	20	
3	Инструментальные блоки	20	
4	Схват робота-манипулятора	400	

Так как отказ любого из выделенных компонентов приводил к отказу всей системы, то риск отказа РТС определялся по следующей зависимости:

$$R_c = r_1 \int_0^t Q_1'(t) P_2(t) P_3(t) P_4(t) dt + r_2 \int_0^t Q_2'(t) P_1(t) P_3(t) P_4(t) dt + \\ + r_3 \int_0^t Q_3'(t) P_1(t) P_2(t) P_4(t) dt + r_4 \int_0^t Q_4'(t) P_1(t) P_2(t) P_3(t) dt,$$

где Q_i , P_i – соответственно вероятность отказа и безотказности i -го элемента РТС.

На первом этапе оптимизации исследовали функции вероятности безотказности и риска РТС при общем постоянном резервировании.

Вероятность безотказности всей системы определялась по уравнению [2]:

$$P_{ci} = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^m P_i \right)^{n+1},$$

где n , m – количество резервных подсистем.

Графики вероятности безотказности и риска отказа в относительных единицах времени представлены на рис. 1.

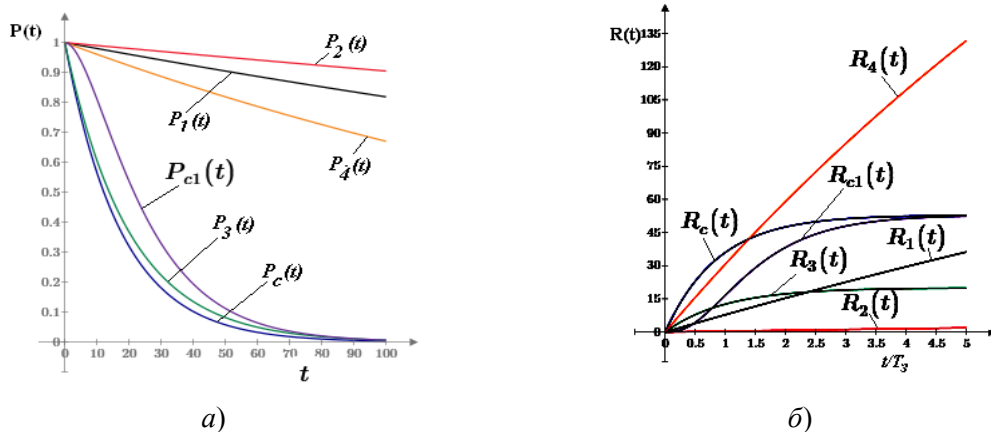


Рис. 1. Графики вероятности безотказности (а) и риска отказа (б)

Анализ результатов, представленных на рис. 1, позволяет заключить, что резервирование быстроизнашивающихся элементов приводит к росту вероятности безотказности РТС при $t = T_3$ – до 0,42, а риск отказа составил $R_c = 37$ у. е. Если время работы составит $2T_3$, то риск составит 47 у. е., а вероятность безотказности составит 0,18.

На втором этапе оптимизации исследовали функции вероятности безотказности и риска РТС при поэлементном постоянном резервировании низконадежных составляющих.

Вероятность безотказности подсистем и всей системы РТК определялась по уравнению

$$P_{pci} = 1 - (1 - P_i)^{n+1}; P_c = \prod_{i=1}^m P_{pci},$$

где n, m – количество резервных элементов.

Тогда вероятность отказа подсистемы и всей системы определялась:

$$Q_{pci} = 1 - P_{pci}; Q_c = 1 - P_c.$$

В результате риск всей системы рассчитывался по уравнению

$$R_c = r_1 \int_0^t Q'_{pc1}(t) P_{pc2}(t) P_{pc3}(t) P_{pc4}(t) dt + r_2 \int_0^t Q'_{pc2}(t) P_{pc2}(t) P_{pc3}(t) P_{pc4}(t) + \\ + r_3 \int_0^t Q'_{pc3}(t) P_{pc1}(t) P_{pc2}(t) P_{pc4}(t) dt + r_4 \int_0^t Q'_{pc4}(t) P_{pc1}(t) P_{pc2}(t) P_{pc3}(t) dt.$$

Результаты расчетов и графики вероятности безотказности и риска отказа в относительных единицах времени представлены на рис. 2.

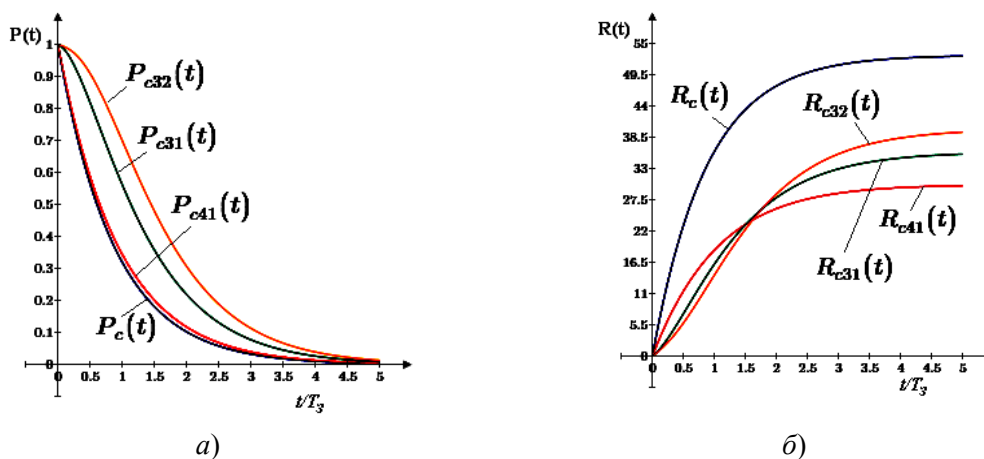


Рис. 2. Графики поэлементного резервирования:
а – вероятности безотказности; б – риска отказа

На рис. 2 приведен график вероятности безотказности исходной структурной схеме без резервирования ($P_c(t)$); $P_{c41}(t)$ – с одним резервным схватом робота; $P_{c31}(t)$, $P_{c41}(t)$ – с одним резервным схватом робота и одним резервным инструментом; $P_{c32}(t)$, $P_{c32}(t)$ – с одним резервным схватом робота и двумя резервными инструментами.

Анализ результатов, представленных на рис. 2, позволяет заключить, что принятый вид резервирования элементов обеспечит вероятность безотказности РТС при $t = T_3$ – до 0,32, а риск отказа составит $R_c = 35$ у. е. Если время работы составит $2T_3$, то риск составит 46 у. е., а вероятность безотказности составит 0,1.

На третьем этапе оптимизации исследовали функции вероятности безотказности и риска РТС при общем резервировании замещением.

Вероятности безотказности всей системы определялось по уравнению

$$P_{ci}(t) = e^{-\lambda_{ci} \sum_{k=0}^m \frac{\lambda_c^k t^k}{k!}},$$

где m – количество резервных подсистем.

Риск отказа подсистемы определялся по уравнению

$$P_{nci}(t) = \sum r_i \lambda_i \frac{1 - e^{-\lambda_c t}}{\lambda_c}.$$

Риск отказа всей системы рассчитывался по уравнению

$$R_{ci} = R_{nci} Q_{ci}.$$

Графики вероятности безотказности и риска отказа в относительных единицах времени представлены на рис. 3.

Анализ результатов, представленных на рис. 3, позволяет заключить, что принятый вид резервирования элементов обеспечит вероятность безотказности РТС при $t = T_3$ – до 0,32, а риск отказа составит $R_c = 37$ у. е. Если время работы составит $2T_3$, то риск составит 47 у. е., а вероятность безотказности составит 0,1.

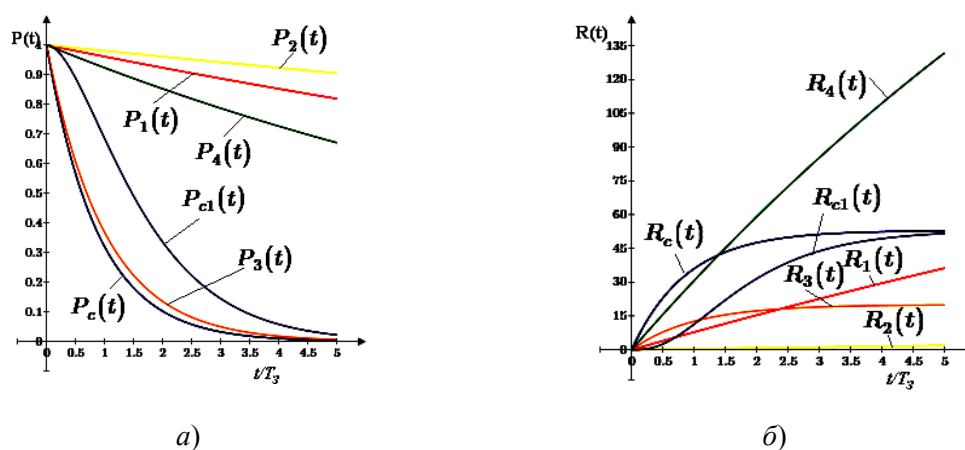


Рис. 3. Графики общего резервирования замещением:
а – вероятности безотказности; б – риска отказа

На четвертом этапе оптимизации исследовали функции вероятности безотказности и риска РТС при поэлементном резервировании замещением.

Резервирование выполнялось для наименее надежных элементов в системе.

Вероятность безотказности подсистемы и всей системы определялось по уравнению

$$P_{pci} = e^{-\lambda_i t \sum_{k=0}^n \frac{\lambda_i^k t^k}{k!}}; P_c = \prod_{i=1}^m P_{pci},$$

где m – количество резервных элементов.

В результате риск всей системы рассчитывался по уравнению

$$R_{ci} = r_1 \int_0^t Q'_{nc1}(t) P_{nc2}(t) P_{nc3}(t) P_{nc4}(t) dt + r_2 \int_0^t Q'_{nc2}(t) P_{nc1}(t) P_{nc3}(t) P_{nc4}(t) dt + \\ + r_3 \int_0^t Q'_{nc3}(t) P_{nc1}(t) P_{nc2}(t) P_{nc4}(t) dt + r_4 \int_0^t Q'_{nc4}(t) P_{nc1}(t) P_{nc2}(t) P_{nc3}(t) dt.$$

Графики вероятности безотказности и риска отказа в относительных единицах времени представлены на рис. 4.

Анализ результатов, представленных на рис. 4, позволяет заключить, что принятый вид резервирования элементов обеспечит вероятность безотказности РТК при $t = T_3$ – до 0,32, а риск отказа составит $R_c = 35$ у. е. Если время работы составит $2T_3$, то риск составит 46,5 у. е., а вероятность безотказности составит 0,1.

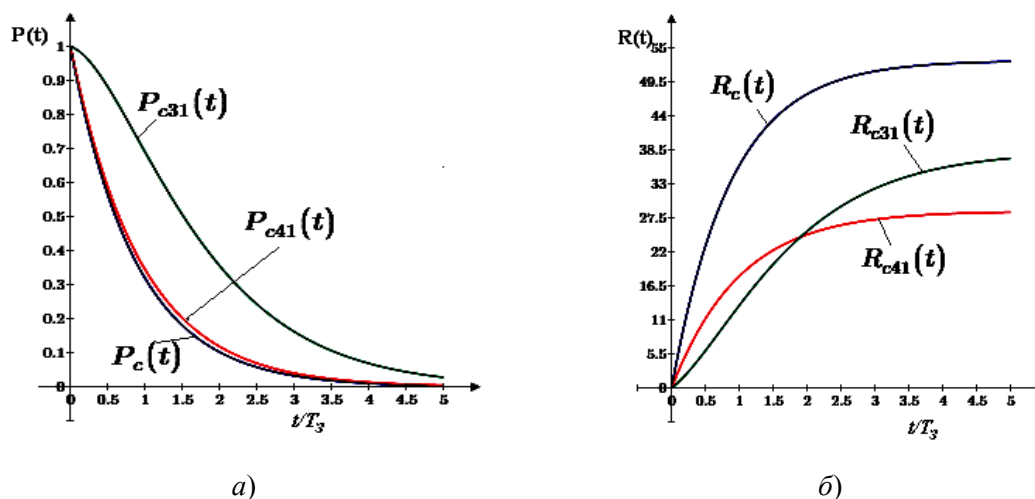


Рис. 4. Графики общего резервирования замещением:
а – вероятности безотказности; б – риска отказа

Полученные результаты позволяют заключить, что наименьший риск отказа РТС при общем резервировании замещением, а наименьшее количество резервных элементов в системе содержит поэлементное резервирование замещением, при котором необходим один резервный схват робота и два резервных инструмента. В обоих случаях риск отказа не превышает допустимый. Однако во втором случае оптимизация системы будет наиболее эффективна и экономически выгодна, так как резервируется наименьшее количество элементов.

Литература

1. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий, П. А. Витязь, М. Л. Хейфец [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 239 с.
2. Автоматизация и управление в технологических комплексах / А. М. Русецкий, П. А. Витязь, М. Л. Хейфец [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 375 с.

3. Михайлов, М. И. Надежность и диагностика технологических систем / М. И. Михайлов. – Минск : РИВШ, 2022. – 360 с.
4. Основы автоматизации машиностроительного производства / Е. Р. Ковальчук, М. Г. Косов, В. Г. Митрофанов [и др.] ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – М. : Высш. шк., 1999. – 312 с.
5. Технологические основы гибких производственных систем / В. А. Медведев, В. П. Вороненко, В. Н. Брюханов [и др.] ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – М. : Высш. шк., 2000. – 255 с.
6. Каштальян, И. А. Повышение эффективности использования станков с ЧПУ в условиях нестационарного резания / И. А. Каштальян. – Минск : БНТУ, 2008. – 311 с.
7. Иванов, А. А. Модернизация промышленных предприятий на базе современных систем автоматизации и управления / А. А. Иванов. – М. : Форум: ИНФРА-М, 2015. – 384 с.
8. Козырев, Ю. Г. Применение промышленных роботов / Ю. Г. Козырев. – М. : КНОРУС, 2021. – 488 с.
9. Булгаков, А. Г. Промышленные роботы: Кинематика, динамика, контроль и управление / А. Г. Булгаков, В. А. Воробьев. – М. : СОЛОН-Пресс, 2018. – 484 с.
10. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.
11. Надежность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. – М. : Машиностроение, 1987. Т. 2 : Математические методы в теории надежности и эффективности / под ред. Б.В. Гнеденко.
12. Михайлов, М. И. Повышение надежности сборного режущего инструмента / М. И. Михайлов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 272 с.
13. Повышение ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности / П. А. Витязь, В. И. Жорник, М. А. Белоцерковский, М. А. Леванцевич ; под общ ред. П. А. Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 452 с.

СЕКЦИЯ I
АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ. МЕХАТРОНИКА.
ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ
СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

УДК 621.822.174:681.7.054.43

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДСТВАМИ САПР ДИНАМИЧЕСКОЙ
УСТОЙЧИВОСТИ ШПИНДЕЛЯ ВВЕДЕНИЕМ ТАРИРОВАННОЙ
НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ НА 3D-МОДЕЛИ ЕГО РОТОРА

В. Е. Брешев, Е. В. Синдеева, А. Ю. Николаев

*ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет
имени Владимира Даля», Российская Федерация*

Разработан метод исследования динамической устойчивости шпинделя в режиме проведения компьютерного имитационного моделирования вращения его ротора на упругих опорах и при действии заданных динамических нагрузок.

Ключевые слова: динамическая устойчивость, шпиндель, компьютерное моделирование, ротор, динамическая нагрузка.

A CAD-BASED METHOD FOR STUDYING SPINDLE DYNAMIC
STABILITY BY INTRODUCING CALIBRATED UNBALANCE
ON A 3D MODEL OF ITS ROTOR

V. E. Breshev, E. V. Sindeeva, A. Yu. Nikolaev

Vladimir Dahl Luhansk State University, the Federation Russian

A method has been developed to investigate the dynamic stability of a spindle by performing computer simulation modeling of its rotor rotation on elastic bearings under specified mechanical loads.

Keywords: dynamic stability, spindle, computer modeling, rotor, dynamic load.

Для обеспечения надежной работы шпинделей, выполняющих прецизионную механическую обработку различных материалов, особенно на высокоскоростных режимах, является принципиально важным исследование их динамической устойчивости. Динамическая система шпинделя и станка в целом испытывает при функционировании действие переменных сил и моментов, приводящих к возникновению колебательных процессов и вибраций. Для надежной работы технологического оборудования важно, чтобы возникающие колебания находились в области допустимых амплитуд, не оказывали влияния на качество механической обработки и тем более не приводили к возникновению явления резонанса [1–3].

Целью исследований является разработка метода исследования динамической устойчивости шпинделя в режиме проведения компьютерного имитационного моделирования вращения его ротора на упругих опорах и при действии заданных динамических нагрузок.

Метод позволяет на стадии проектирования протестировать трехмерную модель шпинделя на динамическую устойчивость в условиях различных скоростных режимов и динамических нагрузок. Полученные результаты динамического анализа можно использовать для определения или уточнения конструктивных параметров, технологических и эксплуатационных условий работы шпинделя, при которых будет обеспечена его динамическая устойчивость.

Для оценки динамической устойчивости необходимо в процессе исследований определить амплитуды поперечных (или других) колебаний ротора на различных режимах вращения и при действии возмущающих сил, моделируя разгон ротора и прохождение резонансных областей. Затем в каждом расчетном случае необходимо сопоставить рассчитанные амплитуды поперечных колебаний ротора со значениями допустимого радиального смещения опорных поверхностей подшипников или концевое участка ротора, где закрепляется инструмент.

Разработанный метод исследования средствами САПР динамической устойчивости шпинделя состоит в последовательном решении следующих задач:

- выполнении предварительного расчета характеристик подшипников – жесткости и несущей способности – в соответствии с требованиями технического задания и условиями эксплуатации шпинделя [2–4];
- разработке 3D-модели шпинделя на подшипниках заданного типа, точно соответствующей конструкции проектируемого шпинделя;
- разработке в САПР виртуальной динамической модели ротора шпинделя с установкой подшипников, имеющих требуемые (расчетные) характеристики [4];
- выполнении на основе динамической модели расчетов собственных частот колебаний ротора на заданных подшипниках в программах САПР, что позволит определить наиболее опасные резонансные области функционирования шпинделя, когда собственные частоты совпадают с частотами вынужденных колебаний (возникающих от действия внешних сил резания, сил дисбаланса вала и др.);
- введении тарированной неуравновешенности (дисбаланса) трехмерной модели ротора для моделирования внешних динамических нагрузок, зависящих от частоты вращения и вызывающих поперечные колебания ротора при вращении;
- выполнении средствами САПР виртуального разгона и вращения ротора при действии динамических нагрузок от введенной неуравновешенности с определением амплитуд поперечных колебаний ротора на различных режимах вращения, включая попадание в области резонансных частот вращения [1, 4];
- определении конструктивных, технологических и эксплуатационных условий, при которых сохраняется динамическая устойчивость ротора и работоспособность шпинделя.

Таким образом, для имитации переменной динамической нагрузки в 3D-модель ротора нами был введен искусственный тарированный дисбаланс. Он позволил задать заранее известные внешние возмущающие силы и изменять их в ходе исследований.

Применение данного метода при исследовании шпинделя для шлифования монокристаллов показало, что при частотах вращения до 10000 об/мин амплитуды колебаний, вызванные неуравновешенностью (дисбалансом) не превышают 0,06 мкм, что вполне приемлемо для выполнения шпинделем высокоточной механической обработки. Частота вращения ротора 10000 об/мин является закритической, потому что для ее достижения необходимо пройти критическую область резонанса, которая возникает при частоте вращения 5955,6 об/мин. Условия ее устойчивого прохождения также были исследованы предложенным методом и учтены при проектировании шпинделя [1].

Разработанный и апробированный метод исследования динамической устойчивости введением тарированной неуравновешенности позволяет на стадии проектирования – в режиме имитационного компьютерного моделирования – проверить динамическую устойчивость шпинделей и определить условия их надежной эксплуатации. Метод является универсальным и применим для различных роторных машин, в которых используются подшипниковые опоры различных типов.

Л и т е р а т у р а

1. Брешев, В. Е. Алгоритм исследования динамических процессов в технологическом оборудовании на газостатических подшипниках / В. Е. Брешев, Ю. С. Долженко // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 1 (37). – С. 6–14.
2. Сипенков, И. Е. Прецизионные газовые подшипники / И. Е. Сипенков [и др.]. – СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ Электроприбор, 2007. – 504 с.
3. Brian Rowe, W. Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design / W. Brian Rowe. – Oxford, 2012. – 334 с.
4. Брешев, В. Е. Развитие теории и методов проектирования приводов бесконтактного типа с комбинированным и пассивным обеспечением устойчивости : монография / В. Е. Брешев. – Луганск : Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2016. – 208 с.

УДК 621.9

ПЛАНЕТАРНОЕ ТОЧЕНИЕ НЕКРУГЛЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В. А. Данилов

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Рассмотрена кинематическая структура станка с функцией планетарного точения и его структурная схема для точения круглых и некруглых поверхностей.

Ключевые слова: некруглые поверхности, схема обработки, планетарное точение, комплексная обработка, точение.

PLANETARY TURNING OF NON-CIRCULAR SURFACES

V. A. Danilov

Belarusian National Technical University, Minsk

This article examines the kinematic structure of a planetary turning machine and its structural diagram for turning round and non-circular surfaces.

Keywords: non-circular surfaces, machining diagram, planetary turning, complex machining, turning.

Профилирование некруглой цилиндрической поверхности резанием возможно двумя согласованными вращательными движениями, образующими формообразующее движение Φ_v , (B_1B_2) . В зависимости от распределения движений B_1 и B_2 между режущим инструментом и заготовкой возможны следующие схемы обработки: одно движение сообщается инструменту, другое – заготовке (полигональное точение); оба движения сообщаются инструменту, совершающему планетарное движение вокруг неподвижной заготовки; оба движения сообщаются заготовке (планетарное точение). Технологическим преимуществом схемы планетарного точения является возмож-

ность обрабатывать на одном станке наружные и внутренние поверхности, т. е. охватываемую и охватывающую детали профильного соединения.

Указанные схемы обработки реализуются на соответствующих станках: первая схема – на специализированных станках для полигонального точения, на токарных станках с ЧПУ с функцией полигонального точения, широкоуниверсальных зубо-шлицефрезерных станках, например, на станке модели ВС50; вторая – на модернизированных универсальных токарных и специальных станках, третья – на станке с планетарным движением шпинделя (патент США № 3593603 и др.).

Кинематическая структура станка с функцией планетарного точения (авторское свидетельство СССР № 1172544 основана на схеме обработки (рис. 1), согласно которой для формирования некруглой цилиндрической поверхности заготовке 1 сообщают одновременно вращение B_1 с частотой n_1 вокруг ее геометрической оси L_1 и вращение B_2 с частотой n_2 вокруг параллельной оси L_2 , а резцу – прямолинейное движение подачи $П_3$.

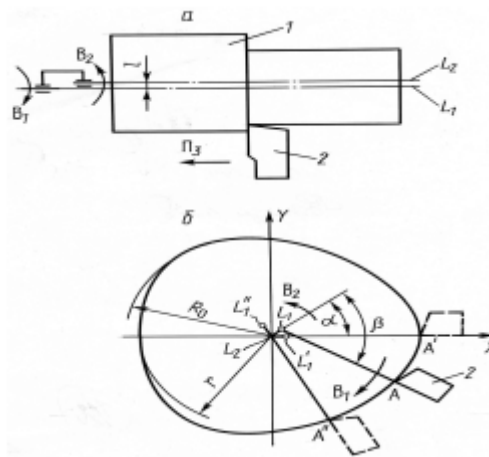


Рис. 1. Схема планетарного точения некруглой цилиндрической поверхности

Если отношение $n_2/n_1 = m$, то формируется m расположенных равномерно по окружности выступов, форма которых зависит от значения n_2/n_1 и расстояния l между осями L_1 и L_2 .

Скорость резания при планетарном точении зависит от параметров схемы обработки и соотношения направлений движений B_1 и B_2 в соответствии с формулой

$$v = 2\pi(r + l)n_2 \pm 2\pi rn_1, \quad (1)$$

где r – радиус окружности, вписанной в формируемый профиль, знак «плюс» соответствует одинаково, а «минус» – противоположно направленным движениям B_1 и B_2 .

Производительность формообразования при планетарном точении пропорциональна частоте вращения заготовки, которая при заданной скорости резания v , согласно (1), составляет:

$$n_1 = \frac{0,5v}{\left(\pi r \left(\left(1 + \frac{l}{r} m \right) \pm 1 \right) \right)}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что производительность больше при противоположно направленных вращательных движениях B_1 и B_2 .

Структурная схема станка (рис. 2) содержит кинематическую группу движения профилирования со скоростью резания $\Phi_v (B_1 B_2)$ и группу движения подачи $\Phi_s (П_3)$, необходимые для обработки некруглых цилиндрических поверхностей методом планетарного точения.

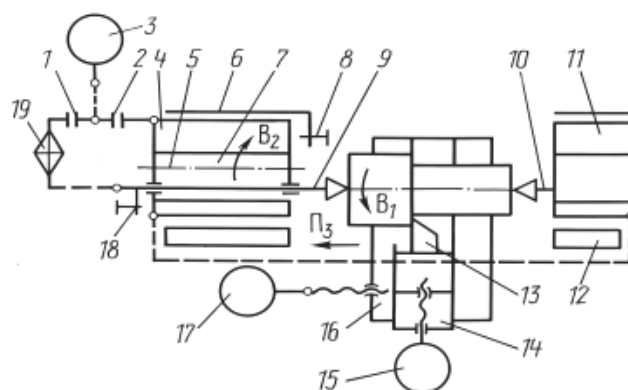


Рис. 2. Структурная схема станка для точения круглых и некруглых поверхностей

В корпусе 6 с возможностью вращения вокруг оси 5 смонтирована обойма 4 со шпинделем 9, который расположен эксцентрично относительно оси 5. Шпиндель установлен эксцентрично во втулке 7, которая имеет возможность поворота в обойме вокруг оси, параллельной оси 5 для настройки эксцентриситета l с целью управления геометрией формируемого профиля. Привод 3 обеспечивает вращательные движения B_1 и B_2 соответственно шпинделя и обоймы. Для этого шпиндель соединен с обоймой кинематической цепью, содержащий орган настройки 19 для задания требуемого отношения n_2/n_1 , а также муфты 1 и 2 для включения (отключения) вращения соответственно шпинделя и обоймы. Согласование вращательных движений обоймы и шпинделя в станке с ЧПУ может обеспечиваться также мехатронной системой (авторское свидетельство СССР № 1404269). Продольный 16 и поперечный 14 суппорты снабжены приводами 17 и 15. Для закрепления длинных изделий служит задняя бабка 12, вращающаяся втулка 11 которой кинематически связана с обоймой и имеет механизм регулирования эксцентриситета. Для формообразования поверхности изделия по длине суппорт 16 получает продольное движение подачи от привода 17. Обработка производится резцом 13 или инструментом для поверхностного пластического деформирования.

Обойма может быть зафиксирована механизмом 8 относительно корпуса 6 при обработке круглых поверхностей, а шпиндель – механизмом 18 относительно обоймы при обработке эксцентриков. При обработке некруглых поверхностей от привода 3 получают взаимосвязанные вращательные движения B_2 и B_1 соответственно обоймы и шпиндель. При этом муфты 1 и 2 включены, а механизмы 8 и 18 не препятствуют вращению обоймы и шпинделя. В результате шпиндель с заготовкой получают планетарное движение, благодаря которому на ней формируется некруглый профиль. Его форма определяется передаточным отношением органа настройки 19 и значением эксцентриситета l .

Таким образом, станок для планетарного точения обеспечивает комплексную обработку деталей с круглыми и некруглыми поверхностями.

УДК 621.9

СОВМЕЩЕНИЕ КРУГОВОГО И ПОЛИГОНАЛЬНОГО ТОЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

В. А. Данилов, А. А. Данилов

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Рассмотрена реализация технологии комплексной обработки разнопрофильных поверхностей в рамках одной операции путем разработки соответствующих схем формообразования, анализом технологических возможностей имеющегося или созданием соответствующего станочного оборудования.

Ключевые слова: разнопрофильные поверхности, комплексная обработка, схема формообразования, механизм профилирования, точение.

COMBINING CIRCULAR AND POLYGONAL TURNING OF REVOLUTIONARY BODY PARTS

V. A. Danilov, A. A. Danilov

Belarusian National Technical University, Minsk

This paper examines the implementation of a technology for the integrated machining of multi-profile surfaces in a single operation by developing appropriate shaping schemes and analyzing the technological capabilities of existing or creating appropriate machine tools.

Keywords: multi-profile surfaces, integrated machining, shaping scheme, profiling mechanism, turning.

Совмещение процессов обработки разных поверхностей позволяет существенно сократить трудоемкость изготовления деталей, что широко применяется, например, на токарно-револьверных станках при одновременном точении наружной поверхности и сверлении или растачивании отверстия. Заслуживает внимания применение этого метода концентрации операций при обработке разнопрофильных поверхностей, в частности, круглых и многогранных. По сравнению с традиционной технологией, предусматривающей последовательную обработку этих поверхностей на разных станках, сокращаются затраты на подготовку производства и средства технологического оснащения.

Реализация технологии комплексной обработки разнопрофильных поверхностей в рамках одной операции связана с разработкой соответствующих схем формообразования, анализом технологических возможностей имеющегося или созданием соответствующего станочного оборудования для их реализации [1]. Станок для комплексной обработки разнопрофильных поверхностей должен иметь два исполнительных органа с индивидуальными приводами перемещения режущих инструментов в плоскости вращения B_1 заготовки 1 (рис. 1). На поперечных направляющих 6 продольного суппорта 11 смонтированы два поперечных суппорта 7 и 15, первый из которых несет инструментальный шпиндель 8 с резцовой головкой 9 для полигонального точения, а второй – резцедержатель 5 или револьверную головку с резцом 4 для кругового точения. Оба поперечных суппорта имеют возможность независимого перемещения в плоскости вращения заготовки по направляющим 6, соответственно от двигателей 12 и 16, связанных с системой ЧПУ, что обеспечивает возможность настройки положения обоих инструментов относительно оси вращения заготовки в со-

ответствии с размерами поверхностей и режимом работы станка по схемам отдельной или совмещенной обработки круглых и многогранных поверхностей.

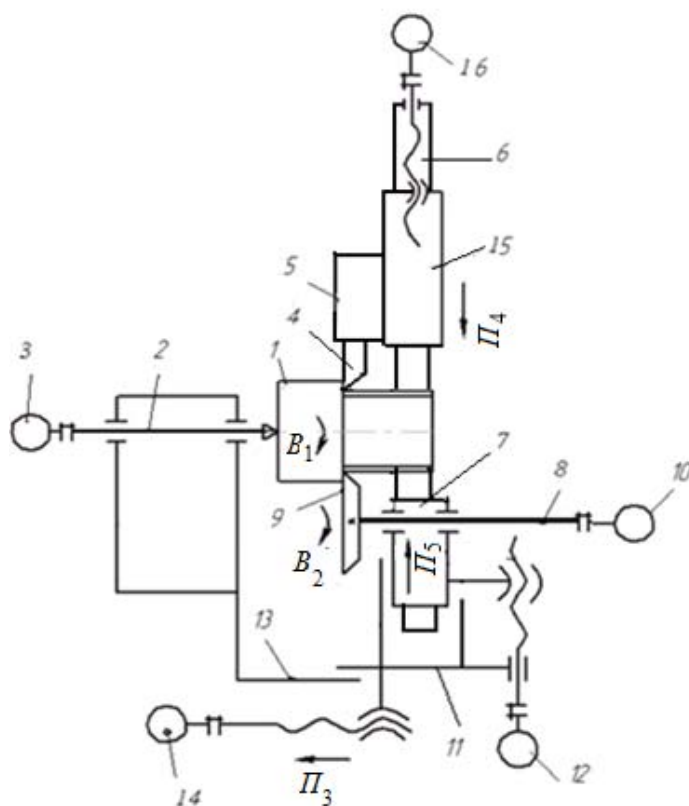


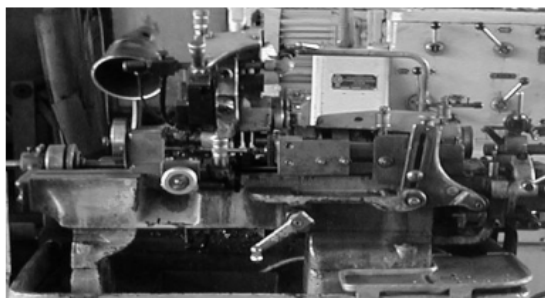
Рис. 1. Схема комплексной обработки круглой и многогранной поверхностей

Круглая поверхность обрабатывается на заготовке 1 (рис. 1) резцом 4 в результате вращения B_1 заготовки и поступательного перемещения Π_3 продольного суппорта 11. Одновременно в результате вращения B_1 заготовки и вращения B_2 резцовой головки на заготовке формируется многогранная поверхность. Если длина многогранной поверхности меньше длины круглой поверхности, то после обработки многогранной поверхности на заданную длину движение подачи Π_3 продольного суппорта 11 отключается и с помощью двигателя 12 резцовая головка отводится от заготовки. Затем снова включается движение подачи Π_3 и производится точение резцом 4 круглой цилиндрической поверхности на требуемую длину.

При одновременной работе двигателей 12 и 14 осуществляется точение круглых конических и фасонных в продольном направлении поверхностей или пирамидальных поверхностей с многоугольным профилем, параметры которых обеспечиваются системой программного управления.

При одновременной работе различных инструментов важно исключить или максимально уменьшить взаимное влияние реализуемых процессов резания на качество обработки, что достигается соответствующей ориентацией режущих инструментов относительно друг друга и заготовки [1].

Рассмотренная схема комплексной обработки может быть реализована также на модернизированном токарном автомате продольного точения, оснащённом механизмом профилирования многогранной поверхности (рис. 2).



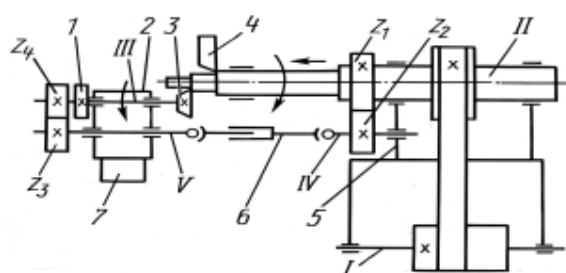
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Общий вид станка (а), обрабатывающий блок механизма профилирования (б), образцы инструмента и обработанных деталей (в), кинематическая схема механизма профилирования многогранной поверхности (г)

Механизм профилирования содержит обрабатывающий блок 2, инструментальный шпиндель *III* которого, несущий маховик *I* и резцовую головку 3, кинематически связан со шпинделем *II* станка через зубчатые колеса z_4 , z_3 , z_2 и z_1 . Колесо z_1 крепится на шпинделе *II*, а z_2 – на валу *IV* неподвижной опоры 5, который через карданную передачу 6 связан с валом *V* обрабатывающего блока 2. Настройка отношения частот шпинделей *III* и *II* производится сменными зубчатыми колесами z_3 и z_4 в зависимости от числа обрабатываемых граней. Например, при обработке детали с двумя параллельными лысками (рис. 2, б) его значение равно 2. Обрабатывающий блок крепится на качающемся суппорте станка.

При продольном точении резцом 4, закрепленном на одном из поперечных суппортов станка, осуществляется обработка поверхностей вращения и одновременно резцовой головкой 3 – некруглой поверхности, т. е. осуществляется за один проход комплексная обработка всех поверхностей детали. Цикл обработки обеспечивается распределительным валом с кулачками системы управления станка.

Рассмотренный вариант модернизации автомата продольного точения реализован в массовом производстве деталей радиоаппаратуры, образцы которых показаны на рис. 2, б.

Литература

1. Данилов, В. А. Комплексная обработка деталей с круглыми и многогранными поверхностями на многооперационных токарных станках / В. А. Данилов, А. А. Данилов // Машиностроение : Респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск : БНТУ, 2017. – Вып. 30. – С. 25–33.

УДК 621.9

ВЛИЯНИЕ МЕТОДА ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА ГЕОМЕТРИЮ РЕЖУЩЕГО ЛЕЗВИЯ ИНСТРУМЕНТА

А. А. Данилов

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Определен рациональный метод формирования на зубодолбежном станке профиля некруглой цилиндрической поверхности в виде треугольника Рело.

Ключевые слова: формообразование, метод профилирования, процесс обработки, метод огибания, метод обката, треугольник Рело.

THE INFLUENCE OF SURFACE PROFILING ON TOOL CUTTING BLADE GEOMETRY

A. A. Danilov

Belarusian National Technical University, Minsk

A rational method for shaping a non-circular cylindrical surface in the form of a Reuleaux triangle on a gear shaping machine is developed.

Keywords: shaping, profiling method, machining process, enveloping method, rolling method, Reuleaux triangle.

Выбор метода формообразования поверхности резанием является ответственным этапом концептуального проектирования технологии формообразования, поскольку допущенные здесь ошибки не могут быть компенсированы на последующих этапах ее разработки и реализации. От метода формообразования поверхности зависят производительность и точность процесса обработки, сложность режущего инструмента и станка. Возможные методы формообразования поверхности могут различаться методами ее профилирования при неизменном методе формирования по длине, что обуславливает необходимость выбора рационального метода профилирования. Из возможных методов профилирования сложной поверхности предпочтителен метод, реализуемый более простым по конструкции режущим инструментом.

Рассмотрим задачу определения рационального метода формирования на зубодолбежном станке профиля некруглой цилиндрической поверхности в виде треугольника Рело, которое возможно методами обката [1], огибания и следа [2]. Треугольник Рело (рис. 1) – это простейшая после круга выпуклая фигура равной ширины с боковыми сторонами в виде дуг окружностей, которые соприкасаются с вписанной в эту фигуру окружностью радиусом r , а их центры расположены на описанной окружности радиусом R_0 в вершинах правильного треугольника ABC . Радиус сторон треугольника Рело равен длине b сторон треугольника ABC (ширине треугольника Рело). Актуальным является разработка простых в реализации на универсальных станках методов формообразования поверхностей с таким профилем, в частности, на основе сравнения указанных выше возможных методов по сложности их реализации.

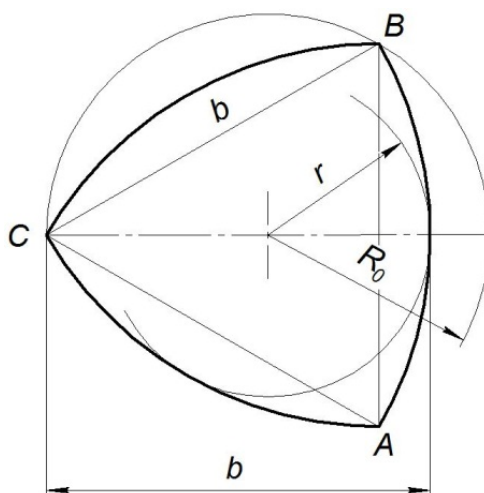


Рис. 1. Геометрия треугольника Рело

Общим признаком методов обката и огибания является то, что профиль обработанной поверхности образуется как огибающая множества вспомогательных линий (положений режущих лезвий). При этом метод обката (или центроидного огибания) основан на качении без скольжения центроида, связанной с режущим инструментом, по центроиде, связанной с заготовкой [3], поэтому форма режущих лезвий зависит от образуемого профиля. При методе нецентроидного огибания (огибания) режущие лезвия перемещаются вдоль профиля формируемой поверхности со скольжением, поэтому их форма не зависит от геометрии профиля и может быть простой, например, в виде прямой или окружности. Независимость формы режущих лезвий от профиля поверхности изделия является существенным преимуществом метода огибания по сравнению с методом обката.

При реализации на зубодолбежном станке методы обката и огибания различаются по кинематике тем, что в первом случае инструмент и заготовка вращаются в разных, а во втором – в одном направлении (рис. 2). При формировании профиля изделия 2 в виде треугольника Рело методом обката (рис. 2, а) режущая кромка инструмента 1 представляет огибающую этого профиля в виде замкнутой кривой [1], что обуславливает сложность изготовления и заточки инструмента.

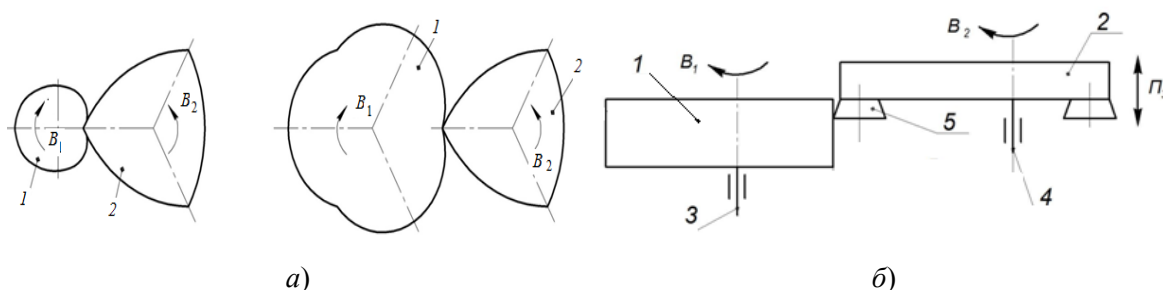


Рис. 2. Схемы формирования профиля в виде треугольника Рело методами обката (а) и огибания (б)

В соответствии с [4] при формировании профиля изделия методом огибания (рис. 2, б) заготовке 1 и инструменту 2 сообщают вокруг осей 3 и 4 одинаково направленные вращательные движения B_1 и B_2 с равными угловыми скоростями. Для

формирования изделия по длине инструменту сообщают также возвратно-поступательное движение $П_3$ со скоростью резания вдоль оси Z .

Поскольку угловые скорости заготовки и режущего инструмента равны, то он имеет три равномерно расположенных по окружности режущих лезвия 5, каждое из которых формирует соответствующую сторону треугольника Рело. Режущие лезвия имеют круглую форму, что позволяет оснащать инструмент стандартными круглыми режущими пластинками и тем самым упростить его конструкцию по сравнению с инструментом, работающим методом обката (рис. 2, а). Все пластинки должны быть одного радиуса, значение которого не зависит от геометрии формируемого профиля. Путем замены режущих пластин технически просто восстанавливается работоспособность и точность инструмента.

Благодаря круглой форме режущих лезвий их рабочие главный и вспомогательный углы в плане имеют постоянные значения на всей ширине формируемой грани изделия, что обеспечивает постоянную форму и стабильную высоту гребешков на обработанной поверхности. Согласно экспериментальным данным [2], точность ширины b профиля, формируемого методом огибания инструментом с круглыми режущими пластинками на зубодолбежном станке нормальной точности, соответствует 8–9 квалитетам, а среднее арифметическое отклонение профиля R_a составляет 1,0–1,15 мкм.

Вместо круглых могут использоваться многогранные сменные пластинки. В этом случае профиль изделия формируется методом прерывистого следа простым по конструкции инструментом [2].

Литература

1. Понкратов, П. А. Разработка эффективного долбежного инструмента для обработки сложных криволинейных поверхностей по методу обкатывания : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Понкратов Павел Александрович / Юго-западн. гос. ун-т. – Курск, 2013. – 20 с.
2. Данилов, А. А. Технология формообразования наружных моментопередающих поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на универсальных станках : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07 / Данилов Александр Алексеевич // Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2022. – 22 с.
3. Родин, П. Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П. Р. Родин. – Киев : Вища шк., 1977. – 192 с.
4. Способ обработки некруглых деталей с треугольным профилем равной ширины : Евраз. пат. 031383 / А. А. Данилов, В. А. Данилов. – Опубл. 28.12.2018.

УДК 621.9.01

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА КООРДИНАТ ПРОФИЛЯ ВИНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОИЗВОЛЬНОЙ СЕКУЩЕЙ ПЛОСКОСТИ

Д. В. Никитенко¹, М. И. Михайлов²

¹ОАО «Гомельское конструкторское бюро «Луч», Республика Беларусь

²Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Предложен универсальный алгоритм расчета координат профиля винтовой поверхности в произвольной секущей плоскости.

Ключевые слова: винтовая поверхность, секущая плоскость, сечение, профиль.

ALGORITHM FOR CALCULATING THE COORDINATES OF A HELICAL SURFACE PROFILE IN AN ARBITRARY SECTION PLANE

D. V. Nikitenko¹, M. I. Mikhailov²

¹*Open Joint-Stock Company "Gomel Design Bureau "Luch"*

²*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

A universal algorithm for calculating the coordinates of a helical surface profile in an arbitrary section plane is proposed.

Keywords: helical surface, section plane, section, profile.

Исходный профиль винтовых поверхностей деталей машин и режущих инструментов, виду их многообразия, задают в различных плоскостях. Для сверл, зенкеров, разверток профиль, как правило, задают в торцовой плоскости, а для различных резьб – в осевой плоскости. Для червяков червячных передач форма и размеры витков исходного червяка определяются также в осевой плоскости, а угол профиля витка задается в различных плоскостях [1]: в осевом сечении витка для архимедова червяка ZA ; в сечении плоскостью касательной к основному цилиндру для эвольвентного червяка ZJ ; в нормальном сечении витка для конволютного червяка $ZN1$; в нормальном сечении впадины для конволютного червяка $ZN2$; в нормальном сечении к винтовой линии на боковой поверхности для конволютного червяка $ZN3$. При проектировании режущих инструментов часто возникает необходимость в пересчете координат профиля винтовой поверхности из одной секущей плоскости в другую. Указанную задачу приходится решать в следующих случаях: при проектировании токарных резцов, дисковых фрез и резцов вихревых головок для обработки винтовых поверхностей, червячных фрез, долбяков для косозубых колес; при нахождении параметров профиля винтовой поверхности в плоскости контроля; при определении погрешности аппроксимации нелинейчатых винтовых поверхностей через линейчатые.

В работе [2] приведены приближенные формулы, позволяющие вычислить погрешность профиля, возникающую при обработке резьбы резцом с прямолинейными режущими кромками, передняя поверхность которого расположена в плоскости нормальной к винтовой линии. С. И. Лашнев в статье [3] описал краткий алгоритм расчета параметров профиля винтовой поверхности в произвольной секущей плоскости, однако конкретные математические зависимости, необходимые для расчета, автор не привел. В работе [4] приведены формулы, позволяющие пересчитывать координаты профиля винтовой поверхности, заданные в осевом или нормальном сечении в торцовое сечение. Недостатком данной работы является невозможность расчета координат профиля, если секущая плоскость не пересекает ось винтовой поверхности.

Целью данной работы является создание универсального алгоритма расчета координат профиля винтовой поверхности в произвольной секущей плоскости.

Пусть $Oxyz$ – неподвижная система координат, $O'XYZ$ – подвижная система координат, совершающая винтовое движение вокруг оси Oz . Если $X = f(u)$, $Y = f(u)$, $Z = f(u)$ функции одного переменного параметра u , то мы имеем линию (образующую) в системе координат $O'XYZ$, которая при винтовом движении опишет винтовую поверхность:

$$\begin{cases} x = X \cos u - Y \sin u; \\ y = X \sin u + Y \cos u; \\ z = Z + pu, \end{cases} \quad (1)$$

где u – угол поворота системы координат $O'XYZ$ вокруг оси Oz ; p – винтовой параметр, $p = P/\pi$, где P – шаг винтовой поверхности.

Нормальное уравнение плоскости, рассекающей винтовую поверхность

$$x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma - d = 0, \quad (2)$$

где α, β, γ – углы, образуемые нормальным вектором секущей плоскости с осями координат x, y, z соответственно; d – расстояние от начала координат O до секущей плоскости.

Величину d удобно вычислять по формуле

$$d = x_0 \cos \alpha + y_0 \cos \beta + z_0 \cos \gamma, \quad (3)$$

а косинусы углов α, β, γ по формулам:

$$\cos \alpha = \sin \theta \cos \varphi, \quad \cos \beta = \sin \theta \sin \varphi, \quad \cos \gamma = \cos \theta, \quad (4)$$

где x_0, y_0, z_0 – координаты начала системы координат, две из осей которой расположены в секущей плоскости; θ, φ – углы между нормалью к секущей плоскости и осями Oz и Ox соответственно.

После подстановки x, y, z в уравнение (2) получаем:

$$[X \cos u - Y \sin u] \cos \alpha + [X \sin u + Y \cos u] \cos \beta + [Z + pu] \cos \gamma - d = 0. \quad (5)$$

Трансцендентное уравнение (5), в общем случае, не имеет аналитического решения, однако при некоторых положениях секущей плоскости аналитическое решение возможно. С целью создания универсального алгоритма расчета координат профиля винтовой поверхности в произвольной секущей плоскости предлагается решать его численным методом.

Решая уравнение (5) относительно u и подставляя полученное значение в (1), можно найти координаты профиля винтовой поверхности x, y, z в системе координат $Oxyz$. Для преобразования координат профиля винтовой поверхности из системы координат $Oxyz$ в систему координат O', x', y', z' , две из осей которой расположены в секущей плоскости, необходимо выполнить преобразование координат по [5]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

При подстановке параметров $x_0, y_0, z_0, \theta, \varphi$ в (6) необходимо учитывать правило знаков из [5]. Проверкой правильности преобразования координат является равенство нулю одной из координат x', y', z' .

Алгоритм расчета координат профиля винтовой поверхности в произвольной секущей плоскости состоит из следующих этапов:

- расчет координат образующей винтовой поверхности $X = f(u), Y = f(u), Z = f(u)$ в системе координат $O'XYZ$;
- решение трансцендентного уравнения (5) относительно параметра u ;
- определение координат профиля винтовой поверхности (1) в неподвижной системе координат $Oxyz$;
- пересчет координат профиля винтовой поверхности из системы координат $Oxyz$ в систему координат $O''x'y'z'$ по (6).

Для архимедовой винтовой поверхности образующую удобно представить в виде уравнений с независимым параметром u , изменяющемся от 0 до 1:

– для образующих левой и правой стороны винтовой поверхности (знак «+» соответствует правой образующей):

$$X = r_f + h_u, Y = 0, Z = \pm \left[\frac{b}{2} + \frac{h}{\operatorname{ctg} \alpha_x} u \right], \quad (7)$$

– для образующей дна винтовой поверхности:

$$X = r_f, Y = 0; Z = \frac{-b}{2} + bu, \quad (8)$$

где b – ширина впадины; h – высота профиля; r_f – радиус впадины; α_x – угол профиля (половина угла профиля для резьбы).

На рис. 1 изображена винтовая поверхность, соответствующая резьбе Тр30х10 и секущая плоскость. На рис. 2, а представлен профиль образующей винтовой поверхности, а на рис. 2, б – профиль винтовой поверхности в секущей плоскости, положение которой определяется параметрами $x_0 = -2$ мм, $y_0 = -2$ мм, $z_0 = -2$ мм, $\theta = 30^\circ$, $\varphi = 70^\circ$.

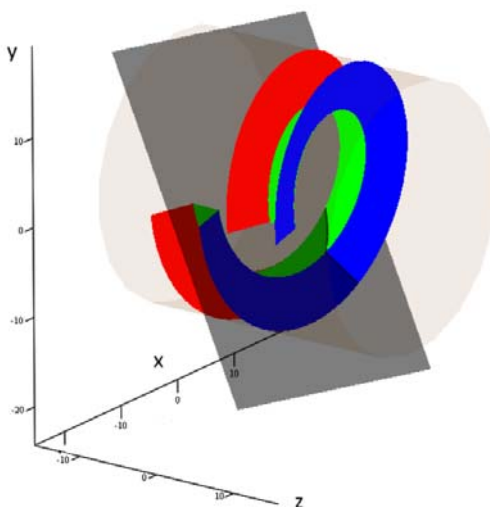


Рис. 1. Винтовая поверхность в системе координат $Oxyz$

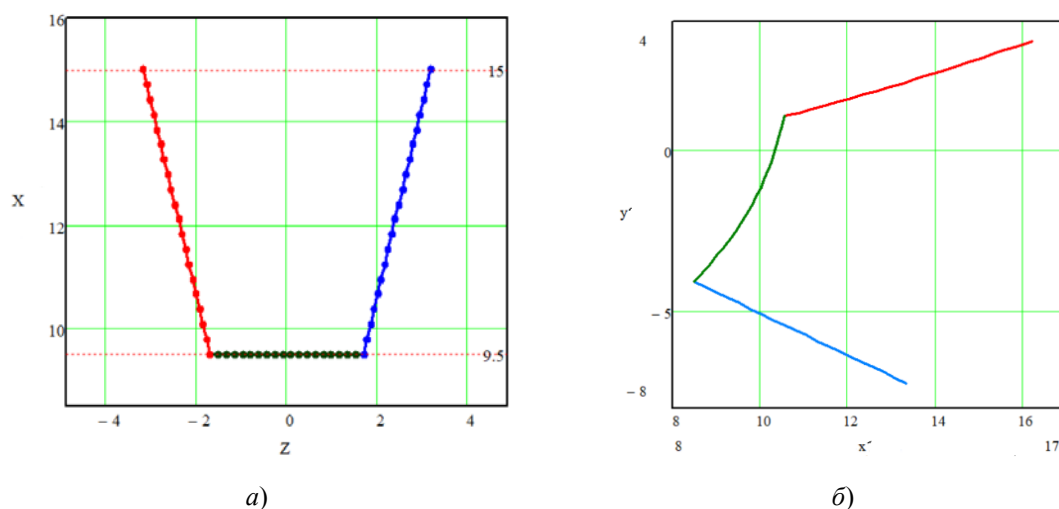


Рис. 2. Профиль винтовой поверхности:
а – профиль образующей; б – профиль в сечении

Литература

1. Сандлер, А. И. Производство червячных передач / А. И. Сандлер, С. А. Лагутин, А. В. Верховский ; под общ. ред. С. А. Лагутина. – М. : Машиностроение, 2008. – 271 с.
2. Riegel, F. Rechnen an spanenden Werkzeugmaschinen. Ein Lehr- und Handbuch zum Gebrauch in Werkstatt, Büro und Schule. Erster Band. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1958.
3. Лашнев, С. И. Расчет параметров профиля винтовой поверхности в произвольной секущей плоскости / С. И. Лашнев, А. Н. Борисов // Станки и инструмент. – 1984. – № 12. – С. 22–23.
4. Панкратов, Ю. М. Профилирование обкатных инструментов / Ю. М. Панкратов. – СПб. : Политехника-сервис, 2010. – 158 с.
5. Решетов, Д. Н. Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М. : Машиностроение, 1986. – 336 с.

УДК 621.91.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ СМАЗЫВАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД НА СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

В. В. Скакун, Э. Ш. Джемилов, Р. М. Джемалидинов, И. Э. Теминдаров

*Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова,
г. Симферополь, Российская Федерация*

Проведены стойкостные испытания режущего инструмента без покрытия и с износостойким покрытием TiN. В качестве технологических сред были использованы следующие масла: минеральное масло И-20А, растительные (подсолнечное, кукурузное) масла, а также животный (свиной) жир.

Ключевые слова: стойкость, износостойкие покрытия, СОТС, окружающая среда, износ, точение.

A STUDY OF THE IMPACT OF ENVIRONMENTALLY FRIENDLY LUBRICANTS ON THE LIFE OF HIGH-SPEED STEEL TOOLS

V. V. Skakun, E. Sh. Dzhemilov, R. M. Dzhemalyadinov, I. E. Temindarov

*Fevzi Yakubov Crimean Engineering and Pedagogical University
Simferopol, the Russian Federation*

Life tests of uncoated cutting tools and those with a wear-resistant TiN coating were conducted. The following oils were used as process fluids: I-20A mineral oil, vegetable oils (sunflower, corn), and animal fat (pork).

Keywords: life, wear-resistant coatings, lubrication systems, environment, wear, turning.

Использование различных металлорежущих инструментов непрерывно связано с интенсификацией процесса резания, пути решения которой связаны с использованием как традиционных, так и новейших технологий, направленных на повышение эксплуатационных свойств инструментального материала. Использование износостойких покрытий позволяет значительно повысить стойкость металлорежущего инструмента, при этом снижая износ инструментальной основы [1, 2]. В свою очередь применение различных составов СОТС также направлено на повышение производительности процесса резания, сочетая в себе моющее, смазывающее и охлаждающее действие. Однако современные требования охраны труда, а также промышленной экологии, выдвигают новые требования, направленные на снижение негативного действия СОТС на окружающую среду и здоровье человека. Основу таких СОТС составляют минеральные масла, являющиеся продуктом нефтепереработки. Основываясь на приведенных доводах, все большую актуальность принимает использование в качестве СОТС различных растительных масел и животных жиров, которые являются биоразлагаемыми [3, 4]. Учитывая дороговизну таких масел, а также то, что данный продукт в основном используется в пищевой промышленности, на сегодняшний день разрабатываются и внедряются в производство различные дозирующие устройства, позволяющие подавать смазочный материал в зону резания в распыленном состоянии в достаточном количестве и с минимальным расходом [3, 5].

Экспериментальные исследования проводились на операции точения с использованием токарного резца со сменными многогранными неперетачиваемыми пластинами из быстрорежущей стали Р6М5К5 как с износостойким покрытием TiN, так и без покрытия. В качестве заготовки использовался холоднокатанный круглый прокат из нержавеющей стали 12Х18Н10Т диаметром 110 мм.

Для обеспечения необходимого температурного диапазона 200–400 °С (режим приработки) был разработан экспериментальный стенд, позволяющий измерять температуру непосредственно в зоне резания методом естественной термопары [6]. При этом державка токарного резца была изготовлена из того же инструментального материала, что и режущая пластина (Р6М5К5), для снижения паразитных термо-ЭДС. Измерение значений термоэлектродвижущей силы осуществлялось при помощи универсального цифрового милливольтметра В7-38. Также был разработан оригинальный экспериментальный стенд, позволяющий осуществлять тарирование естественной термопары непосредственно на металлообрабатывающем оборудовании [7], в результате чего был получен тарировочный график.

В качестве технологических сред были использованы следующие масла: минеральное масло И-20А, растительные (подсолнечное, кукурузное) масла, также животный (свиной) жир. Опыты проводились при постоянной глубине резания $t = 0,5$ мм и подаче $s = 0,2$ мм/об. Стационарная скорость резания составляла $V_c = 25$ м/мин, скорость резания в процессе приработки составляла $V_{пр} = 10$ м/мин. Время резания в

процессе приработки составляло $T_{пр} = 5$ мин. Измерение износа режущей пластины осуществлялось по задней поверхности на инструментальном микроскопе ИМЦЛ 150 х 75(2), Б. Допустимым значением износа была принята величина $h_3 = 0,4$ мм, в зоне нормального износа по задней поверхности инструмента. Подача минерального, а также растительных масел в зону резания осуществлялась при помощи дозирующего устройства Noga Minicool MMS. Подача животного жира в зону резания осуществлялась при помощи специально разработанного устройства, позволяющего подавать смазочный материал в распыленном состоянии. Масла применялись непосредственно в процессе приработки, на протяжении 5 минут. После предварительной приработки дальнейшая эксплуатация режущего инструмента осуществлялась на стационарных режимах резания с использованием 10%-ного состава водосмешиваемой СОТС марки Аквафриз – 6. Экспериментальные исследования показали, что снижение температуры в зоне резания с применением растительных масел и животного жира имеет более выраженный характер нежели от использования минерального масла И-20А. Наибольшее смазочное действие биожиров приводит к изменению угла наклона плоскости фактического сдвига и уменьшению размеров зоны вторичной деформации на передней поверхности инструмента, что в свою очередь облегчает процесс пластической деформации, являющейся основным источником теплообразования в зоне резания.

Проведенные стойкостные испытания после предварительной приработки показали эффективность применения в качестве СОТС подсолнечного масла и свиного жира. Время достижения критериального значения износа режущего инструмента без покрытия, приработанного в таких средах по сравнению с резанием неприработанным режущим инструментом, увеличилось с 38 мин до 67 и 75 минут соответственно. При работе режущим инструментом с покрытием стойкость при резании в среде указанных выше биожиров по сравнению с неприработанным инструментом повысилась с 56 мин до 86 и 93 мин соответственно.

Литература

1. Верещака, А. С. Физические основы процесса резания и изнашивания режущего инструмента с износостойкими покрытиями : учеб. пособие / А. С. Верещака, В. П. Табаков. – Ульяновск : УлГТУ, 1998. – 144 с.
2. Чихранов, А. В. Повышение работоспособности режущего инструмента путем разработки и применения многоэлементных износостойких покрытий на основе модифицированного нитрида титана : дис. ... канд. техн. наук / Чихранов Алексей Валерьевич. – Ульяновск, 2006. – 314 с.
3. Якубов, Ф. Я. Экспериментальная оценка эффективности смазывающих технологических сред в периоде приработки металлорежущего инструмента / Ф. Я. Якубов, Ч. Ф. Якубов, В. В. Скакун // Известия Тульского государственного университета. – Серия. Технические науки. – 2016. – Вып. 8, ч. 1. – С. 246–253.
4. Влияние СОТС на деформационные процессы формирования поверхностных структур при резании / Ч. Ф. Якубов, В. А. Ким, Е. В. Самар, И. В. Белова // Металлообработка. – 2019. – № 6 (114). – С. 3–10.
5. Патент RU № 202624. Устройство для подачи смазывающих технологических сред : заявлено 01.03.2021 : срок действия патента истекает 2021-08-12 : заявка № 2020127167 / Скакун В. В., Ким В. А., Якубов Ч. Ф., Джемилов Э. Ш.
6. Патент RU № 2746316. Способ измерения термо-ЭДС при точении : заявлено 12.04.2021.: срок действия патента истекает 2021-10-12 : заявка № 2020133506 / Скакун В. В., Джемалидинов Р. М., Акимов С. Н.
7. Патент RU № 2734315. Способ тарирования естественной термопары резец-деталь : заявлено 15.10.2020 : срок действия патента истекает 14.05.2030 : заявка № 2020118701 / Скакун В. В., Джемалидинов Р. М.

УДК 62-1/-9

ПРИМЕНЕНИЕ СИНГУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Р. М. Джемалядинов^{1,2}, Ю. А. Егоров², Б. В. Соколенко², В. В. Скакун^{1,2}

¹Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова,
г. Симферополь, Российская Федерация

²Физико-технический институт Крымского Федерального университета
имени В. И. Вернадского, г. Симферополь, Российская Федерация

Проведено исследование метода лазерной профилометрии на основе Бесселевых пучков, которые характеризуются аксиальной симметрией поля вдоль всей оси распространения.

Ключевые слова: качество поверхности, шероховатость, оптический метод, лазерная профилометрия, пучок Бесселя.

APPLICATION OF SINGULAR BEAMS FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF WORKED SURFACE ROUGHNESS

R. M. Dzhemalyadinov^{1,2}, Yu. A. Egorov², B. V. Sokolenko², V. V. Skakun^{1,2}

¹Fevzi Yakubov Crimean Engineering and Pedagogical University,
Simferopol, the Russian Federation

²Physicotechnical Institute of the Crimean Federal University named
after V. I. Vernadsky, Simferopol, the Russian Federation

A study of laser profilometry based on Bessel beams, which are characterized by axial symmetry of the field along the entire propagation axis, was conducted.

Keywords: surface quality, roughness, optical method, laser profilometry, Bessel beam.

Постоянное ужесточение требований к качеству получаемых поверхностей деталей, выпускаемых на современных машиностроительных предприятиях требует совершенствования методов контроля. Одним из основных показателей качества деталей машин является шероховатость обработанной поверхности, которая во многом определяет надежность и функциональные характеристики изделия.

Шероховатость образуется флуктуациями на поверхности коротких длин волн, характеризующимися выступами (локальными максимумами) и впадинами (локальными минимумами) различной амплитуды и расстояниями между ними.

В настоящий момент контроль шероховатости поверхностей на предприятиях преимущественно проводится контактными профилометрами. Щуп пересекает пики и впадины поверхности с небольшим контактным усилием. Вертикальное движение щупа преобразуется преобразователем в электрический сигнал, который представляет собой профиль поверхности $Z(X)$ или изображение топографии $Z(X, Y)$. Вертикальное разрешение может составлять всего около 0,05 нм [1]. Латеральное разрешение ограничено размером кончика щупа, который может составлять всего около 100 нм [2]. Положение щупа зависит только от отталкивающего механического контакта с поверхностью. Поэтому контактный метод напрямую чувствителен к высоте

поверхности с небольшими перепадами. Основным недостатком стилусных профилометров является то, что щуп может повредить поверхность, в зависимости от твердости поверхности относительно нормальной силы щупа и размера кончика алмазной иглы.

Для качественного контроля применяют неразрушающие методы контроля. Так, существует ряд исследований по применению емкостных, пневматических и акустических методов, однако они не получили широкого распространения. Чаще всего применяют оптические методы, которые в основном основаны на концепциях фокусировки, интерференции, рассеяния света, спекл-эффекта и изменения положения отражающего луча [3]. Использование оптических методов для оценки шероховатости поверхности имеет множество преимуществ по сравнению с использованием механических методов измерения. Помимо высокой скорости отклика, важными характеристиками оптической системы являются более высокая точность и надежность. С другой стороны, оптический метод, основанный на изменении пиковой мощности отраженного луча, может быть ненадежным для тонких поверхностей, поскольку этот метод использует диффузное отражение, которое играет важную роль только для поверхностей с большими значениями отклонения от средней линии [4].

Оптические методы можно поделить по принципу работы на использующие метод рассеивания света, интерферометрический метод, спекл-метод и метод оптического щупа. Основными ограничениями применения оптических методов является сложная геометрия измеряемой поверхности (в том числе округлые), а также необходимость тщательной подготовки поверхности для проведения измерений.

В нашем исследовании предлагается метод лазерной профилометрии на основе Бесселевых пучков [5]. Такой пучок характеризуется аксиальной симметрией поля вдоль всей оси распространения, например, вдоль оси z .

Пучок Бесселя получил свое название от функции (функции Бесселя), которая описывает распределение скалярного поля пучка в поперечном сечении в виде набора светлых и темных колец:

$$\psi_i = J_l(U_r) \exp(\pm il\phi) \exp(-i\beta z), \quad (1)$$

где U – поперечное волновое число; β – продольное волновое число или постоянная распространения, связанные соотношением $k = \sqrt{U^2 + \beta^2}$; k – волновое число, соответствующее плоской волне, распространяющейся вдоль оси пучка; и $l = 0, 1, 2, \dots$ – азимутальный индекс.

С математической точки зрения, пучок Бесселя может содержать бесконечное число колец, занимающих бесконечно большую площадь поперечного сечения. Угловой спектр Бесселева пучка образован набором плоских волн, лежащих на поверхности полой конической поверхности с углом при вершине 2θ , задаваемым простым выражением

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{U}{\beta}.$$

Экспериментально и теоретически анализируются пучки Бесселя, несущие оптические вихри на основе винтового аксикона, а также обычного аксикона и винтовой фазовой пластины, расположенных последовательно.

Данный метод позволит проводить анализ микрогеометрических параметров даже на криволинейных поверхностях с различной отражающей способностью.

Литература

1. Topographic measurements of supersmooth dielectric films made with a mechanical profiler and a scanning force microscope / J. M. Bennett, M. M. Tehrani, J. Jahanmir [et al.] // Applied Optics. – 1995. – Vol. 34. – P. 209–212.
2. Song, J. F. and Vorburger TV. Stylus profiling at high resolution and low force / J. F. Song // Applied Optics. – 1991. – Vol. 30. – P. 42–50.
3. Wong, P. L. In-process roughness measurement on moving surfaces, J / P. L. Wong, K. Y. Li // Optics and Laser Technology. – 1999. – Vol. 31, N 8. – P. 543–548.
4. W. Xiangjun, and K. Xinyu. Study on non-contact optical sensor for inside diameter measurements, SPIE. – 1998. – Vol. 3558. – P. 288–292.
5. Influence of optical activity of gyroanisotropic crystals on Bessel beams / Y. Egorov, A. Aliev, R. Dzhemalyadinov [et al.] // Applied Optics. – 2025. – Vol. 64, N 2. – P. 402–408.

УДК 621.914.3

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ
И ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ УЗЛОВ
ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ SGV720 И SGH500**

Н. Е. Демиденко¹, Е. Н. Демиденко²

¹ОАО «СтанкоГомель», Республика Беларусь

²Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Проведен анализ зависимости между интенсивностью отказов и интегральным показателем надежности узлов обрабатывающих центров SGV720 и SGH500, который позволяет рекомендовать оптимизацию интервалов ППР для узлов с высокой интенсивностью отказов и низким IPN, а также модернизацию устройства смены инструмента и частотных преобразователей для повышения их долговечности.

Ключевые слова: надежность, производительность, интенсивность отказов, смена инструмента, частотные преобразователи.

**STUDY OF THE FAILURE RATE AND INTEGRAL
RELIABILITY INDICATOR OF COMPONENTS
OF SGV720 AND SGH500 MACHINING CENTERS**

N. E. Demidenko¹, E. N. Demidenko²

¹OJSC StankoGomel, the Republic of Belarus

²Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

An analysis of the relationship between the failure rate and integral reliability index of components of SGV720 and SGH500 machining centers was conducted. This analysis allows for the recommendation of optimizing maintenance intervals for components with a high failure rate and low IPN, as well as upgrading the tool changer and frequency converters to increase their service life.

Keywords: reliability, performance, failure rate, tool changer, frequency converters.

Обрабатывающие центры SGV720 и SGH500 широко используются в машиностроении, обеспечивая высокую точность и производительность. Однако их сложная конструкция и автоматизация требуют высокой надежности узлов, так как поломки отдельных компонентов могут привести к длительным простоям и значительным потерям.

Цель исследования – определить интенсивность отказов и интегральный показатель надежности (IPN) ключевых узлов, выявить наиболее уязвимые элементы и сформулировать рекомендации по оптимизации обслуживания.

В отличие от стандартной формулы для вероятности безотказной работы, которая показывает вероятность отказа на момент времени T , IPN позволяет посчитать среднее время работы узла до поломки в пределах того же времени, что дает более полное представление о надежности [1].

Формула для IPN выглядит следующим образом:

$$IPN = \frac{1 - e^{-\lambda T}}{\lambda},$$

где e – константа Эйлера; λ – это интенсивность отказов, то есть количество поломок в единицу времени; T – это время, за которое мы хотим оценить работу узла.

IPN позволяет оценить долговечность узлов в реальных условиях эксплуатации, прогнозировать отказы и оптимизировать техническое обслуживание, включая корректировку интервалов для узлов с низким IPN.

В таблице представлены значения интенсивности отказов и IPN для ключевых узлов SGV720 и SGH500.

SGV720	SGV720		SGH500	
	Интенсивность отказов/мес.	IPN	Интенсивность отказов/мес.	IPN
Частотные преобразователи	0,077	11,241	–	–
Датчики ориентации шпинделя	0,038	16,435	0,038	16,435
Серводвигатели	0,038	16,435	0,115	8,235
Устройство автоматической смены инструмента	0,038	16,435	0,346	2,889
Управляющие устройства СОЖ	0,038	16,435	0,115	8,235
Линейные энкодеры	0,077	11,241	0,192	5,165
Повреждение кабелей и контактных соединений	0,269	3,711	0,038	16,435
Шпиндельный узел	0,077	11,241	–	–
Рабочий стол	–	–	0,192	5,165
Коробка передач	–	–	0,077	11,241

Наглядное представление взаимосвязи между интенсивностью отказов и интегральным показателем надежности узлов обрабатывающих центров SGV720 и SGH500 на представленных графиках (рис. 1 и 2) показывает, как эти два показателя соотносятся для различных ключевых узлов. Графики помогают выделить узлы с высокой интенсивностью отказов и низким IPN, которые требуют внимания для повышения их надежности и долговечности.

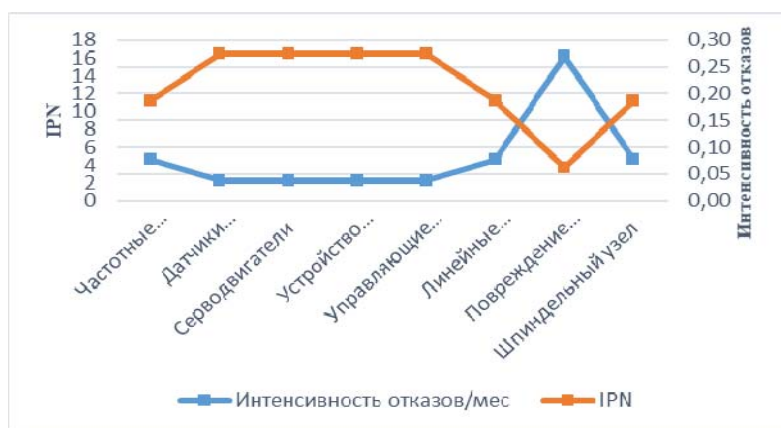


Рис. 1. Сравнение интенсивности отказов и IPN для модели SGV720

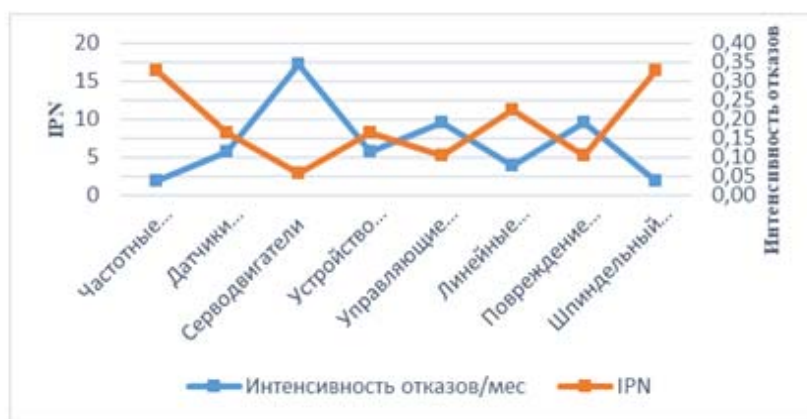


Рис. 2. Сравнение интенсивности отказов и IPN для модели SGH500

Анализ данных позволяет выделить узлы, требующие внимания для повышения надежности. Например, устройство автоматической смены инструмента в модели SGH500 имеет высокую интенсивность отказов и низкий IPN, что указывает на его ограниченную долговечность, требующую модернизации. Узлы с высокой интенсивностью отказов, такие как частотные преобразователи и шпиндельные узлы в SGV720, нуждаются в более частом обслуживании для минимизации простоя, в то время как узлы с высоким IPN, такие как датчики ориентации шпинделя и серводвигатели, показывают стабильную работу и реже требуют обслуживания.

Проведенный анализ позволяет рекомендовать оптимизацию интервалов ППР для узлов с высокой интенсивностью отказов и низким IPN, а также модернизацию узлов, таких как устройство смены инструмента и частотные преобразователи, для повышения их долговечности. Эти меры повысят надежность и снизят затраты на обслуживание, обеспечив стабильную эксплуатацию оборудования [2].

Литература

1. Statistical Models and Methods for Lifetime Data / Дж. Ф. Лоулесс. – New York : Wiley, 2003. – 747 с.
2. Устройство, наладка и обслуживание станков / М. Ю. Сибикин. – М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2019. – 366 с.

УДК 621.914.3

АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕННЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ SGV720 И SGH500 В ПРОЦЕССЕ ГАРАНТИЙНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Н. Е. Демиденко

ОАО «СтанкоГомель», Республика Беларусь

Проведен анализ распространенных поломок обрабатывающих центров SGV720 и SGH500, выявленных в ходе гарантийного обслуживания, с целью определения частых проблем и разработки рекомендаций для улучшения конструкции и эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: обрабатывающий центр, производительность, шпиндельный узел, интенсивность отказов, линейный энкодер.

ANALYSIS OF COMMON FAILURES OF SGV720 AND SGH500 MACHINING CENTERS DURING WARRANTY SERVICE

N. E. Demidenko

OJSC StankoGomel, the Republic of Belarus

An analysis of common failures of SGV720 and SGH500 machining centers identified during warranty service was conducted to identify frequent issues and develop recommendations for improving their design and performance.

Keywords: machining center, productivity, spindle unit, failure rate, linear encoder.

Обрабатывающие центры SGV720 и SGH500 производства ОАО «СтанкоГомель» играют ключевую роль в производстве, обеспечивая высокую точность и производительность. Однако, несмотря на свою надежность, в процессе эксплуатации возникают неисправности, требующие регулярного обслуживания. В данной статье анализируются распространенные поломки, выявленные в ходе гарантийного обслуживания, с целью определения частых проблем и разработки рекомендаций для улучшения конструкции и эксплуатационных характеристик.

Для подтверждения результатов анализа представлена статистика неисправностей на основе 52 гарантийных случаев с августа 2023 г. по октябрь 2025 г. Полученные данные позволяют выявить ключевые неисправности и предложить пути оптимизации технического обслуживания, а также улучшения надежности оборудования.

Обрабатывающие центры модели SGV720 и SGH500 имеют свои специфические особенности, что влияет на распределение неисправностей в процессе эксплуатации. Для станков модели SGV720 основная часть гарантийных случаев приходится на повреждения кабелей и контактных соединений, которые составляют 41 % от общего числа поломок. Эти данные подчеркивают важность грамотного кабель-менеджмента и дополнительной защиты кабелей от перетирания.

На втором месте по частоте поломок находятся шпиндельные узлы, составляющие 12 % всех случаев. Кроме того, часто встречаются проблемы с линейными энкодерами (12 %) и частотными преобразователями (приводами) (11 %). Проблемы обусловлены несовершенством импортозамещенных компонентов и необходимо-

стью повышения эксплуатационных свойств оптических линейных и частотных преобразователей.



Рис. 1. Статистика неисправностей модели SGV720



Рис. 2. Статистика неисправностей модели SGH500

В меньшей степени фиксируются неисправности датчиков ориентации шпинделя (6 %) и серводвигателей (6 %), что свидетельствует о стабильной работе этих компонентов, хотя поломки могут возникать время от времени. Устройства автоматической смены инструмента составляют 6 % всех поломок, что требует внимания к их обслуживанию. Немаловажное значение имеет и мониторинг электронных компонентов функционирования СОЖ, так как их неисправности составляют 6 % поломок.

Для станков модели SGH500 основной причиной поломок является неисправность элементов инструментального магазина, составляющих 31 % всех случаев, что влияет на эффективность работы манипуляторов и механизмов смены инструментов в данной модели. На втором месте по частоте неисправностей находятся линейные энкодеры, составляющие 17 %. Это подтверждает важность корректной работы над совершенствованием преобразовательных систем, как и в модели SGV720.

Заметный процент поломок связан с рабочими столами (17 %) и серводвигателями (10 %). Проблемы с рабочими столами, как правило, связаны с механическими повреждениями или износом элементов перемещения, что подчеркивает необходимость регулярного технического обслуживания этих компонентов. Как и в модели SGV720, для SGH500 также важным моментом являются неисправности датчиков ориентации шпинделя (4 %) и управляющих устройств СОЖ (7 %), что в случае

с устройствами СОЖ, указывает на необходимость регулярного технического обслуживания в виде замены технических жидкостей.

Неисправности коробки передач составляют 7 % случаев, что важно учитывать при планировании профилактического обслуживания и замены изношенных компонентов КПП. Также стоит обратить внимание на течи СОЖ, которые составляют 4 % поломок, требуя внимания к уплотнительным системам и обслуживанию охлаждающих элементов.

Для SGV720 наибольшее внимание следует уделить электронным компонентам функционирования СОЖ, шпиндельным узлам и линейным энкодерам. Для SGH500 критично важны элементы инструментального магазина, линейные энкодеры, а также рабочий стол и серводвигатели. В обоих случаях особое внимание стоит уделить управляющим устройствам СОЖ и датчикам ориентации шпинделя, поскольку поломки этих компонентов часто встречаются в обоих типах станков.

Л и т е р а т у р а

1. Сибикин, М. Ю. Устройство, наладка и обслуживание станков / М. Ю. Сибикин. – М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2019. – 366 с.

УДК 621.923

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВОГО ПОТОКА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ ЧАСТИЦ

В. Ю. Протко, Д. Л. Стасенко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Установлена зависимость изменения газопорошкового потока в зависимости от диаметра напыляемого порошка.

Ключевые слова: адгезионная прочность, струйно-абразивная обработка, газопорошковый поток, зона обработки.

STUDY OF GAS FLOW DURING PARTICLE TRANSPORT

V. Yu. Protsko, D. L. Stasenko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The dependence of gas-powder flow change on the sprayed powder diameter was established.

Keywords: adhesion strength, abrasive-jet machining, gas-powder flow, machining zone.

Одним из основных способов повышения адгезионной прочности покрытий, полученных газотермическим напылением, является подготовка поверхности. При подготовке поверхности необходимо выполнить ее очистку от загрязнений, которые могут быть физическими, органическими, химически связанными с материалом поверхности.

Поверхность детали, поступающей на напыление находится в состоянии термодинамического равновесия, причем свободные связи поверхностных атомов насыщены химическими связями загрязнений. Основным способом активации поверхности перед нанесением покрытия является струйно-абразивная обработка, которая

позволяет отчистить поверхность от адсорбированных веществ и одновременно вывести заготовку из состояния термодинамического равновесия со средой путем освобождения металлических связей поверхностных атомов. Результаты струйно-абразивной обработки и газопламенного напыления зависят от размеров транспортируемых при этом частиц. Анализ влияния размеров частиц на скорость их транспортирования газовым потоком является основной задачей для получения покрытий.

Процесс струйно-абразивной обработки зависит от фракционного состава абразива, его физических свойств и энергетических параметров доставки абразива к обрабатываемой поверхности газовым потоком. Процесс газопламенного напыления зависит от фракционного состава порошка, его физических свойств и энергетических параметров доставки к обрабатываемой поверхности газовым потоком [1].

Рассмотрим одномерное неустановившееся течение газа в цилиндрической трубе переменного сечения (рис. 1).

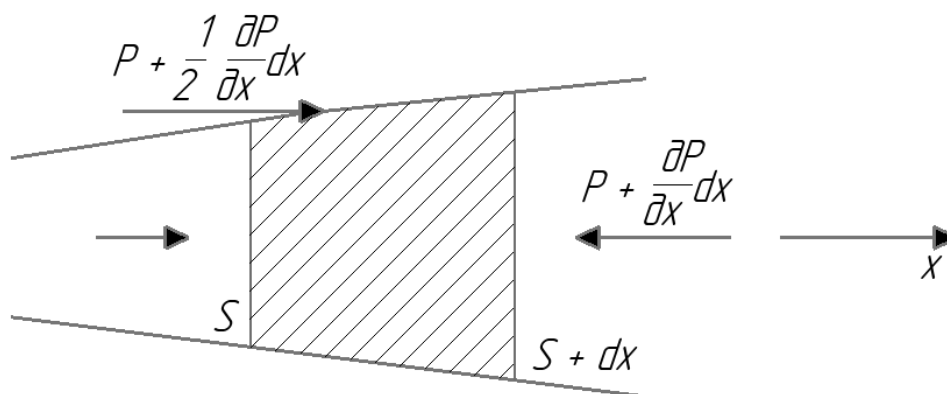


Рис. 1. Схема неустановившегося течения газа в цилиндрической трубе переменного сечения

Выделим объем газа между двумя близкими сечениями, которые находятся на расстоянии dx . Действие на этот объем стенок трубы и газа слева и справа заменим поверхностными силами, где P — давление газа, Па; S — площадь поперечного сечения трубы, м^2 . Допустим, что выделенная частица газа объемом Sdx движется вправо под действием поверхностных сил. Далее используя второй закон Ньютона и после несложных преобразований, получим [2]:

$$\rho S \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial x} dS - \frac{\partial P}{\partial x} S - \frac{\partial P}{\partial x} dS,$$

где ρ — плотность, кг/м^3 ; v — скорость газа, м/с .

Скорость газового потока [2]:

$$v_{г.п} = \sqrt{\frac{2kp_1 \left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}}{(k-1)\rho_r}},$$

где p_1 — давление, ρ_r — плотность, k — показатель адиабаты ($k = 1,4$).

Исходя из известной величины концентрации воздушной смеси с порошком и заданной производительности Q_m , скорость газового потока определяется:

$$v_{\text{газа}} = \frac{Q_m}{S_{\text{сопла}}} = \frac{\pi}{6} d^3 \frac{\rho_{\text{п}} n}{S_{\text{сопла}} \rho_{\text{г}}},$$

где $S_{\text{сопла}}$ – площадь сопла; d – диаметр частицы порошка; $\rho_{\text{п}}$ – плотность частицы порошка; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газового потока; n – концентрация порошка.

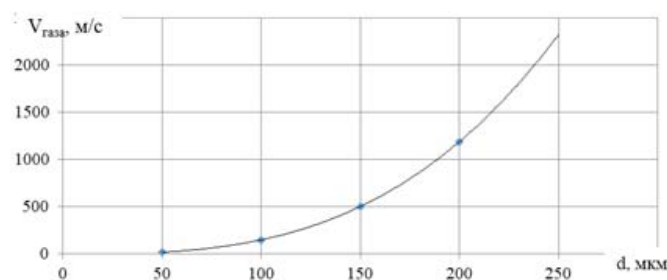


Рис. 2. Изменение скорости полета частиц порошка в зависимости от изменения их диаметра

Установлена зависимость изменения газопорошкового потока в зависимости от диаметра напыляемого порошка, из которой видно, что с ростом частиц порошка для доставки в зону обработки требуется повысить скорость газового потока по степенной зависимости путем увеличения давления газа.

Л и т е р а т у р а

1. Процко, В. Ю. Особенности высокоскоростного газопламенного напыления поверхности / В. Ю. Процко ; науч. рук. Д. Л. Стасенко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 27–28 апр. 2023 г. : в 2 ч. Ч. 1 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – С. 66–69.
2. Стасенко, Д. Л. Процесс получения сферических порошков и дискретных волокон методом высокоскоростной закалки расплава / Д. Л. Стасенко, М. Н. Верещагин // Известия НАН Беларуси. Серия физ.-техн. наук. – 2003. – № 10. – С. 1–63.

УДК 621.923

ВЛИЯНИЕ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВКИ

В. Ю. Процко, Д. Л. Стасенко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Установлена взаимосвязь геометрического размера абразива и его физических свойств на величину шероховатости обработанной поверхности, получаемой после струйно-абразивной обработки.

Ключевые слова: струйно-абразивная обработка, газотермическое напыление, поток абразива, шероховатости.

THE EFFECT OF ABRASIVE JET MACHINING ON WORKPIECE SURFACES

V. Yu. Protsko, D. L. Stasenko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The relationship between the geometric size of the abrasive and its physical properties on the roughness of the machined surface obtained after abrasive jet machining is established.

Keywords: abrasive jet machining, thermal spraying, abrasive flow, roughness.

Существенное влияние на взаимодействие материалов при газотермическом напылении оказывает шероховатость основы. При подготовке поверхности основы для газотермического напыления необходимо учитывать физико-механические свойства поверхности и условия напыления. Так, при напылении частиц с низкой скоростью увеличение шероховатости ведет к росту прочности их с основой и повышению коэффициента напыления. Достигнув максимального значения, прочность сцепления начинает уменьшаться. При напылении увеличение высоты микронеровностей поверхности основы их взаимодействие в зоне контакта изменяет незначительно. С увеличением шероховатости наблюдаются следующие закономерные явления [1]: 1) уменьшается удельная площадь поверхности основы; 2) снижается концентрация микровыступов; 3) растет пластическая деформация вершин микровыступов при напылении; 4) ухудшаются условия взаимодействия во впадинах; 5) при соизмеримых с размерами напыляемых частиц и больших микронеровностях роль микровыступов в образовании связи невелика.

Рельеф поверхности при струйно-абразивной обработке представлен совокупностью неориентированных в пространстве зубчатых выступов. При дробеструйной обработке кроме шероховатости на прочность сцепления оказывает влияние повышение общей потенциальной энергии поверхности (наклеп).

Несмотря на большой опыт практического применения исследования в области поверхностного пластического деформирования до сих пор не сложилось научно-обоснованных методик оценки эффективности упрочнения, выбора оптимального метода и режима обработки.

Рассмотрим взаимодействие потока абразива (рис. 1, а) и действие единичной частицы (рис. 1, б) с обрабатываемой поверхностью.

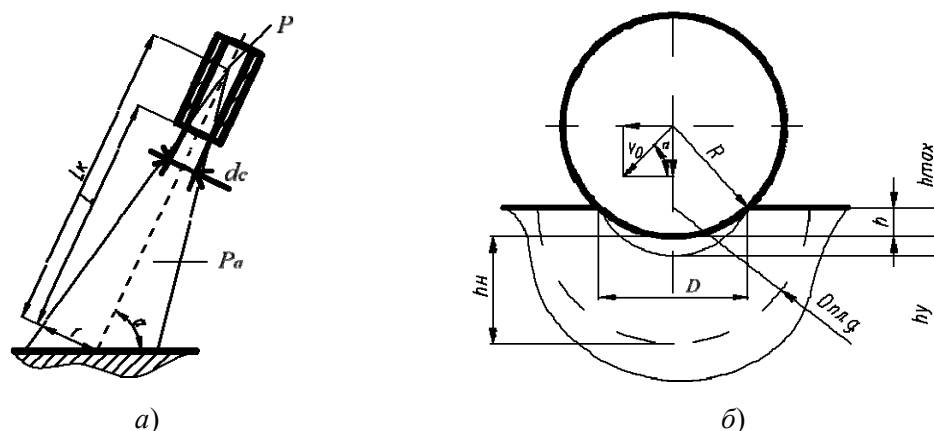


Рис. 1. Схема взаимодействия потока абразива с обрабатываемой поверхностью (а), схема действия частицы абразива обрабатываемой поверхностью (б)

Из соотношения между силой, действующей на поверхность и диаметром получаемого отпечатка, можно найти величину работы совершаемой единичной частицей при статической деформации [1]:

$$A = \int_0^{\lambda} PD\lambda.$$

Уравнение для определения работы совершаемой единичной частицей при деформации поверхности:

$$A_{\text{дин}} = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{H_{\text{м.дин}} D^4}{d}.$$

Для отдельной частицы ударная энергия определяется величиной ее кинетической энергии [2]:

$$A_{\text{дин}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{\pi\gamma}{12g} d^3 v^2.$$

Из данного уравнения можно определить диаметр отпечатка d и глубину отпечатка λ [2]:

$$D = 2\sqrt[4]{\frac{2A_{\text{дин}}d}{\pi H_{\text{м.дин}}}}; \lambda = \frac{D_2}{4d} = \sqrt{\frac{2A_{\text{дин}}}{\pi H_{\text{м.дин}}d}},$$

где v – скорость дробинки; γ – удельный вес; g – ускорение силы тяжести.

Для анализа полученных зависимостей рассмотрим процесс дробеструйной обработки сталей различной твердости: Сталь 10 (HB 143), Сталь 45 незакаленная (HRC 28), Сталь 45 закаленная (HRC 46), Р6М5 закаленная (HRC 66).

Обработка проводилась на струйно-абразивной установке, порошками различного фракционного состава (50–200 мкм). При давлении воздуха 0,4 МПа. Результаты измерения шероховатости были получены на профилометре (рис. 2).

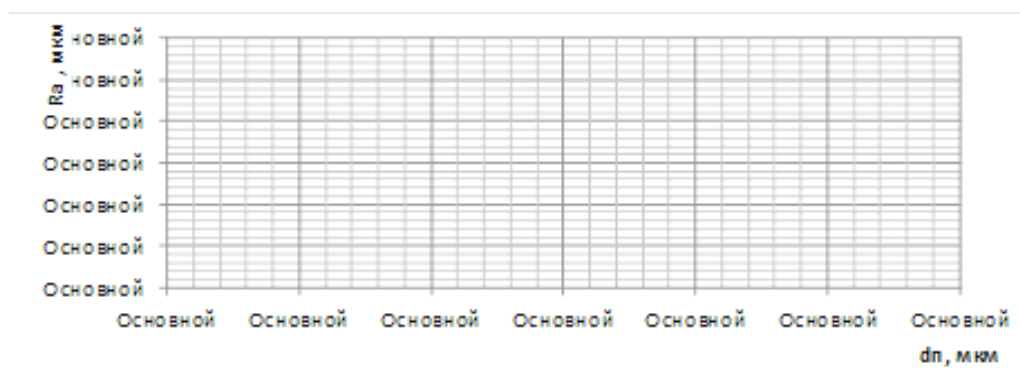


Рис. 2. Результаты измерения шероховатости

Установлена взаимосвязь геометрического размера абразива и его физических свойств на величину шероховатости обработанной поверхности, получаемой после

струйно-абразивной обработки. Анализ зависимости конечных размеров шероховатости поверхности заготовки из сталей различной твердости после струйно-абразивной обработки от размера дроби (рис. 2) показал, что с увеличением размера частиц увеличивается величина шероховатости по линейной зависимости: $Ra = k_1d + k_2$, а с увеличением твердости поверхности заготовки шероховатость уменьшается, здесь k_1, k_2 – коэффициенты, учитывающие твердость обрабатываемой поверхности, d – приведенный диаметр фракционного состава абразива.

Литература

1. Коробов, Ю. С. Основные методы и материалы газотермического напыления / Ю. С. Коробов, В. И. Панов, Н. М. Разиков. – Екатеринбург : Урал. ун-т, 2016. – 80 с.
2. Дисперсия облака частиц в ударной волне. Влияние формы, угла поворота и геометрических параметров облака на динамику потока и дисперсию / С. Л. Дэвис, Т. Б. Диттман, Дж. Б. Якобс, В. С. Дон // Прикладная механика и техническая физика. – 2013. – Т. 54, № 6. – С. 45–59.

УДК 621.923

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА МАГНИТНОГО ИНДУКТОРА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

А. П. Лепший¹, М. П. Кульгейко²

¹Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, Республика Беларусь

²Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

Представлены результаты экспериментальных исследований режущей способности магнитного индуктора при магнитно-абразивной обработке плоскостей. Установлена зависимость производительности обработки от конструктивных и геометрических параметров магнитного индуктора с наклонным межполюсным пространством. Определены оптимальные значения изменяемых параметров рабочего пространства индуктора.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, магнитный индуктор, полюсные наконечники, производитель, плоскость.

INFLUENCE OF THE MAIN DESIGN PARAMETERS OF THE WORKING SPACE OF A MAGNETIC INDUCTOR ON THE PRODUCTIVITY OF MAGNETIC ABRASIVE MACHINING

A. P. Lepshiy¹, M. P. Kulgeiko²

¹Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

²Belarusian State University of Transport, Gomel

The results of experimental studies of the cutting performance of a magnetic inductor during magnetic-abrasive machining of surfaces are presented. The dependence of machining performance on the design and geometric parameters of a magnetic inductor with an inclined interpole space is established. Optimal values for the variable parameters of the inductor's working space are determined.

Keywords: magnetic-abrasive machining, magnetic inductor, pole pieces, manufacturer, surface.

Одним из перспективных методов финишной обработки различных поверхностей является магнитно-абразивная обработка (МАО), отличительной особенностью которой является простота в реализации процесса, экологическая чистота, высокое качество микрогеометрии поверхности, формирование остаточных сжимающих напряжений, повышение износостойкости, контактной прочности и сопротивление коррозии [1].

В настоящее время достаточно широко изучены вопросы влияния технологических факторов на процесс МАО с целью выработки практических рекомендаций по применению данного метода финишной обработки. Возможности повышения эффективности МАО за счет изменения конструктивных факторов, не связанных с повышением энергоемкости оборудования и усложнением устройств, в настоящее время изучены недостаточно.

Целью работы является исследование влияния конструктивных параметров рабочего пространства магнитного индуктора на производительность обработки плоских поверхностей.

К основным конструктивным факторам магнитного индуктора относятся такие параметры, как геометрия и конфигурация полюсных наконечников и рабочих зазоров, размер рабочего пространства, наличие и форма концентраторов магнитного поля, конструкция магнитной системы и др., которые определяют количество участвующих в процессе резания зерен магнитно-абразивного порошка и их ориентацию относительно обрабатываемой поверхности, условия удержания зерен в рабочем пространстве и т. п.

В основу исследований положена обобщенная модель магнитного индуктора [2], реализующего схему кинематического резания, основной особенностью которой является уменьшающийся рабочий зазор между индуктором и обрабатываемой поверхностью при ее обработке, а также комплексный анализ различных конструктивных форм полюсных наконечников, образующих варианты разной конфигурации межполюсного пространства при обеспечении сил магнитного поля, достаточных для производительной обработки.

Данная модель магнитного индуктора позволяет реализовать широкую гамму различных вариантов конструкций, характеризующихся изменяемыми геометрическими параметрами межполюсного пространства (α – углом наклона торцевых поверхностей индуктора; a – межполюсное расстояние) и формой межполюсного зазора, определяемой углами β , ϵ , ψ (рис. 1, *a*).

Исследования влияния угла наклона полюсов (α) и расстояния между ними (a) на производительность МАО проводились при обработке плоских поверхностей из латуни Л62 и нержавеющей стали Х18Н10Т со следующими постоянными факторами: скорость вращения индуктора $V_{\Gamma} = 1,7$ м/с; скорость подачи заготовки $V_S = 45$ мм/мин; время обработки $\tau = 1$ мин; величина рабочего зазора $\delta = 2,5$ мм; зернистость абразивного порошка $\Delta = (315-100)$ мкм; СОЖ – 5 % раствор «Аквол-10» в воде.

По результатам исследования определено, что угол наклона полюсов должен иметь значения $\alpha \geq 75^\circ$, а величина межполюсного зазора находится в пределах $7 \leq a \leq 9$ мм (рис. 1, *б*)

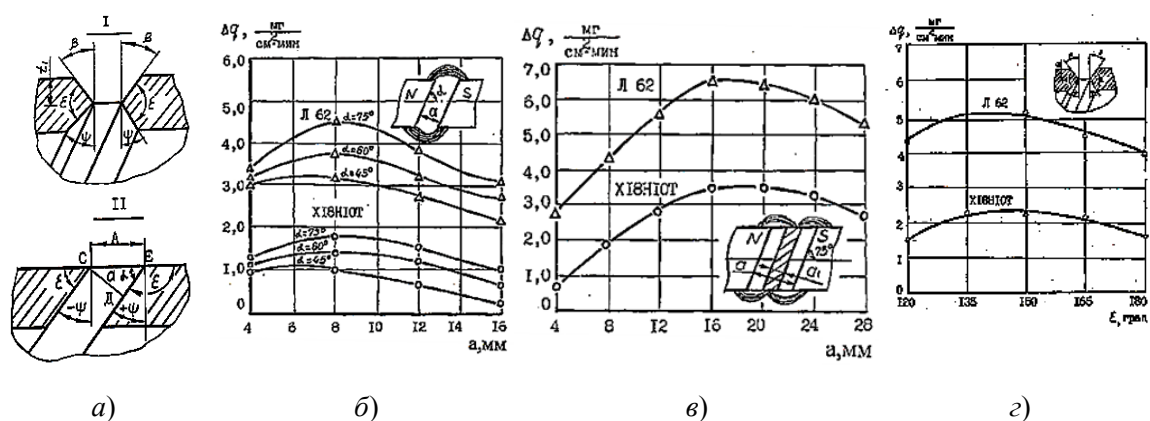


Рис. 1. Рабочее межполюсное пространство магнитного индуктора и зависимости удельного съема металла (Δq) от величины межполюсного зазора (a) при МАО: б – обычным индуктором; в – индуктором с ферромагнитной прокладкой (при $\alpha = 75^\circ$) и от угла заострения ϵ (z)

Дополнительно в исследованиях определено влияние на производительность МАО введение в межполюсное пространство ферромагнитной прокладки с целью увеличения зазора между индукторами. Прокладка, выполненная из стали Ст.3 толщиной $a_1 = 3$ мм, размещалась в середине межполюсного зазора, который изменялся в пределах от 4 до 28 мм с интервалом 4 мм. Из результатов исследования (рис. 1, в) видно, что наличие ферромагнитной прокладки позволяет сместить максимум производительности в область межполюсного зазора $a = (16-20)$ мм с увеличением удельного съема металла до $\Delta q = 6,85 \text{ мг/см}^2 \cdot \text{мин}$ (латунь Л62) и $\Delta q = 3,74 \text{ мг/см}^2 \cdot \text{мин}$ (сталь Х18Н10Т).

При исследовании формы межполюсного зазора (рис. 1, z) принято во внимание, что угол заострения ϵ находится в прямой зависимости с другими углами, определяющими форму межполюсного зазора ($\beta + \epsilon + \psi = 180^\circ$) и в качестве независимого параметра исследования определен угол ψ при $\beta = 0^\circ$. При исследовании внутренний угол скоса торцевой поверхности полюса ψ изменялся в пределах от 0° до 60° с интервалом 15° , что соответствует изменению ϵ от 180° до 120° . В качестве геометрических параметров индуктора выбраны предельные оптимальные их значения: $\alpha = 75^\circ$, $a = 9$ мм.

По результатам исследования установлено, что обеспечение равенства угла ϵ на противоположных полюсах магнитного индуктора и оптимального его значения в пределах $\epsilon = (135-150)^\circ$ обеспечивает повышение производительности обработки на (15–20) %.

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить оптимальный угол наклона полюсов $\alpha \geq 75^\circ$; величину межполюсного зазора $7 \leq a \leq 9$ и угол заострения $\epsilon = (135-150)^\circ$, обеспечивающие повышение производительности обработки на (15–20) %. Введение в межполюсное пространство ферромагнитной прокладки увеличивает величину зазора $a = (16-20)$ мм с повышением производительности обработки в (1,4–1,9) раза.

Литература

1. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий : монография / Н. С. Хомич. – Минск : БНТУ, 2006. – 218 с.
2. Кульгейко, М. П. Анализ обобщенной модели индуктора для магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей / М. П. Кульгейко, А. П. Лепший, Г. С. Кульгейко // Вестник БрГТУ. Серия «Машиностроение». – 2019. – № 4 (117). – С. 100–103.

УДК 621.914.2

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ И РИСКОВ ТОКАРНЫХ РЕЗЦОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ 45 НА СТАНКАХ С ЧПУ

М. В. Матвеевцева, М. И. Михайлов

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Проведен анализ надежности и рисков, связанных с эксплуатацией токарных резцов при обработке стали 45, а также дана оценка их влияния на себестоимость и эффективность производства.

Ключевые слова: надежность, токарный резец, обработка, отказ, сталь 45, поломка, брак.

RELIABILITY AND RISK ANALYSIS OF TURNING TOOLS IN CNC MACHINING GRADE 45 STEEL

M. V. Matveyentseva, M. I. Mikhailov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

An analysis of the reliability and risks associated with the operation of turning cutters when processing grade 45 steel was conducted, as well as an assessment of their impact on production costs and efficiency.

Keywords: reliability, turning tool, machining, failure, grade 45 steel, breakage, defect.

Надежность токарных резцов играет ключевую роль в обеспечении эффективности обработки стали 45 на станках с ЧПУ. Отказы инструмента не только приводят к простоям оборудования, но и увеличивают количество бракованных деталей, что в итоге повышает себестоимость продукции [3]. Для белорусских предприятий, где оптимизация затрат является одним из приоритетов, правильный выбор токарных резцов становится критически важным аспектом производственного процесса.

Целью данного исследования является анализ надежности и рисков, связанных с эксплуатацией токарных резцов при обработке стали 45, а также оценка их влияния на себестоимость и эффективность производства.

Для обработки стали 45 используются токарные резцы из различных материалов, которые различаются по стойкости и стоимости. Согласно ГОСТ 18868-73, основные типы токарных резцов включают проходные, подрезные, резьбовые и расточные [1].

Быстрорежущая сталь (например, P6M5) обладает стойкостью в пределах 30–60 мин. и стоимостью от 15 до 30 BYN. Такие резцы подходят для черновой обработки и производства малых партий деталей.

Резцы из твердого сплава (например, BK8 или T15K6) имеют стойкость от 90 до 180 мин и стоимость от 50 до 120 BYN. Они оптимально подходят для серийного производства благодаря более высокой износостойкости и термостойкости [2].

Твердые сплавы с покрытием (например, TiN или AlTiN) обладают стойкостью от 120 до 240 мин и стоимостью от 100 до 200 BYN. Такие резцы рекомендуются для чистовой обработки и крупносерийного производства, где требуется высокая точность и качество поверхности [2].

Керамические резцы, обладающие стойкостью от 180 до 300 мин и стоимостью от 200 до 400 BYN, применяются для высокоскоростной обработки и массового про-

изводства. Они обеспечивают максимальную стойкость, но отличаются хрупкостью, что ограничивает их применение [2].

Стойкость резцов из твердого сплава в 2–3 раза выше по сравнению с быстрорежущей сталью, что позволяет значительно снизить количество замен инструмента и риск простоев оборудования.

Себестоимость обработки одной детали включает затраты на инструмент, его замену и энергопотребление. Рассмотрим два варианта: резец из быстрорежущей стали (Р6М5) и резец из твердого сплава (Т15К6).

Для примера возьмем время обработки одной детали, равное 5 мин, стоимость простоя станка – 4 BYN в мин., а время замены резца – 10 мин.

Для резца из быстрорежущей стали (Р6М5) стойкость составляет 45 мин, а его стоимость – 20 BYN. За время стойкости можно обработать 9 деталей, что дает затраты на инструмент около 2,22 BYN на одну деталь. За 8-часовую смену (480 мин) потребуется около 11 замен инструмента, что обойдется в 440 BYN только на простои [3].

Для резца из твердого сплава (Т15К6) стойкость составляет 120 мин, а его стоимость – 100 BYN. За время стойкости можно обработать 24 детали, что снижает затраты на инструмент до 4,17 BYN на одну деталь. За смену потребуется всего 4 замены инструмента, что обойдется в 160 BYN на простои [3].

Таким образом, несмотря на более высокую стоимость, резцы из твердого сплава оказываются экономичнее за счет меньшего количества замен и снижения риска брака.

Надежность резцов оценивается вероятностью их безотказной работы, которая рассчитывается по формуле

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

где λ – интенсивность отказов, равная обратной величине стойкости.

Для резца из твердого сплава (Т15К6) интенсивность отказов составляет 0,0083 мин⁻¹, а вероятность безотказной работы за 5 минут – 96 %. Риск отказа в этом случае составляет всего 4 % [3].

Для резца из быстрорежущей стали (Р6М5) интенсивность отказов выше – 0,0222 мин⁻¹, а вероятность безотказной работы за 5 мин составляет 90 %. Риск отказа достигает 10 % [3].

Последствия отказов инструмента могут быть серьезными: поломка резца ведет к простоям станка и браку деталей, что обходится предприятию в 50–200 BYN. Преждевременный износ ухудшает качество поверхности, что требует дополнительной обработки и увеличивает затраты на 20–100 BYN [4].

Для черновой обработки и производства малых партий деталей рекомендуется использовать резцы из быстрорежущей стали (Р6М5), которые отличаются низкой стоимостью и простотой заточки [1].

Для серийного производства оптимальным выбором станут резцы из твердого сплава (ВК8, Т15К6), которые обеспечивают высокую стойкость и термостойкость, снижая затраты на 20–30 % [2].

Для чистовой обработки и крупносерийного производства рекомендуются резцы из твердого сплава с покрытием (TiN, AlTiN), которые обеспечивают максимальную надежность и минимальный брак [2].

Оптимизация режимов резания также играет важную роль. Рекомендуется использовать скорость резания в пределах 100–150 м/мин для твердого сплава и применять смазочно-охлаждающие жидкости для увеличения стойкости инструмента на 20–40 % [2].

Для повышения надежности процесса рекомендуется внедрять системы предиктивной диагностики, такие как датчики вибрации, а также организовывать плановую замену инструмента по наработке, а не по факту поломки [4].

Твердые сплавы (BK8, T15K6) и резцы с покрытием (TiN, AlTiN) обеспечивают максимальную надежность и минимальную себестоимость при обработке стали 45 на станках с ЧПУ. Их применение позволяет снизить риски простоев и брака на 30–50 %, уменьшить затраты на инструмент на 20–40 % и повысить стабильность качества обработки [3]. Внедрение современных систем мониторинга стойкости инструмента позволит дальнейшее сокращение затрат и повышение конкурентоспособности белорусских машиностроительных предприятий [4].

Литература

1. ГОСТ 18868-73. Резцы токарные. Типы и основные размеры.
2. Сандвик Коромант. Руководство по токарной обработке, 2023.
3. Иванов, А. А. Оптимизация процессов резания / А. А. Иванов. – Минск : Беларус. навука, 2021. – 240 с.
4. Современные технологии в машиностроении : материалы конф. – Минск : БНТУ, 2023.

УДК 336.221:004.8:621.82

НАЛОГОВОЕ СТИМУЛИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ВНЕДРЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СТАНКОСТРОЕНИИ

С. Н. Пивовар, Г. В. Митрофанова

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого, Республика Беларусь»*

Проведен анализ как налоговое стимулирование выступает эффективным инструментом внедрения инноваций в станкостроении. Оно способствует снижению затрат на модернизацию и внедрение новых технологий, ускоряет цифровую трансформацию производства, стимулирует разработку аддитивных технологий и повышает технологическую независимость отрасли.

Ключевые слова: налоговая политика, прибыль предприятий, налоговое стимулирование, льготы, инновации в станкостроении.

TAX INCENTIVES AS A TOOL FOR IMPLEMENTING INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN MACHINE TOOL MANUFACTURING

S. N. Pivovar, G. V. Mitrofanova

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

An analysis was conducted of how tax incentives serve as an effective tool for implementing innovation in the machine tool industry. They help reduce the costs of modernization and the implementation of new technologies, accelerate the digital transformation of production, stimulate the development of additive technologies, and increase the industry's technological independence.

Keywords: tax policy, corporate profits, tax incentives, benefits, innovations in machine tool manufacturing.

Станкостроение является одной из ключевых отраслей промышленности, определяющих технологический потенциал страны и уровень ее производственной кон-

курентоспособности. В условиях ускоренной цифровизации предприятиям необходимо активно модернизировать производство, внедрять CAD/CAM-системы, аддитивные технологии и 3D-печать. Однако высокая стоимость таких решений часто становится серьезным барьером, особенно для малых и средних предприятий. В этой связи налоговое стимулирование и меры государственной поддержки приобретают особое значение, поскольку позволяют ускорить внедрение инноваций и повысить эффективность производственных процессов.

Налоговая политика играет ключевую роль в формировании благоприятной среды для инновационной активности предприятий станкостроительной отрасли. В Республике Беларусь предусмотрен комплекс налоговых льгот, направленных на поддержку организаций, инвестирующих в исследования и разработки, а также производящих инновационную и высокотехнологичную продукцию. В соответствии с Указом Президента № 1 научно-технологические парки и их резиденты освобождаются от уплаты НДС при ввозе технологического оборудования, используемого для реализации проектов Государственной программы инновационного развития. Кроме того, от НДС освобождаются обороты по реализации зарегистрированных в государственном реестре научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, что способствует снижению издержек и стимулирует развитие НИОКР в сфере станкостроения [1].

По налогу на прибыль также предусмотрены значимые льготы. Прибыль предприятий, выпускающих инновационные и высокотехнологичные товары, может освобождаться от налогообложения или облагаться по пониженной ставке – 10 %. Научно-технологические парки и центры трансфера технологий имеют право применять инвестиционный вычет и частично освобождаться от налога на прибыль при отчислениях в фонд инновационного развития. Эти меры позволяют предприятиям направлять больше средств на разработку и внедрение современных технологий, включая автоматизацию производства, 3D-печать и цифровое проектирование.

Дополнительные стимулы предоставляются по налогам на недвижимость и землю: от их уплаты освобождаются научные организации и резиденты технопарков, использующие объекты и участки для научно-исследовательской деятельности. Это снижает эксплуатационные расходы и создает более благоприятные условия для функционирования инновационной инфраструктуры [2].

Государственная поддержка инноваций осуществляется как на национальном, так и на региональном уровне и включает прямые и косвенные меры. К прямым относятся бюджетные субсидии и гранты, направленные на финансирование научно-технических проектов, а к косвенным – налоговые льготы и преференции, снижающие налоговую нагрузку. Такое сочетание инструментов повышает устойчивость предприятий и стимулирует их к долгосрочным инвестициям в новые технологии.

В рамках таких программ предприятия станкостроительной отрасли могут получать субсидии на разработку опытных образцов станков с числовым программным управлением или внедрение энергоэффективных технологий обработки металлов. Налоговые льготы на НДС и прибыль позволяют направить высвобожденные средства на закупку современного оборудования и расширение производственных мощностей, что ускоряет внедрение инновационных технологий и повышает производственную эффективность. Так, если предприятие внедряет новые технологии обработки металлов с использованием систем ЧПУ и роботизированных комплексов, оно может воспользоваться налоговыми льготами на расходы на НИОКР (научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы), что позволяет уменьшить налог на прибыль за счет вычета затрат на разработку и испытание новых станков.

В результате компания получает возможность быстрее внедрять инновации и повышать конкурентоспособность своей продукции [3].

В заключение можно отметить, что налоговое стимулирование выступает эффективным инструментом внедрения инноваций в станкостроении. Оно способствует снижению затрат на модернизацию и внедрение новых технологий, ускоряет цифровую трансформацию производства, стимулирует разработку аддитивных технологий и повышает технологическую независимость отрасли. Однако потенциал налоговых мер требует постоянного совершенствования – в частности, расширения перечня инновационной продукции, охватываемой льготами, и упрощения процедуры их получения. В перспективе именно грамотная налоговая политика может стать ключевым фактором перехода станкостроения на инновационный путь развития и укрепления его позиций на мировом рынке.

Литература

1. Гереев, Р. А. Особенности налогового стимулирования промышленного производства / Р. А. Гереев // Налоги и налогообложение. – 2018. – № 1. – С. 2–5.
2. Ошмянский районный исполнительный комитет. Налоговые льготы по инновационной деятельности : информац. сообщение / Ошмян. район. исполн. ком. – Ошмяны. – 1 с. – URL: <https://www.oshmiany.gov.by/printv/ru/actual-ru/view/-nalogovye-lgoty-po-innovatsionnoj-dejatelnosti-4618-2021>.
3. Мантуров, Д. В. Государственное регулирование промышленности / Д. В. Мантуров, Г. С. Никитин, В. С. Осьмаков // Вопросы государственного и муниципального управления. – 2017. – № 1. – С. 50–70.

УДК 621.91

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕСТКОСТИ СБОРНЫХ РЕЗЦОВ СО СМЕННЫМИ МНОГОГРАННЫМИ ПЛАСТИНАМИ

М. И. Михайлов, З. Я. Шабакеева

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, Республика Беларусь

Приведены результаты экспериментальных исследований жесткости сборных резцов со сменными многогранными пластинами.

Ключевые слова: сборные резцы, сменные многогранные пластины, жесткость.

STUDY OF THE RIGIDITY OF ASSEMBLED CUTTERS WITH REPLACEABLE MULTI-FACETED INSERTS

M. I. Mikhailov, Z. Ya. Shabakaeva

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The article presents the results of experimental studies of the rigidity of assembled cutters with replaceable multi-faceted inserts.

Keywords: assembled cutters, replaceable multi-faceted inserts.

Повышение производительности и качества обработки в машиностроении в значительной степени определяется работоспособности режущего инструмента. В условиях современного производства более широко используется сборный режу-

щий инструмент, оснащенный сменными многогранными пластинами. На работоспособность режущего инструмента влияют характеристики, такие как износостойкость, жесткость, прочность, виброустойчивость.

Применяемые методики расчета прочности, исследования жесткости и износостойкости сборного инструмента требуют более полной информации о качестве параметров его элементов, в частности, режущих, где используются сменные многогранные пластины (далее – пластины). На данные характеристики большое влияние оказывает состояние опорных граней сменных многогранных пластин.

Предварительные исследования площадей касания опорных граней пластин, их отклонения от плоскостности, материалографической структуры, показали, что поверхности пластин имеют дефекты, отклонения от плоскостности, контурные площади касания носят неравномерный характер и в некоторых областях они вообще отсутствуют. Перечисленные показатели влияют на условия контакта пластины с державкой инструмента. С увеличением контакта (площади касания) пластины с державкой жесткость сборного инструмента увеличится и, следовательно, должны возрасти прочностные свойства инструмента.

Жесткость сборного инструмента исследовалась на специально разработанном стенде, на котором определялась доля смещения режущей кромки инструмента в результате смещения отдельных элементов. По измеренным перемещениям оценивалось влияние жесткости отдельных элементов на суммарную жесткость инструмента. Сила, с которой нагружался инструмент, соответствовала результирующей силе резания в процессе резания. Исследования проводились на стенде (рис. 1), который представляет собой гидрофицированную установку, при помощи которой осуществлялось нагружение инструмента силой с различными значениями.

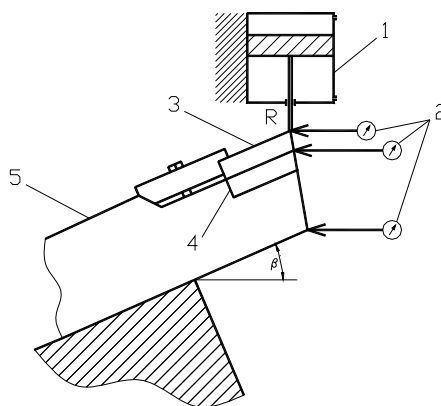


Рис. 1. Схема установки инструмента (резца) при исследовании его на жесткость:
1–2 – нагружающее устройство, исследуемые элементы;
3 – многогранная пластина; 4 – подложка; 5 – державка

Для совершенствования сборного режущего инструмента и повышения его работоспособности была проанализирована эффективность использования полимерных покрытий, которые наносились на опорную поверхность СМП для улучшения контакт пластины с опорной поверхностью режущего инструмента. Ранее опорные поверхности пластин были исследованы по следующим параметрам: отклонения от плоскостности опорных граней СМП; проведено измерение контурных площадей касания и рассчитано распределение относительной контурной площади касания базовой (опорной) грани.

Для исследования реальных характеристик плотности прилегания пластин была выбрана характерная точка (вершина пластины), где производились измерения перемещений пластины. Для более точного исследования предварительно были проведены измерения перемещений державки резца и подкладки.

По результатам испытаний для каждого резца были построены графики (рис. 2), где представлены зависимости перемещений державок (рис. 2, а) и подкладок от нагрузки (рис. 2, б) с пластинами различных форм: трехгранными 1, четырехгранными 2 и пятигранными 3.

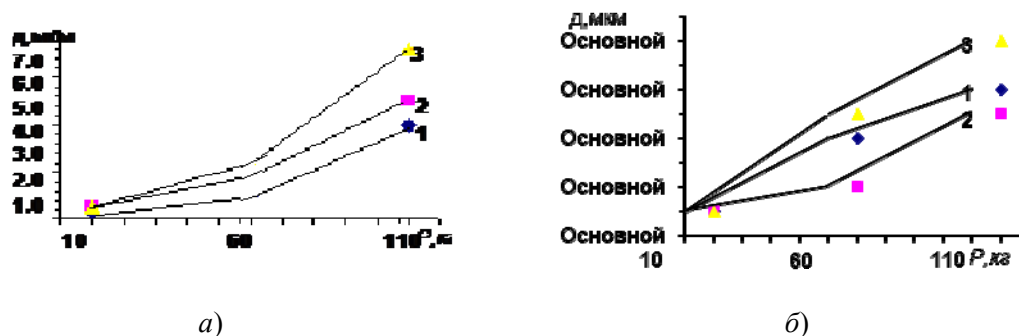


Рис. 2. График результатов исследования жесткости элементов системы крепления резцов

Анализ графиков позволяет заключить, что у державок резцов аналогичный характер перемещений, отличается только численными значениями, которые зависят от геометрических характеристик сечений, перемещения же подкладок отличается в зависимости от типа пластин инструмента. Наибольшее значение перемещений подкладок показано у пластин пятигранной формы. Каждую кривую графика можно разбить на две зоны с различным уровнем нагрузки: при нагружении до 700 Н система крепления подкладок обладает большей жесткостью, а при нагружении свыше 700 Н – жесткость снижается.

Одним из приемлемых способов повышения работоспособности режущего инструмента и улучшения условий контакта между режущей пластиной и державкой является применение фрикционного покрытия, которое наносится на базовые поверхности пластин. С учетом этого к полимерному покрытию должны предъявляться определенные физико-механические требования, обеспечивающие возможность эксплуатации покрытия при высоких нагрузках и в широком интервале температур.

Литература

1. Исследование влияния параметров абразиво-содержащих покрытий на основе эпоксидных смол на их адгезионную прочность / М. И. Михайлов, З. Я. Шабакаева, А. А. Карпов [и др.] // Вестник Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2017. – № 3. – С. 3–8.

УДК 339.13.017

АНАЛИЗ МАКРОСРЕДЫ ПРЕДПРИЯТИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА EFAS

Л. Л. Соловьева

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Проведен анализ макросреды предприятия ОАО «СтанкоГомель». Составлено резюме
анализа внешних стратегических факторов.*

Ключевые слова: анализ, макросреда предприятия, метод EFAS, передовые технологии.

ANALYSIS OF THE ENTERPRISE'S MACROENVIRONMENT USING THE EFAS METHOD

L. L. Solovieva

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

*An analysis of the macroenvironment of StankoGomel OJSC was conducted. A summary of
the analysis of external strategic factors was compiled.*

Keywords: analysis, enterprise macroenvironment, EFAS method, advanced technologies.

PEST-анализ – это инструмент, предназначенный для выявления политических, экономических, социальных и технологических аспектов внешней среды, влияющих на стратегию компании [1].

Методика PEST-анализа используется с целью выявления важнейших факторов макросреды предприятия, оказывающих на его деятельность и ее перспективы решающее значение. Однако данный метод необходимо усилить дополнительными оценками выявленных факторов.

Целью данной работы является совершенствование методики PEST-анализа для повышения его значимости для предприятия станкостроения.

Результаты PEST-анализа позволяют оценить внешнюю экономическую ситуацию, складывающуюся в сфере производства и коммерческой деятельности в ближайшей перспективе нескольких лет.

Рассматривая анализ макросреды предприятия ОАО «СтанкоГомель» [2], можно убедиться, что на деятельность предприятия влияет достаточное количество различных факторов макросреды. Наиболее значимыми для него является возможность финансирования исследований для станкостроительной отрасли и доступность результатов этих исследований, использование технологических трендов, изменение индекса цен на продукцию производственно-технического назначения, тенденции в изменении процентных ставок и доступности кредитов.

Таким образом, исходя из PEST-анализа для предприятия ОАО «СтанкоГомель» можно выделить следующие возможности: получение большего финансирования, что может стимулировать инновации и разработку новых технологий; внедрение передовых технологий, таких как автоматизация, роботизация и искусственный интеллект, что может повысить эффективность, производительность и качество продукции на станкостроительных предприятиях.

Помимо возможностей на предприятие воздействуют угрозы: увеличение цен на сырье и компоненты, что может повлиять на производственные затраты и прибыльность станкостроительных предприятий; более высокие процентные ставки и более низкая доступность кредитов могут увеличить стоимость заимствований и ограничить доступ к финансированию для инвестиций и роста.

Форма EFAS (Резюме анализа внешних стратегических факторов) используется западными специалистами для обобщения результатов работы по анализу стратегических факторов внешней среды [3]. Для ее составления привлечем экспертов.

На первом этапе определим значимость факторов, сформулированных в PEST-анализе. Эксперты заполняют матрицы попарных значений и на их основе рассчитываем вес каждого фактора.

На втором этапе оцениваем уровень влияния каждого фактора на деятельность предприятия. Экспертные оценки предполагают расчет степени согласованности мнений, например, коэффициент конкордации. В нашем случае коэффициент составил 0,74, что больше 0,5. Это определяет достоверность полученных данных.

На третьем этапе составляется форма EFAS и рассчитывается общая оценка методом взвешенного сложения.

Составим форму EFAS (Резюме анализа внешних стратегических факторов) для проведения более углубленного PEST-анализа в таблице.

Резюме анализа внешних стратегических факторов

Внешние стратегические факторы	Вес	Оценка	Взвешенная оценка	Примечание
Государственная политика в области промышленности	0,29	4,2	1,22	Среднее влияние
Регулирование внешнеэкономической деятельности	0,28	4	1,12	Среднее влияние
Стандарты качества и сертификации продукции	0,13	3,8	0,49	Слабое влияние
Законодательства в области охраны труда	0,13	3,8	0,49	Слабое влияние
Изменение индекса цен на продукцию	0,48	4,6	2,21	Сильное влияние
Изменение бюджета прожиточного минимума	0,12	3,6	0,43	Слабое влияние
Изменение обменных курсов валют	0,26	3,8	0,99	Среднее влияние
Тенденции в изменении процентных ставок и доступность кредитов	0,33	4,8	1,58	Среднее влияние
Изменение образовательного, квалифицированного уровня трудоспособного населения	0,09	2,6	0,23	Слабое влияние
Изменение среднегодовой численности населения, занятого в экономике	0,19	2,8	0,53	Слабое влияние
Семейные и культурные ценности	0,15	2,2	0,33	Слабое влияние
Трудовая культура и мотивация	0,25	3,6	0,90	Среднее влияние
Технологические тренды	0,48	4,6	2,21	Сильное влияние
Возможность финансирования исследований	0,52	5	2,60	Сильное влияние
Государственная поддержка инноваций	0,30	4,4	1,32	Среднее влияние

Источник. Собственная разработка.

Предприятию ОАО «СтанкоГомель» следует сосредоточиться на управлении факторами с сильным влиянием, такими как изменение индекса цен на продукцию, технологические тренды и возможность финансирования исследований. Необходимо отслеживать изменения в этих факторах и разрабатывать соответствующие стратегии для смягчения рисков и использования возможностей. Нужно также уделять внимание факторам со средним и слабым влиянием, поскольку они могут стать более значительными в будущем.

Л и т е р а т у р а

1. PEST-анализ. – URL: [https://www.unisender.com/ru/glossary/ pest-analiz/#anchor-3](https://www.unisender.com/ru/glossary/pest-analiz/#anchor-3) (дата обращения: 20.07.2025).
2. Официальный сайт ОАО «СтанкоГомель». – URL: <http://www.stankogomel.by/> (дата обращения: 20.07.2025).
3. Попов, В. Н. Системный анализ в менеджменте : учеб. пособие / В. Н. Попов, В.С. Касьянов, И. П. Савченко ; под ред. В. Н. Попова. – М. : КНОРУС, 2007. – 304 с.

СЕКЦИЯ II СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 546.77.281

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОДИФфуЗИОННЫХ АЛЮМИНИДНЫХ СЛОЕВ НА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ ПРИ РАБОТЕ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

В. Г. Дашкевич, П. С. Мышкевич, М. А. Судников

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Проведены исследования по оценке жаростойкости искусственно оксидированных термодиффузионных слоев анодной обработкой в растворе электролита.

Ключевые слова: жаростойкость, поверхностное упрочнение, термодиффузионное алитирование, алюминидный слой, углеродистая сталь, высокотемпературное окисление.

EFFICIENCY OF THERMODIFFUSION ALUMINIDE LAYERS ON CARBON STEELS OPERATING AT ELEVATED TEMPERATURES

V. G. Dashkevich, P. S. Myshkevich, M. A. Sudnikov

Belarusian National Technical University, Minsk

Research was conducted to evaluate the heat resistance of artificially oxidized thermal diffusion layers by anodic treatment in an electrolyte solution.

Keywords: heat resistance, surface hardening, thermal diffusion aluminizing, aluminide layer, carbon steel, high-temperature oxidation.

Для повышения жаростойкости и долговечности стальных изделий, работающих в теплоэнергетике, нефтехимии и других отраслях, широко используются методы поверхностного упрочнения и защиты. Одним из наиболее эффективных и экономически целесообразных подходов является нанесение термодиффузионных покрытий, в частности, алитирование (насыщение поверхности алюминием). Формирование на поверхности стали алюминидного слоя позволяет создать барьерный слой, препятствующий диффузии кислорода и росту оксидной пленки [1]. Подход давно известный, эффективный, но важным в долговечности такого рода покрытий является образующаяся структура самой оксидной пленки в процессе эксплуатации. Когда она формируется естественным путем, под воздействием высоких температур, плотность структур и ее барьерные свойства не всегда лучшие. Если создать искусственные условия роста оксидных слоев в среде, перед эксплуатацией, эффективность может быть гораздо выше. Особенно если проводить такую обработку в специальной среде, которая дополнительно модифицирует оксидную пленку, т. е. осуществить пассивацию. Такого рода исследования для термодиффузионных алюминидных покрытий достаточно актуальны, поскольку будут способствовать повышению функциональных возможностей алюминидных покрытий на сталях.

Термодиффузионное алитирование обычно осуществляется методом контейнерной и бесконтейнерной обработки (например, из газовой или пастообразной фазы). Процесс включает диффузию атомов алюминия в поверхностный слой углеродистой стали при температурах 800–1000 °С [2, 3]. Такой вариант, относящийся к высокотемпературной обработке, приводит к частичному подплавлению алюминия на поверхности, кинетика роста и концентрация алюминия в этом случае максимально высокая. Диффузия проходит преимущественно через жидкую фазу из расплавленного алюминия и эвтектики системы $\text{FeAl}_3 + \alpha\text{-Al}$.

В результате взаимодействия диффундирующего алюминия с железом матричного материала стали формируется диффузионная зона, состоящая преимущественно из интерметаллидных фаз системы Fe–Al, таких как FeAl, Fe_3Al и Fe_2Al_5 . Наличие этих фаз придает покрытию высокую твердость и стойкость к абразивному износу (вторичный эффект), но главное это обеспечение жаростойкости. Внешний вид поверхности образца из стали У8 после высокотемпературного алитирования и окисления представлен на рис. 1.

Экспериментальные исследования показывают, что алюминидные слои на углеродистой стали могут выдерживать длительную эксплуатацию при температурах до 850–950 °С с минимальной потерей массы (вместо интенсивного окалинообразования на исходной стали).

Для показателя жаростойкости, ее эффективности важным является концентрация алюминия в поверхностном слое, которая должна быть достаточной для постоянного восстановления защитного слоя в случае его повреждения или отслоения и по нашим данным такая концентрация должна быть не менее 20 % масс. Отметим, что эффективность термодиффузионных слоев может снижаться при длительной выдержке из-за диффузионного истощения алюминия в приповерхностном слое, что приводит к ускоренному окислению после местного повреждения и исчезновения барьерных свойств.

Проведенные исследования по оценке жаростойкости искусственно окисированных термодиффузионных слоев анодной обработкой в растворе электролита показали прирост стойкости до 30 % в сравнении с образцами без дополнительной обработки.



Рис. 1. Внешний вид поверхности образца из стали У8 после высокотемпературного алитирования (а) и окисления (б)

Термодиффузионные алюминидные слои являются высокоэффективным средством защиты углеродистых сталей от высокотемпературного окисления. Их эффективность обусловлена формированием интерметаллидной фазы, которая служит источником алюминия для образования плотной и стабильной оксидной пленки. Дополнительная обработка, способствующая образованию модифицированных ок-

сидных слоев, существенно повышает стойкость изделий с термодиффузионными защитными слоями. Принудительное создание оксидированных слоев на сплавах железа с участием технологии термодиффузионного насыщения позволяет повысить защитные функции изделиям, обеспечивает высокую стойкость в условиях высокотемпературной коррозии, что является важным для изделий печного оборудования, различных устройств передачи и аккумуляирования тепла.

Литература

1. David, J. Y. High Temperature Oxidation and Corrosion of Metals / J. Y. David. – Netherlands : Elsevier, 2008. – 574 p.
2. Химико-термическая обработка металлов и сплавов : справочник / Г. В. Борисенок, Л. А. Васильев, Л. Г. Ворошнин [и др.]. – М. : Металлургия, 1981. – 424 с.
3. Коломьцев, П. Т. Жаростойкие диффузионные покрытия / П. Т. Коломьцев. – М. : Металлургия, 1979. – 272 с.

УДК 621.762

РАЗРАБОТКА ТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЦИНКОТЕРМИИ

**В. Г. Харкевич, А. Н. Жигалов, А. Н. Жариков,
М. В. Башаримов, В. А. Капитонов**

ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси», г. Могилев

Рассмотрены температурные режимы, которые необходимо задавать для каждой стадии процесса цинкотермии. Изложена методика проведения исследований по варьированию параметров процесса цинкотермии.

Ключевые слова: цинкотермия, твердосплавный лом, технология рециклинга, температурная модель.

DEVELOPMENT OF A TEMPERATURE MODEL FOR THE ZINCOTHERMY PROCESS

**V. G. Kharkevich, A. N. Zhigalov, A. N. Zharikov,
M. V. Basharimov, V. A. Kapitonov**

State Scientific Institution “Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus”, Mogilev

The temperature regimes required for each stage of the zincothermy process are considered. Development of a research methodology for varying zincothermy process parameters.

Keywords: zincometry, carbide scrap, recycling technology, temperature model.

В настоящее время в ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси» ведутся научные исследования по рециклингу лома и отходов твердосплавных изделий методом цинкотермии. Ранее были выявлены параметры, оказывающие наибольшее влияние на эффективность процесса разложения твердосплавного лома:

- соотношение цинка к твердосплавному лому;
- температурные режимы при разрушении кобальтовой связки;
- время воздействия жидкого цинка на лом;
- давление в рециклинговой камере.

В данной статье рассмотрены температурные режимы, которые необходимо задавать для каждой стадии процесса цинкотермии в отдельности. Цель исследования – установить наиболее приемлемые для каждой стадии процесса цинкотермии значения температур. Реализация поставленной цели осуществлялась путем проведения ряда исследований, направленных на определение данных параметров.

Для установления значений варьирования данными параметрами на различных стадиях процесса цинкотермии, применительно к осваиваемой технологии рециклинга твердосплавного лома в карбидо-вольфрамовый порошок, была предложена его условная температурная модель (рис. 1), состоящая из пяти основных участков этапов процесса цинкотермии, обозначенных римскими цифрами от I до V, и четыре его температурных режима, обозначенных латинскими буквами *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F* и *G*.

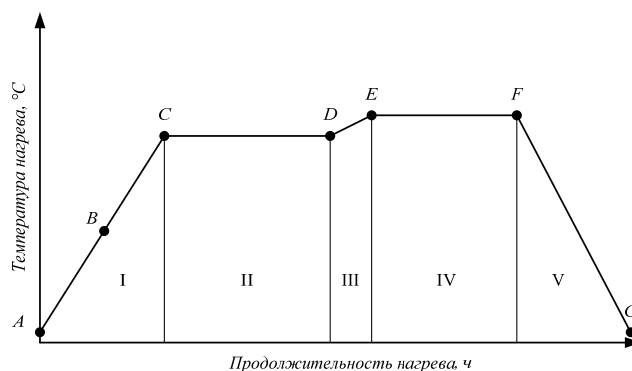


Рис. 1. Условная температурная модель процесса цинкотермии

A и *G* – точки, температура которых соответствует температуре окружающей среды (началу и окончанию процесса цинкотермии).

B – точка, температура которой соответствует температуре плавления цинка (419,6 °C).

C и *D* – точки соответствуют постоянной температуре, при которой происходит взаимодействие расплавленного цинка с кобальтом (температура варьирования выбирается из предела от 750 до 850 °C [1, 2]).

E и *F* – точки соответствуют постоянной температуре, при которой происходит испарение (отгонка) цинка при пониженном давлении (температура варьирования выбирается из предела от 850 до 950 °C [1, 2]).

I – участок, ограниченный точками *A* и *C*, соответствует нагреву в печи сплава до температуры взаимодействия расплавленного цинка с кобальтом.

II – участок, ограниченный точками *C* и *D*, соответствует выбранной постоянной температуре, при которой в течение заданного времени в атмосфере инертного газа (в нашем случае азота) при давлении 0,5–1,0 атм [3], расплавленный цинк вступает в реакцию с кобальтовой связкой сплава.

III – участок, ограниченный точками *D* и *E*, соответствует нагреву в печи сплава до температуры испарения цинка.

IV – участок, ограниченный точками *E* и *F*, соответствует выбранной постоянной температуре, при которой в течение заданного времени при пониженном давлении (приблизительно 4–5 Па [3]) происходит испарение цинка, что приводит к объемному расширению твердого сплава, который в последствии приобретает пористую структуру. Таким образом, происходит деструкция отходов твердых сплавов, идущих в дальнейшем на получение твердосплавного порошка.

V – участок, ограниченный точками F и G , соответствует охлаждению пористой структуры до температуры окружающей среды.

С целью оптимизации технологических режимов разложения твердосплавного лома при цинкотермии необходимо определить численные величины технологических параметров процесса, при которых будут эффективно проходить два наиболее важных его этапа. Одним из данных этапов будет являться процесс экстрагирования кобальта в расплаве цинка (II участок на рис. 1), а вторым – процесс дистилляции цинка (IV участок на рис. 1).

Рассмотренная условная температурная модель позволила создать методику проведения исследований по варьированию параметров процесса цинкотермии, которая была адаптирована к имеющимся технологиям в ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси».

Литература

1. Hirose, K. Recycling Cemented carbides without Pollution – Sorting Charging Material for Zinc Process / K. Hirose, I. Aoki // Int. Conf. Process. Mater. Prop., 1st 1993, 845–848 (English). Edited by Henein, Hani ; Oki, Takeo. Miner. Met. Mater. Soc : Warrendale, P. A.
2. Cutting-tool recycling process with the zinc-melt method for obtaining thermal-spray feedstock powder (WC-Co) / E. Altuncu, F. Ustel, A. Turk [et al.] // Materials and technology. – 2013. – Vol. 47, N 1. – P. 115–118.
3. Совершенствование технологии переработки отходов твердых сплавов. Ч. 2. Определение оптимальных условий реализации технологии / И. Г. Троценко, Т. Е. Герасименко, В. М. Алкацев, С. И. Евдокимов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 31–39.

УДК 621.762

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЦИНКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗЛОЖЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ЛОМА

В. Г. Харкевич, А. Н. Жигалов, Д. А. Жолобов, В. А. Черный, И. В. Кубраков
ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси», г. Могилев

Исследовано влияние содержания цинка на эффективность разложения твердосплавного лома.

Ключевые слова: твердосплавные отходы, разложение, цинк, структура образцов.

STUDYING THE INFLUENCE OF ZINC CONTENT ON THE DECOMPOSITION EFFICIENCY OF HARD-ALLOY SCRAP

V. G. Kharkevich, A. N. Zhigalov, D. A. Zholobov, V. A. Cherny, I. V. Kubrakov
State Scientific Institution “Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus”, Mogilev

The influence of zinc content on the decomposition efficiency of hard-alloy scrap was studied.

Keywords: hard-alloy waste, decomposition, zinc, sample structure.

Проведенный ранее анализ существующих методов переработки твердосплавных отходов показал, что в условиях ГНУ «Институт технологии металлов НАН Бе-

ларуси» наиболее технологически и экономически обоснованным является метод цинкотермии, суть которого заключается в разрушении кобальтовой связки жидким цинком [1].

Одним из немаловажных этапов проводимой работы является установление влияния содержания цинка на эффективность разложения твердосплавного лома. Необходимо отметить, что четко рекомендуемых значений соотношения цинка к твердосплавным отходам нет. Как правило, эти данные в литературных источниках умалчиваются либо представлены в диапазоне, который имеет достаточно широкий разброс значений. Например, в [2] указано соотношение цинка к отходам твердых сплавов от 0,5 : 1 до 6 : 1, в [3] – от 1 : 1 до 2 : 1. Величины данных значений в первую очередь зависят от содержания кобальта в отходах твердосплавного лома. Поэтому была поставлена задача проведения исследований по установлению оптимального соотношения цинка к твердосплавному лому.

Для этой цели был отсортирован и отобран твердосплавный лом с 10%-ным содержанием кобальта. Предварительно проведенные теоретические исследования позволили установить рекомендуемые, в первом приближении, соотношения цинка к твердосплавному лому, которые ориентировочно составили (1,15–1,2) : 1. Понимая, что эффективность разложения твердосплавного лома зависит от полноты взаимодействия цинка с кобальтом, для проведения экспериментальных исследований предварительно были приняты соотношения 1,1 : 1, 1,2 : 1 и 1,3 : 1 и установлен температурный режим взаимодействия цинка с отходами твердосплавного лома 800 °С при времени выдержки 3 часа.

Для оценки качества деструктурированного продукта в виде разложенного пористого твердосплавного лома, полученного при каждом эксперименте, проводилось подробное изучение структуры всех образцов разложенного лома цифровым микроскопом AD5M301 (рис. 1).

С целью оцифровки результатов и построения зависимостей были проведены экспериментальные исследования по определению плотности представленных образцов по методике, разработанной в ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси». Полученные данные заносили в протокол испытаний, на основании которых строили зависимости и делали выводы.

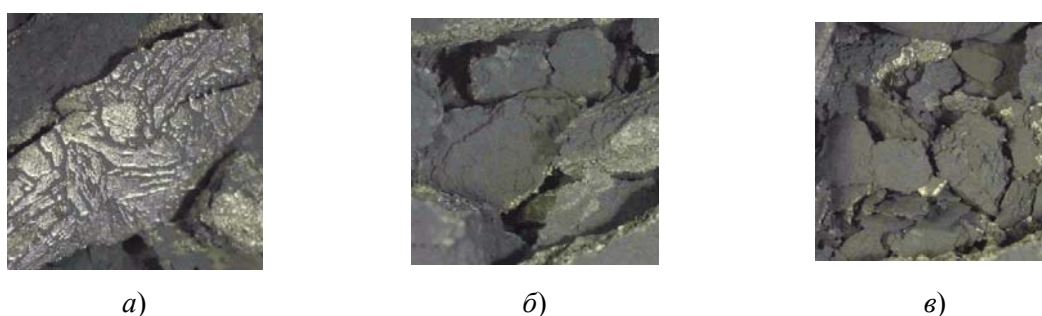


Рис. 1. Вид разложенного пористого твердосплавного лома с различным соотношением цинка: а – соотношение цинка к твердосплавному лому 1,1 : 1; б – соотношение цинка к твердосплавному лому 1,2 : 1; в – соотношение цинка к твердосплавному лому 1,3 : 1

На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость плотности образцов разложенного твердосплавного лома, полученного при температуре 800 °С и времени выдержки 3 часа, от величины соотношения цинка к отходам твердосплавного лома.

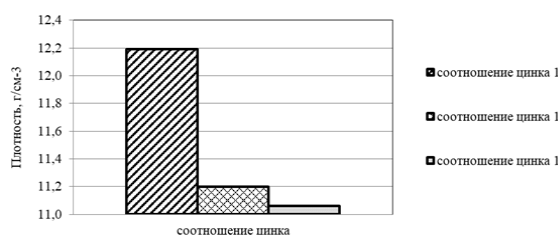


Рис. 2. Зависимость влияния соотношения цинка на плотность образцов разложенного твердосплавного лома, полученного при температуре 800 °С и времени выдержки 3 часа

Анализ результатов проведенных исследований показал, что с увеличением соотношения цинка к твердосплавному лому уменьшалась плотность образцов, т. е. разложение твердосплавного лома происходило более интенсивно. Анализируя график (рис. 2), можно сделать вывод о том, что оптимальным соотношением цинка к твердосплавному лому составляет 1,2 : 1 для исследуемых образцов и выбранных режимных параметров. Это объясняется тем, что при увеличении соотношения цинка на 9,09 % (от 1,1 : 1 до 1,2 : 1) плотность образцов уменьшалась на 8,12 %, в то время как при увеличении соотношения на 8,33 % (от 1,2 : 1 до 1,3 : 1) плотность уменьшалась всего лишь на 1,25 %.

Литература

1. Жолобов, Д. А. Определение эффективного способа разложения твердосплавного лома в условиях ИТМ НАН Беларуси / Д. А. Жолобов, М. В. Башаримов, А. Н. Жигалов // Металлургия сплавов : сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф. (Могилев, 5–6 июня 2025 г.) / Гос. науч. учреждение «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси» ; под ред. А. Н. Жигалова. – Минск : Коллоград, 2025. – С. 131–133.
2. Patent 20120028490 KR. Recycling method of tungsten carbide from waste cemented carbide using pressured zinc melt / Pee Jae Hwan, Yun Jin Soon, Cho Woo Seok, Kim Kyung Ja, Seong Nam Eui. Publication data 23.03.2012.
3. Совершенствование технологии переработки отходов твердых сплавов. Ч. 2. Определение оптимальных условий реализации технологии / И. Г. Троценко, Т. Е. Герасименко, В. М. Алкацев, С. И. Евдокимов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета имени Г. И. Носова. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 31–39. – URL: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-31-39>.

УДК 621.762

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ТВЕРДОСПЛАВНОГО ПОРОШКА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ РАЗЛОЖЕННОГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ЛОМА

В. Г. Харкевич, В. И. Тарасенко, А. Н. Жигалов,
Ю. Д. Черняков, П. А. Тропынин

ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси», г. Могилев

Проведено исследование порошка марки ВУТС после рециклинга и измельчения на шаровой мельнице сухого помола.

Ключевые слова: переработка отходов, цинк, твердосплавный лом, рециклинг, гранулометрический анализ.

STUDY OF THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF HARD-ALLOY POWDER OBTAINED FROM DECOMPOSED HARD-ALLOY SCRAP

V. G. Kharkevich, V. I. Tarasenko, A. N. Zhigalov,
Yu. D. Chernyakov, P. A. Tropynin

*State Scientific Institution "Institute of Metal Technology of the National Academy
of Sciences of Belarus", Republic of Belarus*

A study of BYTC grade powder after recycling and grinding in a dry ball mill was conducted.

Keywords: waste recycling, zinc, hard-alloy scrap, recycling, grain size analysis.

В институте технологии металлов НАН Беларуси произведена апробация технологии по переработке отходов твердосплавного лома в твердосплавные порошки методом цинкотермии, которая включает следующие основные этапы: подготовка отходов, реакция с цинком с целью разложения кобальтовых связей, отгонка цинка, сухой помол разложенного твердосплавного лома.

Проведено исследование полученного порошка марки BYTC после рециклинга и измельчения на шаровой мельнице сухого помола. Разложению подвергался заранее отобранный лом твердосплавных пластин без износостойкого покрытия, химический состав пластин до начала процесса цинкотермии не исследовался. Процесс разложения отходов твердосплавного лома проходил в вакуумной печи ZNF 500. Далее разложенный твердосплавный лом измельчали в шаровой мельнице сухого помола ХНР-600 в течение 16 часов. На выходе получили твердосплавный порошок, который подвергли химическому и гранулометрическому анализу.

Химический состав данного разложенного порошка определялся с помощью рентген-флуоресцентного анализатора Skyray Instrument Sky GTX (регистрационный номер утвержденного типа средства измерений в ГРСИ и СО РБ 03 09 9512 23). Результаты исследований представлены в таблице.

Химический состав исследуемого порошка

Наименование химического элемента	Содержание массовой доли элемента, %
W	74,4
Co	15,6
Ti	5,4
Примеси (Fe, Mn, V, Cr)	3,2
Zn	Отсутствует

Общий вид исследуемого порошка при увеличении 4х и 150х, полученный при использовании металлографического инвертированного микроскопа Leica DMi8-A, представлен на рис. 1. Визуальный анализ показал, что порошок имеет однородную сыпучую структуру, наличие агломерата не наблюдалось.



Рис. 1. Общий вид исследуемого порошка при увеличении 4х (а) и 150х (б)

Насыпная плотность полученного в процессе размольной операции порошка определялась с помощью аналитических весов CAS XE-600 и составила 3,4–3,7 г/см³.

Количественная и качественная оценка размеров частиц полученного порошка проводилась с помощью интегрированного в микроскоп Leica DMi8-A программного обеспечения Axalut. По результатам гранулометрического анализа массива данных были построены гистограмма распределения размеров частиц исследуемого порошка (рис. 2) и интегральная кривая распределения частиц по размерам (рис. 3).

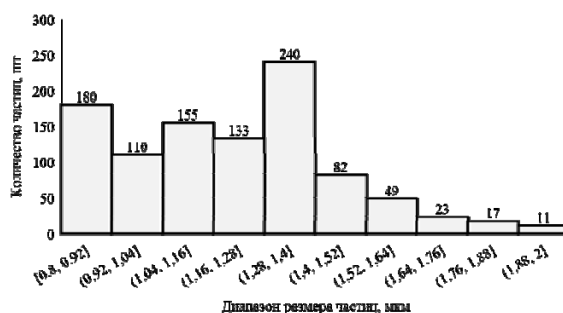


Рис. 2. Гистограмма распределения размеров частиц исследуемого порошка

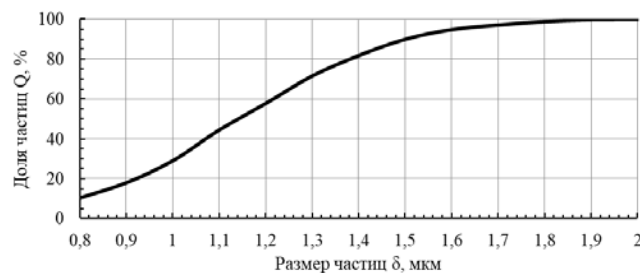


Рис. 3. Интегральная кривая распределения частиц по размерам

Анализ данных (рис. 2 и 3) показал, что средний размер фракции порошка составляет 1,14 мкм, а максимальный размер его частиц не превышает размер 2 мкм.

Результаты исследований гранулометрического состава твердосплавного порошка, полученного методом цинкотермии, показал, что порошок в полной мере удовлетворяет требованиям ГОСТ 4872-75 «Изделия для режущего инструмента из твердых спеченных сплавов. Технические условия».

УДК 621.793

**МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ОКСИКАРБИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ
НА ОСНОВЕ Ti–Al–Cr–Fe–Ni, СФОРМИРОВАННЫЕ МЕТОДОМ
ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ, ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

И. А. Сечко, О. И. Посылкина

Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск

Исследованы покрытия, сформированные методом вакуумно-дугового осаждения с использованием сепаратора плазмы.

Ключевые слова: защитные покрытия, рентгеноструктурный анализ, коррозионная стойкость, режущий инструмент.

**MULTI-COMPONENT OXYCARBIDE COATINGS BASED
ON Ti–Al–Cr–Fe–Ni FORMED BY VACUUM-ARC DEPOSITION
FOR TOOLING PRODUCTS**

I. A. Sechko, O. I. Posylkina

*Physicotechnical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk*

Coatings formed by vacuum-arc deposition using a plasma separator were studied.

Keywords: protective coatings, X-ray diffraction analysis, corrosion resistance, cutting tool.

В настоящее время с повышением требований к эксплуатационной стойкости изделий расширяется спектр материалов, используемых в качестве защитных покрытий. Одним из перспективных направлений в науке о материалах считается направление, связанное с созданием и применением высокоэнтропийных систем (прежде всего сплавов и покрытий на их основе). В настоящее время представляет интерес получение покрытий на основе высокоэнтропийных систем методом вакуумно-дугового осаждения [1, 2]. Высокая степень ионизации плазмообразующих металлов, реализуемая данным методом, позволяет обеспечить высокую адгезионную прочность, высокую вероятность плазмохимических реакций образования соединений, прохождение диффузионных процессов в покрытии, расширяет технологические возможности осаждения покрытий из высокоэнтропийных сплавов. Такие покрытия могут увеличить срок службы и повысить функциональные характеристики как режущих инструментов, так и матриц прессовой оснастки, обеспечивая стабильность и качество обработки в условиях коррозионно-абразивного изнашивания.

В рамках данной работы были сформированы и исследованы покрытия, сформированные методом вакуумно-дугового осаждения с использованием сепаратора плазмы. Для обеспечения необходимого элементного состава применялись два катода, один из чистого титана (Ti) и один из алюминия (Al) со вставками из нихрома (Ni, Cr) и нержавеющей стали 12X18H10T (Fe, Ni, Cr, Ti). В качестве реакционного газа для создания оксикарбидных соединений был выбран углекислый газ (CO₂).

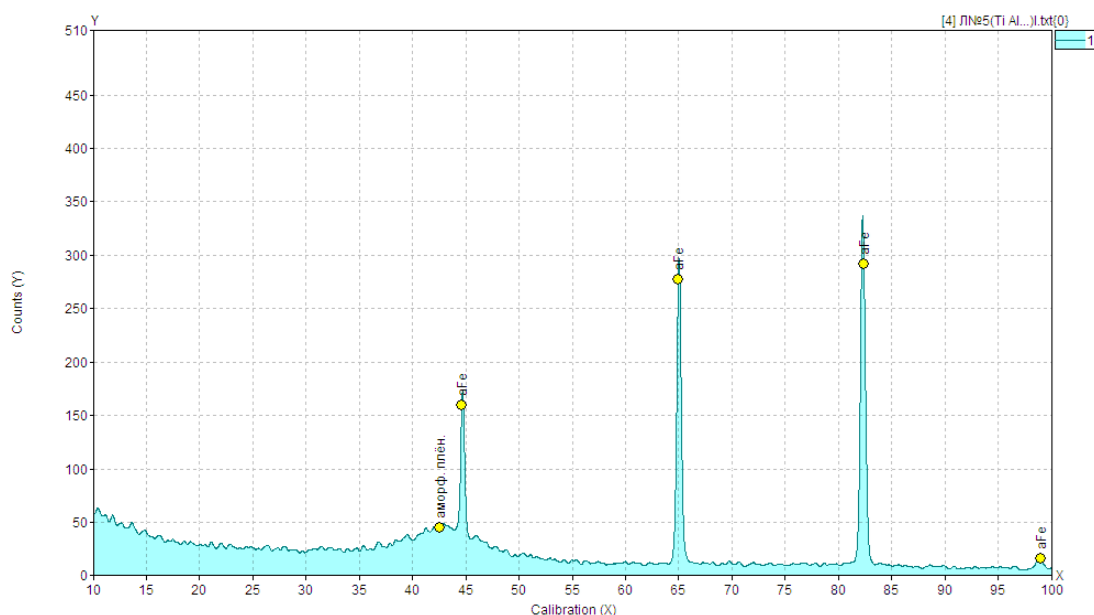


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма оксикарбидных покрытий на основе системы Ti–Al–Cr–Fe–Ni

Рентгеноструктурный анализ оксикарбидных покрытий на основе Ti–Al–Cr–Fe–Ni, сформированных при разрядных токах на титановом и составном катодах $I_{\text{Ti}} = 60$ А, $I_{\text{сост}} = 120$ А, напряжении смещения $U = -80$ В и давлении реакционного газа $P = 0,03$ Па показал, что для покрытия характерна рентгеноаморфная структура (рис. 1). Такая структура покрытия может быть следствием искажения его решетки при наличии в его составе элементов с различными атомными радиусами.

Оценка коррозионной стойкости покрытий проводилась на основе снятия поляризационных кривых и определения электрохимических характеристик покрытий на стали AISI 321 в 3%-ном – растворе NaCl. Анализ полученных данных с образцов, осажденных в среде углекислого газа, показал, что присутствие кислорода положительно влияет на коррозионную стойкость сформированных покрытий (см. таблицу и рис. 2).

Электрохимические характеристики стали с покрытиями

Материал	Токи дуги, А		Давление CO_2 , Па	Время осаждения покрытия, мин	Потенциал коррозии $E_{\text{кор}}$, мВ	Ток коррозионного разрушения $I_{\text{кор}} \cdot 10^{-8}$, $\text{А} \cdot \text{см}^{-2}$
	I_{Ti}	$I_{\text{спл}}$				
AISI 321	—	—	—	—	–231	89
TiAlNiFeCr + CO_2	80	120	0,25	30	–262	1,36
TiAlNiFeCr + CO_2			0,03		–4,67	4,14

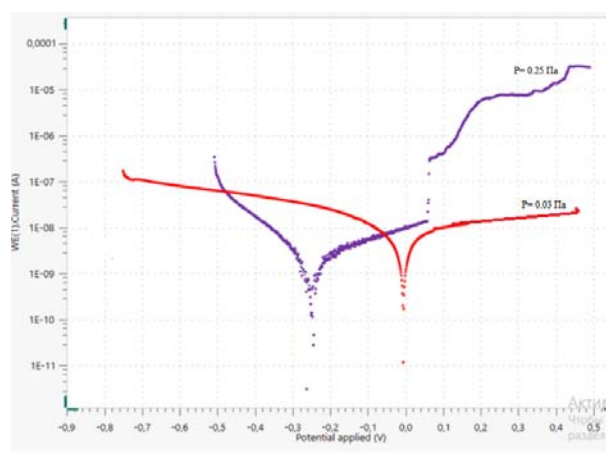


Рис. 2. Поляризационные кривые покрытий на основе (Al, Ti, Fe, Cr, Ni) сформированных при различном давлении реакционного газа

Установлено, что лучшей устойчивостью к коррозионному разрушению обладают покрытия, сформированные при более высоком давлении реакционного газа ($P_{\text{CO}_2} = 0,25 \text{ Па}$), о чем свидетельствует более низкое значение тока анодного растворения ($I_{\text{кор}} = 1,36 \cdot 10^{-8} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$). Однако поляризационная кривая для образца, осажденного при $P = 0,03 \text{ Па}$, отличается более широкой зоной пассивного состояния.

Л и т е р а т у р а

1. Synthesis of Al-Ti-Fe-Cr-Ni-N protective coatings by the method of vacuum-arc deposition from a separated vacuum flow / S. Latushkina, O. Posylkina, D. Kuis [et al.] // Materials Letters. – 2021. – Vol. 303. – P. 130527.
2. Многоэлементные покрытия (Zr-Ti-Al-Nb-Y)N, полученные вакуумно-дуговым осаждением / И. Н. Торьяник, В. М. Береснев, У. С. Немченко [и др.] // Физическая инженерия поверхности. – 2013. – Т. 11, № 4. – С. 420–426.

УДК 621.891

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С УПРОЧНЕННОЙ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТЬЮ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Т. В. Атвиновская, И. И. Злотников

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Проведен анализ влияния жидких сред на особенности трения деталей из алюминиевых сплавов с нанесенным на них методом микродугового оксидирования оксидно-керамическим покрытием.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, нефтедобывающая промышленность, оксидирование, покрытие, трение, коррозионная стойкость, упрочнение.

PERFORMANCE OF PARTS MADE OF ALUMINUM ALLOYS WITH A SURFACE HARDENED BY MICRO-ARC OXIDATION IN FRICTION UNITS OF OIL FIELD EQUIPMENT

T. V. Atvinovskaya, I. I. Zlotnikov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

An analysis of the influence of liquid media on the friction characteristics of aluminum alloy parts coated with an oxide-ceramic coating using the MAO method was conducted.

Keywords: aluminum alloys, oil industry, oxidation, coating, friction, corrosion resistance, hardening.

Одной из областей, где интенсивно применяются алюминиевые сплавы, является нефтедобывающая промышленность, что связано с их высокой коррозионной стойкостью, особенно при добыче нефти в условиях воздействия агрессивных сред. Кроме того, такие детали позволяют снизить вес насосно-компрессорного оборудования, например, погружных многоступенчатых насосов, вследствие чего снижаются затраты на проведение спускоподъемных операций. Но применение изделий из алюминиевых сплавов тормозится низкой износостойкостью их рабочих поверхностей вследствие действия нагрузок при проведении операций по сборке, разборке и эксплуатации нефтепромыслового оборудования. Применение технологии микродугового оксидирования (МДО) позволяет получать на деталях из алюминиевых сплавов керамические покрытия, обладающие высокой механической прочностью и износостойкостью [1]. Однако недостатком МДО-покрытий при их использовании в узлах трения является высокий коэффициент трения, так как оксиды алюминия являются абразивными материалами. Известны попытки снижения коэффициента трения таких покрытий введением в керамическую матрицу антифрикционных частиц (графит, фуллерены и др.) [2], а также пропиткой полимерами [3]. Но все эти покрытия не нашли широкого применения в промышленности. Поэтому перспективным представляется использование деталей с нанесенным МДО-покрытием в узлах трения, функционирующих в условиях смазки жидкой средой, в которой они работают. К таким узлам трения относятся элементы насосно-компрессорного оборудования, применяемого в нефтепромысловой отрасли (запорная арматура, детали центробежных, лопастных, шибберных и других насосов, некоторые резьбовые соединения).

Цель работы – изучение влияния жидких сред на особенности трения деталей из алюминиевых сплавов с нанесенным на них методом МДО оксидно-керамическим покрытием.

В качестве образцов использовали алюминиевую фольгу марки АД1 толщиной 100 мкм, из которой изготавливали прямоугольные электроды размером 10 x 80 мм. Такие же покрытия наносили на поверхность роликов диаметром 30 мм и шириной 25 мм из сплава марки АМг6. На основе ранее проведенных исследований [4], в качестве электролита для МДО использовали раствор, содержащий натриевое жидкое стекло – 13 г/л и гидроксид калия – 2,5 г/л. Процесс МДО проводили в симметричном анодно-катодном режиме с использованием переменного тока частотой 50 Гц при постоянной плотности тока равной 6 А/дм², которую поддерживали, повышая в ручном режиме напряжение по мере роста толщины покрытия, начиная с нескольких вольт до конечного напряжения 400 В. Для испытаний на трение применяли лабораторную установку, схема узла трения которой приведена на рис. 1 [3].

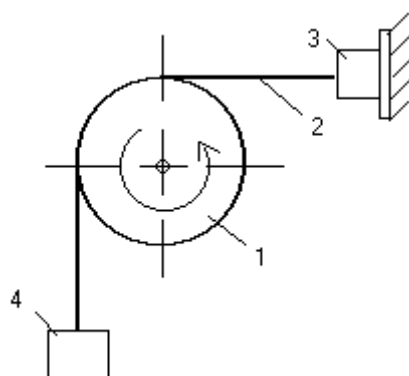


Рис. 1. Схема узла трения установки:
1 – вращающийся ролик; 2 – алюминиевая фольга; 3 – динамометр; 4 – груз

По данной методике фольга с исследуемым покрытием скользит с заданной нагрузкой и скоростью по вращающемуся ролику с таким же покрытием. При необходимости смазочная среда подавалась в зону трения капельным методом. Силу натяжения T_0 в сбегавшей ветви задавали с помощью сменных грузов, прикрепленных к нижнему краю фольги. Силу натяжения T в набегающей ветви измеряли с помощью динамометра. Скорость скольжения фольги по ролику задавали частотой вращения ролика. Во всех экспериментах скорость скольжения составляла $v = 0,1$ м/с (частота вращения ролика $\omega = 1,1$ об/с). Для расчета коэффициента трения f использовали формулу Эйлера: $T = T_0 e^{fa}$. В применяемой установке угол охвата ролика фольгой $\alpha = \pi/2$, поэтому коэффициент трения $f = \frac{2}{\pi} \ln \frac{T}{T_0}$.

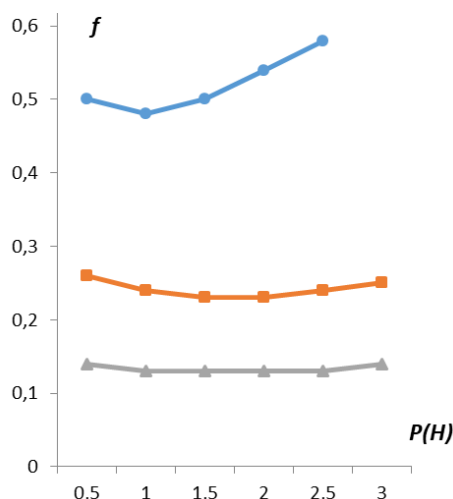


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения f от нагрузки P при смазывании различными средами:
1 – воздух; 2 – вода; 3 – минеральное масло И-20

На рис. 2 приведены результаты испытаний покрытий. Как следует из этих данных, коэффициент трения покрытий на воздухе имеет высокое значение, с ростом нагрузки увеличивается, а при нагрузке более 2,5 Н начинается разрушение покры-

тий. При смазывании водой коэффициент трения в 2 раза меньше, имеет тенденцию к снижению, а при нагрузке более 2,5 Н немного повышается. Последнее вероятно связано с затруднением проникновения воды в зону трения при повышении нагрузки. При трении со смазкой минеральным маслом И-20 коэффициент трения становится еще меньше, быстро снижается и стабилизируется на уровне около 0,12. Повышения коэффициента трения с ростом нагрузки не наблюдается, что можно объяснить высокой проникающей способностью масла по сравнению с водой (краевой угол смачивания покрытия водой $\theta = 60^\circ$, а маслом $\theta = 20^\circ$).

Таким образом, детали из алюминиевых сплавов с оксидно-керамическим покрытием, полученным методом МДО, могут успешно применяться в узлах трения, характеризующихся невысокими контактными давлениями и скоростями скольжения и работающими в устройствах, где их смазывание обеспечивается жидкой средой, в которой они эксплуатируются. При этом очень высокая коррозионная стойкость оксидно-керамических покрытий обеспечивает защиту таких узлов трения от воздействия агрессивных сред.

Литература

1. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов : в 2 т. / под ред. И. В. Суминова. – М. : Техносфера, 2011. – Т. 2. – 511 с.
2. Особенности формирования износостойких слоев на поверхности модифицированного фуллеренами МДО-покрытия при трении / П. А. Витязь, А. И. Комаров, В. И. Комарова, Т. А. Кузнецова // Трение и износ. – 2011. – Т. 32, № 4. – С. 313–325.
3. Злотников, И. И. Повышение антифрикционных свойств керамических покрытий, полученных методом МДО на алюминиевых сплавах / И. И. Злотников, В. М. Шаповалов // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 5. – С. 128–131.
4. Злотников, И. И. Исследование свойств модифицированных керамических покрытий, получаемых методом микроплазменного анодирования на поверхности алюминия / И. И. Злотников, О. И. Проневич, А. П. Сологубов // Вестник Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – 2019. – № 1. – С. 35–40.

УДК 620.178

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЦЕМЕНТАЦИИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ 18ХГТ, 20ХН3А И 16CrMnS5

Е. П. Поздняков¹, И. Н. Степанкин², А. Д. Левкина¹,
Д. В. Куйс³, С. Н. Лежнев⁴

¹ Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

² ЭлитПартнер, г. Минск, Республика Беларусь

³ Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск

⁴ Рудненский индустриальный институт, Республика Казахстан

Проведены испытания на контактную усталость в условиях воздействия пульсирующих напряжений величиной 1100 МПа.

Ключевые слова: цементация, повышение твердости, микротвердость поверхности, износостойкость.

THE INFLUENCE OF CEMENTATION DURATION ON THE WEAR RESISTANCE OF 18XГТ, 20ХН3А, AND 16CrMnS5 STRUCTURAL STEELS

E. P. Pozdnyakov¹, I. N. Stepankin², A. D. Levkina¹,
D. V. Kuis³, S. N. Lezhnev⁴

¹*Sukhoi Gomel State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

²*ElitePartner, Minsk, the Republic of Belarus*

³*Belarusian State Technological University, Minsk, the Republic of Belarus*

⁴*Rudny Industrial Institute, the Republic Kazakhstan*

Contact fatigue tests were conducted under pulsating stresses of 1100 MPa.

Keywords: carburization, hardness enhancement, surface microhardness, wear resistance.

Для изготовления широкой номенклатуры деталей машин и инструментальной оснастки применяются цементуемые конструкционные стали 20Х, 18ХГТ, 15ХФ, 20ХН3А и др. Применение цементации низкоуглеродистых сталей обусловлено повышением твердости материала, которая определяет его прочность и износостойкость. Но так как детали могут работать при различных условиях – знакопеременных или пульсирующих нагрузках, трения скольжения или качения, – поэтому помимо твердости материала необходимо учитывать морфологию структурно-фазовых составляющих, их размер и соотношение. В нашей стране изготавливается сталь 16CrMnS5 в соответствии с DIN EN 10084, однако ее свойства мало изучены. Целью данной работы являлось установление влияния длительности цементации на структурообразование и свойства сталей 18ХГТ, 20ХН3А и 16CrMnS5.

Диффузионное упрочнение образцов заключалось в проведении цементации в течение 8 и 12 часов при температуре 920 °С с последующей закалкой в масле с температуры 860 °С и низким отпускком при температуре 200 °С в течение 1 часа.

Микроструктура поверхностных науглероженных слоев всех сталей представляет собой мартенситно-аустенитную матрицу с присутствием карбидов. Как известно [1], никель провоцирует диффузию углерода при цементации непосредственно в аустенитное зерно с последующим выделением мелкодисперсных карбидов при отпуске. Его повышенное содержание в стали 20ХН3А поспособствовало формированию оптимальной морфологии карбидной фазы [2], чем в хромо-марганцовистых сталях (см. таблицу).

Наибольшая микротвердость поверхности на уровне 8,0–8,4 ГПа отмечена у слоев стали 18ХГТ. Дополнительное легирование титаном способствует снижению углерода в перлите, что приводит к интенсификации диффузии углерода в поверхность и формированию развитой карбидной фазы, обладающей высокой твердостью.

Показатели науглероженных слоев конструкционных сталей

Показатель		Марка стали					
		18ХГТ		20ХН3А		16CrMnS5	
		Длительность цементации, часов					
		8	12	8	12	8	12
Микротвердость, ГПа	Поверхности	8,0	8,4	8,0	8,0	7,1	7,5
	Сердцевины	4,5	4,5	4,3	4,3	3,8	4,2

Показатель	Марка стали					
	18ХГТ		20ХН3А		16CrMnS5	
	Длительность цементации, часов					
	8	12	8	12	8	12
Эффективная толщина слоя, мм	1,4	1,6	1,3	1,5	1,3	1,5
Объемная доля карбидной фазы, %	35	50	5	5	18	26
Максимальный размер включений, мкм	20	30	3	10	40	50
Наработка, тыс. циклов	19,36	18,28	21,52	25,84	24,76	31,24

Испытания на контактную усталость в условиях воздействия пульсирующих напряжений величиной 1100 МПа проводились на оригинальной установке [3]. На рис. 1 приведены зависимости изнашивания слоев исследуемых сталей. У всех испытанных слоев имеется начальный этап, характеризующийся приработкой поверхностей образцов с контртелом. Его длительность во всех случаях составила около 1000 циклов нагружения. На этой стадии происходит пластическая деформация упрочненного сплава. При увеличении количества циклов нагружения в деформированных объемах материала образуются зоны наклепа, зарождаются и распространяются трещины контактной усталости, приводящие к отслаиванию объемов деформированного сплава (питтингообразованию). Появление питтингов на контактной поверхности образца провоцирует уменьшение ее удельной площади и увеличение действующих напряжений. Установлено, что наибольшей износостойкостью обладает слой стали 16CrMnS5, подвергнутый 12-часовому насыщению. Его наработка, при достижении глубины лунки износа 0,6 мм, составила 31,24 тыс. циклов нагружения.

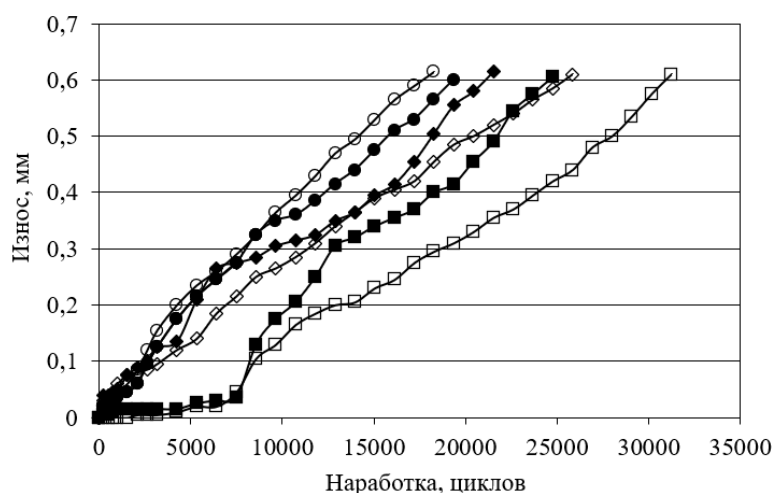


Рис. 1. Зависимости износа от числа циклов нагружения цементованных слоев стали 18ХГТ (●, ○), 16CrMnS5 (■, □) и 20ХН3А (◆, ◇) при амплитуде напряжений 1100 МПа, (●, ■, ◆) – 8-часовая цементация; (○, □, ◇) – 12-часовая цементация

Следует отметить наличие этапа высокой износостойкости у слоев стали 16CrMnS5. Его длительность составила 7500 циклов нагружения при достижении

глубины лунки износа 0,05 мм. Наличие данного этапа особенно важно при изготовлении прецизионных и мелкоразмерных деталей машин и инструментальной оснастки. На данном этапе происходит предельное накопление трещин контактной усталости, что способствует увеличению скорости изнашивания слоев.

В результате проведенных испытаний установлено, что несмотря на наличие крупных вторичных карбидов размером 40–50 мкм и пониженной микротвердости поверхности цементованные слои стали 16CrMnS5 обладают повышенной износостойкостью по отношению к аналогичным слоям сталей 18ХГТ и 20ХН3А.

Литература

1. Ворошнин, Л. Г. Теория и технология химико-термической обработки : учеб. пособие / Л. Г. Ворошнин, О. Л. Менделеева, В. А. Сметкин. – М. : Новое знание ; Минск : Новое знание, 2010. – 304 с.
2. Поздняков, Е. П. Влияние длительности цементации на структуру и свойства конструкционных среднеуглеродистых сталей 40Х, 35ХГСА и 42CrMoS4 / Е. П. Поздняков, И. Н. Степанкин // Литье и металлургия. – 2024. – № 1. – С. 69–77.
3. Полезная модель ВУ 8260. Устройство для испытания на контактную усталость и износ / И. Н. Степанкин, И. А. Панкратов, В. М. Кенько, Е. П. Поздняков, Степанкина Л. В. ; опубл. 30.06.2012.

УДК 621.793

МОДЕРНИЗАЦИЯ ГАЗОВОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНАРНОГО МАГНЕТРОНА

В. М. Комаровская¹, О. И. Терещук², А. Г. Артемчик¹

¹Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск

²ООО «Изовак», г. Минск, Республика Беларусь

Проведено физико-математическое моделирование распределения газового потока по объему вакуумной камеры при использовании линейного коллектора для подвода рабочего газа к стандартному планарному магнетрону, используя среду COMSOL Multiphysics.

Ключевые слова: покрытие, магнетронный метод, вакуумная камера, плотность газового потока.

MODERNIZATION OF THE GAS SYSTEM OF A PLANAR MAGNETRON

V. M. Komarovskaya¹, O. I. Tereshchuk², A. G. Artemchik¹

¹Physicotechnical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

²ООО Izovak, Minsk, the Republic of Belarus

Physical and mathematical modeling of gas flow distribution across the vacuum chamber volume was performed using a linear manifold to supply the working gas to a standard planar magnetron using the COMSOL Multiphysics environment.

Keywords: coating, magnetron method, vacuum chamber, gas flow density.

Как известно из практики, одной из основных задач при нанесении покрытий магнетронным методом остается снижение неравномерности толщины покрытия по

всей поверхности изделия. Одним из ключевых факторов, влияющих на равномерность формируемых покрытий методом магнетронного распыления, является конструкция системы газоподачи магнетронной распылительной системы (МРС). Правильно сконструированная система газоподачи к МРС позволяет снизить неравномерность распределения плотности атомов рабочего газа на поверхности мишени и значительно уменьшить градиент плотности по площади, т. е. повысить равномерность толщины получаемых покрытий.

На практике наиболее распространенными являются три способа подвода газа к мишени магнетрона [1, 2]:

- подача газа непосредственно в объем камеры;
- подача газа в магнетрон с использованием линейного коллектора;
- подача газа в магнетрон с использованием бинарного газораспределителя.

Основным недостатком первых двух способов подачи газа является неудовлетворительное соотношение между однородностью потока газа и постоянной времени (отклик на управление). Решить данную проблему возможно за счет системы бинарного газораспределителя.

Для подтверждения выдвинутого предположения авторы данной работы провели физико-математическое моделирование распределения газового потока по объему вакуумной камеры при использовании линейного коллектора для подвода рабочего газа к стандартному планарному магнетрону, используя среду COMSOL Multiphysics. Для расчетов использовались следующие входные данные: рабочий газ – аргон; поток рабочего газа 200 сссм; скорость откачки высоковакуумного диффузионного насоса 5000 л/с; диаметр выходного отверстия впускного патрубка 4,2 мм. Результаты моделирования приведены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 представлено распределение плотности газа в единицу объема внутри вакуумной камеры. Анализ данных, полученных в результате моделирования, позволяет сделать вывод о неравномерности распространения газового потока по объему камеры.

В результате моделирования установлено, что в рассматриваемом планарном магнетроне с прямоугольной мишенью градиент плотности газового потока над поверхностью мишени колеблется снизу вверх в пределах 10,5 % (рис. 2), что может приводить к получению неравномерных по толщине покрытий.

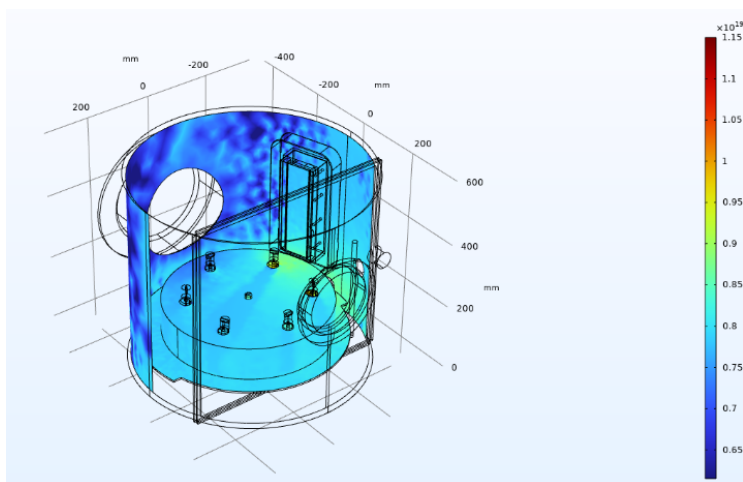


Рис. 1. Плотность рабочего газа в объеме вакуумной камеры, $1/\text{м}^3$

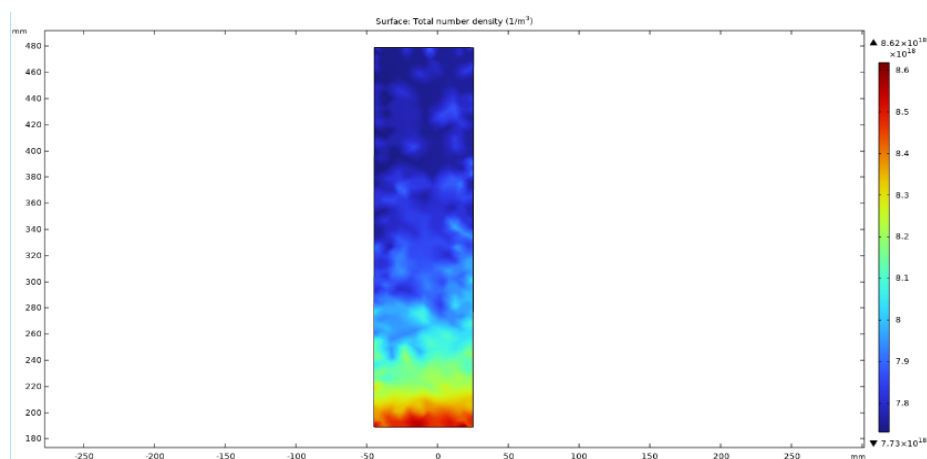


Рис. 2. Градиент плотности газового потока по поверхности мишени магнетрона

Полученные результаты моделирования указывают на необходимость модернизации системы газораспределения рассматриваемой конструкции планарного магнетрона. Для увеличения однородности распределения рабочих газов около поверхности мишени магнетрона предлагается использовать систему бинарных газораспределительных каналов (рис. 3).

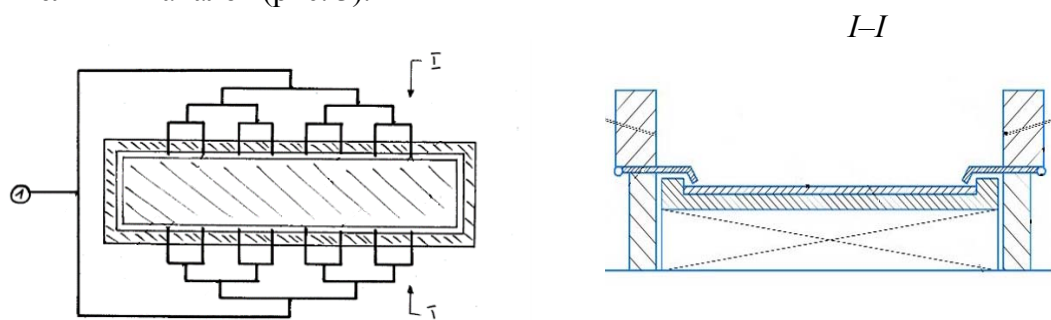


Рис. 3. Схема реализации бинарного газораспределительного устройства

Такая конструкция системы газораспределения гарантирует, что каждое выпускное отверстие имеет одинаковый коэффициент сопротивления и, таким образом, через каждое выпускное отверстие в единицу времени проходит одинаковое количество газа. Для предложенной схемы будет проведено физико-математическое моделирование, что позволит разработать газовую станцию с учетом предложенной модернизации системы газораспределения магнетрона.

Литература

1. Milde, F. Gas inlet systems for large area linear magnetron sputtering sources / F. Milde, G. Teschner, C. May // 44th Annual Technical Conference Proceedings – Philadelphia, April 21–26, 2001 / Society of Vacuum Coaters, 2001. – С. 204–209.
2. Берлин, Е. В. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением / Е. В. Берлин, Л. А. Сейдман. – М. : Техносфера, 2014. – 256 с.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.785

НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМ ЧПУ ДЛЯ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ

А. И. Костенко

ООО «Балт-Систем», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Приведены современные конструкции систем управления станками с ЧПУ, а также представлены схемы обработки.

Ключевые слова: станки с ЧПУ, системы управления, функциональные возможности.

NEW FUNCTIONAL CAPABILITIES OF CNC SYSTEMS FOR MACHINE TOOLS AND ROBOTIC COMPLEXES

A. I. Kostenko

Balt-System LLC, St. Petersburg, the Russian Federation

This article presents modern designs of CNC machine control systems and machining diagrams.

Keywords: CNC machines, control systems, functional capabilities.

Технический прогресс невозможен без применения современных средств производства. Уже нельзя сложные изделия выполнять на старом оборудовании и с его возможностями. Все более для повышения качества и точности в производстве в небытие уходит влияние человеческого фактора.



Рис. 1. Структура систем управления

Это переход к новым возможностям производства, предполагающий внедрение многозадачности и многофункциональности к оборудованию, которое можно решить только с помощью УЧПУ, причем без УЧПУ невозможно научно техническое развитие в любых отраслях промышленности.

Новые функции программного обеспечения:

1. Режим обучения (Teach In).
2. Компенсация прогиба оси (ось в ось).

- презү.



Рис. 2. 5-осевое преобразование

6-осевая обработка на станках ИР-1250 (оси XYZWB+S), Россия.

Установлены:

– УЧПУ NC-110

– привода подач BSD.

Добавлен:

– поворотный-качающийся стол (оси АС) с возможностью токарной обработки.

Результат:

– 6-осевая обработка с 6-осевой трансформацией.



Рис. 3. Рабочие зоны

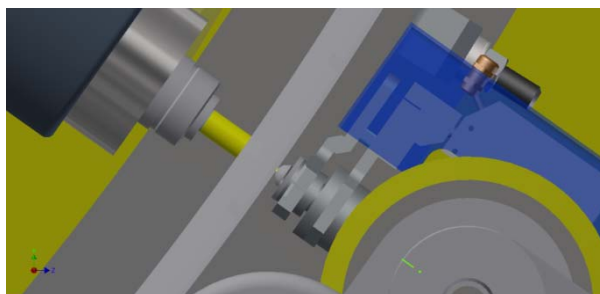


Рис. 4. Решения по адаптивному контролю:
зеркальное копирование; прямое копирование

Обновлена линейка УЧПУ серии NC-400:

- расширенные аппаратные и программные возможности;
- оконный интерфейс с возможностью создавать пользовательские «ОКНА»;
- возможность работы с линейными приводами;
- циклы измерения для всех видов станочного оборудования;
- переключение между режимами контроля оси по ДОС и по напряжению на АЦП;
- НМИ-Интерфейс;
- циклы визуального программирования.

Адаптивные технологии

В настоящее время все более широко применяются адаптивные системы управления с целью оптимизации:

- процессов обработки;
- различных материалов;
- с помощью баз данных;
- роботы и автоматизированные линии.

Автоматическая регистрация с уровнями доступа работников на станках

- оператор;
- технолог;
- наладчик;
- администратор.

Автоматическое получение задания (в том числе и через штрих-код):

- на изготовление детали;
- технического процесса;

- привязка инструмента после обработки на измерительной машине;
- выбор альтернативного станка в случае неисправности;
- прочее.

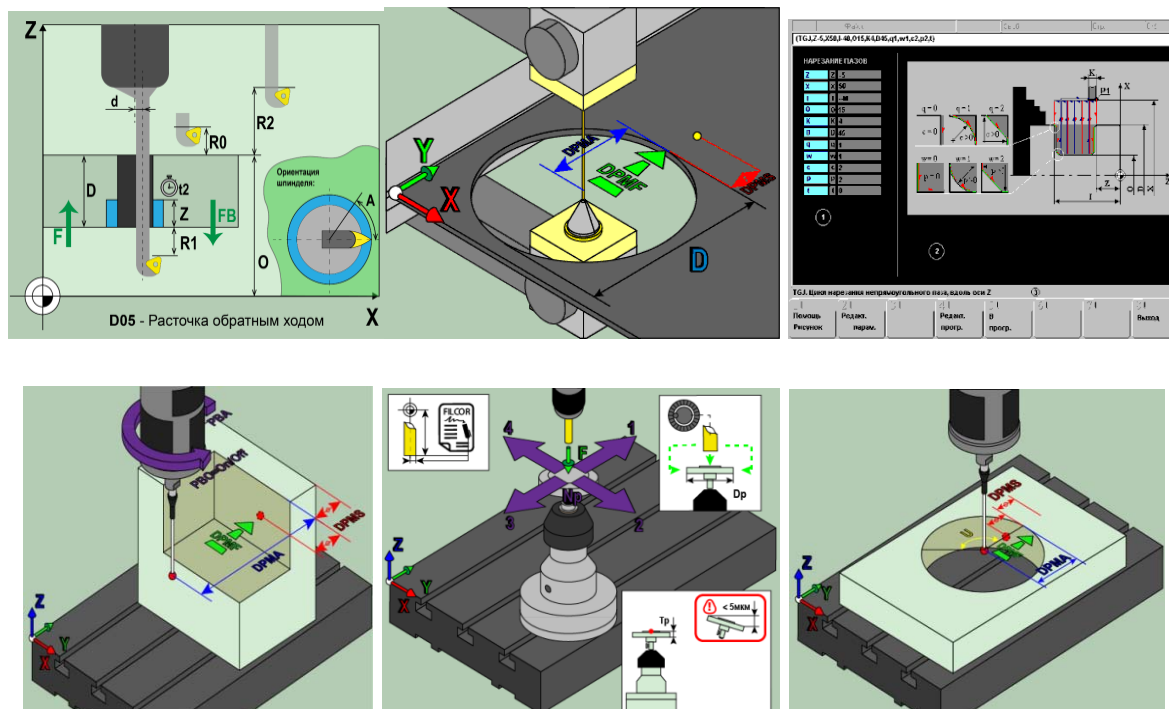


Рис. 5. Технологические циклы

Во всех этих случаях УЧПУ является не только основным исполнительным элементом в этой цепочке, но и элементом, принимающим значительные интеллектуальные решения в управлении производством.

Переход к новым возможностям производства достигается за счет наличия в системе ЧПУ новых функций, а также возможность интеграции УЧПУ с системами управления и подготовки производства (1С:MES, CAD/CAM, ERP системы и др.).

Планирование производства

- Управление портфелем и структурой заказов;
- Формирование маршрутных карт производства;
- Расчет производственного графика;
- Оперативное, внутрицеховое планирование расписания.
- Учет ремонта производственного оборудования.
- Расчет себестоимости продукции и заработной платы персонала.

Системы оперативного мониторинга станков с ЧПУ Балт-Систем

Настраиваемая структура автоматической регистрации машинных данных по работе технологического оборудования с автоматическим созданием файлов мониторинга на диск УЧПУ и/или на удаленном сервере в режиме реального времени, позволяющего осуществить:

- контроль и фиксацию нарушения технологии изготовления деталей;
- контроль загрузки оборудования;
- контроль и классификацию простоев оборудования;
- контроль трудовой дисциплины операторов;

- оповещение ответственных работников о нештатных ситуациях;
- оценка реальных потерь рабочего времени;
- выявление узких мест в технологических цепочках;
- оптимизация графика работы персонала;
- отказ от закупки дополнительного оборудования.



Рис. 6. Система мониторинга оборудования

Подавление механического резонанса на узлах

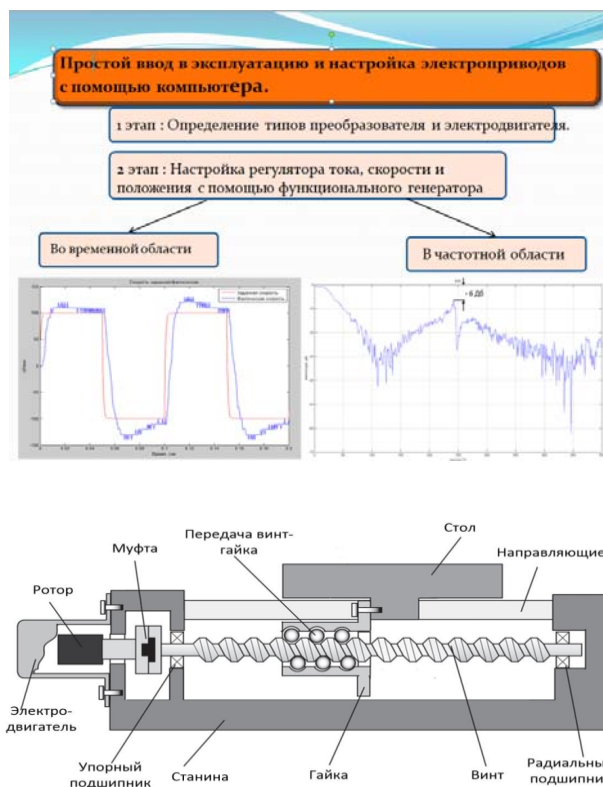


Рис. 7. Структура формирования механического резонанса в приводе подачи

Выводы о Absolute Multiline Technology:

- Не имеющее аналогов в мире, основанное на абсолютном измерении расстояний, решение, позволяющее развернуть на предприятии метрологическую сеть, соответствующую принципам Индустрии 4.0.
- Основа для организации самоконтроля состояния оборудования.
- Широчайшие возможности для метрологии в области физики и точного машиностроения.
- Абсолютные измерительные способности, прецизионность, многоканальность, простота датчиков делают эту технологию уникальной.
- Технология применима для широкого спектра производственных и научных задач.
- Идеально подходит для мониторинга и измерений в вакууме и криогенной среде.

Проблемы

- Низкий уровень квалификации специалистов на предприятиях.
- Корпоративная политика предприятий, ориентированная на закупку импортного оборудования.
- Разрыв технических связей Заказчика с производителями отечественной продукции.
- Формирование технических заданий на поставку оборудования на предприятия с искусственными фильтрами, не позволяющими участвовать отечественным производителям.
- Технологическая зависимость предприятий от импортных поставщиков за счет внедрения CAD/CAM-систем с постпроцессорами, ориентированными на зарубежные УЧПУ

- Подготовка кадров.

Наши преимущества

Программная часть:

- работа в реальном времени;
- обратная связь в исходных текстах и под конкретные задачи;
- быстродействие тика менее 60 нС (дает большой запас времени для вспомогательных задач);
- конкретное математическое обеспечение 2 Мб (возможность экономии по памяти и работа, в том числе с CPU низкой производительности);
- возможность шифрования;
- защищенность программного обеспечения.

Аппаратная часть:

- собственный таймер для квитиования операционной системы;
- всего 1 CPU решает все задачи (себестоимость, не нужна синхронизация);
- невозможность остановить CPU из вне ФСТЭК (DBU:).

По результатам работы с ФСТЭК по наличию уязвимостей встроенного программного обеспечения систем ЧПУ серии NC.

УДК 621.785

**ЗУБО-, ШЛИЦЕ-, РЕЗЬБОШЛИФОВАЛЬНЫЙ МОДУЛЬНЫЙ
СТАНОК С ЕДИНОЙ БАЗОЙ ПРОИЗВОДСТВА ОАО «ВИСТАН»****К. О. Самсонов***ОАО «ВИСТАН», г. Витебск, Республика Беларусь**Представлены зубо-, шлице-, резьбошлифовальные станки с единой базой.*

Ключевые слова: станки модульные, зубо-, шлице-, резьбошлифовальные, технические характеристики.

**MODULAR GEAR, SPLINE, AND THREAD GRINDING MACHINE
WITH A SINGLE BASE, PRODUCED BY VISTAN OJSC****К. О. Samsonov***VISTAN OJSC, Vitebsk, the Republic of Belarus**This article presents gear, spline, and thread grinding machines with a single base.*

Keywords: modular machines, gear, spline, and thread grinding machines, technical specifications.

Группа зубо-, шлице-, резьбошлифовальных станков с единой базой представлена на рис. 1.

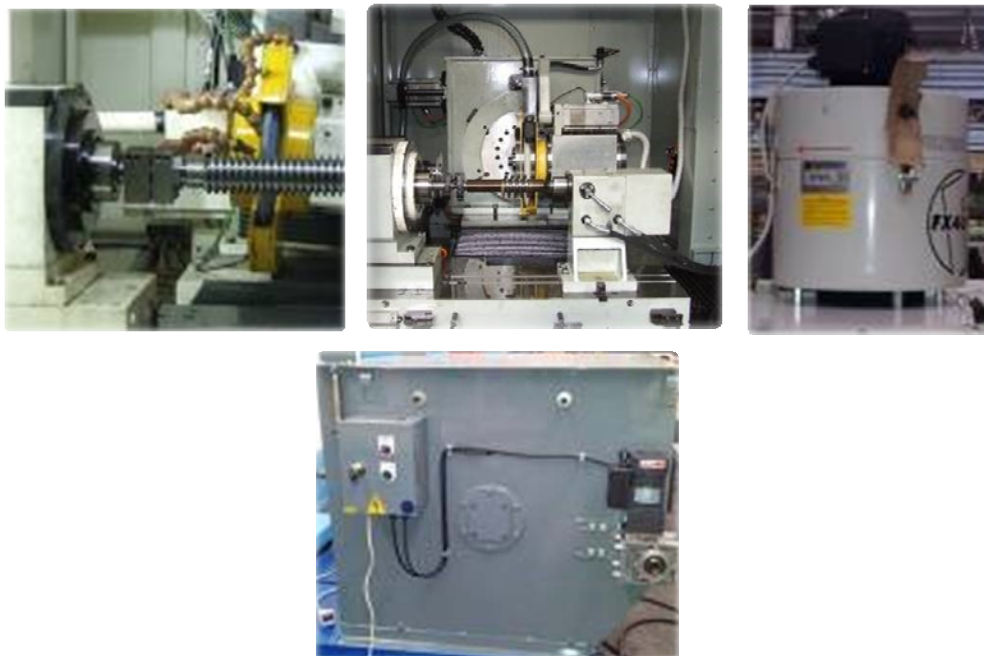


Рис. 1. Станки с единой базой

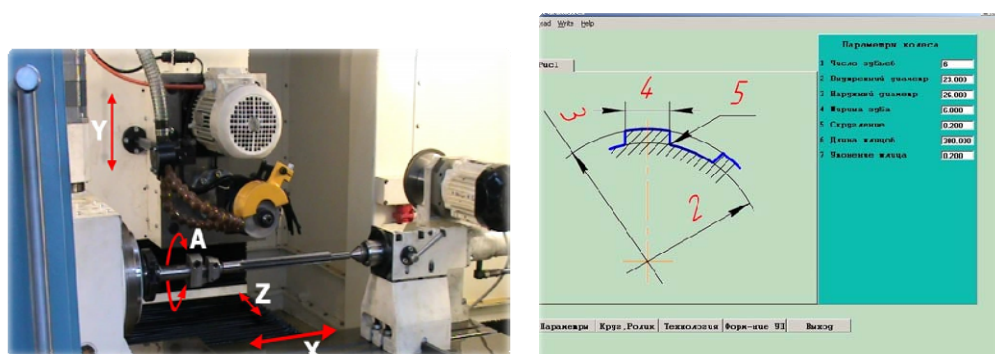


Рис. 2. Шлицешлифовальный полуавтомат

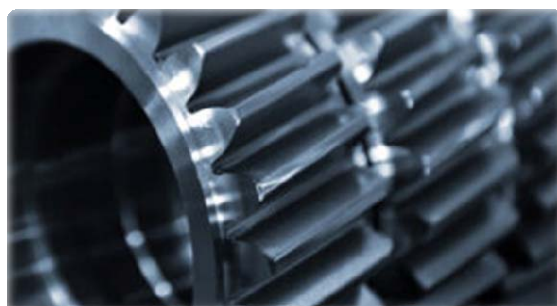
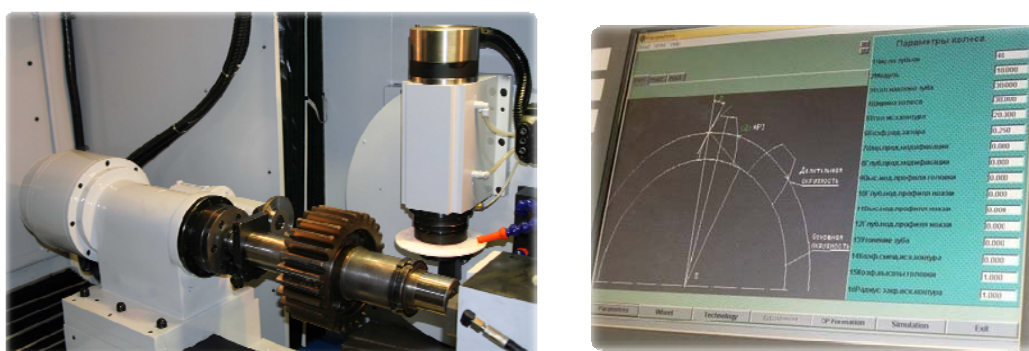


Рис. 3. Зубошлифовальный полуавтомат

Техническая характеристика станка

Основные технические характеристики станка	
Наибольшие размеры устанавливаемой заготовки:	
длина, мм	600
диаметр, мм	250
Размеры обрабатываемых поверхностей:	
наибольшая длина, мм	400
наибольший диаметр, мм	200

Окончание

Основные технические характеристики станка	
наименьший диаметр, мм	10
Наибольший модуль/высота паза, мм	1–6/2–15
Максимальная масса обрабатываемой детали, кг	150
Размеры устанавливаемого шлифовального круга:	
наибольший диаметр, мм	100*
наименьший диаметр, мм	70*
Частота вращения шлифовального круга, мин ⁻¹	4000–8000*
Количество управляемых осей	4
Наибольшие рабочие перемещения:	
ось X, мм	600
ось Y, мм	300
ось Z, мм	300
ось A, град.	Не ограничен
Наибольшие скорости перемещения рабочих органов:	
ось X, м/мин	10
ось Y, м/мин	5
ось Z, м/мин	5
ось A, об/мин	30
Дискретность задания перемещений по осям координат:	
линейных, мм	0,001
круговой, град.	0,001
Шероховатость обрабатываемой поверхности шлица	Ra 0,80
Мощность электродвигателя главного движения, кВт	3
Род тока питающей электросети	Переменный 3-фазный
Напряжение, В	380
Частота тока, Гц	50
Габаритные размеры станка L x B x H мм	3000 x 2600 x 2350*
Масса, кг	7500

УДК 621.91

СОВРЕМЕННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СТАНКОВ

А. В. Карпухин

ОАО «Гомельский завод станков и узлов», Республика Беларусь

Представлены конструкции токарных станков с ЧПУ и сверлильных станков с ручным управлением, а также их технические характеристики.

Ключевые слова: металлорежущие станки с числовым программным управлением, токарные, сверлильные, технические характеристики.

MODERN DESIGN AND PRODUCTION OF DOMESTIC MACHINE TOOLS

A. V. Karpukhin

Gomel Machine Tools and Units Plant, the Republic of Belarus

The design of CNC lathes and manually operated drilling machines, as well as their technical characteristics, is presented.

Keywords: CNC metal-cutting machines, turning machines, drilling machines, technical characteristics

На предприятии «Гомельский завод станков и узлов» внедрена система трехмерного моделирования в системе автоматизированного проектирования, позволяющая в оперативном режиме выпускать:

- чертежи изделий;
- схемы;
- спецификации;
- таблицы;
- инструкции;
- расчетно-пояснительные записки;
- технические условия;
- текстовые и прочие документы.

Примеры приведены на рис. 1.

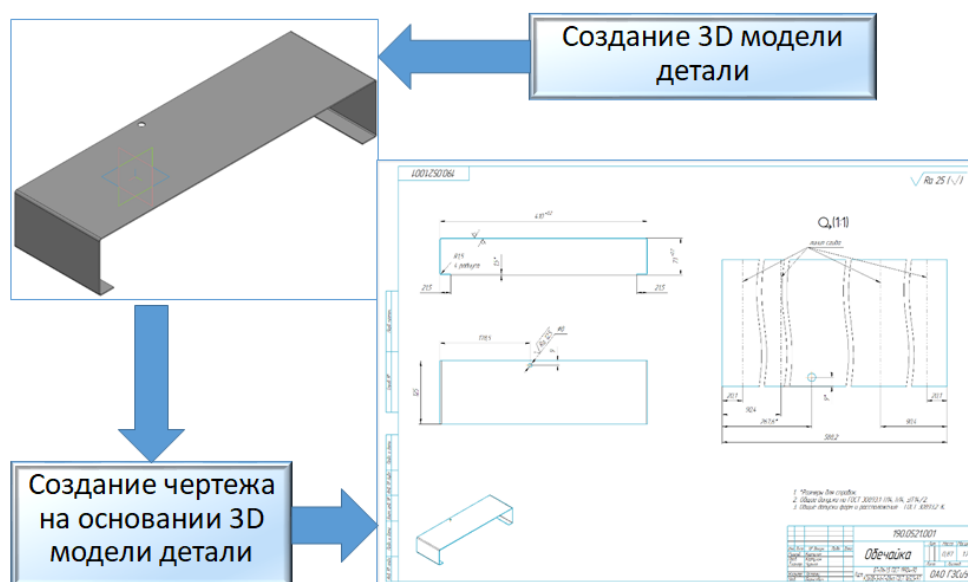


Рис. 1. Примеры автоматизированного проектирования
(1-й фрагмент; окончание см. на с. 100)

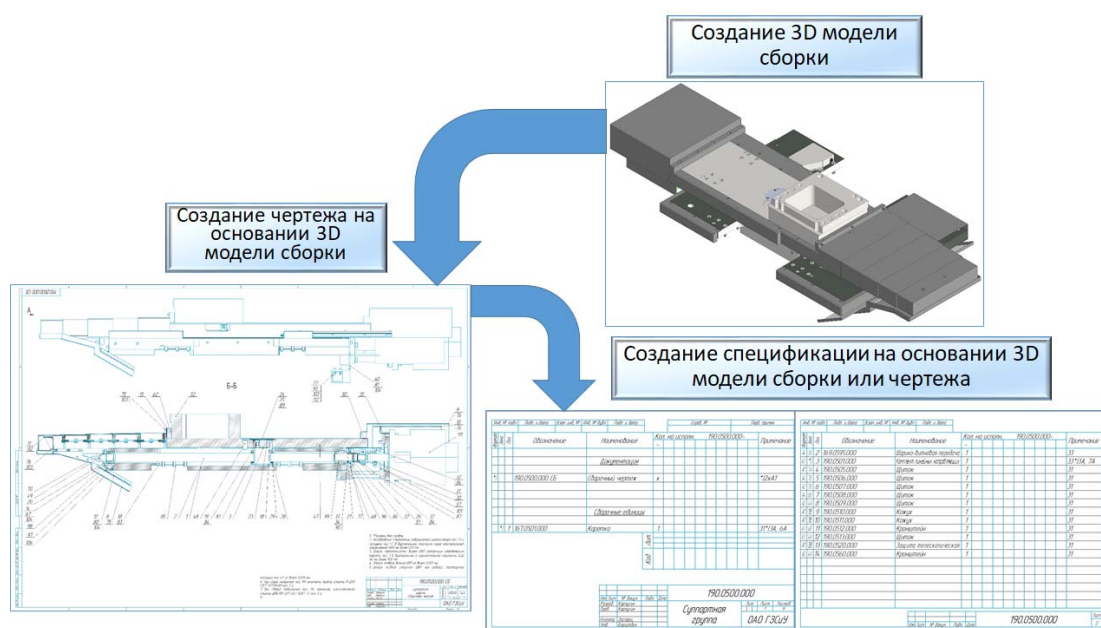


Рис. 1. Окончание (начало см. на с. 99)

На рис. 2 приведен станок, реализованный в рамках проекта «Союзный станок».

Диаметр обработки над станиной	320 мм
Диаметр обработки над суппортом	200 мм
Длина обработки	750 мм
Высота центров	255 мм
Максимальное сечение резца	25x25 мм
Пределы вращения шпинделя	16-2500 об/мин
Суммарная мощность	16,45 кВт



Рис. 2. Станок токарный с ЧПУ модели 16ГС25Ф3С4ГАКТП1

На рис. 3 приведен станок с системой числового программного управления «Серводинамика», а на рис. 4 – его узлы.

Диаметр заготовки устанавливаемый над станиной	840 мм
Диаметр обработки над суппортом	450 мм
Длина обработки	1200 мм
Высота центров	400 мм
Максимальное сечение резца	32x32 мм
Пределы вращения шпинделя	16-1600 об/мин
Суммарная мощность	29,3 кВт



Рис. 3. Станок токарный с ЧПУ модели 16ГС40Ф3С5Г9НАТП1-01

На рис. 5 приведен станок с оперативной системой числового программного управления «ЦИКЛОМАТИК», а на рис. 6 – токарный станок модели ГС1750ФЗС9ГБАВ1R1K1 с основными узлами, приведенными на рис. 7.

3D-модель станка модели ГС1622ФЗС8, для производства ходовых винтов к токарным станкам представлена на рис. 8.

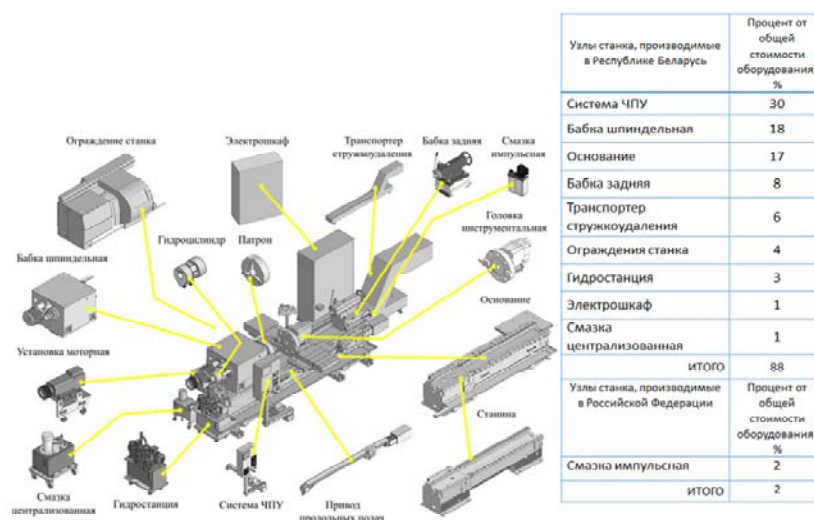


Рис. 4. Узлы станка модели 16ГС40ФЗС5Г9НАТП1-01



Рис. 5. Станок токарный с ЧПУ модели 16ГС40СУ1-01

Диаметр заготовки устанавливаемый над станиной	550 мм
Диаметр обработки над суппортом	340 мм
Длина обработки	450 мм
Высота центров	400 мм
Количество инструментов	12
Максимальное сечение резца	20х20 (25х25) мм
Пределы вращения шпинделя Протившпинделя	20-2500 об/мин



Рис. 6. Станок токарный с ЧПУ модели ГС1750ФЗС9ГБАВ1R1K1

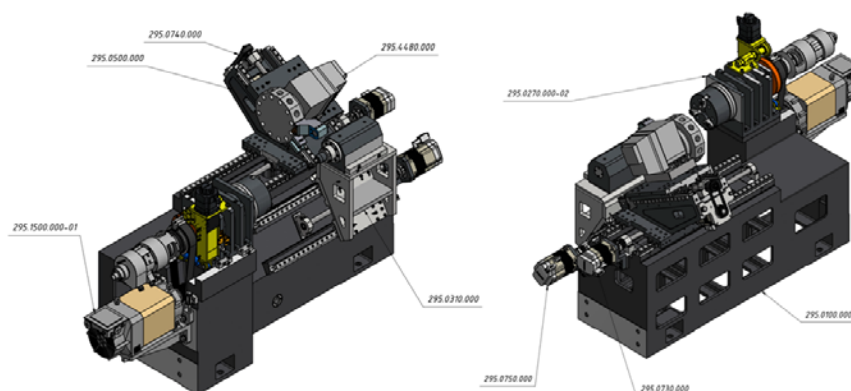


Рис. 7. Основные узлы станка модели GC1750

- Станок предназначен для окончательной нарезки высокоточных винтов диаметром от $\varnothing 20$ до $\varnothing 85$ мм длиной до 2,5 м.
- Станция управления станком на базе устройства числового программного управления, токарная технология, общее количество осей – 3.
- Поддержка циклов нарезания резьбы с графическим интерфейсом.

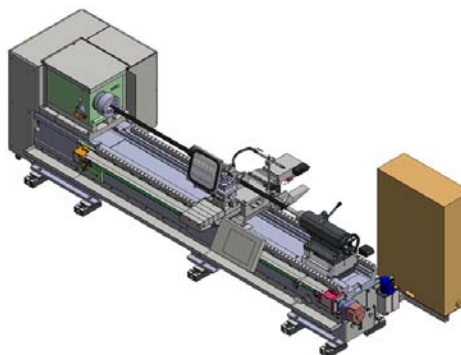


Рис. 8. Специальный токарный станок с ЧПУ модели GC1622Ф3С8

На рис. 9 представлена 3D-модель станка модели 16GC25Ф3СГБ1А(Т)М1П1Б1 с гидравлическим переключением диапазонов скоростей бабки шпиндельной и гидравлическим подводом пиноли задней бабки. Сверлильные станки, производимые на заводе, приведены на рис. 10 и 11.

Диаметр обработки над станиной	320 мм
Диаметр обработки над суппортом	200 мм
Длина обработки	750 мм
Высота центров	255 мм
Максимальное сечение резца	25x25 мм
Пределы вращения шпинделя	16-2500 об/мин
Перемещение пиноли	180 мм
Ход пиноли от гидроцилиндра	50 мм
Суммарная мощность	16,45 кВт

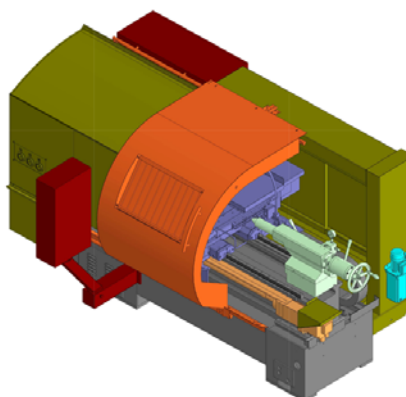


Рис. 9. Станок токарный с ЧПУ модели 16GC25Ф3СГБ1А(Т)М1П1Б1

Наибольший диаметр сверления Сталь/Чугун	55/65 мм
Наибольший диаметр нарезаемой резьбы Сталь/Чугун	M48/M52
Вылет шпинделя	370...1600 мм
Радиус сверления	525...1757 мм
Число ступеней частоты вращения	12
Частоты вращения шпинделя	40...1730 об/мин
Наибольший крутящий момент на шпинделе	710 Нм
Наибольшее усилие подачи шпинделя	20000 Н
Мощность привода главного движения	4 кВт
Размер рабочей поверхности плиты	900 x 1670 мм



Рис. 10. Радиально-сверлильный станок модели 2K550B



Наибольший диаметр сверления Сталь/Чугун	32/36 мм
Наибольший диаметр нарезаемой резьбы	M16
Расстояние от торца шпинделя до стола	0...700 мм
Расстояние от торца шпинделя до плиты	710...1100 мм
Число ступеней частоты вращения	12
Частоты вращения шпинделя	45...2000 об/мин
Наибольший крутящий момент на шпинделе	120 Нм
Наибольшее усилие подачи шпинделя	7000 Н
Мощность привода главного движения	1,5 кВт
Размер рабочего стола	500 x 500 мм
Суммарный угол поворота сверлильной головы вокруг горизонтальной оси	360°



Рис. 11. Станок вертикально-сверлильный модели 2T132

УДК 621.91

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА СОВРЕМЕННОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО И ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА НА ОАО «ОРШАНСКИЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ ЗАВОД»

Д. В. Матюк

ОАО «Оршанский инструментальный завод», Республика Беларусь

Представлены конструкции инструментальной оснастки для станков с ЧПУ, а также система вспомогательного инструмента.

Ключевые слова: инструментальная оснастка, технические характеристики, вспомогательные инструменты.

ORGANIZING THE PRODUCTION OF MODERN METAL-CUTTING AND AUXILIARY TOOLS AT ORSHAN TOOL PLANT, OJSC

D. V. Matyuk

Orsha Tool Plant, the Republic of Belarus

The design of tooling for CNC machine tools, as well as the auxiliary tool system, is presented.

Keywords: tooling, technical characteristics, auxiliary too.

Традиционно завод производит стандартную инструментальную продукцию, которая заслужила свое признание десятки лет назад и до сих пор пользуется огромным спросом. Это обусловлено тем, что большой ряд заводов на территории СНГ использует в своих производственных фондах устаревшее оборудование.

Оршанский инструментальный завод один из немногих производителей, кому удалось сохранить и постоянно поддерживать качество выпускаемого инструмента по ГОСТу.

Для тех металлообрабатывающих производств, которые переоснастили парк оборудования современными станками, мы готовы предложить новейший высокопроизводительный инструмент, выпускаемый по мировым стандартам.



Рис. 1. Режущий инструмент



Рис. 2. Вспомогательный инструмент

Оршанский инструментальный завод обеспечивает комплексное оснащение станков токарной, расточной, фрезерной и сверлильной группы.



Рис. 3. Комплексное оснащение станков

Техническая база для производства нового инструмента на ОАО «Оршанский инструментальный завод» представлена на рис. 4.

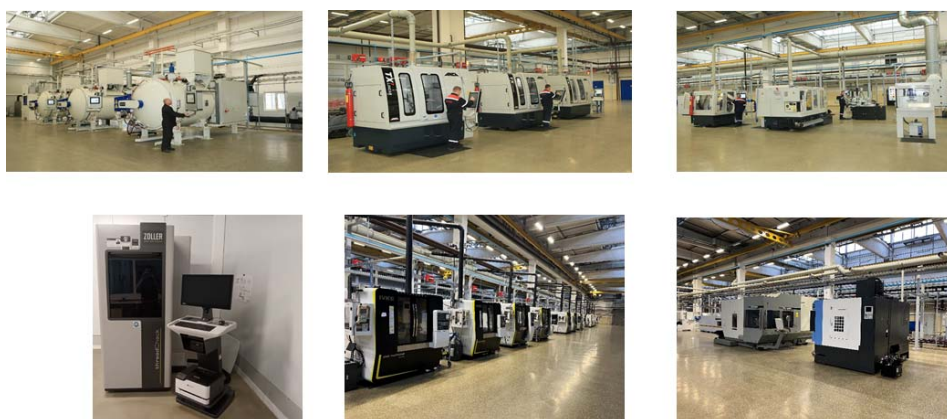


Рис. 4. Техническая база для производства нового инструмента

Стратегия развития ОАО «Оршанский инструментальный завод». По результатам реализации проекта предполагается к выпуску новая инновационная продукция для использования в высокотехнологичных отраслях металлообрабатывающей промышленности, предприятий машиностроения и ВП.

Сборный режущий инструмент. Фрезы с креплением сменных многогранных неперетачиваемых твердосплавных пластин, производимых ведущими мировыми фирмами, изготавливаются на производстве (рис. 5).

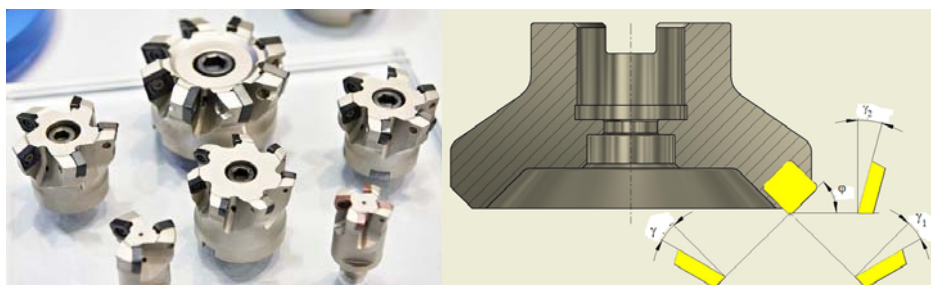


Рис. 5. Сборные фрезы

- сверла ступенчатые;
- сверла центровочные;
- фрезы концевые, шпоночные, фасонные как из P6M5, так и из столбиков твердого сплава с износостойким покрытием;
- сверла винтовые из P6M5 Ø 6–20 мм с износостойким покрытием;
- метчики M5–M30 из быстрорежущей стали;
- метчики M5–M30 с винтовой канавкой;
- метчики гаечные сборные M5–M30;
- метчики M5–M20 из монолитных твердосплавных столбиков с внутренним подводом СОЖ.



Рис. 9. Составной инструмент

Организован участок по изготовлению монолитного твердосплавного инструмента.



Рис. 10. Участок по изготовлению монолитного твердосплавного инструмента



Рис. 11. Составные метчики

Современное уникальное оборудование позволяет наносить износостойкое покрытие на всю номенклатуру выпускаемого режущего инструмента.

Виды наносимых покрытий:

- **TiN** – нитрид титана. Нанесение покрытия увеличивает срок службы твердосплавного инструмента и препятствует образованию сколов на режущей поверхности;
- **TiAlN** – алумонитрид титана. Покрытие с уникальной нанокompозитной структурой, которая существенно увеличивает твердость, термостойкость (до 900 °C) и сопротивление ударным нагрузкам, а также обладает коррозионной стойкостью;
- **AlCrN** – хромонитрид алюминия. Применяется для равномерного износа и сопротивления сколам благодаря высокой термостойкости и отличной производительности в сложных условиях и прерывистых режимах резания. Даже без применения СОЖ.

Преимущества:

- 1) работа на более высоких скоростях, инструмент обладает исключительной стойкостью к истиранию;
- 2) возможность обработки сверхпрочной, закаленной, жаропрочной сталей, чугуна и т. д.;
- 3) увеличение стойкости инструмента от 250 до 300 %.



Рис. 12. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями

Влияние нового поколения инструмента на производительность

Показатели	Действующий	Тестируемый
Инструмент	2220-4081-07	M1-0141-12,0-T
Диаметр, мм	12	12
Число зубье	4	4
Материал инструмента	Быстрорежущая сталь	Твердый сплав с покрытием
Устойчивость инструмента	Отличная	Отличная
Скорость резания, м/мин	60	110
Частота вращения шпинделя, об/мин	1592	2918
Глубина резания, мм	7,5	7,5
Ширина фрезерования, мм	6	6
Число обработанных деталей на инструмент	16	30
Качество поверхности	Хорошее	Хорошее
Износ	По задней поверхности	По задней поверхности
Причина прекращения испытания	Износ	Износ

УДК 621.91

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ УНИВЕРСАЛЬНО-СБОРНОГО КОМБИНИРОВАННОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

А. А. Карпов, М. И. Михайлов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

В условиях современного машиностроения существует необходимость создания сборного инструмента для обработки деталей различного профиля, который повышает производительность обработки.

Ключевые слова: металлорежущий инструмент, машиностроение, сменная пластина, высокая производительность, надежность.

DEVELOPMENT OF DESIGN FOR A UNIVERSAL-ASSEMBLED COMBINED METAL-CUTTING TOOL

A. A. Karpov, M. I. Mikhailov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

In the context of modern mechanical engineering, there is a need to create an assembly tool for machining parts of various profiles, which increases machining productivity.

Keywords: metal-cutting tool, mechanical engineering, indexable insert, high productivity, reliability.

В современном машиностроении и станкостроении широкое применение получил сборный металлорежущий инструмент. Такой инструмент обладает высокой производительностью, надежностью и может обрабатывать различные профили деталей или отдельные поверхности различных деталей.

Универсально-сборный комбинированный металлорежущий инструмент может применяться для обработки комплекса поверхностей различных деталей типа тел вращения, таких как диски, втулки, крышки, корпусные детали в виде тел вращения. Поверхности таких деталей могут иметь различные размеры и различный профиль (цилиндрические поверхности, конические поверхности, радиусные поверхности) [1, 3]. Режущими элементами в различных конструкциях универсально-сборных комбинированных металлорежущих инструментах могут использоваться как сменные многогранные пластины с механическим креплением к корпусу инструмента, так и различные конструкции державок или блок-вставок с механическим креплением на них сменных многогранных пластин [2]. Форма применяемой сменной многогранной пластины (квадратная, круглая, треугольная, пятигранная, шестигранная) зависит от формы обрабатываемой поверхности. Державки или блок-вставки соответственно закрепляются к корпусным элементам сборного металлорежущего инструмента. Каждая отдельная конструкция универсально-сборного комбинированного металлорежущего инструмента позволяет использовать большинство одинаковых корпусных частей, а также блок-вставки и одинаковые по форме и размерам сменные многогранные пластины для создания инструмента для обработки деталей разной конфигурации и размеров. В зависимости от того, какие сменные многогранные пластины устанавливаются в конструкцию универсально-сборного металлорежущего

го инструмента, меняется форма обрабатываемых поверхностей деталей. На рис. 1 показано схематическое изображение конструкций универсально-сборного комбинированного металлорежущего инструмента с различными одинаковыми сменными многогранными пластинами (квадратными, круглыми, трехгранными и пятигранными).

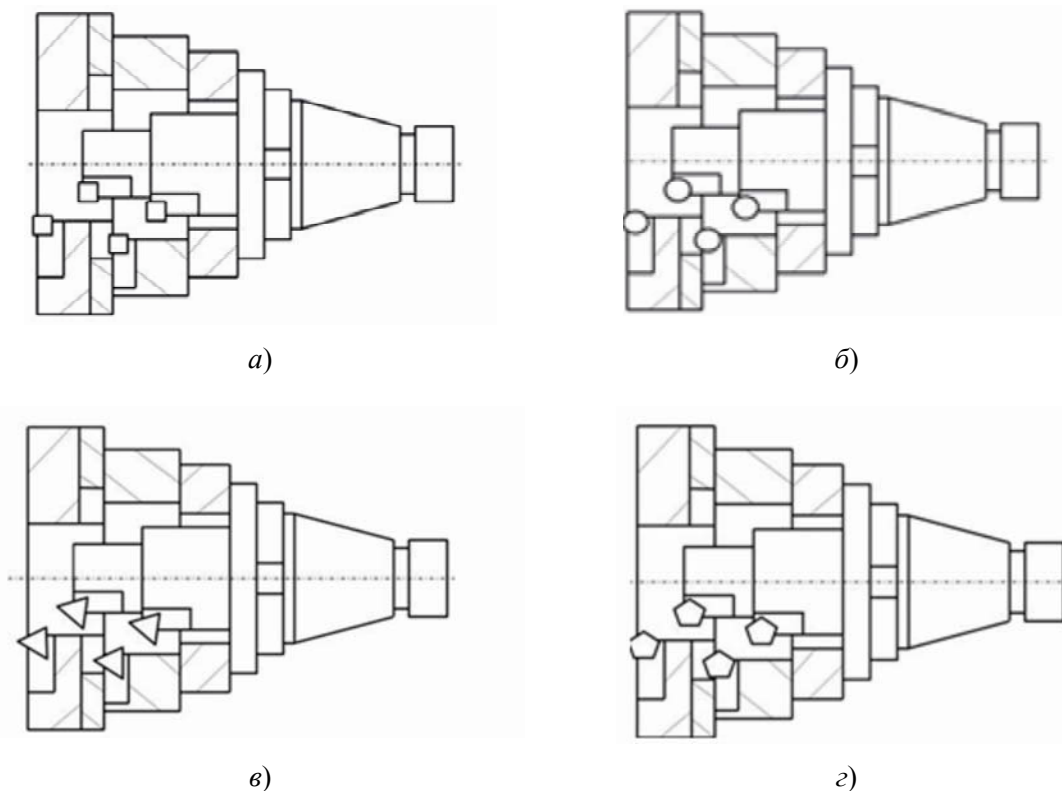


Рис. 1. Схематическое изображение конструкций универсально-сборного комбинированного металлорежущего инструмента с различными сменными многогранными пластинами: а – с квадратными пластинами; б – с круглыми пластинами; в – с трехгранными пластинами; з – с пятигранными пластинами

В других различных конструкциях могут применяться сменные многогранные пластины в любых вариациях.

Литература

1. Режущий инструмент : учеб. для вузов / Д. В. Кожевников, В. А. Гречишников, С. В. Кирсанов [и др.] ; под общ. ред. С. В. Кирсанова. – М. : Машиностроение, 2004. – 512 с. : ил.
2. Ординарцев, И. А. Справочник инструментальщика / И. А. Ординарцев ; под общ. ред. И. А. Ординарцева. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 846 с.
3. Хае́т, Г. Л. Сборный твердосплавный инструмент / Г. Л. Хае́т ; под общ. ред. Г. Л. Хае́та. – М. : Машиностроение, 1989. – 256 с.

УДК 621.785:629.73

ВАКУУМНЫЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ИНСТРУМЕНТ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

В. Г. Дашкевич, П. С. Мышкевич, А. В. Дылевский

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Разработаны направления совершенствования повышения качества покрытий и минимизации недостатков вакуумных ионно-плазменных технологий, которые являются незаменимым инструментом в создании покрытий для аэрокосмической отрасли.

Ключевые слова: долговечность, покрытие, ионно-плазменные технологии, электродуговой метод, авиация, ракетно-космическая техника.

VACUUM ION-PLASMA TECHNOLOGIES AS A TOOL FOR CREATING SPECIAL MULTILAYER COATINGS FOR AEROSPACE APPLICATIONS

V. G. Dashkevich, P. S. Myshkevich, A. V. Dylevsky

Belarusian National Technical University, Minsk

The article presents approaches to improving coating quality and minimizing the disadvantages of vacuum ion-plasma technologies, which are an indispensable tool for creating coatings for the aerospace industry.

Keywords: durability, coating, ion-plasma technologies, electric arc method, aviation, rocket and space technology.

В условиях, предъявляемых к современным аэрокосмическим конструкциям, особое значение приобретает надежность и долговечность деталей, работающих в экстремальных условиях. Плазменное нанесение и упрочнение покрытий относится к числу прогрессивных технологий, позволяющих многократно повышать эти характеристики. Основная цель таких технологий – обеспечение высокой износ- и коррозионной стойкости поверхностей деталей [1].

Вакуумные ионно-плазменные технологии представляют собой мощный инструмент для формирования специальных покрытий, которые могут быть многослойными или наноструктурированными и удовлетворять жестким требованиям авиации и ракетно-космической техники [2, 3].

Ионно-плазменное напыление в условиях вакуума является ключевым методом получения покрытий для ответственных применений. Технология дает хороший результат для электроники, медицины, химических производств. Также один из популярных вариантов кроме вышеуказанного – электродуговой метод. При этом методе покрытия выращиваются из плазменного потока, состав которого оказывает существенное влияние на структуру и конечные свойства покрытия [2].

Ключевым фактором, влияющим на качество вакуумных ионно-плазменных покрытий, является состав плазменного потока. В частности, при электродуговом методе в потоке присутствует капельная фаза. Ее наличие приводит к ухудшению трибологических свойств (антифрикционных и износостойких) покрытий, особенно из нитридов и карбидов, которые часто используются в аэрокосмической отрасли [2].

Для повышения качества покрытий и минимизации недостатков технологии разработаны следующие направления совершенствования:

1. Разделение плазменного потока: предлагаются новые конструкции в виде генератора-сепаратора плазменного потока, который позволяет существенно снизить содержание микрокапельной фазы при формировании покрытий.

2. Оптимизация параметров: для технологии ионно-плазменного напыления перспективным направлением является импульсная модуляция тока дуги, которая позволяет контролировать термодинамические параметры потока.

3. Создание наноструктур: использование ионно-плазменных технологий для получения наноструктурированных углеродсодержащих покрытий открывает возможность создания материалов с уникальными свойствами для снижения трения и повышения прочности [4].

Специальные покрытия для аэрокосмического применения часто требуют не только высокой прочности, но и сочетания различных функциональных свойств (например, теплозащита, эрозионная стойкость, низкий коэффициент трения). Для достижения этого применяются следующие подходы:

1. Многослойные архитектуры: комбинирование слоев из различных материалов (например, нитридов, карбидов, углеродсодержащих соединений) в многослойные структуры позволяет достичь синергетического эффекта, повышая общую трещиностойкость и долговечность покрытия.

2. Создание комплексной слоистой структуры достигается, как правило, комбинированным упрочнением, т. е. используются способы последовательного упрочнения. Эти способы могут быть силовыми (например, обкатка роликом), термическими, термосиловыми, комбинированными (сочетание различных высокоэнергетических воздействий).

Использование вакуумных ионно-плазменных технологий с эффективным контролем качества плазменного потока в сочетании с методами последующего упрочнения, позволяет создавать специальные покрытия, отвечающие строгим требованиям авиации и ракетно-космической техники.

Вакуумные ионно-плазменные технологии являются незаменимым инструментом в создании покрытий для аэрокосмической отрасли. Постоянное совершенствование, направленное на устранение дефектов (таких как капельная фаза) и формирование наноструктурированных и многослойных систем, обеспечивает прогресс в повышении износостойкости, коррозионной стойкости и, как следствие, общей надежности критически важных деталей машин.

Л и т е р а т у р а

1. Никонов, В. О. Анализ способов упрочнения плазменных покрытий / В. О. Никонов, А. М. Кадырметов, В. И. Посметьев // Воронежский научно-технический вестник. – 2014. – Т. 4, № 4 (10). – С. 140–149.
2. Богданович, В. И. Повышение качества вакуумного ионно-плазменного покрытия, полученного электродуговым методом / В. И. Богданович, Д. Р. Попов // Вестник молодых ученых и специалистов Самарского университета. – 2020. – № 1 (16). – С. 12–16.
3. Трифонов, С. А. Ионно-плазменные модули для получения наноструктурированных углеродсодержащих покрытий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.27.02 / Трифонов Сергей Александрович. – СПб, 2017.
4. Перспективные направления совершенствования технологии плазменного напыления с импульсной модуляцией тока дуги / А. М. Кадырметов, Е. В. Снятков, А. А. Плахотин [и др.] // Воронежский научно-технический вестник. – 2022. – Т. 1, № 1 (39). – С. 3–14.

Научное издание

ИННОВАЦИОННОЕ СТАНКОСТРОЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТ

**МАТЕРИАЛЫ
III Международной научно-практической
конференции**

Гомель, 27–28 ноября 2025 года

Ответственный за выпуск *Н. Г. Мансурова*

В авторской редакции

Компьютерная верстка *И. П. Минина*

Подписано в печать 06.10.26.

Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 13,02. Уч.-изд. л. 9,02.

Тираж 30 экз. Заказ № 563/38.

Издатель и полиграфическое исполнение

Гомельский государственный

технический университет имени П. О. Сухого.

Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя

печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.

пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель