

Рис. 3. Зависимость величины износа многокомпонентных изделий от скорости обработки

При изменении скорости вращения образца  $V_{\text{рез}}$  выявлено оптимальное значение  $V_{\text{рез}} = 1,8$  м/с. Обработка с этой скоростью позволяет повысить износостойкость обработанного МАО изделия в 2,5 – 3 раза.

#### Литература

1. Барон, Л.И. Разрушение горных пород проходческими комбайнами. Разрушение тангенциальными инструментами / Л.И. Барон, Л.Б. Глатман, С.Л. Загорский. — М.: Наука, 1973. — 172 с.
2. Пилинский, В.И. Опыт доводки твердосплавных инструментов алмазными кругами / В.И. Пилинский // ЦИТЭИ, тема 6. — М.: Машгиз, 1961 — 293 с.
3. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. — Л.: Машиностроение, 1986. — 172 с.
4. Панченко, В.М. Исследование технологических возможностей магнитно-абразивной обработки для повышения эксплуатационных свойств деталей машин: автореф. дис... канд. техн. наук. / В.М. Панченко; Физико-технический ин-т АН БССР. — Брянск, 1976. — 24 с.

УДК 621.923

## МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

В.Я. Лебедев, В.Е. Бабич

ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск;

И.А. Шмулевцов

ГУО «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров МЧС РБ»

Часто при анализе состояния поверхности деталей их качество оценивается лишь величиной шероховатости, и этот параметр принимают за харак-

нии образцов калийной породы. Время работы резцов составляло при резании калийной породы 90 мин. Орошение поверхности породы осуществлялось водопроводной водой при помощи оросителя, установленного на резцедержателе. В процессе исследования определяли потерю массы резца в зависимости от объема разрушения породы. Взвешивание резцов проводилось на электронных весах OHAUS AR5120.

При исследовании влияния магнитной индукции  $B$ , значение которой изменялось в пределах 0,8...1,2 Тл, остальные параметры оставались постоянными:  $V_{рез} = 1,8$  м/с,  $d = 1 - 1,5$  мм,  $A = 2$  мм, время магнитоабразивной обработки  $t = 180$  с; порошок Fe-TiC. Обработку производили на установке СФТ 2.150. При исследовании влияния скорости вращения  $V_{рез}$ , значение которой менялось в пределах 1,2...2,4 м/с, магнитная индукция в зазоре составляла 1 Тл.

Графики зависимостей износа от магнитной индукции и скорости резания представлены на рис. 2 и 3. На этих же рисунках представлены значения величины износа  $\Delta m$  многокомпонентных изделий. Во всем диапазоне изменения магнитной индукции  $B$  величина износа многокомпонентных изделий меньше, чем образцов без финишной обработки. Увеличение магнитной индукции с 0,9 Тл до 1,0 Тл сопровождается уменьшением износа образцов от 14,8 мг до 9,7 мг. Дальнейшее увеличение магнитной индукции на износостойкости не отражается, она остается на том же уровне.

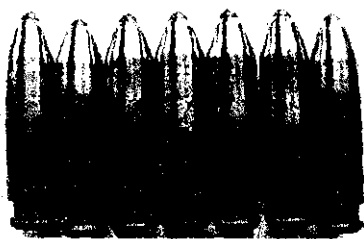


Рис. 1. Резцы РКС после магнитоабразивной обработки

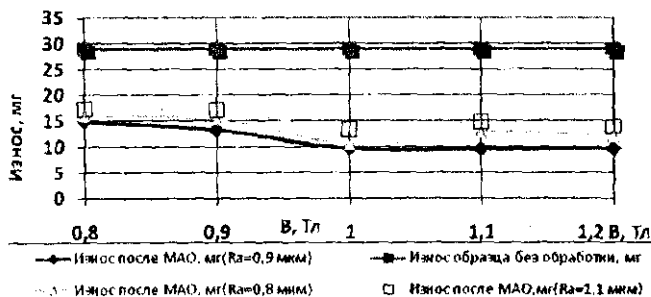


Рис. 2. Зависимость величины износа многокомпонентных изделий от магнитной индукции

цов в резцедержателе; от изношенности резцедержателя (изменение угла атаки резца, неравномерность вращения резцов вокруг собственной оси вращения и др.).

Основными причинами выхода из строя резцов ПК являются:

- износ вставки из твердого сплава равномерно по высоте;
- износ вставки только с одной стороны вследствие того, что резец не проворачивается в резцедержателе;
- выламывание вставки из твердого сплава из тела резца (выворачивание) вследствие износа места запрессовки.

Для обеспечения надежности и долговечности деталей машин необходимо придавать их поверхностям оптимальные геометрические характеристики и физико-механические свойства. Однако на эксплуатационные свойства, помимо точности изготовления детали, шероховатости рабочих поверхностей, марки материала влияют методы и режимы обработки. Точность и шероховатость не в полной мере характеризуют физическое состояние поверхностного слоя металла. Поверхности с одинаковой точностью и конечной шероховатостью могут иметь различную степень наклепа, неодинаковый характер и величину остаточных напряжений, у них в разной степени может быть искажено кристаллическое строение и нарушена целостность поверхности за счет микротрещин, задиров, разрыхлений, различными могут быть химический состав и структура поверхностного слоя металла, если поверхность получена в результате выполнения комплекса физико-механических операций с выделением в технологической зоне значительного количества тепла, то отдельные химические составляющие могут выгорать, в результате чего снижаются эксплуатационные свойства металла [2].

Магнитно-абразивная обработка (МАО) сочетает в себе одновременно действие постоянного магнитного поля и процессов, которые возникают при взаимодействии обрабатываемой поверхности с порошковым магнитно-абразивным инструментом – микрорезания, микроудары абразивных частичек, пластичной деформации в поверхностной зоне. Совокупность влияния различных факторов создает предпосылки для изменения физико – механических свойств поверхностных слоев материала [3, 4, 5].

МАО резцов для горной техники представляет актуальную научную и технологическую задачу, так как необходимо одновременно, за один установ, обработать материалы, отличающиеся химическим составом, физико-механическими свойствами. Испытание образцов на износостойкость производилось в лабораторных условиях. Лабораторные исследования выполнялись на вертикально-фрезерном станке с креплением резцедержателей на корпусе ротационной фрезы (угол атаки резцов  $30 - 45^{\circ}$ ) при реза-

В данное время опытная партия изделий с упрочненными рабочими поверхностями передана в одно из хозяйств Минской области для проведения полевых испытаний.

### Литература

1. Методы повышения конкурентоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники / Г.Ф. Бетеля [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. трудов МНТК. – Минск, 2007. – ч. 2. – С. 85 – 91.
2. Применение модернизированной плазменной установки «Киев-4М» для упрочнения стальных поверхностей / В.С. Голубев [и др.] // Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: Сб. трудов МНТК. – СПб. – 2008. – ч. 2. С. – 127 – 131.

УДК 621.923

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ РЕЗЦОВ РКС ПОСЛЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

**В.Я. Лебедев, В.Е. Бабич**

*ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск;*

**С.П. Адарич, С.П. Лобач**

*ГУО «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров МЧС РБ»*

На РУП «ПО «Беларуськалий» очистными комбайнами добывается около 85 % калийной руды. Резцами РКС в основном оснащаются режущие органы как проходческих комбайнов типа Урал-10А и Урал-61 Конейского машзавода, так и очистных комбайнов. Если на очистных комбайнах режущие органы барабанного типа имеют радиальное вращение, то режущие органы проходческих комбайнов – сложное вращение. В рудниках РУП «ПО «Беларуськалий» для добычи калийной руды применяются очистные выемочные комбайны, режущие органы которых, в основном, оснащены резцами РКС. Производительность зависит от коэффициента загрузки, который непосредственно по отбойке руды на практике составляет 0,35...0,6. Комбайн работает до 18 часов в сутки, в среднем 300 дней в году.

Скорость проходки задается машинистом комбайна с переносного пульта управления (радиоуправление): регулируется скорость подачи комбайна на забой – изменяется скорость вращения (частотный преобразователь) двигателя подачи. Скорость проходки зависит от многих факторов, в т.ч. от износа режущей кромки резцов как в целом, так и от неравномерности износа каждого резца в отдельности; от равномерности вращения рез-

ного аустенита, расположенного между пластинами мартенсита, не превышало 10 %.

Режимы 5 и 6 могут быть использованы для термического упрочнения некоторых РОПМ, где фактор оплавления поверхности не является критическим, но не приемлемы для термообработки режущей кромки диска культиватора (угол заточки  $30^\circ$ ), т.к. происходит ее полное расплавление. Поэтому для упрочнения непосредственно режущей кромки с целью повышения ресурса работы диска в условиях абразивного изнашивания использовалось лазерное модифицирование поверхности ПС-12НВК-01, предопределяющее формирование в поверхностном слое соответствующей гетерофазной структуры.

После лазерного воздействия на рабочей поверхности диска культиватора образовывался слой, основа которого представляла собой твердый раствор легирующих элементов (W, Cr, V и др.) в никеле твердостью  $\sim 8000-9000$  МПа с упрочняющими частицами карбидных, боридных и других фаз с микротвердостью  $\sim 18000 - 28000$ .

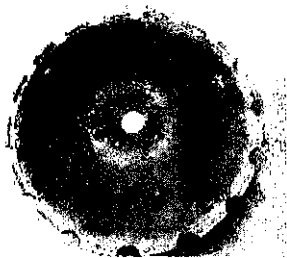


Рис. Диск культиватора и фрагмент рабочей поверхности после комплексной лазерно-плазменной обработки.

Перед лазерной обработкой поверхность образцов с целью улучшения сцепления порошка с основой подвергали дробеструйной обработке, затем посредством связующего наносили слой порошка ПС-12НВК-01. Лазерную обработку поверхности с нанесенным слоем порошка осуществляли с применением непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера «Комета-2» мощностью до 1,0 кВт. Диаметр пятна лазерного луча составлял 1,5 – 2 мм, скорость перемещения – 10 мм/с. Расстояние между соседними дорожками составляло 1,2 – 1,5 мм. Режимы нагрева подбирали таким образом, чтобы происходило оплавление нанесенного порошка, а глубина зоны термического влияния составляла 0,3 – 0,5 мм.

В результате лазерного модифицирования на рабочей поверхности диска культиватора был сформирован слой повышенной твердости 68 – 70 HRC, а в зоне плазменного упрочнения – 58-60 HRC.

верхности, расход плазмообразующего газа (аргон) были определены в ходе предварительных экспериментов на образцах из стали 65 Г.

Для осуществления операций плазменного термического упрочнения рабочей поверхности диска культиватора использовался автоматизированный технологический комплекс, включающий в себя модернизированную промышленную установку воздушно-плазменной резки «Киев-4М» и автоматизированный координатный стол с системой управления технологическими процессами на базе современного контролера типа LSMC-3 [2], обеспечивающие транспортировку плазматрона относительно обрабатываемой поверхности.

Мощность плазменной дуги находилась в пределах 4 кВт, расход плазмообразующего газа – 5 л/мин, скорость перемещения плазматрона варьировалась от 3,5 см/с до 5,0 см/с. Защитный газ и принудительное охлаждение не использовались. Процесс поверхностного плазменного упрочнения осуществлялся как с оплавлением поверхности, так и без него. Некоторые характеристики упрочненных зон в зависимости от режимов обработки приведены в таблице.

Таблица

Режим	Глубина упрочненной зоны, мм	Твердость, МПа
1	0,60-0,65	8850
2	0,72-0,75	11550
3	0,75-0,78	11000
4	0,80-0,85	10500
5	1,50-1,52	12150
6	1,50-1,52	10550
7	0,70-0,80	9600

Как следует из экспериментальных данных, наибольшая глубина закаленной зоны для стали 65 Г имела место при режимах 5, 6 и составляла 1,5 мм. При этом наблюдалось оплавление поверхности, которое становилось более значительным при увеличении расхода плазмообразующего газа.

Металлографические исследования поверхностных слоев после плазменной обработки показали повышение дисперсности структурных составляющих и тенденцию формирования упрочненной зоны. Исходная структура опытных образцов до обработки плазменной струей представляла собой ферритно-перлитную смесь. После плазменного воздействия основной структурной составляющей упрочненной приповерхностной зоны являлся мелкодисперсный мартенсит смешанной морфологии; количество остаточ-

## КОМПЛЕКСНОЕ ЛАЗЕРО-ПЛАЗМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДИСКА КУЛЬТИВАТОРА

В.Н. Черникович, В.С. Голубев, И.А. Романчук, В.И. Гуринович  
*ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск*

Известно, что рабочие органы почвообрабатывающих машин (РОГМ) эксплуатируются в сложных условиях, испытывая при этом абразивный износ, механические и ударные нагрузки, вызывающие затупление режущей кромки и поломку детали. Это приводит к повышенному расходу горючего, простоя сельскохозяйственной техники. Поэтому материал, применяемый для изготовления лемехов, дисковых сошников, дисков культиваторов и др. должен обладать как высокой прочностью и пластичностью, так и высоким сопротивлением трению и ударному воздействию.

Традиционно применяемые в РБ в качестве материала основы РОГМ относительно недорогие марки сталей 30; 40Х; 65 Г и др. не удовлетворяют сегодня требованиям изделий нового поколения из-за низкого уровня их свойств. Такие изделия не могут полноценно конкурировать с изделиями ведущих западноевропейских фирм. Поэтому для достижения высоких эксплуатационных свойств необходимо как использование новых марок сталей, так и переход на использование современных технологических достижений на всех этапах изготовления деталей: получение заготовки и ее упрочнение с целью достижения дифференцированного распределения свойств по сечению. Это предполагает индивидуальный подбор режимов обработки, конструирование и создание специальной оснастки для каждого типа деталей с учетом их геометрических, конструкционных и теплофизических особенностей. При этом желателен применение ресурсо- и энергосберегающих технологий, к которым, несомненно, относятся технологии поверхностного упрочнения с использованием лазерного и плазменного воздействия [1].

В данном случае для поверхностного термического упрочнения рабочей поверхности диска культиватора ( $\varnothing 475$  мм) предложено комплексное использование вышеуказанных способов термообработки, при этом участок режущей кромки шириной до 8 мм подвергался лазерному модифицированию, оставшаяся поверхность шириной до 20 мм – воздействию плазменного факела. Оптимальные параметры процессов: мощность лазерного излучения и плазменной дуги, скорость сканирования лазерного луча, скорость движения плазмотрона относительно обрабатываемой по-

волны металла перед роликом в общем, суммарном угле охвата ролика металлом детали с ростом подачи уменьшается, а доля угла волны металла за роликом увеличивается. При обкатывании с усилием 3400 Н и выше и при малых подачах (0,05...0,09 мм/об) перед роликом образуется значительная волна пластического течения металла. С увеличением усилия обкатывания такое распределение металла в зоне деформации проявляется еще более четко. Деформация поверхностного слоя детали при таких режимах носит совершенно иной характер, чем при вдавливании ролика в неподвижную деталь с тем же усилием. Применение роликов с большим радиусом профиля при подачах 0,05...0,1 мм/об позволяют получить аналогичное распределение металла в зоне деформации и достичь при больших усилиях обкатывания требуемой глубины упрочнения. Исследования микротвердости поверхностного слоя показали, что после обкатывания осей колесных пар с усилием 20 кН и подачей 0,1 мм/об роликом с радиусом профиля 20 мм глубина упрочненного слоя достигает 0,6 мм.

**Выводы.** Исследованиями геометрических параметров зоны пластической деформации установлено, что величина самой зоны, распределение в ней металла, изменение величины углов охвата ролика металлом определяются соотношением режимов обработки. При малых подачах происходит образование значительной по высоте волны металла, и наличие такой волны дает возможность обеспечить требуемую деформацию поверхностного слоя детали, а, значит, и формирование наклепанного поверхностного слоя, достаточного для упрочнения осей колесных пар с использованием обкатного устройства с упругим элементом.

### Литература

1. Пашшев, Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д.Д. Пашшев. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
2. Benamar, A. Galetage d'un acier inoxydable / A. Benamar, J. Lu, J.-F. Flavenot, G. Chalant // CETIM-information. – № 124. – Senlis. – France. – 1991. – p. 49 – 54.
3. Баршай, И.Л. Обеспечение качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей после обработки в условиях дискретного контакта с инструментом / И.Л. Баршай. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 244 с.
4. Фельдштейн, Е.Э. Использование методов робастного проектирования Г. Тагучи для анализа и оптимизации процессов поверхностного пластического деформирования / Е.Э. Фельдштейн, П.С. Серенков // *Материалы, технологии, инструменты*. – Гомель. – 2005. – т. 10. – № 1. – с. 19 – 23.
5. Бохан, С.Г. Исследование процесса формирования рельефа поверхности при обкатывании роликом / С.Г. Бохан, Н.В. Шкинъ // *Машиностроение*. – Минск, 2008. – Вып. 24.



Уровни факторов и интервалы варьирования при обкатывании

Уровни факторов и интервалы варьирования	Натуральные величины		Кодовые значения	
	Усилие $P$ , Н	Подача $S$ , мм/об	$X_1$	$X_2$
Основной уровень	2300	0,35	0	0
Интервал варьирования	1100	0,35	1	1
Верхний уровень	3400	0,7	+1	+1
Нижний уровень	1200	0,05	-1	-1

С учетом полученных дисперсий и значимости коэффициентов искомые уравнения регрессии имеют вид:

$$Y_1 = 0,1884 + 0,0947X_1 - 0,1123X_2 + 0,08425X_2^2 - 0,0703 X_1 X_2,$$

$$Y_2 = 0,1531 + 0,0295X_1 + 0,0252X_2.$$

Из полученных уравнений видно, что подача оказывает на величину волн металла существенное влияние, а на волну металла перед роликом степень влияния даже больше, чем степень влияния усилия обкатывания в исследованном диапазоне режимов. С увеличением подачи высота волны металла перед роликом уменьшается, а за роликом увеличивается. Уравнение регрессии для суммарного угла охвата ролика металлом детали будет иметь вид:

$$Y = Y_1 + Y_2,$$

$$Y = 0,3415 + 0,1242X_1 - 0,0071X_2 + 0,0043X_2^2 - 0,0703X_1X_2.$$

Результаты исследований показали, что наибольшая волна металла может быть получена перед роликом, и с увеличением подачи происходит стабилизация этой волны, после чего она не изменяется. При обкатывании с усилием 600...1200 Н такая стабилизация наступает при подачах около 0,175...0,35 мм/об. Значительная по высоте волна пластической деформации образуется перед роликом во время обкатывания с усилиями 2500...3000 Н и выше. С ростом усилия обкатки волна металла перед роликом увеличивается и при малых подачах (около 0,05 мм/об) и усилиях обкатывания более 3000 Н достигает весьма значительных размеров, что может привести к полному разрушению обрабатываемой поверхности.

Анализируя весь исследуемый интервал подач, можно отметить, что при малых подачах течение материала происходит в основном из-под ролика в направлении подачи, то есть перед роликом, при этом доля угла

проведенного через верхнюю точку волны металла, возникающей за роликом в направлении, противоположном подаче, также до оси симметрии профиля ролика.

Таким образом, при рассмотрении продольного сечения зоны контакта ролика и детали величина пластической деформации поверхностного слоя детали в процессе обкатки может быть охарактеризована суммарным углом охвата ролика металлом детали:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2.$$

Тогда высота волны металла, возникающей перед роликом в направлении подачи, определяется углом  $\varphi_1$ , а высота волны металла, возникающей за роликом в направлении, обратном подаче, — углом  $\varphi_2$ .

Для определения величины этих углов в процессе обкатки осуществлялась фотосъемка зоны пластической деформации в проходящем свете, что позволило четко выявить зону пластического течения металла. Для определения степени увеличения фотографировалась масштабная линейка. По полученным фотографиям замерялись хорды  $AA_1$  и  $CC_1$ , проведенные из вершин волн металла перед роликом и за ним соответственно, к оси симметрии профиля ролика.

Тогда, зная увеличение  $m$  и радиус профиля ролика  $R_{np}$ , углы охвата ролика металлом детали определяются из следующих соотношений:

$$\sin \varphi_1 = \frac{AA_1}{R_{np} m}; \quad \sin \varphi_2 = \frac{CC_1}{R_{np} m}.$$

По найденным значениям углов в радианах определялись их зависимости от основных режимов обкатывания.

**Результаты и обсуждение.** Для исследования изменения углов охвата ролика металлом детали в зависимости от основных режимов обкатывания, а именно, продольной подачи и поперечного усилия обкатывания, был использован метод планирования эксперимента. В качестве математической модели принят полином второго порядка вида:

$$Y_x = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_{12} X_1 X_2 + B_{11} X_1^2 + B_{22} X_2^2.$$

Значения варьируемых параметров приведены в табл. 1.

По вышеизложенной методике определялись значения угла волны металла перед роликом  $\varphi_1$ , угла волны металла за роликом  $\varphi_2$  и величина суммарного угла охвата ролика материалом детали  $\varphi$ . Замеры углов производились по фотографиям при трехкратном повторении опытов. Обкатывались цилиндрические заготовки из стали 20 в состоянии поставки (НВ 136) роликом с радиусом рабочего профиля 2 мм, интервал используемых режимов приведен в табл. 1.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОБКАТЫВАНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР

С.Г. Бохан, В.В. Титов

*Белорусский национальный технический университет, Минск*

**Введение.** Целью настоящего исследования явилось определение возможности упрочнения осей колесных пар трамвайных тележек с применением механических накатных устройств с упругим силовым элементом. Технологическая сложность процесса упрочнения методами ППД такого типа деталей определяется необходимостью применения больших усилий обкатывания, а использование для их создания гидравлических приспособлений в значительной мере удорожает процесс упрочнения. Отсюда следует потребность в более подробном рассмотрении процессов в зоне контакта ролика с деталью, что, в свою очередь позволит оптимизировать режимы обкатывания для обеспечения максимально возможной глубины упрочняемого слоя с применением механических обкатных приспособлений.

**Методика исследования процесса деформирования поверхностного слоя при обкатывании роликом.** В работах П.Г. Алексева, В.М. Браславского, М.А. Балтер, И.В. Кудрявцева, Д.Д. Папшева, А.Г. Суслова и других ученых показано, что использование методов поверхностного пластического деформирования (ППД) дает возможность значительно повысить эксплуатационные характеристики обрабатываемых деталей [1, 2, 3, 4]. В процессе обкатывания роликами деформация поверхностного слоя локализуется в зоне, непосредственно примыкающей к рабочему профилю ролика, находящегося в контакте с поверхностью детали, при этом зона контакта будет иметь определенные геометрические характеристики, зависящие от режимов обработки.

Для изучения закономерностей изменения зоны пластической деформации был использован метод фотографирования в проходящем свете, позволяющий зафиксировать зону контакта в процессе обработки и по полученным фотографиям определить ее параметры.

В качестве геометрических характеристик зоны деформации использовались углы охвата ролика металлом детали [5]. Угол  $\varphi_1$  отсчитывался от радиуса профиля ролика, проведенного через верхнюю точку волны металла, возникающей перед роликом в направлении подачи, до оси симметрии профиля ролика. Угол  $\varphi_2$  отсчитывался от радиуса профиля ролика,



Рис. 3. 3D модели рабочей части сферических фрез

**Выводы.** В работе представлена впервые созданная САПР рабочей части сферической фрезы, которая учитывает на этапе проектирования фрез условия изготовления и эксплуатации этого инструмента. Создание этой САПР обеспечило сокращение сроков, повышение качества проектирования, надежности спроектированного инструмента в работе, снижение поломок инструмента и повышение его стойкости.

### Литература

1. Вовк, В.В. Геометрия задней поверхности концевых фасонных фрез / В.В. Вовк // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА. – вип. № 16. – 2004. – С. 18 – 25.
2. Равская, Н.С. Геометрия передней поверхности концевых фасонных фрез / Н.С. Равская, Т.П. Николаенко, В.В. Вовк // Вестник НГУУ «КНИ». Серия «Машиностроение». – Вып. 45. – 2004. – С. 83 – 86.
3. Вовк, В.В. Геометрические основы разработки интегрированных технологий проектирования и изготовления сферических концевых фрез / В.В. Вовк, Е.Р. Линский, С.В. Корзун // Вестник НГУУ «КНИ». Серия «Машиностроение». – Вып. 52. – 2008. – С. 397 – 403.
4. Равская, Н.С. Особенности разработки информационной технологии проектирования, анализа и контроля сферических концевых фрез / Н.С. Равская, В.В. Вовк, П.В. Скрышник // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ. – вип. № 22. – 2007. – С. 14 – 18.
5. Вовк, В.В. Загрузка режущей части фасонных концевых фрез / В.В. Вовк, К.Б. Балухок // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА. – вип. № 17. – 2005. – С. 60 – 65.

вочных параметров шлифовальных конических кругов формообразующие операции выполняются в такой последовательности:

- выбирается дискретность определения координат точек сечения нужной поверхности и дискретность самих сечений;
- решается задача формообразования, результатом которой являются координаты точек поверхности в соответствующих сечениях;
- строятся кривые (сплайны, дуги и отрезки), которые задают сечения поверхности (рис. 1, а);

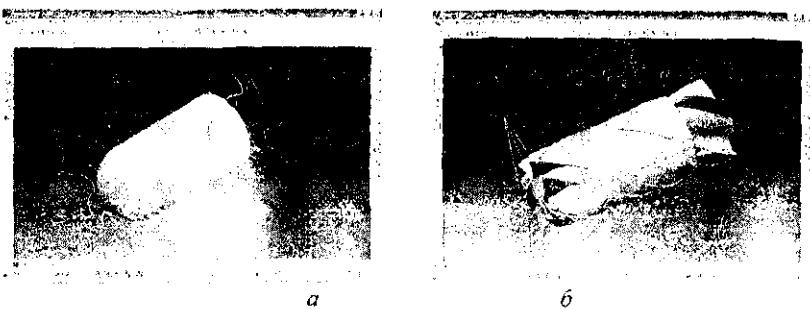


Рис. 1. Создание сечений (а) и поверхности (б): 1 – нормаль направлена в тело, 2 – из тела

- строится поверхность или тело по данным кривым и выполняются логические операции с активным телом (рис. 1, б, 2).



Рис. 2. Сформированная стружечная калавка

На рис. 3 приведены примеры построенных 3D моделей рабочей части сферических фрез с различным количеством зубьев.

параметров являются допустимые значения передних и задних углов режущей части.

Задачей проектирования является расчет изменения геометрических параметров вдоль режущей кромки с учетом условий работы инструмента и условий их изготовления. Поэтому расчет проводят по выходным данным, которые подразделяются на 4 группы:

- параметры фрезы – используются для расчета геометрических параметров, расчета фрезы на прочность, анализа и выбора геометрии, решения задач формообразования;
- установочные параметры и параметры шлифовальных кругов – используются для анализа изготовления отдельных поверхностей коническим шлифовальным кругом;
- параметры точности – влияют на точность и скорость построения модели;
- условия эксплуатации – используются для расчета фрезы на прочность, выбора геометрии.

Следующим этапом решения этой задачи является расчет геометрических параметров вдоль режущей кромки с учетом угла опережения и выбор целесообразной геометрии.

При анализе геометрии режущей части фрез критерием выбора служат допустимые пределы их изменения вдоль режущей кромки для заданных условий обработки.

После выбора геометрии режущей части решается задача формообразования фасонных поверхностей фрезы с учетом технологии ее изготовления, а именно, формообразование канавок, в частности, винтовых, передней и задней поверхности коническим шлифовальным кругом, которая раньше не рассматривалась. В зависимости от диаметра фрезы, количества зубьев и геометрии режущей части решены задачи определения установочных параметров кругов (круга).

Программа предусматривает анализ возможности обработки отдельных поверхностей заданным коническим шлифовальным кругом.

**Построение модели.** Пример реализации разработанного программного продукта рассмотрим на примере построения 3D модели в PowerShare четырехзубой фрезы диаметром 6 мм.

Основные этапы построения модели показаны на примере сфероконической концевой фрезы.

На первом этапе построения создается заготовка – твердое тело, полученное объединением сферы и конуса.

После анализа возможности изготовления поверхности с заданными геометрическими параметрами и определения соответствующих устано-

его эксплуатации, что вызвано отсутствием теории определения геометрических параметров в процессе работы инструмента. В работах [1, 2] изложены основные положения расчета геометрических параметров режущей части сферических конечных фрез, которые обеспечили разработку САПР рабочей части этого инструмента в средах PowerShape и Unigraphics.

**Общая характеристика программы.** Система автоматизированного проектирования (САПР) сферических конечных фрез предназначена для использования конструкторами-инструментальщиками, которые проектируют режущий инструмент. Программа имеет имя DAC\_TM, работает под ОС Windows XP. Языки программирования C# для работы с PowerShape и C для Unigraphics. Для функционирования программы необходима система PowerShape и/или Unigraphics.

Данная САПР позволяет на стадии проектирования анализировать геометрию рабочей части сферических фрез относительно условий их эксплуатации, рассчитывать их изменение вдоль режущей кромки в заданный момент резания и выбирать наиболее целесообразные из них.

При этом одним из вопросов, которые решаются в этой программе, является анализ возможности изготовления отдельных поверхностей коническим шлифовальным кругом. На основе такого анализа решается задача определения установочных параметров шлифовального круга в зависимости от изменения геометрии на режущей кромке инструмента.

Основные задачи, которые решает данная САПР:

1. Задача проектирования: расчет геометрических параметров; анализ и выбор геометрии.
2. Задачи формообразования, связанные с особенностями изготовления, и анализ возможности обработки отдельных поверхностей коническим шлифовальным кругом.
3. Создание 3D модели фрезы: построение сложных кривых по точкам с заданной точностью; определение сетки кривых и построение по ней тел с заданной точностью; оптимизация построения элементов модели по критериям времени, корректности и точности модели.

**Проектирование рабочей части.** В основу САПР положены разработки кафедры инструментального производства [1, 2, 3, 4].

Информационное обеспечение САПР сферических фрез включает в себя разработку теории и методик расчета геометрических параметров инструмента в любой момент времени его работы в каждой точке режущей кромки, а также силовой расчет [5] и проверку спроектированного инструмента на прочность.

Геометрические параметры сферических фрез рассчитываются по зависимостям, приведенным в [1,2]. Критерием выбора геометрических па-

обработка), припуск определяется одновременно на две стороны. Следовательно, неравномерность припуска проявится только в ходе чистовой обработки в виде чернот, определяемых визуально. В связи с неравномерностью припуска контуры впадин в переходных зонах несимметричны и, следовательно, подрез, образованный протуберанцем фрезы на сторонах впадин, – неравномерный. Он может превышать величину радиуса начала активного профиля, из-за чего возможно касание шлифовальным кругом нешлифуемых участков впадины или даже образование уступа. Эти дефекты впоследствии проявляются как опасные концентраторы напряжений, приводящие к снижению изгибной усталостной прочности зубьев.

Таким образом, обоснованное задание погрешности базовых поверхностей заготовок зубчатых колес перед операциями зубообработки является необходимым условием обеспечения равномерности припуска под чистовую обработку и позволяет повысить точность изготовления зубчатого колеса.

### Литература

1. Сидоренко, А.К. Производство крупных зубчатых передач / А.К. Сидоренко, Я.И. Адам, Г.Г. Овумян. – М.: Машгиз, 1961. – 68 с.
2. Овумян, Г.Г. Повышение производительности и качества чистового зубонарезания / Г.Г. Овумян. – М.: Машиностроение, 1979. – 64 с.
3. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: учеб. пособие / под общ. ред. М.М Канне, В.Е. Старжинского. – СПб.: Профессия, 2007. – 832 с.
4. Овумян, Г.Г. Чистовая обработка зубьев закаленных колес / Г.Г. Овумян, Я.И. Адам. – М.: Труды ЦНИИТМАШа, 1968. – 43 с.

УДК 621.9

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ СФЕРИЧЕСКИХ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ

**В.В. Вовк, П.В. Скрынник, С.В. Корзун**

*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев*

**Введение.** При обработке фасонных поверхностей в основном используются сферические концевые фрезы. Условия эксплуатации сферических концевых фрез и требования к их надежности при работе ставят этот инструмент в ряд специального.

На рынке САПР практически отсутствуют САПР режущих инструментов, обеспечивающие проектирование инструмента с учетом условий



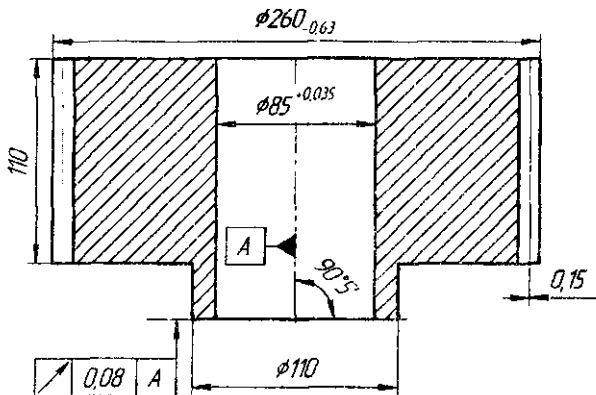


Рис. 1. Отклонение по направлению зуба при торцовом биении 0,08 мм

При зубофрезеровании на обработанной поверхности образуется так называемая огранка профиля из-за многократного воздействия производящего контура в процессе обката впадины.

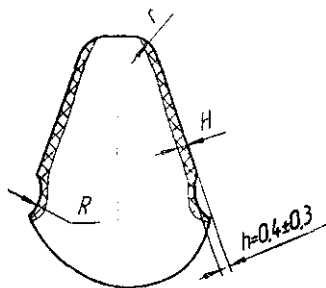


Рис. 2. Профиль зуба шлифуемого зубчатого колеса

Переходная поверхность у основания зуба воспроизводится вершиной зуба червячной фрезы и представляет собой огибающую семейства окружностей – удлиненную эвольвенту со своеобразной огранкой и волнистостью.

Погрешности базовых поверхностей совместно с затуплением фрезы вызывают искажение форм как эвольвентных участков, так и переходных поверхностей у основания зубьев [2]. Возникающий при этом наклеп является причиной остаточных напряжений, которые при последующей термической обработке усиливают эффект коробления зубчатого венца [4]. Все перечисленное приводит к созданию неравномерного припуска под чистовую обработку и вызывает погрешность:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_m + \delta_{\phi} + \delta_s,$$

где  $\delta_m$  – погрешность при токарной обработке;  $\delta_{\phi}$  – погрешность при зубофрезеровании;  $\delta_s$  – погрешность, вызванная короблением при закалке.

При контроле толщины зубьев или длины общей нормали у колес, обработанных под чистовую операцию (зубошлифование или лезвийная

гию изготовления крупномодульных зубчатых колес горных машин и механизмов.

Например, крупномодульные зубчатые колеса проходческого комбайна ПКС-8 изготавливаются из конструкционной легированной стали 20Х2Н4А с низким содержанием углерода. Заготовки крупномодульных зубчатых колес получают, в основном, горячей штамповкой. После токарной обработки заготовки производят предварительное нарезание зубьев червячной модульной фрезой. В качестве термической обработки при изготовлении таких колес используется цементация зубьев с последующей закалкой и низким отпуском. Окончательно рабочие поверхности зубьев обрабатывают зубошлифованием по методу обката или копирования.

Проанализируем процесс зубофрезерования червячными модульными фрезами для определения влияния погрешностей обрабатывающей системы на зубчатый венец. Отверстие зубчатого колеса является сборочной и технологической базой, а торцевая поверхность – установочной базой при обработке и свободной – при сборке. Совместить технологическую базу со сборочной часто не представляется возможным, поэтому при нарезании зубьев необходимо обеспечить высокую точность расположения (перпендикулярность) оси отверстия относительно базового торца.

Отклонение от перпендикулярности оси отверстия к базовому торцу колеса влечет за собой возрастание погрешности направления зуба и эллипсности делительной окружности [3]. Например, колесо комбайна ПКС-8 с параметрами: модуль  $m = 10$ ; число зубьев  $z = 50$ ; делительный диаметр  $d = 250$ ;  $W = 84.685_{-0,2}^{+0,1}$ ; диаметр отверстия  $D = 85_{-0,035}^{+0,035}$ . Для торцов колеса установлен допуск на торцевое биение – 0,08 мм, который удовлетворяет условиям эксплуатации. Но при базировании во время обработки на такой торец увеличивается погрешность направления зуба до 0,15 мм (рис. 1). Это является причиной отклонения в направлении зубьев, а также образования их конусности. Ошибка относительного положения базовых поверхностей может вызывать также погрешности шага и профиля зубьев. Погрешности, возникающие при зубофрезеровании, приводят к завышению припуска под зубошлифование.

Зубофрезерование производится на зубофрезерных станках червячными фрезами с протуберанцем, обеспечивающим подрезание у основания зубьев (рис. 2). Таким образом, контур впадин переходит в эвольвентную поверхность не по касательной, а с подрезом на величину, несколько большую припуска под зубошлифование. Основание впадины располагается на уровне окружности впадин или несколько ниже.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ БАЗОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ ЗУБЬЕВ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

**И.К. Карась**

*ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения  
с Опытным производством», г. Солигорск*

Крупномодульные зубчатые передачи горных машин и оборудования испытывают повышенные динамические и знакопеременные нагрузки, колебания температуры. При этом работоспособность конкретных зубчатых передач может зависеть от ряда технологических, конструкционных и эксплуатационных факторов, таких как:

- перегрузка рабочих поверхностей зубьев по контактным напряжениям, связанная с погрешностями механической обработки зубчатых колес и сборки передачи, обуславливающими неправильную форму пятна контакта;
- высокие нагрузки в зацеплении из-за отклонения теоретического эвольвентного профиля зубьев от номинального вследствие погрешности зубонарезания;
- динамические нагрузки, возникающие при работе в исполнительных механизмах машин и передаваемые на зубчатую передачу (например, удары режущего инструмента при взаимодействии с горной породой).

Из-за погрешностей изготовления передачи усиливаются циклические контактные напряжения. Их влияние возрастает с износом сопряженных поверхностей зубьев.

Технологическая наследственность, приобретаемая в процессе механической обработки, влияет на точностные и прочностные параметры зубчатого венца [1]. Оценка этого влияния требует аналитического исследования. Указанные параметры закладываются в начале технологического процесса, при получении заготовки, и далее – при токарной обработке, нарезании зубьев и их финишной обработке.

ГОСТ1643-81 не определяет величины погрешностей базовых поверхностей, их допустимые отклонения принимаются исходя из опыта и по нормативам допускаемых погрешностей. Это обстоятельство часто приводит к несоответствию требований к точности зубчатого профиля колеса и его посадочных поверхностей.

Для оценки влияния погрешностей базовых поверхностей на точность профиля обработанных зубьев рассмотрим применяемую техноло-

изготовления комбинированной головки. К преимуществам относится совмещение черновой и чистовой обработки сферической поверхности за один установ на одном станке, что улучшает качество и точность получаемой поверхности.

**Выводы.** В результате проведенного анализа видно, что при обработке сферических поверхностей деталей машиностроения в основном используются либо специальные способы обработки на специальных станках, либо специальные инструменты. При этом наиболее часто встречаемыми в машиностроении являются способы 1, 2, 3 и 5, так как они реализуются на станках, выпускаемых серийно, а способы 4, 6 и 7 требуют дополнительных затрат на проектирование и изготовление приспособлений к станкам.

### Литература

1. Захаров, В.И. *Технология токарной обработки* / В.И. Захаров. – Л.: Лениздат, 1968. – С. 502.

2. Способ высокоточной свободнообкатной обработки сферической поверхности: пат. 2311991 (RU) МПК В23В 1/00, В23В 35/00 / А.В. Добровольский, С.И. Дмитриев (UA). – № 2004137691/02; заявл. 23.12.2004; опубл. 10.12.2007 // Бюл. № 34.

3. Блюмберг, В.А. *Справочник токаря* / В.А. Блюмберг. – Л.: Лениздат, 1963. – С. 452.

4. Способ статико-импульсного иглофрезерования сферической поверхности: пат. 2320459 (RU) МПК<sup>7</sup> В23С 3/00 / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, А.В. Катунин, Б.И. Афанасьев, А.А. Катунин, Д.С. Фомин, Н.Н. Самойлов, К.Ф. Селеменев (RU), Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Орловский государственный технический университет» (RU). – № 2006123402/02; заявл. 30.06.2006; опубл. 27.03.2008 // Бюл. № 9.

5. Устройство для статико-импульсного иглофрезерования сферической поверхности: пат. 2320460 (RU) МПК<sup>7</sup> В23С 3/00 / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, А.В. Катунин, Б.И. Афанасьев, А.А. Катунин, Д.С. Фомин, Н.Н. Самойлов, К.Ф. Селеменев (RU), Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Орловский государственный технический университет» (RU). – № 2006123403/02; заявл. 30.06.2006; опубл. 27.03.2008 // Бюл. № 9.

6. Способ точения наружных сферических поверхностей: пат. 2275989 (RU) МПК<sup>7</sup> В23В 1/00 / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, Н.Н. Самойлов, А.В. Катунин, Б.И. Афанасьев, А.А. Катунин, Д.С. Фомин (RU), Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Орловский государственный технический университет» (RU). – № 2004133452/02; заявл. 19.11.2004; опубл. 10.05.2006 // Бюл. № 13.

7. Комбинированная головка для точения наружных сферических поверхностей: пат. 2275990 (RU) МПК<sup>7</sup> В23В 5/40, В23С 3/04 / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, Н.Н. Самойлов, А.В. Катунин, Б.И. Афанасьев, А.А. Катунин, Д.С. Фомин (RU), Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Орловский государственный технический университет» (RU). – № 2004133451/02; заявл. 16.11.2004; опубл. 10.05.2006 // Бюл. № 13.

рументом являются, как и у обработки фасонными резцами, малая универсальность (каждый резец может обработать сферическую поверхность лишь определенного радиуса) и невысокая производительность. В то же время в резцовой головке данные недостатки устранены, то есть инструмент имеет возможность перенастройки на размер обрабатываемой поверхности и более высокую производительность, а также точность формообразования сферической поверхности определяется не профилем инструмента и точностью поворотного приспособления, а точностью траектории движения заготовки и инструмента, то есть кинематикой процесса, что позволяет получить сферические поверхности высокого качества и точности.

6. *Способ статико-импульсного иглофрезерования* заключается в сообщении вращательных движений заготовке и иглофрезы, к которой еще прикладывается статическая продольная нагрузка и дополнительная периодическая импульсная нагрузка [4, 5]. Иглофреза имеет пучки ворса, расположенные радиально относительно центра обрабатываемой сферической поверхности. Недостатками данного способа является трудоемкость изготовления инструмента и устройства для его осуществления, а также возможность его применения только при чистовой окончательной обработке. Но в то же время способ обладает рядом преимуществ, такими как получение высокого качества поверхности  $Ra = 0,63$  мкм и одновременно упрочнения поверхностного слоя с глубиной  $0,9 \dots 1,2$  мм.

7. *Способ точения комбинированной головкой* заключается в том, что заготовке и инструменту сообщают вращательные движения вокруг собственных осей, причем режущему инструменту сообщают движение по окружности, лежащей в плоскости, смещенной относительно центра обрабатываемой сферической поверхности. Для реализации данного способа используется режущий инструмент в виде двух кинематически связанных между собой резцовых головок, имеющих одинаковое количество, но не менее двух, резцов. Резцовые головки, из которых одну настраивают на предварительную черновую обработку, а другую – окончательную чистовую обработку за счет осевой подачи, располагают друг против друга под определенным углом к плоскости, перпендикулярной оси заготовки и проходящей через центр сферической поверхности и с траекторией вращения вершин резцовых головок, имеющих общую точку, расположенную на продольной оси заготовки. Головки вращаются от одного привода с одинаковой частотой для синхронизации движения резцов, заключающегося в последовательном прохождении общей точки поочередно резцами черновой и чистовой головок [6, 7]. Недостатками данного способа является трудоемкость

способлений, закрепляемых в резцедержателе станка, а иногда вместо резцедержателя. Станки и приспособления такого типа позволяют обрабатывать сферические поверхности с высокой точностью. Однако они довольно сложны по конструкции и поэтому имеют ограниченное распространение.

4. *Способ свободно обкатной обработки.* Формирование сферической поверхности происходит при принудительном вращении заготовки и движении подачи инструмента в сторону обрабатываемой поверхности, после появления контакта режущей кромки инструмента с поверхностью заготовки последняя начинает «вести» за собой инструмент – он начинает вращательное обкатное движение в том же направлении, что и заготовка. Инструмент выполнен в виде кольцеобразного (трубчатого) резца, режущая кромка которого образуется пересечением внутренней цилиндрической и торцовой поверхностью. Инструмент предварительно устанавливается с возможностью свободного вращения в опорах так, чтобы его ось находилась в одной плоскости с осью вращения заготовки под углом к ней, не кратным прямому [2]. Преимуществами данного способа являются высокая геометрическая точность и качество обработанной поверхности. Недостатки данного способа такие же, как и у способа обработки фасонным резцом.

5. *Способ обработки совмещением двух вращений.* Формирование шаровой поверхности происходит при взаимном вращательном движении инструмента и детали, причем главное движение совершает инструмент [3, с. 307, табл. 144]. В качестве инструмента может быть использован как кольцевой (трубчатый) резец, так и резцовая головка. В трубчатых резцах, режущая кромка образуется пересечением внутренней цилиндрической и торцовой поверхностей. Диаметр отверстия трубчатого резца  $D_p \approx 0,9D_d$ , где  $D_d$  – диаметр обрабатываемой сферы; угол наклона оси инструмента к оси детали  $\alpha \approx 45^\circ$ . В резцовой головке имеется несколько твердосплавных проходных резцов с углами в плане  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ , которые выставляются по калибру. Для обработки этим способом сферических поверхностей необходимо изготовить несложное устройство, сообщаемое вращение инструменту. Устройство монтируется на поперечном суппорте; оно состоит из шпиндельной бабки с инструментом и электродвигателя, расположенных на одной плите. Обрабатываемая заготовка закрепляется в патроне токарного станка, шпинделю которого сообщается медленное вращение. Возможна и другая схема установки: инструмент крепится на шпинделе станка, а обрабатываемая заготовка – в шпиндельной бабке устройства. Подача осуществляется поперечным суппортом до упора. Каретка суппорта станка во избежание перемещений ее во время работы закрепляется. Недостатками обработки кольцеобразным инст-

1. *Способ обработки фасонными резцами* осуществляется при вращательном движении заготовки и поступательном движении инструмента, форма режущей кромки которого приближена к профилю детали. Режущая кромка фасонного резца должна устанавливаться строго по центру обрабатываемой детали, иначе это может привести к искажению профиля детали. Фасонные резцы изготавливаются из быстрорежущей стали или оснащаются твердым сплавом [1, с. 363]. Этот способ обработки характеризуется хорошим качеством полученной поверхности и простотой реализации как на универсальных станках, так и на специальных. К недостаткам его можно отнести малую производительность и использование специального инструмента, который трудоемок в изготовлении и может обрабатывать поверхности лишь определенного радиуса. Данный способ целесообразен при серийном производстве деталей.

2. *Способ обработки резцом совмещением двух подач* осуществляется при вращательном движении заготовки и одновременном перемещении резца в продольном и поперечном направлениях относительно оси заготовки. Форма режущей пластины резца зависит от обрабатываемой сферической поверхности. Точность профиля и качество сферической поверхности зависит от точности перемещения рабочих органов станка. Данный способ обработки, как и способ обработки фасонными резцами, характеризуется хорошим качеством обработки и простотой реализации, для его осуществления в серийном производстве применяются станки с ЧПУ, где перемещение рабочих органов станка производится по программе, или копировальные станки, где перемещение рабочих органов станка осуществляется по копиру или детали-эталону. Иногда вместо копировальных станков используются универсальные станки, оснащенные специальным копиром или гидрокопировальным суппортом. В единичном производстве, где изготовление копира нерентабельно, а квалификация рабочего обычно высокая, перемещение рабочих органов станка осуществляют вручную, ориентируясь на чертеж детали, и контролируют чаще всего с помощью шаблона. Поперечное перемещение резца всегда производится вручную, продольное иногда автоматически. Качество обработки зависит от квалификации рабочего [1, с. 367].

3. *Способ обработки резцом при помощи поворотных приспособлений и специальных станков* осуществляется при вращательном движении заготовки и круговой подаче резца в горизонтальной плоскости, причем центр вращения находится на линии центров станка [1, с. 370]. Реализуется на специальных или универсальных станках с помощью поворотных при-

ях кинематическая структура станка должна содержать простую кинематическую группу движения деления, последовательно соединенную со сложной кинематической группой движения формообразования боковых сторон пазов. Этому условию отвечает, в частности, кинематическая структура широкоуниверсального станка модели ВС-50, который снабжен делительным механизмом для периодического поворота шпинделя с заготовкой, благодаря чему обеспечивается возможность обрабатывать пазы по схеме с дискретно-непрерывным делением.

#### Литература

1. Данилов, В.А. Анализ условий формирования пазов на торцах деталей методом кинематического профилирования / В.А. Данилов, О.В. Яловский // Теория и практика машиностроения: международный научно-технический журнал. – 2004. – № 2. – С. 14 – 16.
2. Данилов, В.А. Влияние параметров настройки обрабатывающей системы на точность формообразования пазов / В.А. Данилов, Р.А. Киселев, О.В. Яловский; под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика // Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин: Тематический сборник. – Минск: УП «Технопринт»; Новополоцк: ПГУ, 2003. – С. 346 – 348.

УДК.621.91.04

### СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ ДЛЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

**Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, Г.И. Гвоздь**

*УО «Полоцкий государственный университет», Новополоцк*

**Введение.** В настоящее время на машиностроительных предприятиях выпускается широкая номенклатура различных деталей, которые состоят из определенных конструктивных элементов и поверхностей. В этой номенклатуре детали со сферическими поверхностями встречаются довольно часто: шаровая опора автомобиля, пробка шарового крана, пробка сегментного клапана, ось и др. К сферическим поверхностям таких деталей предъявляются высокие требования по качеству и точности.

**Аналитический обзор.** Рассмотрим способы механической обработки сферических поверхностей, которые используются в настоящее время в машиностроении, и технологическое оснащение для их реализации.



ми сторонами ( $i = 3$ ). Расстояние между осями заготовки и резцовой головки равно радиусу последней:  $l = R = 20$  мм.

При обработке по схеме с непрерывным делением резцовая головка должна иметь 2 группы резцов ( $n = 2$ ), в частном случае 2 резца. Каждая из групп резцов обеспечивает обработку трех впадин ( $N_{cp} = 3$ ) – заштрихованные участки, ограниченные траекторией 1. Таким образом, первая группа резцов формирует впадины, перемещаясь по траектории 1, а вторая – по траектории 2. При обработке пазов по схеме с дискретно-непрерывным делением головка имеет одну группу резцов (или один резец), перемещающихся, например, по траектории 1, которыми обрабатываются 3 впадины. По окончании их обработки за счет дополнительного дискретного движения деления (поворота заготовки или инструмента) траектория движения резцов смещается в новое геометрическое положение (с траектории 1 на траекторию 2) и обрабатываются остальные 3 впадины. Таким образом, все пазы обрабатываются одной группой резцов (одним резцом). Благодаря этому количество резцов в головке уменьшается в два раза и, следовательно, упрощается ее конструкция.

В общем случае дискретное движение деления выполняется целое число раз, равное отношению общего числа пазов у детали и числа пазов, обрабатываемых при непрерывном движении деления. После выполнения последнего движения деления режущие кромки возвращаются на начальную траекторию, что соответствует окончанию цикла обработки всех пазов детали. При выполнении дискретного движения деления должна быть исключена возможность контакта резцов с заготовкой, что обеспечивается в цикле обработки вспомогательными движениями отвода и подвода резцовой головки к заготовке.

Если дискретное движение деления осуществляется за счет дополнительного поворота заготовки (инструмента), то величина угла поворота определяется по формулам, соответственно:

$$\gamma_j = \frac{2\pi}{N_{cp}n}, \quad (1)$$

$$\gamma_n = \frac{2\pi i}{N_{cp}n}, \quad (2)$$

где  $\gamma_j$  ( $\gamma_n$ ) – угол поворота заготовки (инструмента).

При  $i > 1$   $\gamma_j < \gamma_n$ , поэтому дискретное движение деления следует выполнять за счет поворота заготовки, что позволяет уменьшить инерционные нагрузки в механизме деления.

Обработка пазов по схеме с дискретно-непрерывным делением возможна на специальных или широкоуниверсальных станках. В обоих случа-

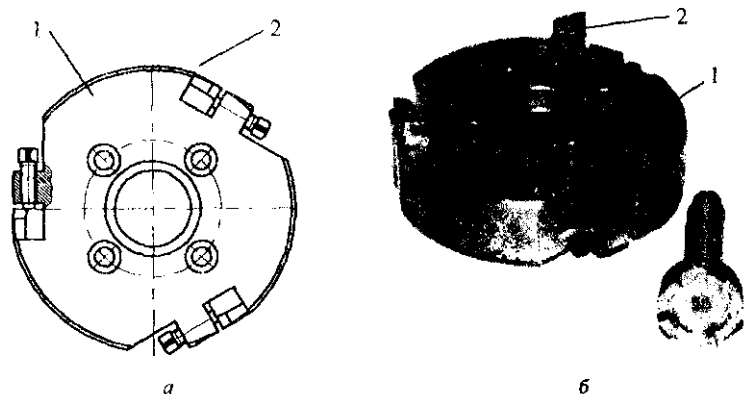


Рис. 1. Инструмент для обработки пазов на торцах деталей к станку модели ВС-50:  
*а* – конструкция инструмента; *б* – инструмент с обработанной деталью;  
 1 – корпус; 2 – резец

В этой связи заслуживает внимания схема обработки с дискретно-непрерывным движением деления, при которой заданное множество пазов создается как объединение нескольких групп пазов. Пазы первой группы обрабатываются по схеме с непрерывным движением деления всеми резцами головки, а для перехода к обработке пазов второй и последующих групп траекторию движения формообразования переносят (смещают) в новое геометрическое положение, для чего заготовке или инструменту сообщают поворот на определенный угол вокруг своей оси (дискретное движение деления). При такой схеме обработки упрощается конструкция резцовой головки и повышается ее универсальность, так как одной резцовой головкой можно обрабатывать детали с различным числом пазов.

Общее число обработанных пазов  $m = n N_{гп}$ , где  $n$  – число групп резцов,  $N_{гп}$  – число впадин, обрабатываемых одной группой резцов.

Рассмотрим выполнение схем с непрерывным и дискретно-непрерывным делением на примере обработки 6 пазов на торце детали (рис. 2) с вогнутыми боковы-

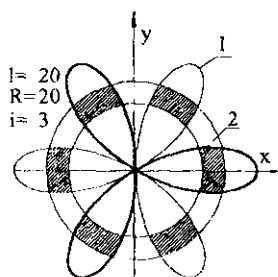


Рис. 2. Схема переноса траектории исполнительного движения в результате деления:  
 1 – первоначальная траектория;  
 2 – смещенная траектория

на угол между пазами. В данном случае движения формообразования и деления выполняются раздельно, что увеличивает время обработки. Этот недостаток устраняется при совмещении движений формообразования и деления, т.е. при непрерывном процессе деления. Как показывает опыт эксплуатации станков-профиляторов фирмы «Wega» (Германия), такая схема обеспечивает существенное повышение производительности обработки пазов на торцах деталей. Характерным для нее является кинематическое формирование боковых поверхностей пазов по циклоидальным кривым за счет одновременного вращения заготовки и резцовой головки, оси которых параллельны друг другу. Условия осуществления данной схемы, возможности и точность формообразования рассмотрены в работах [1, 2].

Схема обработки пазов с непрерывным движением деления реализована на широкоуниверсальном станке модели ВС-50 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан». Для обработки пазов на торце детали на станке устанавливается сменный обрабатывающий модуль, шпиндель которого, несущий резцовую головку, расположен параллельно шпинделю с заготовкой и кинематически связан с ним через орган настройки, что позволяет обрабатывать пазы по схеме с непрерывным делением.

Форма боковых поверхностей пазов зависит от отношения  $i$  частот вращательных движений резцовой головки и заготовки, расстояния  $l$  между их осями и радиуса  $R$  резцовой головки. Например, если  $l = R$ , то при  $i = 2$  траектория относительного движения точки режущей кромки представляет собой эллипс, который при соответствующем значении радиуса  $R$  резцовой головки приближается в зоне резания к прямой, что позволяет обрабатывать пазы с допусаемым отклонением от прямолинейности. При  $i < 2$  боковые поверхности пазов имеют выпуклую, при  $i > 2$  – вогнутую форму, при  $i = 1$  они очерчены дугами окружности.

Во всех случаях число  $z$  резцов в головке зависит от числа  $m$  обрабатываемых пазов и заданного значения  $i$ :  $m = z \cdot i$ . Например, при  $i = 5/3$  для обработки 5 пазов на торце детали головка должна иметь 3 равномерно расположенных по окружности резца (рис. 1) или в общем случае 3 группы резцов.

Для заданного значения  $i$  с увеличением числа пазов пропорционально возрастает число резцов в головке, что усложняет ее конструкцию и заточку, а в ряде случаев, учитывая ограниченный диаметр резцовой головки, исключает возможность реализации схемы обработки. Данное обстоятельство в большей степени проявляется, когда паз обрабатывают не одним, а группой резцов, что имеет место для широких пазов.

Данные технологии были апробированы и реализованы в технологическом комплексе (рис. 1) для финишной обработки рабочего профиля сателлита.

**Вывод.** Эффективный способ повышения качества поверхности зацепления при формообразовании детали с трохойдным профилем методом профильного глубинного шлифования за несколько проходов, заключается в стабилизации термодинамического воздействия на заготовку в процессе обработки. Это может быть достигнуто, если из впадины за каждый проход будет удаляться одинаковое количество материала. На базе этого построена методика расчета глубины шлифования на каждом проходе. Выполненные исследования позволили создать эффективную технологию формообразования трохойдных поверхностей, которая была реализована в технологическом комплексе для финишной обработки рабочего профиля сателлита.



Рис. 1. Профилирование сателлита планетарно-цевочного редуктора

### Литература

1. Ящерицын, П.И. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П.И. Ящерицын, А.К. Цокур, М.Л. Еременко. – Минск: Наука и техника, 1973. – 184 с.
2. Старков, В.К. Шлифование высокопористыми кругами / В.К. Старков – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.

УДК 621.91.04

## СХЕМЫ ОБРАБОТКИ ПАЗОВ НА ТОРЦАХ ДЕТАЛЕЙ С НЕПРЕРЫВНЫМ И ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНЫМ ПРОЦЕССОМ ДЕЛЕНИЯ

В.А. Данилов, О.В. Яловский

*УО «Полоцкий государственный университет», Новополоцк*

В машиностроении для обработки пазов на торцах деталей обычно применяется схема с дискретным движением деления, при которой они обрабатываются последовательно с периодическим поворотом заготовки

На базе анализа изменения геометрии впадины при формообразовании трохойдной поверхности можно получить, что в общем случае площадь сечения материала, удаляемого на  $i$ -том проходе, определяется из соотношения

$$S_i^* = S_i - (i-1) \cdot \frac{S^*}{n}, \quad (2)$$

где  $i=1 \dots n-1$ ;

$$S_i = \left( r - r_{\eta} - e + \sum_{j=1}^i h_j \right)^2 \cdot \arctan \left( \frac{y(\alpha_i)}{x(\alpha_i)} \right) - \int_{\alpha_i}^{\pi} (x(\alpha) \cdot y'(\alpha) - y(\alpha) \cdot x'(\alpha)) d\alpha, \quad (3)$$

угол  $\alpha_i$  находится из уравнения

$$r \cdot e \cdot \cos(z\alpha_i) - \frac{r_{\eta}}{\sqrt{1+m^2+2m \cdot \cos(z\alpha_i)}} (r - e \cdot m + e(z+2) \cdot \cos(z\alpha_i)) = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( r - r_{\eta} - e + \sum_{j=1}^i h_j \right)^2 - (r^2 + e^2 + r_{\eta}^2) \right] \quad (4)$$

а  $x(\alpha), y(\alpha)$  — уравнения эпитрохоиды

$$x = r \cos \alpha + e \cos(z+1)\alpha - r_{\eta} \cos(\gamma + \alpha);$$

$$y = r \sin \alpha + e \sin(z+1)\alpha - r_{\eta} \sin(\gamma + \alpha),$$

в которых  $\alpha$  — параметр;  $\gamma$  — угол зацепления, который определяется выражением

$$\gamma = \arctan \frac{\sin(z \cdot \alpha)}{\frac{r}{e \cdot (z+1)} + \cos(z \cdot \alpha)}.$$

Таким образом, задача расчета оптимальной (с точки зрения стабилизации термодинамического воздействия на заготовку в процессе формообразования детали с трохойдным профилем) глубины шлифования на каждом проходе решается посредством последовательных приближений по  $h_j$  до тех пор, пока соответствующая площадь  $S_j^*$  не станет равна  $S^*/n$ .

Ввиду того, что теоретическая высота зуба колеса с трохойдным профилем равна  $2e$ , глубина последнего прохода может быть найдена из соотношения

$$h_n = 2e - \sum_{i=1}^{n-1} h_i. \quad (5)$$

Припуск на термообработку и чистовое шлифование может быть учтен в параметре  $r_{\eta}$  теоретического профиля сателлита.

реализации предложенной технологии формообразования сателлита актуальной становится задача выбора параметров и режима шлифования, позволяющих избежать появления дефектов шлифовочного характера.

**Постановка задачи.** Как показали исследования, проведенные для зубчатых колес [2], при формообразовании профиля за несколько проходов решающее влияние на качество и точность профилирования оказывает стабильность термодинамического воздействия, обусловленного условиями диспергирования при интенсивном трении. Для того чтобы определить параметр шлифования, управляя которым можно стабилизировать термодинамическое воздействие на заготовку в процессе формообразования, авторами было проведено экспериментальное исследование [2], корреляционный анализ результатов которого показал, что скорость подачи  $v_d$  и площадь сечения впадины  $S^*$ , а также скорость шлифовального круга  $\omega_{кр}$  и  $S^*$  достаточно тесно связаны между собой. Остальные параметры шлифования являются статистически независимыми. На основании этого был сделан вывод об определяющем влиянии параметра  $S^*$  на значение скоростей рабочих движений профильного глубинного шлифования. Поэтому, чтобы стабилизировать термодинамическое воздействие на заготовку, достаточно стабилизировать параметр  $S_i^*$ , характеризующий площадь сечения материала, удаляемого из впадины за каждый проход. Этого можно достигнуть, если назначать глубину каждого прохода  $h_i$  таким образом, чтобы площадь сечения материала, удаляемая на каждом проходе оставалась постоянной. Таким образом, задача состоит в разработке методики расчета глубины каждого прохода по заданным параметрам эпитрохоиды, описывающей профиль.

**Результаты.** Путем преобразований на базе методов математического анализа было получено, что площадь сечения материала, удаляемого при профилировании впадины между двумя зубьями колеса с эпитрохоидным профилем, определяется соотношением

$$S^* = \frac{2\pi}{z} \cdot \left( r \cdot e - r \cdot r_{\eta} - r_{\eta} \cdot e - \frac{e^2 z}{2} \right) + \frac{4r \cdot r_{\eta} (m+1)}{z} \cdot E \left( \frac{2\sqrt{m}}{m+1} \right), \quad (1)$$

где  $z$  (количество зубьев сателлита),  $r$  (радиус цевочного колеса),  $e$  (эксцентриситет),  $r_{\eta}$  (радиус цевки) – параметры эпитрохоиды;  $m$  – коэффициент укорочения эпитрохоиды, вычисляемый по соотношению

$$m = \frac{e(z+1)}{r}; \quad E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta - \text{полный эллиптический интеграл.}$$

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТРОХОИДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Н.Г. Янкевич

*РУП «Приборостроительный завод «Отрон», Минск;*

Е.Н. Янкевич

*ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», Минск*

**Введение.** На протяжении всей истории редукторостроения отечественные лидеры по выпуску редукторов и электроприводов производили в основном классические редукторы, построенные на базе традиционной, прежде всего эвольвентной, передачи. Однако в последние годы появились редукторы, созданные на несколько иных видах зацепления, в том числе планетарно-цевочный редуктор, у которого рабочий профиль зуба сателлита выполнен по эпитрохоиде. Идея создания редукторов данного типа появилась еще в начале прошлого века, но предпринятые тогда попытки освоения их производства оказались безуспешными, так как предложенные технологии не позволяли добиваться требуемой точности изготовления элементов цевочного зацепления. Лишь сейчас, когда все большее применение находит принципиально новое технологическое оборудование, оснащенное гибкими системами с ЧПУ, задача создания и производства этих перспективных редукторов вновь стала актуальной.

В НАН Беларуси ведется цикл работ по созданию научных основ расчета и конструирования, а также разработке инновационных технологий изготовления оригинальных деталей планетарно-цевочного редуктора. Предложена технология формообразования трохойдной поверхности сателлита методом профильного шлифования. Однако следует отметить, что формообразование трохойдных поверхностей данным методом характеризуется интенсивным теплообразованием в зоне обработки с нагревом до температур плавления обрабатываемого материала. Сочетание высоких температур и скоростей нагрева с последующим быстрым охлаждением создаст предпосылки для структурно-фазовых превращений в поверхностном слое обрабатываемого материала и, как следствие, обуславливает возможное появление дефектов шлифовочного характера -- прижогов, микротрещин, сколов и др. Исследования [1] показывали, что возникающие в процессе шлифования дефекты поверхности в десятки раз снижают контактную и циклическую прочность деталей. Поэтому при практической

устройств 8 и 9, когда создаваемые ими движения не требуются для обработки заданной поверхности.

При настройке станка диаметр поперечного сечения (производящей окружности) устанавливается перемещением поперечного суппорта 5 поперек станины, эксцентриситет профиля обеспечивается установкой в механизме 14 возвратно-поступательного движения каретки 6 сменной кулачка соответствующей формы, шаг получаемой винтовой поверхности настраивается органом 17, а ее направление (левое или правое) – реверсирующим механизмом 11. Элементы режима резания – скорость резания (частота вращения шпинделя с заготовкой) и подача продольного суппорта настраиваются соответственно органами 19 и 10.

При обработке круговой винтовой поверхности станок работает следующим образом. Шпиндель 1 с заготовкой 2 получают от двигателя 18 вращение  $V_1$  с частотой, настроенной органом 19, а каретка 6 с инструментом 7 – возвратно-поступательное (осциллирующее) движение  $O_2$ , согласованное с вращением шпинделя. В результате осуществления этих движений на заготовке 2 инструментом 7 формируется заданный профиль поперечного сечения круговой винтовой поверхности – окружность определенного радиуса.

Одновременно с указанными движениями получает прямолинейное перемещение  $П_3$  продольный суппорт 4, благодаря чему осуществляется обработка поверхности по длине. Вследствие того, что тяговое устройство 8 через суммирующий механизм 15 связано с механизмом 14 возвратно-поступательного движения, каретка 6 с инструментом 7 получают дополнительное возвратно-поступательное движение  $O_4$ , вследствие чего инструментом формируется винтовая поверхность с круговым профилем, требуемый шаг которой обеспечивается органом настройки 17, а ее направление – реверсирующим механизмом 11.

Благодаря модернизации станка решена задача освоения производства роторов винтовых насосов по заказам промышленности, что позволило отказаться от их закупки за рубежом.

### Литература

1. Данилов, В.А. Синтез и реализация схем формообразования каналовых винтовых поверхностей резанием / В.А. Данилов, А.А. Чепурной // Вестник Полоцкого государственного университета, серия В «Прикладные науки». – 2003. – № 4. – Т. 2. – С. 204 – 207.

2. Станок для обработки винтовых поверхностей: пат. 4118 ВУ. МПК В23В 1/00, В23G 1/00 / В.А. Данилов, А.А. Чепурной (ВУ). – Заявка № u20070465; опублик. 2007.10.02.



речный суппорт 5 и установленную на нем с возможностью перемещения поперек станины каретку 6 с закрепленным на ней резцом 7. После обработки заготовки резцом ее окончательная обработка может осуществляться на этом станке также инструментом для поверхностно-пластического деформирования.

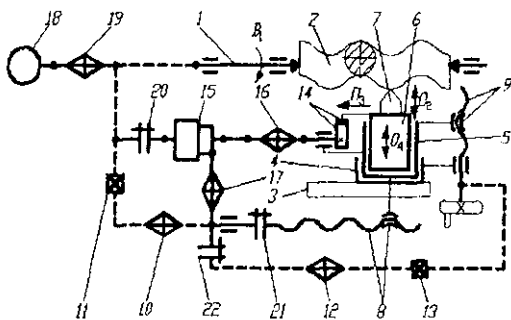


Рис. 2. Структурная схема станка для обработки роторов винтовых насосов

Продольный 4 и поперечный 5 суппорты снабжены тяговыми устройствами, соответственно 8 и 9. Устройство 8 связано со шпинделем 1 кинематической цепью, содержащей орган настройки 10 подачи продольного суппорта и реверсирующий механизм 11. Устройства 8 и 9 связаны между собой кинематической цепью, содержащей орган настройки 12 соотношения скоростей перемещения продольного и поперечного суппортов и реверсирующий механизм 13 для настройки соотношения направлений этих движений при обработке конических винтовых поверхностей.

На поперечном суппорте 5 смонтирован механизм 14 возвратно-поступательного движения каретки 6, который связан со шпинделем 1 кинематической цепью, содержащей суммирующий механизм 15 и орган настройки 16, служащий для задания соотношения между одним оборотом шпинделя и числом двойных ходов каретки 6 при обработке многозаходных винтовых поверхностей. Через суммирующий механизм 15 механизм 14 связан также с тяговым устройством 8, что позволяет сообщать каретке с инструментом 7 дополнительное движение, необходимое для получения на заготовке винтовой поверхности, шаг которой настраивается органом 17.

Для вращения шпинделя 1 и связанных с ним перемещений суппортов и каретки служит двигатель 18, который соединен со шпинделем 1 через орган 19 настройки частоты вращения шпинделя. Муфты 20, 21 и 22 предназначены для отключения соответственно механизма 14 или тяговых

ся в технологическом оборудовании ряда предприятий страны. Роторы, как запасные части винтовых насосов, обычно приобретаются за рубежом. В этой связи актуально освоение их производства, что связано с созданием соответствующего оборудования и разработкой технологии их обработки.

Ротор винтового насоса ограничен круговой винтовой поверхностью, особенностью геометрии которой является то, что в любом поперечном сечении она представляет окружность, эксцентрично расположенную относительно оси ротора (рис. 1). Поэтому формообразование круговой винтовой поверхности удобно рассматривать как перемещение окружности вдоль винтовой линии.

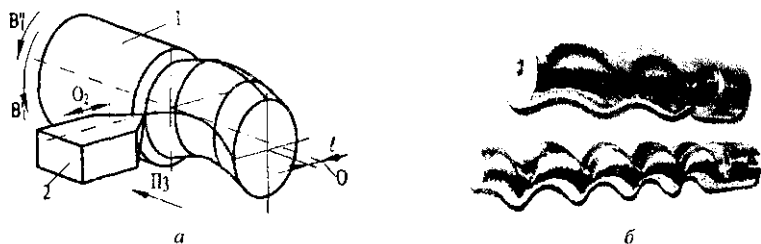


Рис. 1. Схема обработки круговой винтовой поверхности (а) и образцы роторов винтовых насосов (б)

Эксцентрично расположенную окружность при точении можно получить сложным движением, образованным сочетанием вращения  $B_1'$  заготовки и осциллирующего (возвратно-поступательного) движения  $O_2$  резца, а направляющую винтовую линию – вращением  $B_1''$  заготовки вокруг своей геометрической оси, согласованным с поступательным движением  $P_3$  резца параллельно оси заготовки [1]. Параметры возвратно-поступательного движения резца таковы, что центр образующейся окружности в любой момент времени отстоит от геометрической оси  $O$  заготовки на величину эксцентриситета профиля  $e$  (см. рис. 1).

Таким образом, круговая винтовая поверхность формируется двумя сложными исполнительными движениями – движением резания  $\Phi_1(B_1' O_2)$  и винтовым движением подачи  $\Phi_2(P_3 B_1'')$ . Эти движения могут быть созданы на токарно-затыловочном станке при соответствующем исполнении механизма профилирования (возвратно-поступательного движения поперечного суппорта). Кинематическая структура модернизированного токарно-винторезного станка [2] представлена на рис. 2. Станок содержит шпиндель 1, несущий обрабатываемую заготовку 2, станину 3, на которой с возможностью перемещения вдоль нее установлен продольный суппорт 4, несущий попе-

1. Данилов, В.А. Модернизация токарных автоматов для обработки некруглых деталей / В.А. Данилов // СТИН. – 1993. – № 2. – С. 19 – 22.
2. Данилов, В.А. Новые технологии формообразования профильных и прерывистых поверхностей резанием / В.А. Данилов // Инженер-механик. – 2003. – № 3 (20). – С. 26 – 31.
3. Данилов, В.А. Синтез схем формообразования торцовых зубчатых контуров / В.А. Данилов, Р.А. Киселев // Теория и практика машиностроения: междунар. пуч.-техн. журнал. – № 1. – 2005. – С. 83 – 87.

УДК 621.91.04

## РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРЕССИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕРНИЗАЦИИ СТАНКОВ

В.А. Данилов, А.А. Чепурной

*УО «Полоцкий государственный университет», Новополоцк*

Подъем промышленного производства требует технического перевооружения заводов вследствие физического и морального износа станков. Наряду с закупкой нового активно выполняются программы модернизации имеющегося оборудования, что позволяет экономить до 70 % средств на обновление оборудования. Наиболее активно ведется модернизация станков с числовым программным управлением, что связано с их высокой стоимостью, а также быстрым устареванием систем управления и комплектующих. Агрегатное (модульное) построение этих станков позволяет в короткие сроки проводить модернизацию, которая обычно сводится к замене системы программного управления, узлов электроавтоматики, датчиков положения исполнительных органов, а также оснащению станка унифицированными приводами главного движения и подачи, режущими инструментами, обеспечивающими скоростную и сверхскоростную обработку материалов и решение других задач.

Наряду с этим эффективно направление модернизации, когда при относительно небольших затратах создаются станки, реализующие прогрессивные способы формообразования, что обеспечивает возможность освоения производства импортозамещающей продукции. Определенный опыт в этом направлении накоплен в Полоцком государственном университете, в частности, при создании технологии и оборудования для обработки роторов винтовых насосов, которые достаточно широко применяют-

Третье из указанных направлений связано с созданием высокопродуктивных специальных станков на основе прогрессивных схем обработки. Данная задача решена в результате выполнения задания по региональной научно-технической программе «Инновационное развитие Витебской области» при создании технологии и оборудования для нарезания зубчатого контура на торцах деталей АБС автомобилей. В рамках этой работы на основе теоретических и экспериментальных исследований [3] разработана технология высокопроизводительного нарезания плоских зубчатых контуров круговым протягиванием, созданы реализующие их специальные режущие инструменты (рис. 3, б), разработаны методы настройки станков. Заводом освоена технология изготовления созданных режущих инструментов, по заказам промышленности изготовлены два станка для обработки индукторов АБС автомобилей (рис. 3, в).

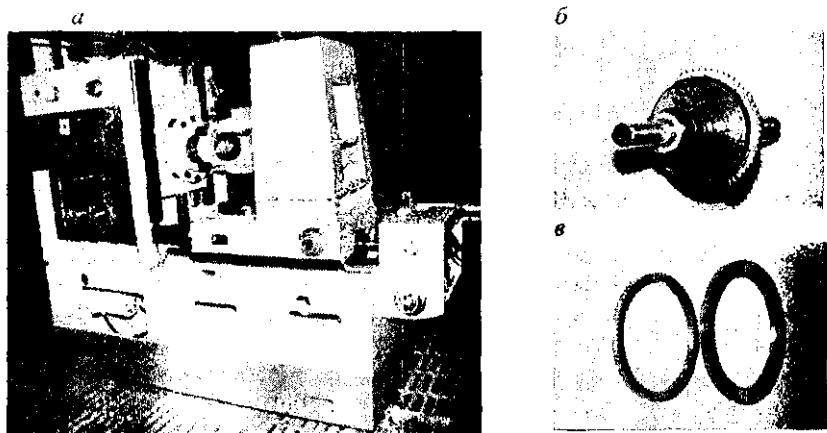


Рис. 3. Станок модели BC-30II-9253 для обработки индукторов АБС автомобилей:  
 а – общий вид станка; б – инструмент для кругового протягивания пазов;  
 в – обработанные индукторы АБС автомобилей

Таким образом, использование результатов теоретических, экспериментальных и конструкторско-технологических работ при выполнении заданий научно-технических программ позволило освоить производство нового типа станков и инструментов. Тем самым решена важная задача оснащения предприятий станками отечественного производства, исключается необходимость в импорте аналогичного оборудования и расширяются возможности экспорта станков.

более широкие технологические возможности, благодаря реализации прогрессивных схем формообразования сложных поверхностей.

Второе из указанных направлений было реализовано в широко-универсальном зубошлицефрезерном станке модели ВС-50 (рис. 2, а) [2], который был создан совместно Полоцким государственным университетом (обоснование кинематической структуры станка, разработка и исследование схем формообразования некруглых и прерывистых поверхностей, проектирование специальных инструментов), Витебским специальным конструкторским бюро зубообрабатывающих, шлифовальных и заточных станков (разработка рабочего проекта станка) и Витебским станкостроительным заводом им. Коминтерна (изготовление станка и специальных режущих инструментов) по двум заданиям государственной научно-технической программы «Создать и освоить в производстве новые базовые модели конкурентоспособного металлообрабатывающего оборудования и инструмента» (ГНТП «Станки и инструмент»).

Станок позволяет выполнять широкий круг операций: нарезать зубчатые колеса и шлицевые валы, обрабатывать наружные и внутренние резьбы, шпоночные пазы, винтовые канавки и многогранники, червяки, а также некруглые и прерывистые поверхности с периодически повторяющимся профилем по методу кинематического профилирования различными инструментами (рис. 2, б, в). Станок модели ВС-50 и его инструментальное оснащение заменяет зарубежное оборудование, в частности, станки-профиляторы фирмы «Wega».

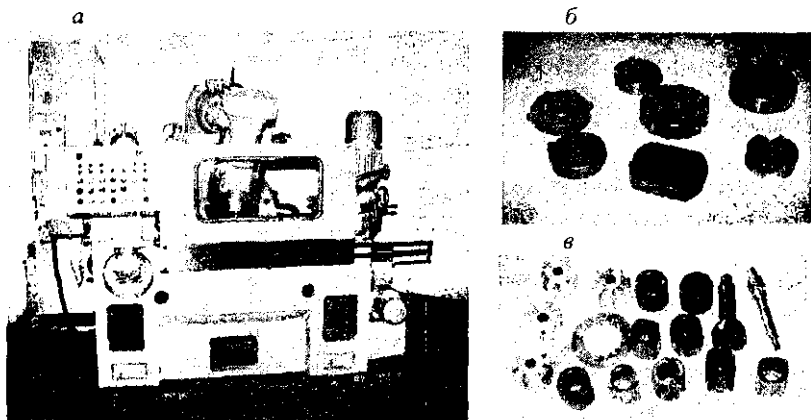


Рис. 2. Станок модели ВС-50: а – общий вид станка; б – специальные инструменты для обработки профильных и прерывистых поверхностей; в – образцы деталей, обработанных на станке

ольного точения был создан станок-профилятор [1] с необходимым инструментальным оснащением (рис. 1).

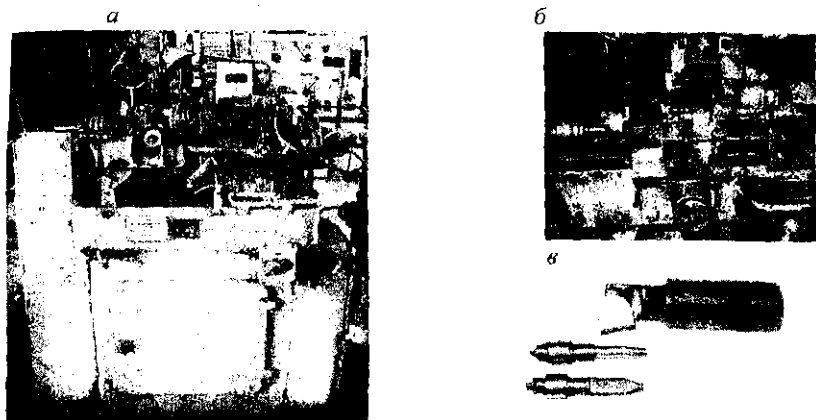


Рис. 1. Станок-профилятор для комплексной обработки: а – общий вид станка; б – обрабатывающий блок; в – инструмент с обработанными деталями

Совмещение во времени процессов обработки разных поверхностей позволило исключить из применяемой ранее технологии универсальные фрезерные станки, автоматизировать процессы обработки всех поверхностей на одном станке, сократить количество станков и численность рабочих. Многолетний опыт эксплуатации в условиях массового производства показал высокую эффективность созданных станков и технологии.

Разработки в области зубообработки выполнялись в сотрудничестве с Витебским станкостроительным заводом им. Коминтерна (ныне завод «Вистан») по следующим направлениям:

- проектирование специальных станков с необходимым инструментальным оснащением;
- расширение технологических возможностей универсальных станков за счет оснащения их сменными обрабатывающими модулями;
- создание специальных высокопроизводительных станков на базе универсального оборудования.

По первому направлению разработаны не имеющие аналогов в СНГ станок-профилятор с ЧПУ модели ВС-400Ф2 и его инструментальное оснащение для обработки некруглых и прерывистых поверхностей [2]. Эта работа выполнена совместно заводом и Полоцким государственным университетом по договору с Госкомпромом Республики Беларусь. По сравнению с аналогичным станком немецкой фирмы «Wega», этот станок имеет

на полированном образце, а для остальных образцов на участке  $z(0) \dots z(12)$  имеет место скачок, величина которого прямо зависит от  $z_n$ .

Исходная шероховатость определяет и правую границу допустимого диапазона размеров зерна: при переходе от чистового образца к получистовому размер зерна  $a^*$  увеличивается с 24 до 34 мкм. Высота профиля на допустимом участке для чистового образца несколько ниже, чем для получистового. При переходе к черновому образцу высота профиля на допустимом участке увеличивается значительно, а правая граница  $a^*$  отодвигается за пределы диапазона исследованных размеров зерна.

### **Выводы**

1. Разработана методика моделирования процесса шаржирования на твердомере и измерения параметров микропрофиля отпечатка на профилемере.

2. Исследовано влияние величины зерна и исходной шероховатости на параметры микропрофиля шаржированной поверхности. Выявлено скачкообразное изменение высотных и шаговых параметров шероховатости.

**Заключение.** Таким образом, результаты проведенных экспериментов и выявленные на их основе принципиальные зависимости подтверждают работоспособность и эффективность предложенной методики исследования поверхности, шаржированной алмазным порошком. Разработанная методика может быть использована при постановке многофакторных экспериментов.

**УДК 621.91.04**

## **ОПЫТ СОЗДАНИЯ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПРОЕКТАМ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОГРАММ**

**В.А. Данилов, Р.А. Киселев, В.А. Герентьев**

*УО «Полоцкий государственный университет», Новополоцк*

Одним из современных направлений развития станкостроения является создание станков для комплексной обработки сложных деталей, основанной на объединении различных схем резания. Это позволяет сократить число станков и повысить эффективность механической обработки. К этому направлению относится разработка по заказу Новополоцкого завода «Измеритель» технологии обработки деталей, основанной на совмещении во времени процессов обработки на одном станке поверхностей вращения и многогранных поверхностей. Для ее реализации на базе автоматов про-

Характеристики исходной шероховатости образцов

Наименование образца	Обработка образца	Характеристики шероховатости					
		$R_a$ , мкм	$R_q$ , мкм	$R_z$ , мкм	$R_{max}$ , мкм	$S$ , мм	$S_m$ , мм
чистой.	Точение, выглаживание шаром, полирование	0,151	0,21	0,73	1,186	0,073	0,109
получистой	Точение. $S_o = 0,05$ мм/об	1,16	1,426	5,443	6,693	0,047	0,055
черновой	Точение. $S_o = 0,19$ мм/об	6,185	7,56	20,12	30,61	0,16	0,2

Результаты измерений (рис. 3) иллюстрируют следующую зависимость высотных параметров шероховатости  $z$  от величины зерна  $a$  и исходной шероховатости  $z_0$ . В начале кривой  $z(a)$  присутствует участок с небольшим наклоном, на протяжении которого с ростом величины зерна параметры шероховатости изменяются незначительно. Он характеризуется предельной величиной зерна  $a^*$  и значением параметров шероховатости в начале (на самом мелком из исследуемых порошков) и в конце участка:  $z(12)$  и  $z^*$  соответственно. Этот участок определяет допустимый диапазон размера зерна – при  $a > a^*$  происходит резкое увеличение параметров шероховатости и поверхность приобретает сильные абразивные свойства. С увеличением размера зерна внутри допустимого диапазона происходит «наполнение» профиля (см. рис. 2), следовательно, оптимальным следует полагать размер зерна:  $a_{opt} = a^*$ .

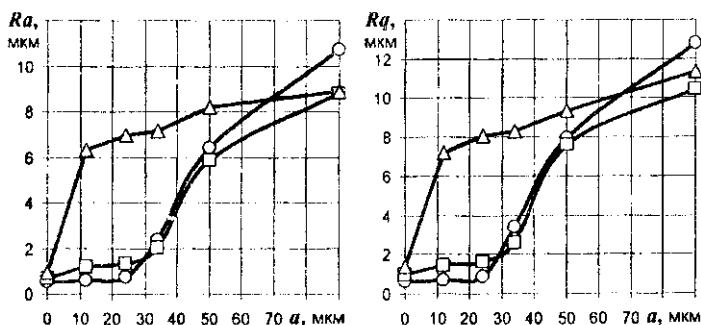


Рис. 3. Зависимость параметров шероховатости шаржированной поверхности от размера зерна: —○— — чистой образец; —□— — получистой образец; —△— — черновой образец

Левая граница допустимого диапазона в общем случае не соответствует нулевому размеру зерна (вдавливание индентора без порошка): линейная интерполяция диапазона  $z^* \dots z(12)$  дает совпадение с  $z(0)$  только



мую. Затем в точке перегиба (зернистость 40/28) приобретает близкий к первоначальному выпуклый вид, а при переходе на более крупное зерно резко изменяется, приобретая вогнутую форму.

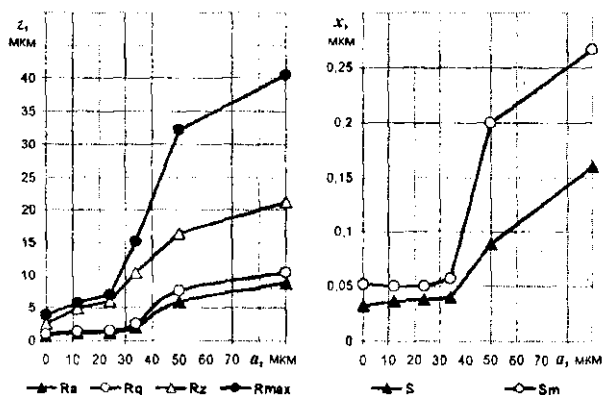


Рис. 1. Зависимость параметров шероховатости шаржированной поверхности от размера зерна

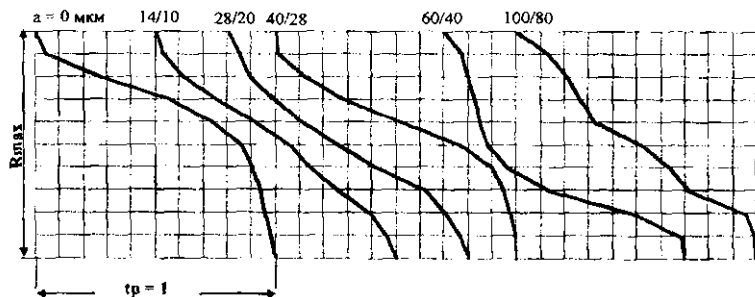


Рис. 2. Влияние размера зерна на форму опорной кривой

Логично предположить, что оптимальный размер зерна связан с шагом микронеровностей исходной шероховатости поверхности. Подача при тчении образцов составляла 50 мкм/об, следовательно, зерна размером 50 мкм и более не помещаются во впадинах профиля и после вдавливания значительно выступают над поверхностью.

Характеристики исходного микропрофиля образцов для исследования влияния шероховатости приведены в таблице.

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ШАРЖИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ПАРАМЕТРАМ ШЕРОХОВАТОСТИ

О.Я. Асанова

*Тольяттинский государственный университет, Россия;*

Н.В. Хрипунов

*ОАО «АВТОВАЗ», Тольятти*

**Введение.** Повышение износостойкости деталей, инструмента и оснастки шаржированием алмазными порошками обладает значительным потенциалом. При относительно несложном оборудовании и оснастке, во многом сходных с применяемыми в процессах ППД, обеспечивается присутствие на контактных поверхностях пар трения алмаза – наиболее износостойкого материала.

Известно немало отдельных примеров эффективного внедрения шаржированных деталей инструмента и оснастки в машиностроении, но при всей универсальности и технологической доступности шаржирование нельзя отнести к широко известным и повсеместно применяемым методам упрочнения, таким как ППД или нанесение покрытий.

В настоящей работе исследовано влияние шероховатости поверхности до шаржирования (исходной шероховатости) на характеристики микропрофиля упрочненной поверхности.

**Методы исследований.** Для шаржирования образцов (сталь 19ХГН 180НВ) в качестве индентора использован шар ( $\varnothing 36,45$  мм, 60HRC), нагружаемый нормальной силой с использованием твердомера ТБ-5004. Микропрофиль сферического отпечатка исследован на профилографе TP200.

**Результаты исследований.** Изменение высотных параметров шероховатости  $Rz$ ,  $R_{max}$ ,  $Ra$ ,  $Rq$ , с ростом величины зерна  $a$  происходит монотонно – имеет место их резкое возрастание (рис. 1). Точка перегиба графиков  $Rz(a)$  и  $R_{max}(a)$  соответствует  $a^* = 24$  мкм, а по графикам  $Ra(a)$  и  $Rq(a)$   $a^* = 34$  мкм. Зависимость шаговых параметров  $S$  и  $S_m$  от размера зерна также имеет перегиб при  $a^* = 34$  мкм.

Изменение кривых относительной опорной длины профиля (рис. 2) показывает, что при вдавливании мелких зерен наполненность профиля снижается. Выпуклая кривая, типичная для плосковершинного профиля отпечатка полученного при вдавливании индентора без микропопошка ( $a = 0$ ) на порошках зернистостью 14/10 и 28/20 трансформируется в пря-

в рабочих зазорах силы прижима обрабатываемых элементов с более крупными частичками к поверхности МНТП будут выше по причине их большей намагниченности и инерционности, что обеспечивает более высокую эффективность процесса обработки. Измерения сил резания показали, что имеет место их снижение на 20 – 100 Н, причем наибольшее уменьшение характерно для составляющей  $F_y$ . Стойкостные испытания выполняли при скорости резания 100 м/мин, подаче  $s = 0,34$  мм/об, глубине резания  $t = 1,5$  мм, времени работы 90 мин (рис. 3).

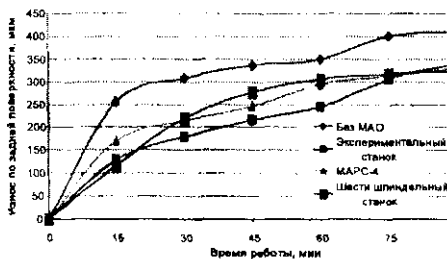


Рис. 3. Износ задней поверхности МНТП при эксплуатационных испытаниях

кольцевой ванны составляет 20 – 30°. При этом формируется микропрофиль рабочих поверхностей пластин с располированными вершинами, а радиус притупления режущих кромок незначителен и не превышает 6-8 мкм. Показано, что в процессе МАО обеспечивается наклеп поверхностного слоя с коэффициентом наклепа  $K = 1,3 - 1,5$ . Работоспособность МНТП возрастает не менее чем в 1,5 раза. Наибольшее влияние на показатели работоспособности оказывают условия перемещения обрабатываемых деталей в зонах обработки и размер частиц магнитно-абразивных порошков.

### Литература

1. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
2. Кобчиков, В.С. Технология магнитно-абразивного полирования изделий из твердых сплавов: автореф. ... канд. техн. наук / В.С. Кобчиков. – Л.: ЛПИ, 1983 – 16 с.
3. Ульяновко, Н.В. Підвищення працездатності твердосплавного інструменту шляхом застосування магнітно-абразивного оброблення та нанесення зносостійких покриттів: дис. ... канд. техн. наук / Н.В. Ульяновко. – Київ, 2006. – 160 с.
4. Сакулевич, Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич. – Минск: Наука и техника, 1981. – 328 с.

резания при непрерывном точении стали 45 и величине износа по задней поверхности МНТП в процессе эксплуатации на протяжении 90 мин.

Установлено, что наиболее равномерный съем материала обеспечивается при МАО на экспериментальном станке с наклоненными по отношению к плоскости магнитной системы типа кольцевой ванны на угол  $20 - 30^\circ$  обрабатываемыми пластинами при обработке с реверсом. Наилучшие результаты по шероховатости – снижение величины  $Ra$  менее  $0,3$  мкм,  $Rz$  – менее  $2-3$  мкм получены при использовании более крупного магнитно-абразивного порошка (рис. 1, 2). Режущие кромки при этом приобретают правильную форму без микровывривов и сколов.

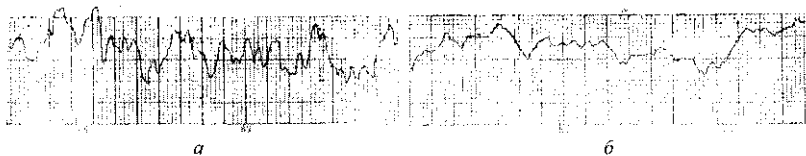


Рис. 1. Профилограммы задней поверхности МНТП до (а) и после (б) МАО, ГУ50000, ВУ 500

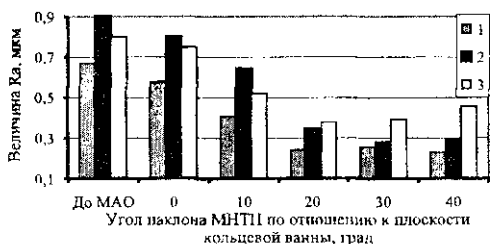


Рис. 2. Изменение величины шероховатости поверхности МНТП от угла ее базирования в рабочей зоне установки; 1 – на задней поверхности, 2 – на опорной поверхности, 3 – на передней поверхности пластины

Происходит их незначительное притупление на  $6 - 8$  мкм. Наилучшие результаты по упрочнению поверхности МНТП (коэффициент упрочнения  $K = 1,35$ ) обеспечиваются при МАО порошком Ферромап с размером частиц  $200/100$  мкм и добавлением алмазной пасты со скоростью вращения вокруг оси кольцевой ванны  $3,3$  м/с, частоте вращения шпинделей  $400$  об/мин, магнитной индукции в рабочих зазорах  $0,23$  Тл. При использовании для МАО порошка Ферромап с размером частиц  $400/315$  мкм с алмазной пастой величина коэффициента упрочнения возрастает до  $1,5 - 1,57$  при аналогичных условиях обработки. Это связано с тем, что более крупные частицы обеспечивают более весомый вклад в силы динамического происхождения при МАО, а сам магнитно-абразивный инструмент выполняет роль эластичного притира. А при одинаковой магнитной индукции

**Цель работы** – проведение сравнительного анализа эффективности процесса МАО МНТП в различных условиях, реализуемых на оборудовании, которое обеспечивает различную кинематику и динамику процесса обработки.

**Экспериментальные исследования.** МАО МНТП выполняли на установках трех типов, реализующих разную кинематику и динамику процесса перемещения обрабатываемых деталей в рабочих зонах при обработке: на магнитно-абразивном роторном станке МАРС [1, 4], шестипиндельной установке типа кольцевая ванна [3] с вертикальным расположением шпинделей и экспериментальном станке, обеспечивающем возможность позиционирования и последующего перемещения обрабатываемых изделий под различными углами в кольцевой рабочей зоне, возможность вращения деталей вокруг оси оправки, используемой для крепления МНТП, в различных направлениях с регулируемой частотой при регулируемом вращении головки станка с технологической наладкой вокруг оси кольцевой ванны.

Исследования выполняли на МНТП типа SNMG 120412 и SNMM 120412, изготовленные различными фирмами (MITSUBISHI и Московским комбинатом твердых сплавов, KENNAMETAL и ОАО «Кировоградским заводом твердых сплавов»). Предварительный анализ состояния рабочих элементов МНТП разных изготовителей показал, что шероховатость рабочих поверхностей до МАО для пластин MITSUBISHI и KENNAMETAL составляет 0,7 – 0,9 мкм, рабочие кромки без микросколов со средней величиной радиуса режущей кромки в диапазоне 30 – 38 мкм. Шероховатость рабочих поверхностей (передней и задней) МКТС и кировоградских пластин составляет 0,9 – 1,4 мкм, рабочие кромки имеют радиус округления 40 – 55 мкм, шероховатость  $Ra = 2,5 - 2,8$  мкм и  $Rz = 15 - 16$  мкм, что свидетельствует о наличии на них микросколов.

МАО выполняли магнитно-абразивными порошками Ферромап с размером частиц 400/315 и 200/100 мкм с добавлением алмазной пасты АСМ 3/2. Время обработки составило 120 с. Варьировали скоростью МАО в диапазоне 1,7 – 3,3 м/с, величиной магнитной индукцией в рабочих зонах от 0,15 до 0,35 Тл и углом наклона пластин по отношению к плоскости рабочих зон в диапазоне 0 – 40°.

Результаты обработки оценивали по величине шероховатости, характеру изменения опорной поверхности микропрофиля, изменению радиусов округления режущих кромок и величине поверхностной твердости. Эксплуатационные характеристики МНТП после МАО оценивали по силам

микросколов (особенно на режущих кромках), которые могут быть причиной разрушения инструмента в процессе его эксплуатации, напряженным состоянием тонкого поверхностного слоя, величиной поверхностной твердости. Именно на эти факторы обращают особое внимание на финишных стадиях изготовления инструмента.

**Состояние проблемы.** В современном производстве распространенными методами финишной обработки при изготовлении многогранных неперегретаемых твердосплавных пластин (МНТП) являются виброабразивная или струйно-абразивная обработки, которые применяют после их спекания. При этом решаются задачи, связанные с удалением «облоя», остатков засыпки, применяемой при спекании, снижением уровня шероховатости, притуплением режущих кромок МНТП, формированием благоприятных сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое. Распространенной операцией при размерной финишной обработке является шлифование рабочих поверхностей МНТП абразивным инструментом из сверхтвердых материалов. В последнее время широкое применение находят методы комбинированной финишной обработки, которые используют комплексное воздействие различных технологических процессов и физических явлений, способных формировать заданные свойства рабочих поверхностей МНТП, обеспечивая повышение их эксплуатационных характеристик. К одному из таких методов можно отнести метод магнитно-абразивной обработки (МАО) в условиях больших рабочих зазоров. Эффективность данного метода для финишной обработки доказана в [1 – 3]. Показано, что МАО позволяет не только формировать шероховатость рабочих поверхностей на уровне 0,2 мкм, но и обеспечивать существенное повышение поверхностной твердости (в ряде случаев до величины  $HV = 18 - 20$  ГПа, на глубине более 10 – 50 мкм). При этом установлено повышение работоспособности режущего инструмента не менее чем в 1,3 – 1,5 раза. Общим недостатком известных методов, применяемых при МАО МНТП являются ограничения, связанные с существующими схемами обработки, определяемые условиями базирования деталей в зонах обработки – когда ось МНТП расположена вертикально и совпадает с осью преимущественного вращения шпинделя станка. Данные схемы МАО не учитывают специфику процесса обработки, определяемую сложной и разнообразной формой МНТП. Поэтому возникает задача по обеспечению равномерной и эффективной обработки всех рабочих поверхностей твердосплавного инструмента – задней и передней поверхностей, непосредственно режущих кромок, элементов, предназначенных для стружкодробления на передней поверхности, опорных поверхностей.

полную картину объемного сжатия порции ФАП в рабочем зазоре между зубьями шестерни. Поэтому из-за сравнительно небольших модулей упругости этого материала в данном зазоре возникают заметные деформации сжатия.

Проведенные исследования и полученные экспериментальные данные показывают, что использование данной схемы МАО гарантирует снижение шероховатости рабочей поверхности зубчатого контура колеса с показателя  $R_{a1} = 1,6 - 3,2$  мкм до  $R_{a2} = 0,4 - 0,8$  мкм за 120 с обработки. Модуль  $m$  этих зубчатых колес составляет диапазон 2,5 – 3,5 мм. Величина рабочего зазора варьируется от 1 до 3 мм.

**Выводы.** В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что применение в качестве финишной обработки метода МАО приводит к достижению требуемых показателей шероховатости рабочей поверхности зубчатых колес, обеспечивающих рост эксплуатационных параметров и надежность функционирования механизмов.

### Литература

1. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
2. Ящерицын, П.И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / П.И. Ящерицын, А.Г. Зайцев, А.И. Барбогько. – Минск: Наука і техника, 1976. – 396 с.
3. Hou, Zhen Bing Magnetic field assisted finishing of ceramics / Zhen Bing Hou, R. Komanduri // Journal of Tribology, Transactions of the ASME. – v. 120. – № 4. – 1998. – p. 645 – 651.
4. Сакулевич, Ф.Я. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Я. Сакулевич. – Минск: Наука и техника, 1981. – 328 с.
5. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / под ред. М.Л. Хейфеца и Б.П. Чемисова. – Новополоцк: ПГУ, 2002. – 268 с.

УДК 621.923

## МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА МНОГОГРАННЫХ НЕПЕРЕТАЧИВАЕМЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН

В.С. Майборода

*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»*

**Введение.** Качество твердосплавного режущего инструмента в значительной степени определяется микрогеометрией его рабочих поверхностей, наличием на поверхности микроконцентраторов напряжений в виде

ерность, кроме как использованием магнитного поля. Поэтому если осуществлять дополнительное уплотнение этой порции ФАП, находящейся в пространстве межзубной впадины, то можно увеличить размерный и массовый съем материала детали. Вращение зубчатого колеса как заготовки осуществляет доставку порции ФАП между зубьями шестерни к месту уплотнения. Кроме того, уплотнение этой порции носит характер постоянного и плавного увеличения, не обладающего дискретностью, что положительно сказывается на качестве обработки (рис. 2).

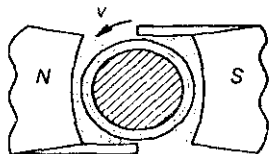


Рис. 2

Таким фактором ограничения выступает плоскость демпфера, играющего роль рабочей поверхности поршня (рис. 3, а). Разница заключается в том, что при традиционной схеме производится сжатие какого-либо объема вещества путем поступательного движения поршня, а в данном случае уплотнение порции ФАП осуществляется реализацией ее доставки элеваторным способом. Таким образом, основная задача заключается в необходимости расчета возникающего дополнительного воздействия на порцию ФАП, т. е. механического, как было указано ранее, и которое, в свою очередь, должно быть связано со скоростью вращения заготовки и, кроме

того, с геометрическими размерами инструмента, или, иначе говоря, порцией ФАП. Физическая модель имеет определенные допущения, заключающиеся в замене эвольвентного профиля впадины прямоугольным, а также представлении, как указано на рис. 3, б, суперпозиций давления, образованных окружностями

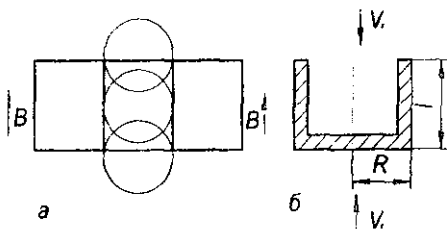


Рис. 3

стями в каждом конкретном поперечном сечении заготовки зубчатого колеса.

Для процесса МАО характерно сложное реологическое поведение порции ферроабразивного порошка, что накладывает определенные трудности на создание и построение адекватных моделей [5]. При их построении стало традиционным не учитывать сжимаемость материала, поэтому полагают, что  $\xi_c = 0$  и  $\epsilon_c = 0$ , в варианте же МАО возникает ситуация, что принимаемые допущения приводят к существенным отклонениям от реального процесса. В общем случае физическая модель будет носить нелинейный характер, что усложняет ее использование, но одновременно дает более



представляет сложную задачу. Что касается самого метода шлифования, то для него характерно образование прижогов поверхностного слоя и низкий коэффициент использования абразивных зерен, и это ухудшает качественные показатели обработанной поверхности детали [2].

**Результаты и обсуждение эксперимента.** Согласно представленному анализу другим вариантом служит возможность создания инструмента на упругой связке, позволяющей осуществлять заполнение пространства впадины между двумя зубьями шестерни. Однако упругая связка или, иначе говоря, свободное закрепление абразивного зерна, что характерно для метода полирования, обладает низким показателем его давления на

обрабатываемую поверхность, высокой текучестью суспензии или пасты и не имеет требуемого диапазона размерного и массового съема материала. В таком случае следующим вариантом выступает абразивная обработка [3, 4] с подвижно-координированным закреплением зерна в связке инструмента, образованном магнитным полем (рис. 1).

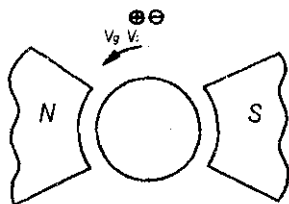


Рис. 1

Данное закрепление зерна позволяет произвести заполнение указанной выше межзубной впадины и путем регулирования подачи тока на катушки соленоидов электромагнитной системы (ЭМС) изменять давление ферроабразивного порошка (ФАП) на обрабатываемую поверхность зуба. Известно, что уровень этого давления составляет 0,4 – 2 МПа и данный показатель ниже, чем при шлифовании, который равен 10 – 15 МПа. Диапазон достигаемой на данный момент времени величины магнитной индукции находится в пределах 0,8 – 1 Тл, и этому диапазону и соответствует уровень давлений инструмента. Повышение силы тока с целью образования больших по значению показателей магнитной индукции, которая является силовой характеристикой процесса магнитно-абразивной обработки (МАО), связано с пределом магнитного насыщения сердечника и увеличением неоправданного расхода электроэнергии. В таком случае существует возможность интенсификации процесса МАО сложно-профильных поверхностей и зубчатых колес в частности за счет увеличения давления инструмента путем воздействия двух факторов: магнитного и механического. Указанное выше решение приводит к росту давления и обеспечивается созданием конструкции схемы МАО, заключающимся в дополнительном ограничении и уплотнении съема порции ФАП. Это связано с тем, что для данной порции ФАП, находящейся в межзубном пространстве, не существует возможности ограничить свою раз-

На основании полученной зависимости разработан модуль оценки упругой деформации заготовки при точении, который является частью системы, направленной на повышение точности токарной обработки.

### Литература

1. Жолобов, А.А. Застосування 3D моделі ГВМ для підвищення продуктивності та якості механічної обробки / А.А. Жолобов, А.В. Казаков // Весник ЖДГУ. – 2006. – № 4 (39). – С. 21 – 25.
2. Сопротивление материалов: учеб. пособие / А.В. Александров; под ред. А.В. Александрова. – М.: Высш. шк., 1995. – 560 с.

УДК 621.923

## ФЕРРОАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ПРЕРЫВИСТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, В.В. Головков, В.Е. Бабич, Е.В. Сенчуров  
*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск*

**Введение.** Современные тенденции в машиностроении направлены на реализацию уменьшения количества операций в общем объеме технологического процесса изготовления деталей машин [1]. Ввиду этого всякий раз возникает необходимость в повышении качественных показателей точности и качества после каждой отдельной операции, поскольку выходные показатели продукции остаются на заданном уровне. Особая ответственность в связи с изложенным возлагается на финишные методы механической обработки изделий. Решение данной проблемы приводит к тому, что некоторые технологические операции, относящиеся к ряду финишных по причине достижения высоких показателей точности и качества на предшествующих операциях, связанных с лезвийной обработкой, могут быть заменены либо исключены вообще.

**Постановка задачи исследования.** Одними из самых ответственных деталей в машиностроении являются зубчатые колеса, финишная обработка которых связана с рядом технологических и организационных трудностей. Профиль межзубной впадины имеет сложный характер конфигурации, в связи с чем всякий раз возникает необходимость в проведении мероприятий по созданию аналогичного профиля формообразующего инструмента. Известно, что поскольку форма детали – след инструмента, то достижение требуемой ориентации границ режущего контура, например, шлифовального круга

$$\Delta_i(l_i) = \frac{1}{6 * E} * \frac{(2 * M_i^n + M_i^k) * l_i^2}{I_i} + \theta_{0i} * l_i + \Delta_{0i}. \quad (15)$$

Угол поворота в начале  $i$ -того участка определяется из условия целостности бруса ( $\theta_{0i} = \theta_{i-1}$ ) [2]:

$$\theta_{0i} = \theta(i-1). \quad (16)$$

Тогда выражение (15) примет вид

$$\Delta_i(l_i) = \frac{1}{6 * E} * \frac{(2 * M_i^n + M_i^k) * l_i^2}{I_i} + \left( \frac{1}{2 * E} * \sum_{k=1}^{i-1} \left( \frac{(M_k^n + M_k^k) * l_k}{I_k} \right) + \theta_{01} \right) * l_i + \Delta_{0i} \quad (17)$$

Упругая деформация в конце  $k$ -того участка определяется как сумма  $\Delta_j(l_j)$ , т.е.

$$\Delta(k) = \sum_{i=1}^k \Delta_i(l_i), \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Delta(k) = & \frac{1}{6 * E} * \sum_{i=1}^k \left( \frac{(2 * M_i^n + M_i^k) * l_i^2}{I_i} \right) + \theta_{01} * \sum_{i=1}^k l_i + \\ & + \frac{1}{2 * E} * \left( \sum_{i=2}^k l_i * \sum_{j=1}^{i-1} \left( \frac{(M_j^n + M_j^k) * l_j}{I_j} \right) \right) + \Delta_{01}. \end{aligned} \quad (19)$$

Для упрощения расчетов удобны следующие замены:

$$\Delta_i^\Delta = \frac{(2 * M_i^n + M_i^k) * l_i^2}{I_i}, \quad (20)$$

$$\Delta_i^\theta = \frac{(M_i^n + M_i^k) * l_i}{I_i}. \quad (21)$$

Тогда выражение (19) примет вид

$$\Delta(k) = \frac{1}{6 * E} * \sum_{i=1}^k \Delta_i^\Delta + \theta_{01} * \sum_{i=1}^k l_i + \frac{1}{2 * E} * \left( \sum_{i=2}^k l_i * \sum_{j=1}^{i-1} \Delta_j^\theta \right) + \Delta_{01}. \quad (22)$$

При базировании вала в центрах начальный угол поворота первого участка  $\theta_{01}$  определяется из выражения (22) и условий  $\Delta(n) = 0, \Delta_{01} = 0$ :

$$\frac{1}{6 * E} * \sum_{i=1}^n \Delta_i^\Delta + \theta_{01} * \sum_{i=1}^n l_i + \frac{1}{2 * E} * \left( \sum_{i=2}^n l_i * \sum_{j=1}^{i-1} \Delta_j^\theta \right) = 0; \quad (23)$$

$$\theta_{01} = \frac{-\frac{1}{6 * E} * \sum_{i=1}^n \Delta_i^\Delta - \frac{1}{2 * E} * \left( \sum_{i=2}^n l_i * \sum_{j=1}^{i-1} \Delta_j^\theta \right)}{\sum_{i=1}^n l_i}. \quad (24)$$

После подстановки  $M_i(x)$  в (3) и интегрирования полученного выражения (5) угол поворота в сечении с координатой  $x$  ( $0 \leq x \leq l_i$ )  $i$ -того участка определяется выражением (6).

$$\theta_i(x) = \frac{1}{EI_i} \int M_i'' + \frac{M_i^K - M_i''}{l_i} * x + \theta_{0i}, \quad (5)$$

$$\theta_i(x) = \frac{1}{EI_i} * (M_i'' * x + \frac{M_i^K - M_i''}{2 * l_i} * x^2) + \theta_{0i}, \quad (6)$$

Значение угла поворота в конце  $i$ -того участка (7) определяется выражением (6) при  $x = l_i$ :

$$\theta_i(l_i) = \frac{1}{EI_i} * (M_i'' * l_i + \frac{M_i^K - M_i''}{2 * l_i} * l_i^2) + \theta_{0i}, \quad (7)$$

После упрощения выражения (7) значение угла поворота в конце  $i$ -того участка примет окончательный вид

$$\theta_i(l_i) = \frac{1}{2 * E} * \frac{(M_i'' + M_i^K) * l_i}{I_i} + \theta_{0i}. \quad (8)$$

Таким образом, для того чтобы получить значение угла поворота в конце  $k$ -того участка, необходимо просуммировать выражение (8):

$$\theta(k) = \sum_{i=1}^k \theta_i(l_i), \quad (9)$$

$$\theta(k) = \frac{1}{2 * E} * \sum_{i=1}^k \left( \frac{(M_i'' + M_i^K) * l_i}{I_i} \right) + \theta_{01}. \quad (10)$$

Закон изменения упругих деформаций можно получить интегрированием выражения (3):

$$\Delta_i(x) = \int \theta_i(x) + \Delta_{0i}, \quad (11)$$

$$\Delta_i(x) = \int \left( \frac{1}{EI_i} * (M_i'' * x + \frac{M_i^K - M_i''}{2 * l_i} * x^2) + \theta_{0i} \right) + \Delta_{0i}, \quad (12)$$

$$\Delta_i(x) = \frac{1}{EI_i} * \left( \frac{M_i'' * x^2}{2} + \frac{M_i^K - M_i''}{6 * l_i} * x^3 \right) + \theta_{0i} * x + \Delta_{0i}. \quad (13)$$

где  $\Delta_i(x)$  – значение упругой деформации в сечении с координатой  $x$  ( $0 \leq x \leq l_i$ )  $i$ -того участка;  $\Delta_{0i}$  – значение упругой деформации в начале  $i$ -того участка.

Таким образом, упругая деформация в конце  $i$ -того участка определяется зависимостью

$$\Delta_i(l_i) = \frac{1}{EI_i} * \left( \frac{M_i'' * l_i^2}{2} + \frac{M_i^K - M_i''}{6} * l_i^2 \right) + \theta_{0i} * l_i + \Delta_{0i}, \quad (14)$$

где  $\Delta(x)$  – закон изменения упругих деформаций заготовки в рассматриваемой плоскости;  $M(x)$  – изгибающий момент вызванный соответствующей силой или силами резания в рассматриваемой плоскости;  $EI(x)$  – закон изменения жесткости заготовки.

Схема заготовки с действующими на нее при обработке силами резания приведена на рис. 1.

Интегрирование выражения (1) дает закон изменения угла поворота [2]:

$$\theta(x) = \Delta(x)' = \int \frac{M(x)}{EI(x)} + \theta_0. \quad (2)$$

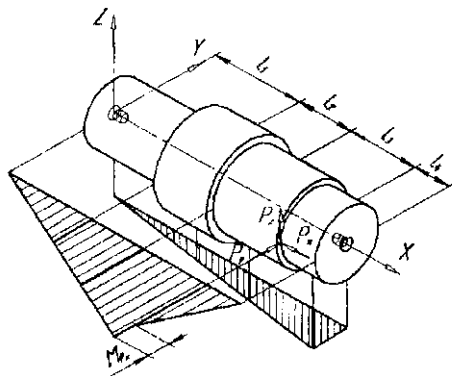


Рис. 1. Схема нагружения вала силами резания

Для дальнейшего анализа обрабатываемую заготовку удобно разделить на участки с постоянной жесткостью. Т.е. каждая ступень будет являться участком, который характеризуется следующими параметрами: угол поворота в начале участка, угол поворота в конце участка, упругая деформация в начале участка, упругая деформация в конце участка, изгибающий момент в начале участка, изгибающий момент в конце участка.

Исходя из вышеизложенного, выражение (2) можно записать в виде

$$\theta_i(x) = \frac{1}{EI_i} \int M_i(x) + \theta_{0i}, \quad (3)$$

где  $\theta_i(x)$  – угол поворота в сечении с координатой  $x$  ( $0 \leq x \leq l_i$ )  $i$ -того участка;  $M_i(x)$  – закон изменения изгибающего момента на  $i$ -том участке;  $\theta_{0i}$  – угол поворота в начале  $i$ -того участка.

Закон изменения изгибающего момента на  $i$ -том участке можно представить в виде линейной функции

$$M_i(x) = M_i'' + \frac{M_i^k - M_i''}{l_i} * x, \quad (4)$$

где  $M_i''$  – изгибающий момент в начале  $i$ -того участка;  $M_i^k$  – изгибающий момент в конце  $i$ -того участка;  $l_i$  – длина  $i$ -того участка.

Применение представленных зависимостей может осуществляться как для определения только прогибов заготовок и деталей, имеющих шлицевую поверхность, так и в комплексе автоматизированного прогнозирования точности шлицефрезерования червячной фрезой наряду с учетом упругих деформаций и смещений остальных элементов технологической системы.

### Литература

1. Шалыжин, К.А. Прогнозирование погрешностей шлицевого вала на основе моделирования и анализа деформаций в технологической системе / К.А. Шалыжин, А.А. Жолобов // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы международной науч.-техн. конф., Могилев, 19 – 20 апреля 2007 г. В 3-х ч. Ч. 1 / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет». – 2007. – С. 102 – 103.*
2. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.
3. Лизюгуб, В.А. Влияние проектных параметров узлов токарного станка и режима резания на точность обработки / В.А. Лизюгуб // *СТИН*. – 2007. – № 3. – С. 8 – 10.
4. Трофимов, Б.Ф. Расчет моментов инерции сечения шлицевых валов с эвольвентным профилем зубьев / Б.Ф. Трофимов // *Вестник машиностроения*. – 2004. – № 8. – С. 23 – 25.

УДК 621.9

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ СТУПЕНЧАТОГО ВАЛА В ПРОЦЕССЕ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ

А.А. Жолобов, А.В. Казаков

*Белорусско-Российский университет, Могилев*

При токарной обработке по мере удаления припуска и перемещения резца от задней бабки к шпиндельному узлу станка изменяются жесткость и деформация заготовки, величина упругой деформации передней и задней бабок. В результате получается деталь с переменным диаметром, а также с погрешностями в продольном сечении. При неблагоприятных условиях величина данной погрешности может превысить допуск на размер детали [1]. Величину прогиба заготовки, а следовательно, величину, на которую изменится глубина резания под действием сил резания  $P_Y$ ,  $P_Z$ ,  $P_X$  любой точки заготовки при базировании в центрах, патроне или в патроне с поджимом задним центром, можно определить с помощью дифференциального уравнения изогнутой оси балки [2]:

$$\Delta(x)'' = \frac{M(x)}{EI(x)}. \quad (1)$$

Угол сектора определяется по формуле

$$\alpha = \frac{2\pi}{z}, \quad (3)$$

где  $z$  – число зубьев шлицевого вала.

Используя методику [1], для каждого номинального размера шлицевого профиля из ГОСТ 1139-80 был определен осевой момент инерции сечений. Сравнивая рассчитанные значения осевого момента инерции шлицевого профиля со значениями момента инерции профиля, соответствующего круглой заготовке, установлено, что с геометрической точки зрения формирование шлицев ослабляет сечение примерно на 30 – 40 % для различных шлицевых профилей. Это приводит к различному характеру прогибов обрабатываемой заготовки на участках до и после обработки. После установления значений моментов инерции шлицевых профилей было проведено исследование прогибов шлицевых валов при фрезеровании шлицевой поверхности по всей длине вала. При этом для каждого стандартного шлицевого профиля были выбраны режимы резания, на основании которых рассчитаны величины силовых факторов, действующих на заготовку. Расчет деформаций заготовки производился по представленным формулам.

Установлено, что при обработке шлицевой поверхности наименьшие деформации заготовки наблюдаются у профилей с большим числом шлицев. В этом отношении наиболее оптимальными являются шлицевые профили тяжелой серии с числом шлицев не менее десяти.

Фрезерование шлицев за два рабочих хода позволяет уменьшить деформации заготовки пропорционально разделению припуска между рабочими ходами, а также устранить эксцентриситет максимума кривой прогибов заготовки (рис. 3).

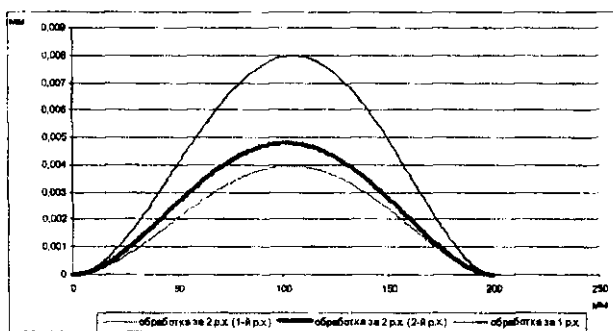


Рис. 3. График прогибов заготовки при шлицефрезеровании за один и два рабочих хода (р. х.)

осевой момент инерции круглого профиля определяется из расчета приведенного диаметра ступеней [3].

$$d_{np} = \sqrt{\frac{\sum_1^n d_i \cdot I_i}{\sum_1^n I_i}}, \quad (3)$$

где  $n$  – число ступеней вала;  $d_i, I_i$  – диаметр и момент инерции  $i$ -того участка вала.

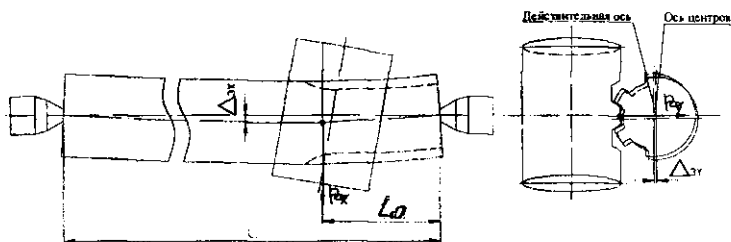


Рис. 1. Схема деформации заготовки

При обзоре исследований моментов инерций периодических профилей [4] установлено, что в настоящее время отсутствуют сведения о величинах моментов инерции стандартных прямобочных шлицевых профилей. Для их расчета была использована методика [2].

Значение осевого момента инерции шлицевого профиля определяются путем суммирования осевых моментов инерции составляющих его отдельных элементарных фигур – треугольников, прямоугольников и сегментов. Простейшим элементом, характеризующим профиль шлицевого сечения, является сектор, ограниченный одним выступом и одной впадиной (рис. 2). Для определения осевых моментов инерции элементарного сектора он раскладывается на элементарные фигуры: равнобедренный треугольник, прямоугольник и сегмент. Для каждой фигуры, условно ориентированной вдоль координатных осей определяются осевые моменты инерции [2]. Осевые и центробежный момент инерции элементарного сектора определяется как сумма осевых и центробежных моментов инерции фигур, его составляющих.

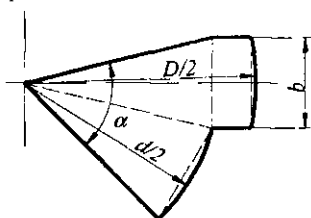


Рис. 2. Элементарный сектор шлицевого профиля



## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ШЛИЦЕФРЕЗЕРОВАНИИ

К.А. Шалыжин, А.А. Жолобов

*Белорусско-Российский университет, Могилев*

При прогнозировании точности формообразования в технологических системах является актуальной задача определения прогибов заготовок под действием сил резания. Особую важность эта задача приобретает при обработке сложных заготовок с фасонными поверхностями, например, при фрезеровании прямобочных шлицев червячной фрезой. В данной технологической системе наряду с относительной сложностью формообразования методом обката существует значительное ослабление заготовки, обусловленное глубиной обработкой шлицевой поверхности. Возрастающая при этом податливость заготовки приводит к возникновению погрешностей поверхности. Одним из путей их компенсации является назначение рациональных режимов обработки, позволяющих ограничивать погрешности в пределах допусков выдерживаемых размеров. С этой целью необходимо определить зависимости, связывающие прогибы заготовки с режимами обработки. Расчет величин сил резания производился по методике, представленной в работе [1].

Установка заготовки в шлицефрезерном станке осуществляется в центрах передней и задней бабок. При этом прогиб заготовки под действием сил резания в точках их приложения определяется, как для балки переменного сечения, установленной на двух опорах, по формулам [2]

$$\Delta_{3X} = \frac{P_x \cdot L_0^2 \cdot (L - L_0)^2}{3 \cdot E \cdot I \cdot I_0 \cdot L^2} (II_0 + I_0(L - L_0)), \quad (1)$$

$$\Delta_{3Y} = \frac{P_y \cdot L_0^2 \cdot (L - L_0)^2}{3 \cdot E \cdot I \cdot I_0 \cdot L^2} (II_0 + I_0(L - L_0)), \quad (2)$$

где  $L$  – длина вала;  $L_0$  – длина шлицевого участка вала;  $I$  – осевой момент инерции круглого профиля вала;  $I_0$  – длина шлицевого участка вала;  $E$  – модуль упругости.

Схема деформации заготовки, закрепленной в центрах под действием сил резания  $P_x$  и  $P_y$ , представлена на рис. 1. Осевой момент инерции круглого профиля вала рассчитывается по известным формулам исходя из диаметра профиля. В случае фрезерования шлицев на ступенчатом валу

**Результаты и обсуждение.** Для оценки эффективности применения разработанного устройства была проведена серия экспериментов, в ходе которых был вычислен минутный массовый съём материала образцов и минутный электроэрозионный износ поверхности. Для условий проведения опытов (по результатам 30 экспериментов) средний съём материала составил 0,004 г/мин или 0,05 % от массы образца, а линейный электроэрозионный износ поверхности равнялся 0,2 мм/мин.

В ходе проведения опытов для вычисления минутного съёма материала образца после каждых пяти минут обработки поверхности алмазосодержащий сегмент снимался и исследовалась топография его поверхности.

Обработанная таким образом поверхность представлена на рис. 3.

Из представленной фотографии видно, что в процессе электроконтактной обработки с помощью разработанного устройства не происходит разрушения или графитизации поверхности алмазных зерен, при этом обработанные алмазные сегменты представляют собой поверхности с большим количеством перекрывающихся друг друга сферических лунок. Одновременно использование электромагнитного вибратора позволяет значительно ускорить электроэрозионное разрушение материала связки и обеспечить, как показало исследование поверхности образцов, достаточное для резки непрерывное обнажение алмазных частиц.



Рис. 3. Фотография участка поверхности образца после вскрытия алмазных зерен с помощью электроэрозионной обработки на экспериментальной установке с электромагнитным вибратором

### Литература

1. Ящерицын, П.И. Электроэрозионная правка алмазно-абразивных инструментов / П.И. Ящерицын, В.Д. Дорофеев, Ю.А. Пахалин. – Минск: Наука и техника, 1981. – 232 с.
2. Беззубенко, Н.К. Место нового процесса алмазно-абразивно-искрового шлифования в ряду комбинированных электрохимических и электрофизических методов обработки. – В сб.: Резание и инструмент, вып. 9 / Н.К. Беззубенко. – Харьков, 1974. – С. 133 – 139.
3. Чачин, В.П. Профилирование алмазных шлифовальных кругов / В.П. Чачин, В.Д. Дорофеев. – Минск: Наука и техника, 1974. – 160 с.

Конструкция электромагнитного вибратора включает кронштейн 4, на котором закреплен двухобмоточный электромагнит 5 переменного тока с сердечником 6, питание которого осуществляется с помощью генератора 3 двухполярных импульсов, с отдельной регулировкой частоты и скважности выходного сигнала. Правящий инструмент 7 электроконтактной цепи устанавливается на подвижном основании 8, связанном с кронштейном 4 с помощью плоской пружины 9. На подвижном основании с помощью уголка 10 также монтируется якорь 11. При работе от генератора 3 электрические сигналы поступают на двухобмоточный электромагнит 5 и в результате сердечник 6 притягивает или отталкивает якорь 11, приподнимая или прижимая тем самым правящий инструмент 7 к торцевой поверхности алмазного отрезного круга. Изменяя толщину и длину плоской пружины 9, а также частоту и скважность импульсов генератора 3, регулируется амплитуда и частота вынужденных колебаний правящего инструмента 7. Электроконтактная цепь включает источник постоянного тока, напряжение от которого подается на правящий инструмент 7 устройства (рис. 1, б), а также на основание 1, а через него и шпиндель, на котором закрепляется вращающийся алмазный отрезной круг.

В процессе экспериментов была принята прямая полярность электроконтактной обработки, а напряжение холостого хода и сила тока короткого замыкания составляли соответственно 12 В и 8 А. В качестве рабочей среды для электроэрозионной обработки использовалось трансформаторное масло, которое подавалось в зону взаимодействия электродов с помощью системы подвода в виде капельницы, снабженной регулятором расхода. Для удобства изучения топографии торцевой поверхности после электроэрозионной правки алмазного инструмента, а также выяснения количественных характеристик его электроконтактного износа, обработке подвергались как сами алмазные отрезные диски, так и образцы, представляющие собой отдельные алмазные сегменты (рис. 2). Крепление таких образцов 12 осуществлялось с помощью пружинной канцелярской скрепки 13 на торцевой поверхности отрезного диска 14 (рис. 1, б).



Рис. 2. Фотография общего вида алмазобносных сегментов, использованных в экспериментальных исследованиях в качестве образцов

Однако производительность такого способа правки определяется характером расположения микровыступов на рабочей поверхности алмазного инструмента и на правящем электроде, что затрудняет управление процессом. Для устранения указанного недостатка авторами предложено осуществлять принудительный разрыв контакта между правящим инструментом и обрабатываемым диском в процессе непрерывной электроконтактной правки за счет электромагнитного вибратора. Это позволяет регулировать длительность и частоту разрядов электрического тока, изменяя объем удаляемого из межзернового пространства связки и шлама. Использование вибратора электромагнитного типа вызвано следующими его преимуществами: простотой регулирования амплитуды и частоты вынужденных колебаний, надежностью в работе, малыми габаритами и массой, что позволяет встраивать его в установки для резки, получением направленных вынужденных колебаний. Исходя из этого, целью данной работы явилась разработка конструкции электроконтактного вибрационного устройства, позволяющего поддерживать режущие свойства алмазных отрезных кругов непосредственно в процессе их работы.

**Методика исследований.** Авторами предложено экспериментальное устройство для поддержания режущей способности алмазных отрезных дисков в процессе их работы, фотография общего вида которого приведена на рис. 1. Оно закрепляется на отдельном основании 1, имитирующем настольную пилу, и представляет собой малогабаритный электромагнитный вибратор 2, питание которого осуществляется с помощью генератора 3, как показано на рис. 1, а.

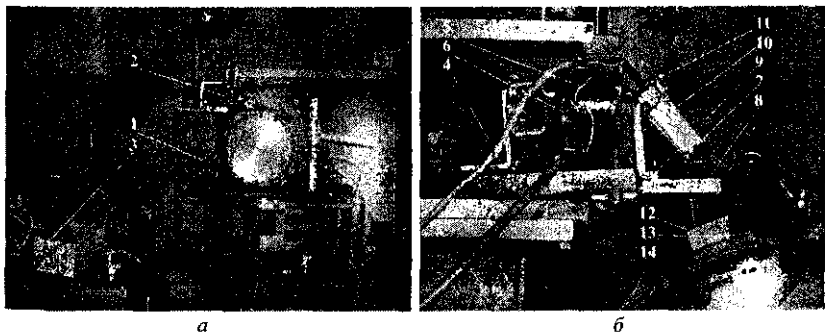


Рис. 1. Фотографии экспериментального устройства для поддержания режущей способности алмазных отрезных дисков: а – общий вид устройства; б – зона взаимодействия вибратора с торцевой поверхностью инструмента

3. Салуквадзе, В.С. Изменение свойств в поверхностном слое сплавов при иглофрезерной обработке / В.С. Салуквадзе, И.А. Другова // Расчет, сооружение и эксплуатация магистральных газопроводов. – М.: ВНИИСТ, 1980. – С. 93 – 102.

4. Ящерицын, П.И. Планирование эксперимента в машиностроении / П.И. Ящерицын, Е.И. Махаринский. – Минск: Высш. шк., 1985. – 286 с.

5. Поллард, Д. Справочник по вычислительным методам статистики / Д. Поллард; пер. с англ. В.С.Западворова. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 344 с.

6. Баршай, И.Л. Обеспечение качества поверхности и эксплуатационных характеристик деталей при обработке в условиях дискретного контакта с инструментом / И.Л. Баршай. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 244 с.

**УДК 621.9.048.4**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВИБРАТОРА ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ РЕЖУЩИХ СВОЙСТВ АЛМАЗНЫХ ОТРЕЗНЫХ КРУГОВ ЗА СЧЕТ НЕПРЕРЫВНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРАВКИ**

**М.Г. Киселев, А.В. Дроздов**

*Белорусский национальный технический университет. Минск*

**Введение.** В промышленности широкое применение находят алмазные инструменты, и в частности, отрезные круги различных типоразмеров. Наибольшее распространение получили алмазные инструменты на металлических связках, что вызвано их высокой прочностью, износоустойчивостью, а также способностью прочно удерживать зерна алмаза [1]. При этом такие инструменты работают либо с постепенным снижением режущих свойств до полного затупления, либо в режиме самозатачивания при пониженных режущих свойствах. Кроме того, они подвержены засаливанию межзернового пространства [1]. Известен способ алмазно-эрозионного шлифования, который позволяет поддерживать режущие свойства алмазных инструментов на металлических связках на высоком уровне [2], но область применения данного способа ограничена обработкой токопроводящих материалов, что снижает возможности его использования для поддержания режущей способности алмазных отрезных кругов, применяемых в основном для резки горных пород, огнеупоров, бетона и других неметаллических строительных материалов. Тем не менее, действие данного способа основано на гипотезе стружечного замыкания [3], которая также лежит в основе электроконтактной правки алмазного инструмента с помощью источников постоянного напряжения [1].

Шероховатость обработанной поверхности зависит от динамических углов проволочного элемента иглофрезы ( $\gamma$  и  $\alpha$ ), формируемых в процессе обработки [6]. Значения этих углов определяются упругой деформацией проволочных элементов инструмента. В свою очередь упругая деформация проволочных элементов зависит от параметров режима иглофрезерования. Увеличение значений параметров режима обработки приводит к росту углов  $\gamma$  и  $\alpha$ . Так, в частности, при формировании динамического переднего угла  $\gamma > (-20^\circ)$  процесс микрорезания переходит в субмикрорезание и пластическое деформирование обрабатываемой поверхности.

Рост скорости иглофрезерования способствует снижению высотных  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rt$ ,  $Rp$ ,  $Ry$ ,  $Rq$  и  $Rc$  и шаговой  $RSm$  характеристик шероховатости в 1,5...3,6 раза по сравнению с исходными (до обработки) значениями. Выявленный характер изменения характеристик шероховатости в зависимости от скорости обработки объясняется присущим иглофрезерованию «краевым» эффектом [6], который заключается в следующем. Крайние стороны обрабатываемой поверхности проволочные элементы (микрорезцы) имеют изгиб в направлении подачи заготовки больший, так как обладают меньшей жесткостью, чем весь пакет проволочных элементов. В результате они формируют микроцарапины (следы своего движения) на обрабатываемой поверхности.

Повышение продольной подачи ведет к увеличению исследуемых характеристик шероховатости. Это объясняется ростом сил резания, увеличением угла упругого деформирования проволочного элемента и переходом процесса субмикрорезания к микрорезанию.

Увеличение натяга  $i$  в системе «обрабатываемая поверхность – рабочая поверхность иглофрезы» способствовало росту всех исследуемых характеристик шероховатости. Рост указанного параметра режима обработки приводит к превалирующему влиянию процесса микрорезания и в меньшей степени пластического деформирования обрабатываемой поверхности, вызываемого ударным воздействием проволочных элементов иглофрезы.

Разработанные математические модели позволяют осуществить оптимизацию и управление процессом иглофрезерования для обеспечения требуемой шероховатости поверхности деталей.

#### Литература

1. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
2. Жоров Ю.С. Качество поверхности при иглофрезеровании / Ю.С. Жоров, В.А. Балдаев // Механизация тяжелых и трудоемких процессов в судостроении. – Л.: Румб, 1987. – С. 125 – 132.

Условия проведения опытов

Номер опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	169	330	0,22
2	84	530	0,11
3	253	170	0,34
4	295	400	0,06
5	127	85	0,28
6	211	270	0,17
7	42	690	0,39

Обработку плоских поверхностей образцов иглофрезерованием выполняли на горизонтально-фрезерном станке 6Н82Г. Использовали иглофрезу диаметром  $D = 50$  мм, шириной  $B = 20$  мм и плотностью набивки проволочных элементов 75...85 %. Диаметр единичного проволочного элемента  $d = 0,3$  мм, вылет  $L = 20$  мм. Обрабатываемый материал – конструкционная сталь 12ХНЗА (ГОСТ 4543-71).

Минимальные значения исследуемых высотных характеристик шероховатости поверхности после иглофрезерования получены при следующих параметрах режима обработки:  $v = 295$  м/мин;  $S = 400$  мм/мин;  $i = 0,06$  мм (см. табл. 1, 4-й опыт); максимальные – при  $v = 42$  м/мин;  $S = 690$  мм/мин;  $i = 0,39$  мм (см. табл. 1, 7-й опыт). Минимальные значения шаговой характеристики  $RSm$  были зафиксированы в четвертом опыте при обработке на следующих режимах:  $v = 295$  м/мин;  $S = 400$  мм/мин;  $i = 0,06$  мм, максимальные – в седьмом опыте. Минимум значения относительной опорной длины профиля  $Rmr(c)$  на уровне 50 % был получен в шестом опыте ( $v = 211$  м/мин;  $S = 270$  мм/мин;  $i = 0,17$  мм).

После обработки экспериментальных данных были разработаны математические модели влияния параметров режима иглофрезерования на изменения исследуемых характеристик шероховатости поверхности в виде уравнений регрессии (1) – (8). Данные модели позволяют рассчитать значение характеристик шероховатости поверхности при выбранном сочетании параметров режима обработки:

$$Ra = 8,52v^{-0,300}S^{0,126}i^{0,106}; \quad (1) \quad Rp = 14,1v^{-0,224}S^{0,159}i^{0,216}; \quad (5)$$

$$Rq = 12,0v^{-0,361}S^{0,170}i^{0,122}; \quad (2) \quad Rv = 35,8v^{-0,455}S^{0,265}i^{0,138}; \quad (6)$$

$$Rz = 46,5v^{-0,362}S^{0,226}i^{0,153}; \quad (3) \quad Rc = 1,17v^{-0,491}S^{0,291}i^{0,425}; \quad (7)$$

$$Rt = 112v^{-0,489}S^{0,260}i^{0,229}; \quad (4) \quad RSm = 3,45v^{-0,389}S^{0,133}i^{0,469}; \quad (8)$$

вания металлической стружки, составляющей в отдельных случаях до 5% массы обрабатываемой заготовки. Стружку применяют в порошковой металлургии [2, 3]. Это обстоятельство свидетельствует о возможности создания мало- и безотходных процессов изготовления деталей машин в результате применения иглофрезерования.

Имеющиеся данные о процессах в зоне обработки при иглофрезеровании недостаточны и требуют дополнения. Ограничена информация о влиянии режимов обработки на формирование качества поверхности, отсутствуют сведения об управлении данным процессом. Все это сужает возможные области применения иглофрезерования. Потребность в решении комплекса научных, конструкторских и технологических задач обеспечения качества деталей для широкого применения указанного процесса определяет актуальность данных исследований.

Для оценки шероховатости поверхности после иглофрезерования был использован действующий в настоящее время комплект международных норм, характеризующих геометрическую структуру обработанной поверхности. – ISO-3274:1997 и ISO 4287:1998, включающий следующие характеристики: среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$ , высоту десяти точек отклонений от регулярного профиля  $Rz$ , стандартное отклонение профиля  $Rq$ , общую высоту профиля  $Rt$ , максимальную высоту выступов профиля  $Rp$ , максимальную глубину впадин профиля  $Rv$ , среднюю высоту элементов профиля  $Rc$ , среднюю ширину элементов профиля  $RSm$ , относительную опорную длину профиля  $Rmr(c)$ . Измерение характеристик шероховатости поверхностей образцов после выполняли на компьютеризованном приборе TR-200.

Для определения влияния иглофрезерования на изменение характеристик шероховатости поверхности использовали математическое планирование эксперимента – метод ЛП, последовательностей [4, 5]. Матрица планирования экспериментов представлена в табл. 1. Результаты ранее выполненных исследований [6] позволили выбрать следующие значения параметров режима иглофрезерования, принятые за основной уровень в данном эксперименте:  $v = 338$  м/мин; подачу  $S = 660$  мм/мин и натяг  $i = 0,45$  мм. Условия проведения эксперимента приведены в табл. 2

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

Фактор	Точки исследований						
	1	2	3	4	5	6	7
$X_1$ – скорость резания $v$ , м/мин	0,500	0,250	0,750	0,875	0,375	0,625	0,125
$X_2$ – подача $S$ , мм/мин	0,500	0,750	0,250	0,625	0,125	0,375	0,875
$X_3$ – натяг $i$ , мм	0,500	0,250	0,750	0,125	0,625	0,375	0,875



Из анализа эпоры следует, что при распространении волны в державке происходит незначительное усиление колебаний по амплитуде (коэффициент усиления 1,06). Расчетное значение инерционной силы, действующей на присоединенную массу, составило 1995 Н.

### **Выводы**

1. Предложена методика инженерного расчета ультразвуковой колебательной системы для точения высокопластичных материалов, снабженной присоединенной массой на рабочем конце резцовой державки.

2. Показана возможность практического применения предложенной методики на примере расчета резонансной длины державки резца при заданной частоте возбуждения.

### **Литература**

1. Кумабэ, Д. Вибрационное резание / Д. Кумабэ. – М.: Машиностроение. – 1985. – 424 с.
2. Марков, А.И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов / А.И. Марков. – М.: Машиностроение. – 1968.
3. Куптель, В.Г. Моделирование параметров системы «инструмент – акустический преобразователь» для вибрационного точения / В.Г. Куптель // Горная механика. – 2006. – № 3. – С. 11 – 15.
4. Бабаков И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков. – М.: Наука. – 1968. – 560 с.

**УДК 621.762**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИГЛОФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ 12ХНЗА**

**И.Л. Баршай, В.К. Шелег, Е.Ф. Скробот**

*Белорусский национальный технический университет, Минск;*

**С.П. Гончаров**

*РУП «Минский тракторный завод»*

Качество поверхности в значительной степени определяет эксплуатационные характеристики деталей машин. Установлено, что 70...80 % вариаций показателей износостойкости связаны с параметрами шероховатости поверхности деталей машин [1].

Иглофрезерование является перспективным методом обработки для обеспечения заданной шероховатости обработанной поверхности. Положительным фактором иглофрезерования является возможность использо-

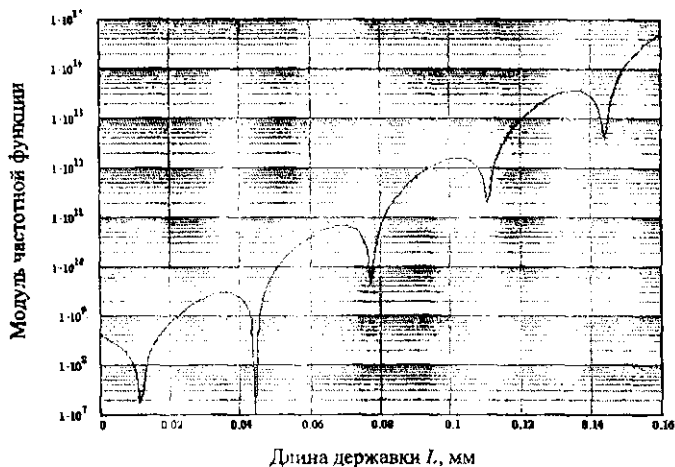


Рис. 2. График модуля частотной функции

По вертикальной оси использован логарифмический масштаб. Собственным значениям длины соответствуют точки разрыва графика. Резец должен быть достаточно длинным, чтобы обеспечить возможность его закрепления в стандартном резцедержателе. Поэтому принимаем длину резца равной 143,7 мм (пятая точка разрыва). Эюра амплитуды колебательных смещений державки приведена на рис. 3.

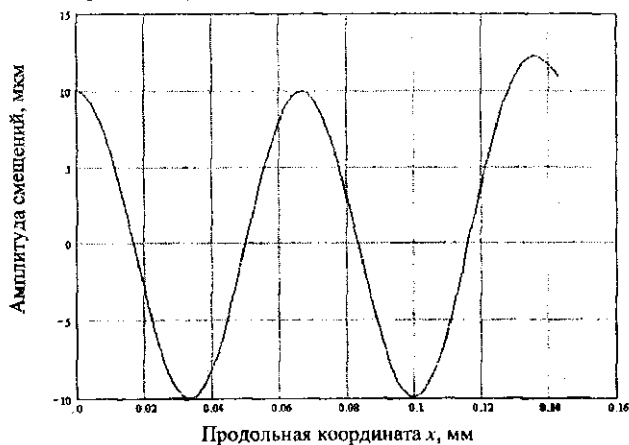


Рис. 3. Эюра амплитуды колебательных смещений державки

$$C = \frac{a_{12}\xi_0}{a_{12} - a_{11}}.$$

Таким образом, частное решение уравнения (1), удовлетворяющее граничным условиям (3), принимает вид

$$\eta(x) = \frac{\xi_0}{a_{12} - a_{11}} (a_{12} \cos(k_1 x) - a_{11} \cdot ch(k_1 x)). \quad (5)$$

Точки крепления державки могут быть определены из эпюры колебательных смещений, построенной в соответствии с выражением (5).

Если варьировать один из параметров колебательной системы (например, частоту возбуждения или длину державки), поддерживая постоянными значения остальных параметров, то условие резонанса будет удовлетворяться лишь для ряда дискретных значений варьируемого параметра (собственных значений). С практической точки зрения представляют интерес две задачи:

1) определение собственных значений длины державки при заданной частоте возбуждения. Эта задача возникает при необходимости подбора инструмента для существующего преобразователя продольных колебаний;

2) определение собственных значений частоты возбуждения при заданной длине державки. Эта задача возникает при необходимости проектирования преобразователя продольных колебаний для существующего режущего инструмента.

**Результаты расчетов и их обсуждение.** С целью подтверждения возможности практического использования описанной методики была решена задача определения собственной длины державки и точек ее крепления для следующих значений параметров:

- размеры сечения державки  $b = h = 10$  мм;
- частота возбуждения  $f = 22$  кГц;
- величина присоединенной массы  $M = 0,01$  кг;
- амплитуда колебаний на выходе концентратора  $\xi_0 = 10$  мкм.

Державка изготовлена из стали 45 ( $E = 206$  ГПа,  $\mu = 0,28$ ,  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>).

Для определения собственной длины рассчитывалась частотная функция  $y(L) = \det \|a_{ij}(L)\|$ . Расчет производился с помощью универсальной математической программы MathCAD. Полученный в результате расчета график модуля частотной функции приведен на рис. 2.

где  $J = bh^3/12$  – осевой момент инерции поперечного сечения державки,  $b$  – ширина державки,  $M$  – величина присоединенной массы.

Первое условие описывает жесткую связь входного конца державки с выходным сечением концентратора (равенство нулю угла поворота выходного сечения концентратора). Второе условие выражает равенство нулю поперечной силы, действующей на входной конец державки. Третье условие выражает равенство поперечной силы на выходном конце державки и инерционной силы, действующей на присоединенную массу. Четвертое условие выражает равенство нулю изгибающего момента на выходном конце державки.

Реакции опор при расчете не учитываются, так как закрепление державки производится в узловых точках, положение которых определяется из расчета для свободной державки. Взаимодействие резца с обрабатываемым материалом в первом приближении не рассматривается.

Подставив общее решение (2) в граничные условия (3), получим для определения неизвестных постоянных линейную систему из четырех однородных алгебраических уравнений. Из первого и второго условий следует, что  $C_1 = C_3 = 0$ . Это позволяет сократить число уравнений до двух и получить систему вида

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_2 \\ C_4 \end{pmatrix} = 0, \quad (4)$$

где коэффициенты матрицы определяются выражениями

$$a_{11} = E J k_i^3 \sin(k_i L) - \omega^2 M \cos(k_i L), \quad a_{12} = E J k_i^3 \cdot sh(k_i L) - \omega^2 M \cdot ch(k_i L), \\ a_{21} = -\cos(k_i L), \quad a_{22} = ch(k_i L).$$

Система (4) имеет нетривиальное (отличное от нуля) решение только в том случае, когда ее определитель обращается в нуль, то есть  $\det \|a_{ij}\| = 0$  (условие резонанса). При этом система имеет бесконечное множество решений, определяемых формулой

$$\begin{pmatrix} C_2 \\ C_4 \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} 1 \\ -a_{11}/a_{12} \end{pmatrix},$$

где  $C$  – произвольное действительное число.

Выберем число  $C$  таким образом, чтобы удовлетворялось условие равенства амплитуд колебаний входного конца державки и выходного сечения концентратора, то есть  $\eta(0) = \xi_0$ , где  $\xi_0$  – амплитуда колебаний на выходе концентратора. Из этого условия с учетом структуры общего решения (2) получим

значение импульсных сил, возникающих при взаимодействии режущей кромки резца с заготовкой. Попытка моделирования колебательной системы для вибрационного точения предпринималась ранее в работе [3]. Однако практическая ценность этой работы ограничена рядом причин.

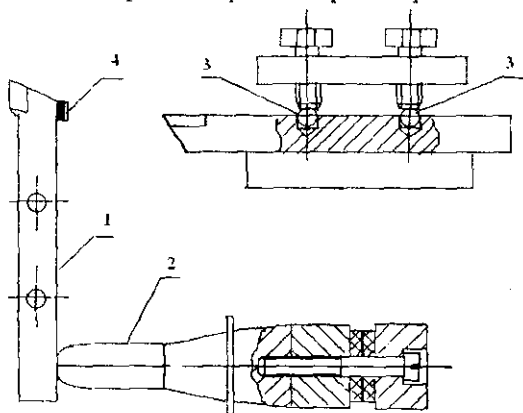


Рис. 1. Схема конструкции ультразвуковой колебательной системы для точения труднообрабатываемых материалов

**Методика моделирования.** Как известно [4], распространение изгибной волны в стержне постоянного сечения (державке резца) может быть описано уравнением

$$\eta^{IV} = k_t^4 \eta, \quad (1)$$

где  $\eta$  – амплитуда поперечных смещений,  $k_t = \sqrt[4]{\frac{12\rho\omega^2(1-\mu^2)}{Eh^2}}$  – волновое число для изгибной моды колебаний,  $\rho$  – плотность материала державки,  $\omega$  – круговая частота колебаний,  $\mu$  – коэффициент Пуассона,  $E$  – модуль упругости,  $h$  – толщина державки.

Общее решение уравнения (1) имеет вид

$$\eta(x) = C_1 \sin(k_t x) + C_2 \cos(k_t x) + C_3 \operatorname{sh}(k_t x) + C_4 \operatorname{ch}(k_t x). \quad (2)$$

Постоянные  $C_1, C_2, C_3, C_4$  определяются из граничных условий на концах державки.

Если обозначить длину державки через  $L$ , то граничные условия для уравнения (1) примут вид

$$\begin{aligned} \eta'(0) &= 0, \quad \eta''(0) = 0, \\ EJ\eta'''(L) &= \omega^2 M\eta(L), \quad \eta''(L) = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

может быть использован для реализации дистанционного контроля и управления процессом ЭИП в реальном масштабе времени.

**Выводы.** Установлены предельно допустимые величины соотношений площадей поверхностей электродов при ЭИП в зависимости от условий и режимов обработки. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации эксплуатации оборудования ЭИП по производительности обработки и максимальной загрузке по мощности источника технологического тока.

#### Литература

1. Синькевич, Ю.В. Обеспечение геометрических параметров качества поверхности электроимпульсным полированием / Ю.В. Синькевич, И.Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонИТУ, 2006. – Вып. 32. – С. 200 – 206.
2. Метод электроимпульсного полирования металлов / Е.Я. Головкина [и др.] // Машиностроение. – Минск, 1988. – Вып. 13. – С. 40 – 43.
3. Способ электрообработки: а.с. № 1425972 СССР / В.Н. Чачин, А.Э. Паршутю, Г.М. Кухаренко [и др.] // Открытия. Изобретения. – 1988. – № 35. – С. 215.

УДК 621.9.04

### МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ВИБРАЦИОННОМ ТОЧЕНИИ ВЫСОКОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**А.Ф. Присевко, Н.Т. Минченя, Д.А. Степаненко, В.Г. Куптель**  
*Белорусский национальный технический университет, Минск*

**Введение.** Одной из проблем, возникающих при точении высокопластичных материалов, является образование сливной стружки, которая затрудняет использование автоматизированного оборудования, хранение и транспортировку отходов производства, служит источником производственного травматизма. Как известно [1, 2], эффективность процесса резания высокопластичных материалов может быть существенно повышена за счет сообщения режущему инструменту направленных колебаний с заданной интенсивностью. В частности, при токарной обработке авторами предложена схема, представленная на рис. 1 и основанная на преобразовании продольных колебаний концентратора 2 в изгибные колебания державки резца 1. Державка крепится в узловых точках изгибных смещений 3, что позволяет избежать потерь энергии. Для дополнительного повышения эффективности дробления стружки на рабочем конце державки закреплена присоединенная (сосредоточенная) масса 4 (см. рис. 1). Применение такой системы позволяет увеличить

18...23 %, сохраняя при этом превышение площади поверхности анода над площадью поверхности катода в 15...29 раз.

Исследование влияния подаваемого на электроды напряжения на величину соотношения  $\Delta$  показало, что в диапазоне напряжений 280...340 В зависимость соотношения  $\Delta$  от напряжения обработки имеет линейный горизонтальный характер, а колебание величины соотношения  $\Delta$  не превышает 10 %.

Полученные данные справедливы для случая, когда площадь поверхности катода постоянна, а площадь поверхности анода постепенно возрастает за счет его погружения в электролит. Данная схема характерна для установок ЭИП, реализующих погружной метод обработки заготовок. Однако при струйной обработке, обработке с использованием затопленных струй или при случайном срыве парогазовой оболочки возможна ситуация, при которой напряжение подается на анод, полностью или частично смоченный электролитом. В этом случае происходит взрывоподобное образование (восстановление) парогазовой оболочки, приводящее к резкому возрастанию величины электрического тока и потребляемой мощности.

На рис. 2 представлены зависимости величины соотношения  $\Delta$  от температуры электролита и концентрации сульфата аммония в момент подачи напряжения на электроды, полностью расположенные в электролите. В этом случае величина соотношения  $\Delta$  снизилась в 31...43 раза по сравнению с данными, приведенными на рис. 1. Температура электролита оказывает наибольшее влияние на величину соотношения  $\Delta$  при относительно низкой концентрации сульфата аммония. Увеличение концентрации сульфата аммония до 4...6 % (вес.) повышает вероятность перехода электрогидродинамического режима в режим катодного нагрева. Влияние температуры электролита при этом практически нивелируется.

Следует отметить, что после перехода анодного процесса в режим катодного нагрева уменьшение площади поверхности анода на 20...25 % способствует обратному переходу в электрогидродинамический режим в течение 1...3 с и восстановлению устойчивости процесса ЭИП. Этот факт

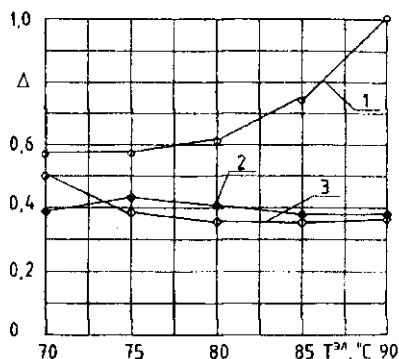


Рис. 2. Соотношение площадей электродов:  
1 — 2 %  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ; 2 — 4 %  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ;  
3 — 6 %  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

поверхности катода зажигается сплошной дуговой разряд, вызывающий интенсивные эрозию и разогрев (вплоть до плавления) катода. Катод выходит из строя. Это обстоятельство играет немаловажную роль при расчете максимально допустимой обрабатываемой площади поверхности заготовок с учетом фактической площади поверхности ванны установки ЭИП, выполняющей роль катода.

На сегодняшний день для ЭИП экспериментально обоснованного соотношения площадей поверхностей электродов не установлено. Основываясь на опыте электрохимического полирования, авторы [3] утверждают, что минимальное значение соотношения площадей электродов  $\Delta$  при ЭИП должно составлять 1:5. Следует отметить, что завышенная величина соотношения  $\Delta$ , принятая на этапе проектирования оборудования для ЭИП, неизбежно приводит к ухудшению технико-экономических характеристик оборудования. На величину соотношения  $\Delta$  оказывают влияние физико-механические свойства электролита и режимы ЭИП – напряжение обработки, концентрация и температура электролита. На рис. 1 представлены зависимости соотношения площадей электродов от концентрации и температуры электролита.

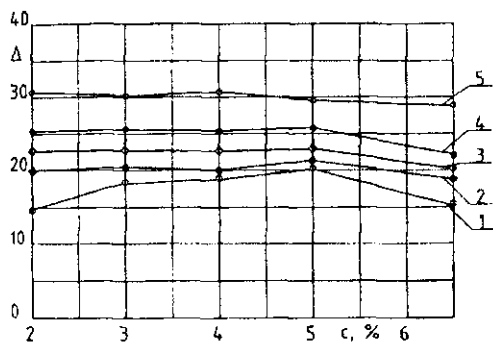


Рис. 1. Соотношение площадей электродов при погружении анода в электролит: 1 –  $T_{эл} = 70^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $T_{эл} = 75^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $T_{эл} = 80^{\circ}\text{C}$ ; 4 –  $T_{эл} = 85^{\circ}\text{C}$ ; 5 –  $T_{эл} = 90^{\circ}\text{C}$

росту величины соотношения площадей поверхностей электродов, максимальное значение которой наблюдается при температуре  $90^{\circ}\text{C}$ .

Анализ полученных результатов показывает, что при температуре электролита в диапазоне  $75...90^{\circ}\text{C}$  повышение концентрации сульфата аммония от 2 до 5 % (вес.) оказывает незначительное (не более чем на 5 %) влияние на величину соотношения  $\Delta$ . Повышение концентрации до 6,5 % (вес.) приводит к снижению величины соотношения  $\Delta$  в среднем на

полученные при напряжении обработки 300 В. Как следует из рис. 1, при температуре электролита  $70^{\circ}\text{C}$  для исследованного диапазона концентраций электролита смена электрогидродинамического режима на режим катодного нагрева происходит при превышении площади анода над площадью катода в 15...20 раз. Повышение температуры электролита приводит к



ний, протекающих около активного электрода, под которым понимают электрод с меньшей площадью поверхности. Анодный процесс сопровождается растворением металла, а катодный, при определенной напряженности электрического поля, – эрозией. При плавном повышении напряжения на аноде от 0 до 550 В анодный процесс последовательно проходит через пять стадий: классический электролиз, коммутационный режим, режим нагрева электролитной плазмой, электрогидродинамический режим и электролитно-разрядный режим [1]. Высококачественное полирование поверхности металлов и сплавов достигается в электрогидродинамическом режиме. Разработанный метод обработки, нашедший широкое промышленное применение, получил название электроимпульсного полирования (ЭИП) [2]. Процесс ЭИП считается устойчивым в случае, когда вся обрабатываемая поверхность заготовки покрыта сплошной, динамически устойчивой парогазовой оболочкой, в электрической цепи отсутствуют пульсации электрического тока большой амплитуды, а температура заготовки равна температуре электролита или незначительно ее превышает.

**Методы исследований.** Устойчивость процесса ЭИП исследовалась на экспериментальной установке, в состав которой входил регулируемый источник питания мощностью 15 кВт и электролитическая ячейка объемом 19 дм<sup>3</sup> с механизмом подачи анода. Катод и анод были выполнены в виде цилиндрических образцов Ø 1,8 мм из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т. Катод неподвижно располагался в электролитической ячейке на глубине 100 мм от зеркала электролита. После подачи напряжения на электроды анод вертикально погружался в электролит со скоростью 1 мм/с. В качестве электролита использовался водный раствор сульфата аммония, концентрация которого варьировалась от 2 до 6,5 % (вес.), а его температура изменялась в диапазоне 70...90 °С с шагом 5°С. Устойчивость процесса ЭИП оценивалась визуально по наличию сплошной парогазовой оболочки около поверхности анода, а также по величине амплитуды колебаний электрического тока в цепи. Ход эксперимента фиксировался с помощью цифровой видеокамеры Sony DCR-НС 42Е.

**Результаты и обсуждение.** Одним из важных факторов, влияющих на устойчивость процесса ЭИП, является соотношение площадей поверхностей анода  $S_a$  и катода  $S_k$  ( $\Delta = S_a / S_k$ ). При нарушении баланса площадей поверхностей электродов анодный электрогидродинамический режим меняется на режим катодного нагрева. Парогазовая оболочка около поверхности анода исчезает. Поверхность анода интенсивно растравливается, что приводит к потере качества поверхности анода (заготовки). Одновременно с этим парогазовая оболочка возникает около поверхности катода. При напряжениях, характерных для процесса ЭИП, в парогазовой оболочке около

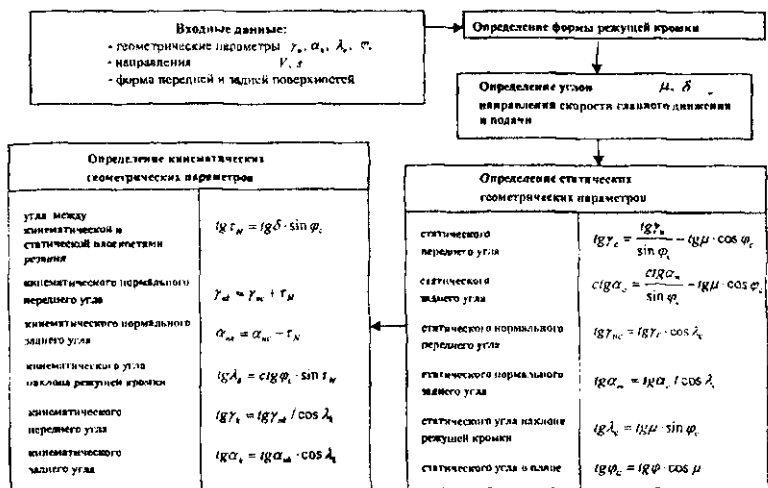


Рис. 1. Алгоритм определения статических и кинематических геометрических параметров резательного инструмента

### Литература

1. Родін, П.Р. Основы проектирования режущих инструментов [для инженеров, технических работников, аспирантов и студентов вузов] [Текст]: учеб. для студентов машиностроительных специальностей / П.Р. Родін – Киев: Высш. шк. 1990. – 421 с.: ил.
2. Родін, П.Р. Різальний інструмент в прикладах і задачах [навчальний посібник для студентів, які вивчають дисципліни «Різальний інструмент» і «Технологія виготовлення різальних інструментів»] [Текст]: навчальний посібник / П.Р. Родін, Н.С. Равська, Л.І. Ковальова. – Киев: Вища школа, 1994. – 293 с.: ил.

УДК 621.923.7

## ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОДОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ

Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский  
 Белорусский национальный технический университет, Минск

Введение. Анодный и катодный процессы в водных электролитах имеют ряд существенных различий в природе физико-химических яв-

где  $\bar{N}_s$  – вектор нормали к рабочей плоскости, в которой расположены вектор главного движения резания  $\bar{V}$  и вектор подачи  $\bar{S}$ , равный  $\bar{N}_s = [\bar{V} \times \bar{S}]$ .

При определении статических геометрических параметров фасонных инструментов, учитывая, что режущая кромка определяется как линия пересечения передней поверхности и исходной инструментальной, вектор  $\bar{P}$  определяется как векторное произведение  $\bar{N}_p$  и нормали к исходной инструментальной поверхности  $\bar{N}_s$ .

Аналогичным образом определяются геометрические параметры в кинематической системе координат.

**Обобщенный алгоритм определения статических и кинематических геометрических параметров режущего инструмента.** Наряду с движениями, которые осуществляются инструментом в процессе обработки им заготовки, геометрические параметры его режущей части зависят и от формы его передних и задних поверхностей. Передние поверхности чаще всего могут быть плоскими, круглыми, коническими и винтовыми.

Задние поверхности инструмента, как правило, описываются режущей кромкой при ее принятом движении. Поэтому при определении геометрических параметров в исследуемой точке режущей кромки рассматриваются плоскости, касательные к передней, задней плоскостям резания. Рассматривая формы передних поверхностей инструментов, следует отметить, что из указанных наиболее общей является винтовая поверхность.

Проведенные исследования по определению различных видов инструментов и обобщения их результатов позволили разработать в статической и кинематической системах координат общую теорию определения геометрических параметров инструмента независимо от его вида и конструкции.

Обобщенный алгоритм определения статических и кинематических параметров приведен на рис. 1.

Исследования показали, что при  $\lambda \neq 0$  направления  $\bar{V}$  и  $\bar{S}$  вдоль режущей кромки в процессе резания изменяются.

Их изменения зависят как от конструкции инструмента, формы режущей кромки, так и от величины припуска.

**Выводы.** Изложенная в статье общая теория определения геометрических параметров режущей части инструмента является основой для совершенствования существующих и разработки новых конструкций инструментов, а также позволяет в определенной степени на стадии проектирования прогнозировать работоспособность инструмента.

ного движения резания не перпендикулярен к инструментальной основной плоскости, то статические передние  $\gamma_{nc}$  и задние  $\alpha_{nc}$  углы в нормальном к режущей кромке сечении будут равны:  $\gamma_{nc} = \gamma_n + \tau_n$  и  $\gamma_{nc} = \gamma_n - \tau_n$ , где  $\tau_n$  — угол между инструментальной  $P_{nu}$  и статической  $P_{nc}$  поверхностями резания может рассчитываться по формуле

$$\cos \tau_n = \frac{(\bar{N}_{nc} \cdot \bar{N}_{nu})}{|\bar{N}_{nc}| \cdot |\bar{N}_{nu}|},$$

где  $\bar{N}_{nu}$  — вектор нормали к инструментальной поверхности резания, определяемый вектором  $\bar{P}$ , касательным к режущей кромке, и вектором  $\bar{V}_n$ , перпендикулярным к инструментальной основной плоскости.

Вектор нормали  $\bar{N}_{nu}$  равен векторному произведению векторов  $\bar{P}$  и  $\bar{V}_n$ :  $N_{nc} = [\bar{P} \times \bar{V}_n]$ .

Аналогично определяется вектор нормали к статической поверхности резания:  $N_{nc} = [\bar{P} \times \bar{V}]$

При известных  $\bar{P}$  и  $\bar{V}$  определяется статический угол наклона режущей кромки:  $\sin \lambda_c = \frac{(\bar{V} \cdot \bar{P})}{|\bar{V}| \cdot |\bar{P}|}$ .

Статический передний угол в нормальном к режущей кромке сечении будет

$$\text{tg} \gamma_{nc} = (\bar{N}_p \cdot \bar{N}_n) / \left| [\bar{N}_p \times \bar{N}_n] \right|,$$

где  $\bar{N}_p$  — вектор нормали передней поверхности, определяемый как векторное произведение вектора  $\bar{P}$  и вектора  $\Pi$ , касательного к передней поверхности  $\bar{N}_p = [\bar{P} \times \bar{\Pi}]$ .

Статический передний угол  $\gamma_c$  в главной секущей плоскости будет:

$$\text{tg} \gamma_c = \text{tg} \gamma_{nc} / \cos \lambda_c.$$

Аналогично определяется статический задний угол в нормальном к режущей кромке сечении и статический задний угол в главной секущей плоскости:  $\text{ctg} \alpha_{nc} = (\bar{N}_p \cdot \bar{N}_z) / \left| [\bar{N}_p \times \bar{N}_z] \right|$ , где  $\bar{N}_z$  — вектор нормали к задней поверхности —  $\bar{N}_z = [\bar{P} \times \bar{Z}]$ .

Статический главный угол в плане определяется как угол между статической плоскостью резания и рабочей плоскостью  $P_s$ :

$$\cos \varphi_c = \frac{(\bar{N}_p \cdot \bar{N}_s)}{|\bar{N}_p| \cdot |\bar{N}_s|},$$

Важным вопросом при аналитическом определении геометрических параметров инструмента является выбор систем координат, в которых решаются рассматриваемые задачи. В ГОСТ 25763-83 однозначности определения положения прямоугольных систем координат нет. Так, например, статическая система координат — это прямоугольная система  $XYZ$ , ориентированная относительно скорости главного движения  $\vec{V}$ . В стандарте не указано, каким образом система  $XYZ$  ориентирована относительно скорости  $\vec{V}$ .

Необходимо учитывать, что при разных задачах анализа геометрии режущей части инструмента целесообразно выбирать разные положения прямоугольной системы координат  $XYZ$ , а в некоторых случаях переходить на цилиндрическую систему координат, принимать разные системы координат для разных точек режущей кромки.

Целесообразно оси  $X$ ,  $Y$  задавать в основной плоскости, а положения передних  $\gamma$  и задних  $\alpha$  углов — в главной секущей плоскости или в нормальном сечении к режущей кромке.

Положение режущей кромки в инструментальной системе координат  $XYZ$  определяется инструментальным углом в плане  $\varphi_n$  и инструментальным углом наклона режущей кромки  $\lambda_n$ .

Передние и задние поверхности могут также задаваться инструментальными продольными  $\gamma_{np}$ ,  $\alpha_{np}$  и поперечными  $\gamma_n$ ,  $\alpha_n$  передними и задними углами, которые измеряются во взаимно перпендикулярных сечениях. Поэтому возникает задача определения инструментальных передних и задних углов в инструментальной главной секущей плоскости и в нормальном сечении, а также определение касательной к режущей кромке, т.е. главного угла в плане и угла наклона режущей кромки.

В случае если скорость  $\vec{V}$  главного движения направлена перпендикулярно инструментальной основной плоскости, то инструментальная плоскость резания совпадает со статической плоскостью резания, а статические геометрические параметры будут равны соответствующим инструментальным.

Если же скорость  $\vec{V}$  направлена наклонно к инструментальной основной плоскости, то статические геометрические параметры не будут равны инструментальным, чем обусловлена задача определения статических геометрических параметров при известных инструментальных.

При известных инструментальных передних  $\gamma_n$  и задних  $\alpha_n$  углах в нормальном к режущей кромки сечении и когда вектор  $\vec{V}$  скорости глав-

- определение положения передней и задней плоскостей в исследуемой точке режущей кромки; определение положений основной  $P_v$  плоскости, плоскости резания  $P_n$  и главной секущей плоскости  $P_T$ ;
- определение линий пересечения главной секущей плоскости с основной плоскостью и плоскостью резания;
- определение линий пересечения секущей плоскости с передней и задней поверхностями;
- определение значений передних и задних углов в секущей плоскости в соответствующей системе координат.

Угол наклона режущей кромки определяется в плоскости резания между режущей кромкой и основной плоскостью  $P_v$ . Его определение включает:

- определение положения режущей кромки в выбранной системе координат;
- определение положения основной плоскости  $P_v$ ;
- определение положения плоскости резания  $P_n$ ;
- определение линий пересечения основной плоскости с плоскостью резания;
- определение величины угла наклона режущей кромки  $\lambda$ .

Угол в плане измеряется в основной плоскости между плоскостью резания  $P_n$  и рабочей плоскостью  $P_s$ . Его определение включает:

- определение плоскости резания в исследуемой точке;
- определение рабочей плоскости  $P_s$  как плоскости, в которой расположены скорость главного движения и скорость движения подачи;
- определение пересечения основной плоскости  $P_v$  с плоскостью резания  $P_n$  и рабочей плоскостью  $P_s$ ;
- определение угла в плане в плоскости  $P_v$ .

Учитывая, что положение плоскости однозначно определяется нормалью к этой плоскости, аналогично графическому определению геометрических параметров рассмотрим аналитическое их определение.

**Аналитическое определение геометрических параметров режущей части инструмента.** Наряду с графическим определением геометрических параметров инструмента, основанном на использовании методов начертательной геометрии, эти задачи можно решать с использованием векторной алгебры. Оба метода могут использоваться в равной степени. Преимущество того или другого метода определяется конструкцией инструмента, принятой схемой формообразования, содержанием решаемой задачи и исходными данными.

## ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ИНСТРУМЕНТОВ

Н.С. Равская, О.А. Охрименко

*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев*

**Введение.** Современная теория определения геометрических параметров решает задачи анализа геометрии режущей части различных инструментов в инструментальной системе координат и для многих инструментов, особенно фасонных, она не отображает истинного значения параметров в процессе резания [1, 2].

Согласно стандарту ГОСТ 25762-83 инструментальная система ориентирована относительно геометрических элементов режущих инструментов, принятых за базу, и применяется для изготовления и контроля того или иного инструмента. Таким образом, по определению для каждого вида и конструкции инструмента может выбираться та или иная система координат. Это не позволяет на базе инструментальной системы координат создать общую теорию определения геометрических параметров режущей части независимо от вида и конструкции инструмента, которая позволяла бы определять геометрию инструмента в любой точке режущей кромки в процессе резания. Такой подход можно реализовать при определении геометрических параметров в статической и кинематической системах координат, которые ориентированы соответственно относительно скорости главного или результирующего движения резания.

Основные положения разработки общей теории приближенного графического и аналитического определения геометрических параметров режущей части инструмента изложены в данной статье.

**Графическое определение геометрических параметров режущей части инструмента.** При анализе геометрических параметров инструмента возникает задача их определения в выбранной системе координат при известных, заданных в другой системе. Наиболее часто определяются геометрические параметры режущей части в статической системе координат при известных параметрах в инструментальной. В общем виде инструментальные геометрические параметры не совпадают со статическими.

Графическое определение углов передних  $\gamma$  и задних  $\alpha$  независимо от вида и конструкции инструмента заключается в следующем:

– определение направления скорости резания (главного или результирующего);

Задачу структурного синтеза схемы установки предлагается решать в терминах условных установочных элементов. Для чего вид компонента КБО заменяется соответствующим условным установочным элементом. После определения точки приложения и направления сил закрепления сформировано задание на проектирование приспособления [1].

На базе методик, моделей и алгоритмов разработан программно-методический комплекс автоматизации процедур синтеза индивидуальных ТП механической обработки заготовок оригинальных деталей классов «корпус» и «некруглые стержни», доказать его работоспособность и внедрить на ряде машиностроительных предприятий Витебской области и в учебном процессе.

В работе использовались методы системно-структурного анализа и моделирования, теории графов, алгебры логики, теории множеств, теории алгоритмов и теории базирования.

**Выводы.** В результате проведенных исследований:

1. Предложен метод формализованного синтеза конструкторско-технологической модели деталей из параметризованных комплексных функциональных модулей, структуры размерных и угловых связей между главными поверхностями модулей, а также технологических регламентов обработки, позволяющий формально представить заготовку в задаче автоматизации определения порядка обработки и смены баз, синтеза схем базирования и установки.

2. Разработан метод формализованного структурного синтеза маршрута обработки деталей, который на основе формирования и анализа таблиц комплектов технологических баз ориентации (отражающих угловую и размерную ориентации обрабатываемых поверхностей) позволяет: на стадии проектирования обеспечивать допуски взаимного расположения конструктивных элементов, в зависимости от имеющегося оборудования определять порядок обработки поверхностей, порядок смены комплектов баз внутри этапов типовой схемы механической обработки.

3. Разработан метод структурного синтеза задания на проектирование (выбор) станочного приспособления, впервые позволивший для нетипизированных деталей машин внутри каждого этапа типовой схемы механической обработки в автоматизированном режиме синтезировать теоретические схемы базирования, определять вид компонента комплекта технологических баз (установочная, направляющая, опорная база и т.д.), по схеме базирования в терминах условных элементов синтезировать теоретические схемы установки.

#### Литература

1. Махаринский, Е.И. Теория базирования в проблеме проектирования технологических процессов механической обработки и станочных приспособлений / Е.И. Махаринский, Н.В. Беляков, Ю.Е. Махаринский // Вестник машиностроения. – 2008. – № 9. – С. 34 – 45.



Первым шагом решения задачи синтеза задания на проектирование приспособления является идентификация комплекта баз ориентации. Для этого рассматриваются поверхности сформированных комплектов баз и определяется характер поверхности (ось или плоскость). Всего возможно четыре варианта сочетаний поверхностей (рис. 1).

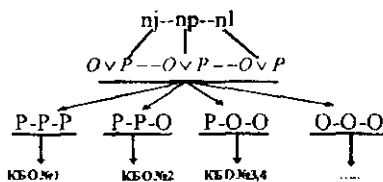


Рис. 1. Модель идентификации комплекта баз

Далее определяется принадлежность рассматриваемого комплекта к одному из четырех. Комплект O-O-O для деталей классов «корпус» и «некруглые стержни» практически не используется.

Для формального назначения вида компонентов комплекта (проектирования схемы базирования) разработан массив продукционных моделей, элементы которого соответствуют вариантам однозначного задания ориентации ФМ (рис. 2).

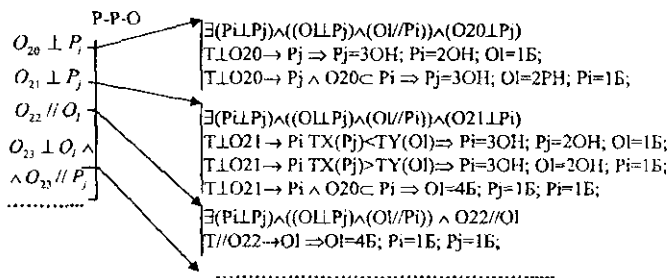


Рис. 2. Элементы массива продукционных моделей для КБО № 2

Например, алгоритм  $O_{21}$ : если существует КБО № 2 и задан допуск перпендикулярности оси  $O_{21}$  относительно плоскости  $P_j$ , а допуск линейного размера относительно  $P_j$  меньше допуска линейного размера относительно  $O_1$ , то плоскость  $P_j$  назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость  $P_j$  – двойной однонаправленной (направляющей), ось  $O_1$  – одиночной (опорной). Если допуск линейного размера относительно  $P_j$  больше допуска линейного размера относительно  $O_1$ , то плоскость  $P_j$  назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось  $O_1$  – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость  $P_j$  – одиночной (опорной) базами. Если плоскость  $P_j$  совпадает с осью  $O_1$ , то ось  $O_1$  назначается четверной (двойной направляющей) базой плоскости.  $P_j$  и  $P_j$  назначаются одиночными (опорными) базами.

Хранение информации о *внутренних показателях* ФМ внутри этапов (предварительный, чистовой, отделочный) обработки предлагается осуществлять в виде базы данных соответствующего формата. Оперирование с *внешними параметрами* предлагается осуществлять с помощью неориентированных графов типа дерева обозначений размерных связей главных поверхностей ФМ в трех координатных направлениях (матриц смежности)  $R_{(x,y,z)} = (\bar{N}, V)$  и ориентированного графа угловых расположений (матриц инцидентности)  $U = (\bar{N}, Y)$ , где  $\bar{N} = \{\bar{n}_1, \bar{n}_2, \dots, \bar{n}_m\}$   $|\bar{N}| = m$  – множество вершин (главных поверхностей ФМ). Множество линейных размеров, соединяющих любые пары вершин (главных поверхностей),  $(\bar{n}_i, \bar{n}_j) \in \bar{N}$  есть множество ребер  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$   $|V| = k$ . Множество угловых размеров, соединяющих любые пары вершин,  $(\bar{n}_i, \bar{n}_j) \in \bar{N}$  есть множество дуг  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_l\}$   $|Y| = l$ .

Согласно разработанному *методу структурного синтеза маршрута* обработки деталей, для каждого обрабатываемого на этапе ФМ выявляются возможные комплекты баз ориентации (КБО) [1]. Для этого разработаны алгоритмы совместного анализа графов размерных и угловых связей этапа для определения возможных комплектов баз для осей (см. ниже) и плоскостей

$$\begin{aligned} \bar{n}_i(O) &\rightarrow (R^{\text{II}}_X \wedge R^{\text{II}}_Y) \vee (R^{\text{II}}_Y \wedge R^{\text{II}}_Z) \vee (R^{\text{II}}_Y \wedge R^{\text{II}}_Z); \\ \{v_{iX} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_X\} \wedge \{v_{iY} = (\bar{n}_i, \bar{n}_p)_Y\} &\Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p; \\ \{v_{iX} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_X\} \wedge \{v_{iZ} = (\bar{n}_i, \bar{n}_p)_Z\} &\Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p; \\ \{v_{iY} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_Y\} \wedge \{v_{iZ} = (\bar{n}_i, \bar{n}_p)_Z\} &\Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p; \\ \bar{n}_i(O) &\rightarrow U^{\text{II}}_{n_i \text{обр-нобр}} \vee U^{\text{II}}_{n_i \text{обр-обр}} \rightarrow y_i = \langle \bar{n}_i, \bar{n}_l \rangle \Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p - \bar{n}_l. \end{aligned}$$

Согласно алгоритмам номер обрабатываемой поверхности (ее оси (O) или плоскости (P)) отыскивается на графе (по одной оси для плоской поверхности, по двум координатным осям для оси) размерных связей. Определяется ее связь или связи с другими ближайшими поверхностями на графах размерных связей (кратчайшие пути на графе от рассматриваемой поверхности до других поверхностей). Далее для плоских поверхностей на графах угловых расположений обрабатываемых поверхностей комплект дополняется двумя поверхностями, для оси комплект дополняется одной поверхностью. Анализ сформированных таблиц комплектов для ФМ с учетом ряда условий (возможность оборудования, требования по выбору баз на первой операции, использование настроечных баз) позволяет сформировать маршрут обработки заготовки.

проектирования изделий и технологических процессов их изготовления. В настоящее время в машиностроении находят применение системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) двух видов: 1) системы адресации (УИ «Институт Белоргстанкинпром» (САПР ТИ), СПРУТ (GTP, САПР ТП), T-FLEX (ТЕХНОПРО) и др.); 2) диалоговые системы («Интермех» (Techcard), КОМПАС (АВТОПРОЕКТ, Вертикаль), Consistent Software (TechnologiCS, FOBOS) и др.). Первые разработаны для деталей типа тел вращения и планок на базе комплексного ТП на типовые детали. Вторые могут быть использованы и для нетипизированных деталей (классов «корпус», «некруглые стержни» и др.) но только достаточно опытным технологом. С их помощью технолог, используя опыт и интуицию, может выбрать из базы данных текст переходов, оборудование и т.д., нормировать расход времени и материала, рассчитать режимы резания. Однако эти системы не позволяют для указанных деталей в автоматизированном режиме назначать технологические базы, порядок обработки поверхностей, порядок смены баз внутри этапов типовой схемы механической обработки, выдавать задание на проектирование (выбор станочных приспособлений).

**Результаты.** Для решения задачи создания *конструктивно-технологической модели* детали классов «корпус» и «некруглые стержни» предлагается представлять в виде набора функциональных модулей (ФМ), технологических регламентов их обработки, характеристик их элементов (внутренних показателей), а также структуры размерных и угловых связей между ФМ (внешних показателей).

На основе проведенного анализ чертежей деталей, а также технологических процессов их механической обработки в конструкторских и технологических бюро станкостроительных заводов Витебской области ОАО «ВИЗАС», РУП «ВИСТАН» (г. Витебск), РУПП «Красный борец» (г. Орша), а также витебского завода тракторных запасных частей (РУП «ВЗТЗЧ») предложены принципы классификации и классификаторы ФМ деталей классов «корпус» и «некруглые стержни» низких рангов; на теоретико-множественном уровне разработан формат представления детали в задаче автоматизации проектирования технологии ее механической обработки; выделен ряд классификационных множеств ФМ по служебному назначению; определено порядка 1100 частных элементов (функциональных модулей) различных классификационных множеств. Комплексование частных ФМ по конструктивному и технологическому признаку позволило разработать иллюстрированный классификатор комплексных ФМ деталей классов «корпус» и «некруглые стержни» по служебному назначению. Частные модули формируются методом адресации.

где

$$D = A_2^2 - 4 \cdot C_2 \cdot \alpha_1 \cdot E \cdot i_2.$$
$$\sigma_2 = \frac{\pi_2 - Y(\alpha_1 - \alpha_2)}{i_2}.$$
(10)

Если ограничение нарушается на третьем (завершающем) этапе рабочего цикла (рис. 4), то следует несколько уменьшить  $\alpha_R$  (на  $\Delta\alpha_R$ ).

Решение задачи в целом получаем методом итераций, т.е. если после первого уменьшения  $\pi_1$  ( $\alpha_R$ ) ограничение производительности на втором (третьем) этапе рабочего цикла все же нарушается, то процедура повторяется до тех пор, пока не будет обеспечено требование ограничений.

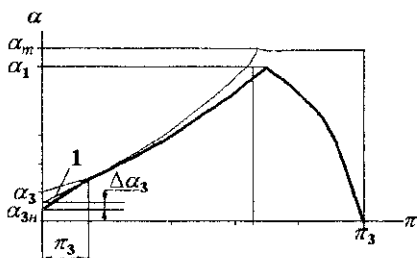


Рис. 4. Схема изменения фактической глубины шлифования ( $\alpha_{3ф}$ ) после коррекции параметров управления для предотвращения нарушения ограничения по шероховатости

#### Литература

1. Махаринский, Е.И. Технологические основы управления процессом шлифования / Е.И. Махаринский. — М.: СНИО СССР, 1990. — 53 с.
2. Михелькевич, В.Н. Автоматическое управление шлифованием / В.Н. Михелькевич. — М.: Машиностроение, 1975. — 304 с.
3. Яцерицын, П.И. Модели ограничений производительности при плоском врезном шлифовании / П.И. Яцерицын, Е.И. Махаринский, Ю.Е. Махаринский // Вестні Акадэміі навук Беларусі, серыя фізіка-тэхнічных навук. — № 3. — 1997. — С. 31 — 34.

УДК 658.51:621.81

### СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕТИПИЗИРОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Н.В. Беляков

УО «Витебский государственный технологический университет»

**Введение.** Одним из направлений развития технологической подготовки машиностроительного производства Республики Беларусь в условиях рыночных отношений и растущей конкуренции является автоматизация

число проходов  $i_1$  и глубина шлифования  $\alpha_1$  на последнем проходе первого этапа сохраняются. Тогда можно записать

$$\alpha_1 = \sigma_{1н} \cdot (1 - \delta^{(i-1)}) + \alpha_v \cdot \delta^{(i-1)};$$

$$\Delta\pi = \pi_1 - \alpha_v - \sigma_{1н}(i-1) - Y \cdot (\alpha_v - \alpha_1);$$

Решив эту систему, получим

$$\alpha_v = \frac{\alpha_1 - \Delta\pi_1}{C},$$

где  $C = i_1 + Y - \frac{(i_1 - 1)}{1 - \delta^{(i-1)}}$ ;  $\sigma_{1н} = \frac{\alpha_1 - \alpha_v \cdot \delta^{(i-1)}}{1 - \delta^{(i-1)}}$ ;  $\sigma_{1н} = (1 + Y) \cdot \alpha_v$ ;

$\sigma_{1н}$  – новая относительная подача перед первым проходом;  $\sigma_{1н}$  – новая относительная подача;  $\alpha_v$  – относительная глубина шлифования на первом (врезном) проходе.

Если  $NS = 2$  или  $4$ , то, задавая  $\Delta\pi_1$ , получаем (рис. 3)

$$\Delta\pi_1 = (\sigma_1 - \sigma_{1н}) \cdot \Delta L,$$

где

$$\Delta L = i_1 - Y \cdot (1 - \delta^{(i-1)}),$$

откуда

$$\sigma_{1н} = \sigma_1 - \Delta\pi_1 / \Delta L; \alpha_1 = \sigma_{1н} \cdot \Delta L.$$

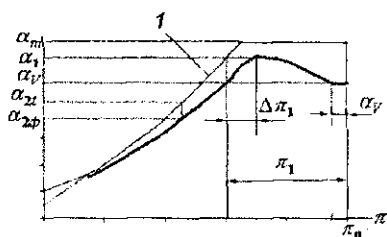


Рис. 2. Схема изменения фактической глубины шлифования  $\alpha_2$  после коррекции параметров управления  $\sigma_1$  и  $\pi_1$  для предотвращения нарушения теплового ограничения 1

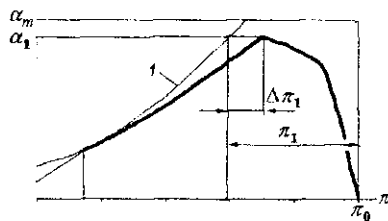


Рис. 3. Схема изменения фактической глубины шлифования  $\alpha_{2ф}$  после коррекции параметров управления  $\sigma_1$  и  $\pi_1$  ( $\sigma_v = 0$ ) для предотвращения нарушения теплового ограничения 1

Новые значения параметров управления и выходных показателей второго этапа рабочего цикла определяются с помощью моделей

$$C_2 \cdot \pi_2^2 - A_2 \cdot \pi_2 + \alpha_1 \cdot i_2 \cdot E = 0, \quad (8)$$

где  $A_2 = C_1 + 2 \cdot C_2 \cdot (\pi_0 - \pi_1) + E$ ;  $E = (1 - \delta^{i_2}) / (i_2 - Y \cdot (1 - \delta^{i_2}))$ .

$$\pi_2 = \frac{A_2 - D^{0,5}}{2 \cdot C_2}, \quad (9)$$

Затем вычисляем

$$\alpha_1 = C_0 + C_1 \cdot (\pi_0 - \pi_1) + C_2 \cdot (\pi_0 - \pi_1)^2. \quad (3)$$

Если  $\alpha_1 > \alpha_m$ , то принимаем  $\alpha_1 = \alpha_m$ .

$$\sigma_1 = \alpha_1; \quad \sigma_V = \alpha_1 \cdot (1 + Y). \quad (4)$$

Рассмотрим систему ограничений производительности на черновом этапе [3] при  $\sigma_3 = 0$ . Тогда

$$\pi_3 = Y \cdot (\alpha_2 - \alpha_3); \quad \alpha_3 = \alpha_2 \cdot \delta^{i_3}; \quad \alpha_3 = \alpha_R. \quad (5)$$

Зависимость глубины шлифования от припуска при этом будет линейной, т.е.

$$\alpha_3 = \alpha_2 - \pi_3 / Y. \quad (6)$$

Максимальный припуск, который можно снять выхаживанием, равен

$$\pi_{3 \max} = Y \cdot \alpha_2.$$

а число проходов, необходимое для удаления заданного припуска  $\pi_3$ , определяется выражением

$$i_3 = \ln \left( \frac{1 - \pi_3}{Y \cdot \alpha_2} \right) / \ln \delta. \quad (7)$$

**Особенности расчета при больших значениях параметров  $Y$  и  $b$ .**

При достаточно больших значениях относительной упругой деформации  $Y$  и параметра тепловой активности шлифовального круга  $b$  возможны ситуации, когда на концах этапов ступенчатого рабочего цикла фактическая глубина шлифования точно соответствует ограничениям, а посередине второго и третьего этапов ограничения производительности нарушаются (рис. 1).

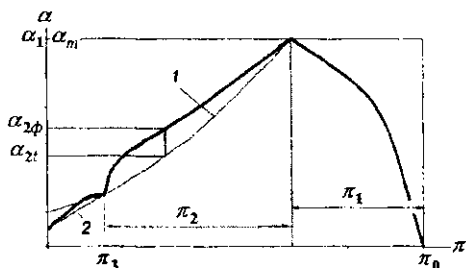


Рис. 1. Схема нарушения теплового ограничения 1 ( $\alpha_{2\phi} > \alpha_{2t}$ ) и ограничения по шероховатости 2 ( $\alpha_{3\phi} > \alpha_{3R}$ ). Индекс «ф» соответствует фактической безразмерной глубине

В таких случаях необходимо уменьшить часть припуска  $\pi_1$ , удаляемую на первом этапе рабочего цикла на  $\Delta\pi_1$ , так, чтобы тепловое ограничение не нарушалось. Если  $NS = 1$  или  $3$  (см. табл. 1), то это лучше всего сделать путем незначительного уменьшения подачи  $\sigma_V$  на врезание (рис. 2). При этом глубина шлифования на первом проходе  $\alpha_V$  будет меньше, чем  $\alpha_1$ , а

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СТУПЕНЧАТОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ШЛИФОВАНИЯ

Ю.Е. Махаринский

УО «Витебский государственный технологический университет»

Оптимальным считается ступенчатый алгоритм управления, который обеспечивает удаление заданного припуска за минимальное число проходов без нарушения силовых и тепловых ограничений производительности. Рассматривается оптимизация следующих элементов рабочего цикла [1, 2]:

1) этап предварительного шлифования с ускоренным врезанием или без него;

2) этап чистового шлифования (в зависимости от сочетания значений параметров  $b$  и  $Y$ ) с нулевой или ненулевой подачей;

3) отделочное шлифование с микроподачей.

Таблица 1

Варианты ступенчатых алгоритмов управления

NS	$S_v$	$S_2$	$S_3$
1	$>0$	$>0$	$>0$
2	$=0$	$>0$	$>0$
3	$>0$	$=0$	$>0$
4	$=0$	$=0$	$>0$

**Алгоритм расчета при наличии увеличенной подачи и выхаживания без подачи.** Если  $\sigma_v > 0$ , то система ограничений производительности на черновом этапе [3] принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \alpha_1 \cdot (1 + Y); \quad \sigma_1 = \alpha_1; \quad \pi_1 = \sigma_1 \cdot i_1; \quad \alpha_1 \leq \alpha_m; \\ \alpha_1 &= C_0 + C_1 \cdot (\pi_0 - \pi_1) + C_2 \cdot (\pi_0 - \pi_1)^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Если задано значение  $i_1$ , то из второго, третьего и пятого уравнений этой системы получаем

$$\frac{\pi_1}{i_1} = C_0 + C_1 \cdot (\pi_0 - \pi_1) + C_2 \cdot (\pi_0 - \pi_1)^2,$$

откуда легко получается квадратное уравнение для вычисления  $\pi_1$

$$C_2 \cdot \pi_1^2 - A_1 \cdot \pi_1 + \alpha_0 = 0; \quad (2)$$

где  $A_1 = C_1 + 2 \cdot C_2 \cdot \pi_0 + 1/i_1$ ;  $\alpha_0 = C_0 + C_1 \cdot \pi_0 + C_2 \cdot \pi_0^2$ .

взаимосвязанных алгоритмов. Определение технологических условий обработки производится также в отдельном модуле с использованием теоретических зависимостей, связывающих эксплуатационные показатели деталей, точность обработки, а также ее технико-экономические характеристики с технологическими условиями обработки [4].

3. *Разработка операционной технологии.* После определения маршрутов обработки для всех поверхностей детали в диалоговом режиме производится формирование операций обработки детали в целом, вводится дополнительная информация, необходимая для заполнения операционных карт. Здесь же производится расчет норм времени с использованием соответствующего расчетного модуля системы, разрабатываются операционные эскизы, формируются и выводятся на печать операционные карты.

Методика автоматизации проектирования технологических процессов, описанная выше, реализована в виде отдельного программного модуля, который взаимодействует с пакетом программ «Техкард» (разработчик – НПП «Интермех», г. Минск, Беларусь). Стыковка внешнего модуля автоматизации формирования маршрута обработки с САПР «Техкард» позволила использовать готовые решения по созданию информационно-поисковой системы, подготовке исходной технологической информации, формированию и выводу технологической документации.

В результате стало возможным сформировать структуру технологического процесса и рассчитать операционные размеры и режимы резания исходя из обеспечения заданных эксплуатационных показателей деталей с учетом экономической целесообразности.

### Литература

1. Петренко, А.И. Основы построения систем автоматизированного проектирования [Текст] / А.И. Петренко, О.И. Семенов. – Киев: Вища школа, 1984. – 296 с.
2. Цветков, В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов / В.Д. Цветков. – Минск: Наука и техника, 1979. – 261 с.
3. Расчет технологических условий токарной обработки, обеспечивающих заданные параметры качества поверхностного слоя и точность обработки (Свидетельство № 3457 от 19.05.2004 об отраслевой регистрации разработки «Техно») / В.Ф. Безъязычный, Т.Д. Кожина, С.А. Волков. – М., 2004.
4. Безъязычный, В.Ф. Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей / В.Ф. Безъязычный [и др.]. – М.: Изд-во МАИ, 1993. – 184 с.



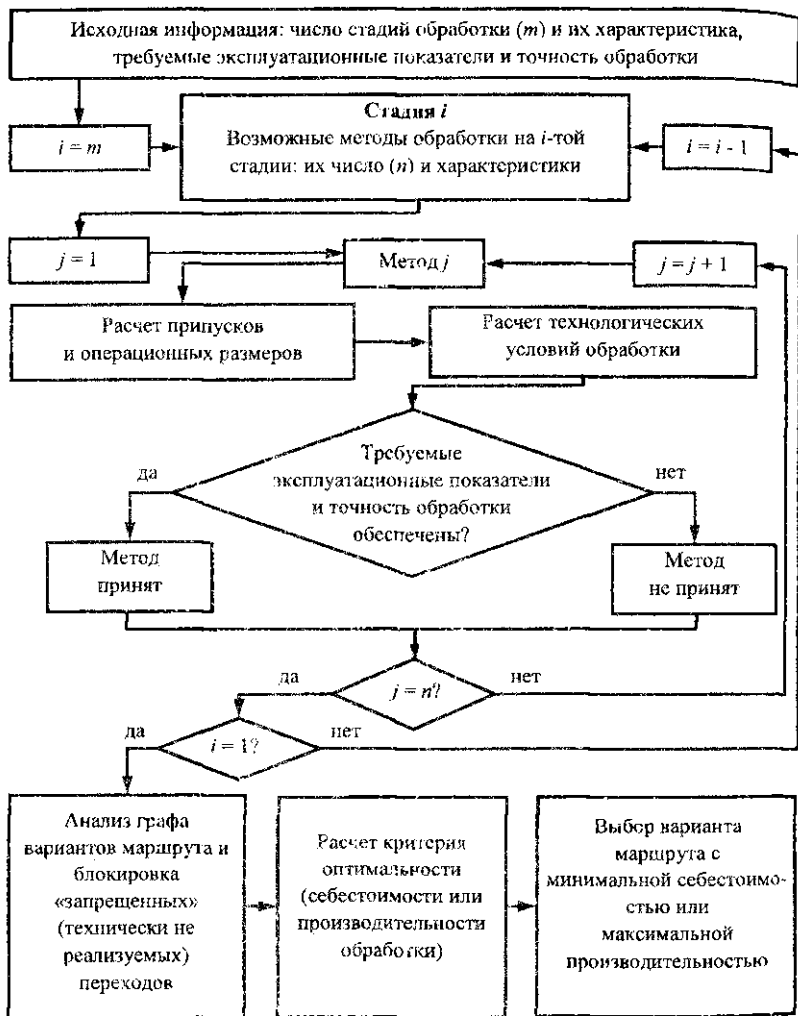


Рис. 1. Схема формирования маршрута обработки поверхности

Этап расчета операционных размеров и припусков на обработку осуществляется с использованием теории графов по методу максимума-минимума и реализуется в отдельном модуле, включающем несколько

процессов проектирования [1, 2]. Это позволяет преодолеть начальную неопределенность задачи технологического проектирования, поэтому решения первой стадии носят наиболее общий характер и на последующих уровнях конкретизируются до требуемой степени детализации.

В соответствии с вышеизложенным, весь процесс проектирования разделяется на следующие три уровня.

*1. Разработка принципиальной схемы техпроцесса.* На данном уровне производится определение последовательности технологических этапов (стадий), типа заготовки, ориентировочного состояния детали после выполнения каждого этапа. Для разделения технологического процесса на этапы (стадии) используется исходная информация о точности, шероховатости, физико-механическом состоянии поверхностей заготовки и детали, а также ориентировочные значения точности и шероховатости, достижимые на каждом из этапов технологического процесса. Формирование принципиальной схемы технологического процесса предлагается осуществлять, используя матрицу выбора этапов обработки, составленную авторами путем анализа и обобщения производственных данных и результатов исследований.

При необходимости введения термической обработки поверхности детали необходимо в диалоговом режиме скорректировать принципиальную схему технологического процесса путем добавления термического этапа с указанием вида термообработки и, в случае необходимости, дополнительной стадии механообработки. Изменения в свойствах обрабатываемого материала после проведения термической операции вносятся путем обработки информации из базы данных методов термической обработки.

*2. Формирование маршрута обработки поверхностей.* Маршрут обработки детали характеризует состав и последовательность операций в каждом этапе, состояние обрабатываемой детали после выполнения каждой операции и основные характеристики системы обработки. На данном этапе по каждой поверхности формируется набор методов обработки, обеспечивающих требуемые эксплуатационные показатели и точность обработки (рис. 1).

Отличительной особенностью данного алгоритма является расчет припусков и операционных размеров, а также технологических условий обработки для выбранного метода с использованием соответствующих расчетных процедур и программных продуктов, разработанных на кафедре «Технология авиационных двигателей и общего машиностроения» РГАТА имени П.А. Соловьева [3].

# ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ

УДК 621:658.011.56

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

С.А. Волков, А.Н. Рябов

*Рыбинская государственная авиационная технологическая академия  
им. П.А. Соловьева*

Во многих отраслях промышленности существует тенденция к повышению требований по точности деталей и надежности работы изделий. Этим обусловлено широкое применение и возросшее значение систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП).

В то же время, несмотря на разнообразие таких систем, решение многих технологических задач как логического, так и расчетного характера в них не автоматизировано и зачастую базируется на использовании имеющегося производственного опыта, что не гарантирует оптимальных результатов.

Так, например, не автоматизирован учет эксплуатационных показателей деталей и их соединений, а при решении вопроса автоматизации расчета операционных размеров не используются последние достижения технологии машиностроения, что отрицательно сказывается на результатах проектирования.

Авторами предлагается решить задачу автоматизированного проектирования маршрута обработки исходя из обеспечения заданных эксплуатационных показателей деталей на основе комплексной оптимизации. Для этого была создана автоматизированная система формирования и оптимизации маршрута обработки.

Первоначальный выбор методов обработки предлагается осуществлять исходя из эксплуатационных требований, предъявляемых к тем или иным сопрягаемым поверхностям деталей машин и их узлов. Поэтому требуемый комплекс эксплуатационных показателей или один из них должен определяться исходя из совместного анализа условий эксплуатации и технических условий на изделие.

Формирование вариантов маршрута обработки поверхности предлагается производить, используя принцип многоуровневой декомпозиции

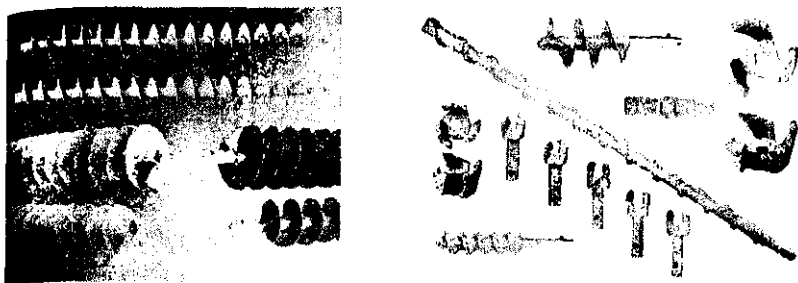


Рис. 4. Буровой инструмент, используемый на рудниках РУП «ПО «Беларуськалий» производства ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»

**Заключение.** В условиях Старобинского месторождения в связи с ростом работ, связанных с бурением скважин различного назначения, существует необходимость перехода от установок ручного бурения, в которых применяется электрический привод вращения (бурильной головки), к мобильным самоходным установкам с гидравлическим приводом, позволяющим в значительной степени снизить трудозатраты, а также ускорить проведение горных работ на отдельных участках шахтного поля.

Разработанный, изготовленный, испытанный и запатентованный в ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» буровой инструмент для бурения шпуров и скважин в глинистых, глинисто-соляных породах, доломитах, песчаниковидных солях может быть рекомендован для промышленного использования на рудниках РУП «ПО «Беларуськалий», а также других горных предприятий, разрабатывающих месторождения калийных, каменных и других солей подземным способом.

#### Литература

1. Обзор существующих буровых установок и заряжающих устройств для бурения и зарядки вертикальных и наклонных скважин глубиной до 50 м с учетом возможности использования соответствующих ВВ и СВ применительно к условиям Старобинского месторождения калийных солей: отчет о НИР (этап 3 договор 1056) / МОРБ Белорусский государственный университет; рук. А.А. Клевчня; исполн. М.А. Жуковков [и др.]. – Минск. – 1999.
2. Алимов, О.Д. Механизация буровых работ в калийных рудниках / О.Д. Алимов, Л.И. Старков, И.Д. Мухид / М.: Недра, 1975.
3. Иванов, К.И. Бурение шпуров и скважин самоходными шахтными установками / К.И. Иванов, А.М. Цикалич / М.: Недра, 1983.
4. Нормативные и методические документы по ведению горных работ на Старобинском месторождении калийных солей. – Солигорск – Минск, 1995. – 214 с.

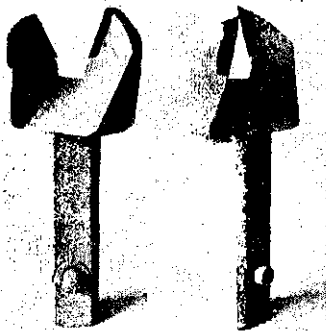


Рис. 3. Коронка буровая  
Ø 42 мм

случаях  $+6^\circ$ ). Для буровых коронок, применяемых на рудниках РУП «ПО «Беларуськалий», опытным путем установлено, что наибольший эффект при бурении достигается тогда, когда передний угол перьев коронки находится в пределах  $10 - 15^\circ$  (рис. 3). Следует также отметить, что крепление, применяемое в данной конструкции, позволяет надежно удерживать инструмент в штанге, благодаря чему уменьшаются биения инструмента в процессе бурения шпура и снижается уровень шума. Кроме того, увеличивается срок службы коронки (резца).

Одной из проблем, которая существует на месторождении при отработке Третьего калийного горизонта, является проблема перехода очистными и подготовительными выработками геологических нарушений типа «мульда погружения». В соответствии с «Нормативными и методическими документами по ведению горных работ на Старобинском месторождении калийных солей» [4], данные участки выемочного столба должны проходиться лавой с предварительным и принудительным инициированием выброса соли и газа буровзрывным способом из специально проводимой передовой выработки.

Основной проблемой, осложняющей переход таких участков, является проблема бурения горизонтальных и слабонаклонных (до  $\pm 25^\circ$ ) шпуров. Чаще всего глинистые породы, слагающие такие мульды, еще и увлажнены. При бурении в них, без продувки или промывки, происходит заштыбовка бурового инструмента и его заклинивание. Извлечь буровой инструмент без его разрушения в таких случаях не представляется возможным.

В связи с вышеизложенным было предложено проходку передового вруба заменить проходкой передовой скважины диаметром  $120 - 140$  мм. Для этих целей в 2003 - 2004 годах на базе ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» создан буровой инструмент для бурения скважин  $\text{Ø}80 - 85$  мм и  $\text{Ø}120 - 140$  мм по глинистым породам. Данный инструмент получил положительную оценку на испытаниях в шахтных условиях.

Отдельные части бурового инструмента представлены на рис. 4.

Скорость бурения по массиву глинисто-соляных пород достигает 10 м/мин и более [3]. Однако, учитывая, что при бурении скважин для торпедирования зависшей труднообрушаемой кровли пересекаются нарушенные породы, в результате чего возрастает вероятность заклинивания бурового става, указанная скорость не должна превышать 3 – 5 м/мин.

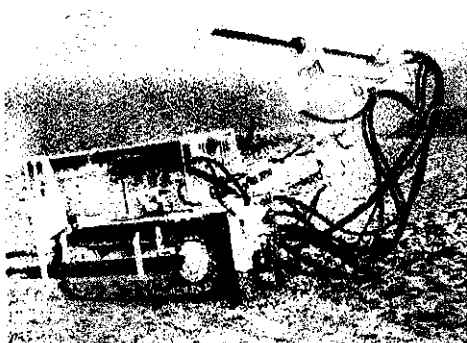


Рис. 2. Буровая установка UBW 40/2000 EN

Ответственным узлом буровых машин является захват, который удерживает став в период его монтажа (демонтажа). В буровых колонках типа 063-1И, применяемых на рудниках объединения, отсутствует механический либо гидравлический захват и поэтому использование их для бурения глубоких скважин (свыше 15 м) неприемлемо, т.к. это весьма трудоемкий и небезопасный процесс.

Во всех бурильных установках для повышения их устойчивости при работе применяются механический либо гидравлический (при помощи домкратов) распор в кровлю и почву выработки.

**Буровой инструмент для бурения в сложных горно-геологических условиях Старобинского месторождения.** Эффективное бурение по глинисто-соляным породам и сильвиниту (породы, обладающие ярко выраженными пластическими свойствами) возможно лишь при реализации способа разрушения забоя скважины (шпура) посредством резания, без образования скола, как это происходит у «угольных» коронок.

Существует большое разнообразие режущего инструмента, который применяется для бурения скважин различного диаметра. Как показывает опыт эксплуатации месторождений каменного угля, для вращательного бурения по углю и породам крепостью  $f \leq 7$  наиболее оптимально подходят двухперые резцы угольные и породные, которые могут иметь различную форму и армируются пластинами твердого сплава ВК-8. Данные резцы крепятся к витой (спиральной) буровой штанге с помощью клиновидного хвостовика и шплинта через отверстия, имеющиеся в штанге и хвостовике резца. Передний угол перьев для бурения обычно равен  $0^\circ$  (в некоторых

Буровые установки для бурения скважин различного назначения, применяемые на Старобинском месторождении калийных солей. Одним из наиболее распространенных способов бурения скважин на Старобинском месторождении является вращательный. Областью его эффективного применения являются породы с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова не более 6-8. Для бурения в слабых породах, в том числе и соляных, применяются установки ударно-вращательного бурения. Но в условиях Старобинского месторождения данный способ оказался недостаточно эффективным вследствие пластичности соляных пород [1].

Самым распространенным приводом вращения (бурильной головки) является электрический. Однако в последнее десятилетие, как свидетельствует мировой опыт, прослеживается тенденция к более широкому использованию бурильных головок с гидравлическими и реже – пневматическими приводами. Гидроприводы обеспечивают бурильным машинам почти неограниченные диапазоны по скорости вращения и условиям подачи инструмента [2]. Гидравлическая подача позволяет плавно регулировать величину осевого усилия на забой, что существенно уменьшает число поломок бурового инструмента.

На Солигорских рудниках производится бурение взрывных и дегазационных шпуров и скважин диаметром от 40 – 42 до 105 мм и шпуров диаметром 28 – 42 мм для установки анкерной крепи. Данные работы выполняют при помощи ручных электросверл, установленных на специальные буровые колонки 063-ИИ (рис. 1).

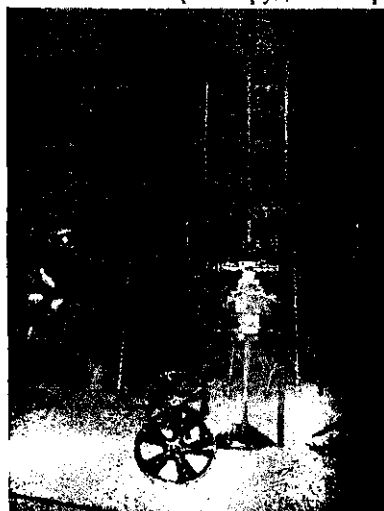


Рис. 1. Буровая колонка модели 063-ИИ

Для бурения скважин большого диаметра (40 – 100 м) и глубиной до 70 – 80 м применяют буровые машины UBW 40/2000 ЕИИ производства Schmidt, Kranz & CoGmbh, Германия (рис. 2), WBH-22 производства Польши.

Для бурения скважин большого диаметра (40 – 100 м) и глубиной до 70 – 80 м применяют буровые машины UBW 40/2000 ЕИИ производства Schmidt, Kranz & CoGmbh, Германия (рис. 2), WBH-22 производства Польши.

Скорости подачи бурильной головки колеблются в среднем в пределах от 1,5 – 3 до 10 – 30 м/мин.

Далее динамическая балансировка ротора центробежной установки выполнялась методом пробных пусков по известным алгоритмам [3]. Применение данного метода наладки динамических характеристик центробежной установки позволило уменьшить уровень вибраций, вызванных неуравновешенностью ротора до 0,05 мм/с, что в 1,5 раза меньше, чем при отдельной балансировке ее элементов на балансировочных станках.

### Литература

1. Кельзон, А.С. Динамика роторов в упругих опорах / А.С. Кельзон, Ю.П. Циманский, В.И. Яковлев. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 280 с.
2. Маслов, Г.С. Расчеты колебаний валов: справ. / Г.С. Маслов. – 2-е издание, перераб. и доп. – М: Машиностроение, 1980 – 151 с.
3. Вибрации в технике. Справочник. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1981 – 456 с.

УДК 622.23.051.15+622.23.052

## ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН ПОДЗЕМНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ РАЗВЕДКИ

Д.Т. Карабань, А.Л. Поляков

*ЧНПУП «Институт горного дела», Солигорск*

Введение Освоение Старобинского месторождения началось в 1961 году и представляет собой соленосную толщу мощностью около 300 – 400 м, представленную чередованием пластов каменной соли и глинисто-карбонатных пород, среди которых залегают четыре калийных горизонта. Породы, встречающиеся при разработке Старобинского месторождения калийных солей, в основном, не отличаются высокой прочностью. Их крепость по шкале Протодяконова изменяется в пределах от 1 до 4. При разработке Второго, Третьего, а также частично Первого калийных горизонтов встречаются различные геологические нарушения, такие, как:

- геологические нарушения типа «мульда погружения»;
- замещение продуктивного калийного пласта каменной солью;
- тектонические нарушения.



По данным расчета построен график, представленный на рис. 2.

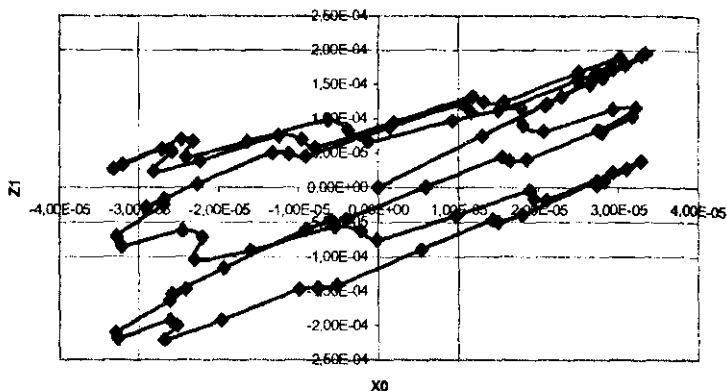


Рис. 2. Зависимость горизонтальных колебаний ротора (точка А) от вертикальных колебаний точки зацепления штока с приводным электродвигателем (точка В)

На основании полученных данных (рис. 2) методом наименьших квадратов была аппроксимирована зависимость  $x_0$  от  $z_1$  линейной функцией  $x_0 = a + bz_1$ .

Согласно этому методу

$$a = (\sum x_{0i} \sum z_{1i}^2 - \sum z_{1i} \sum x_{0i} z_{1i}) / \Delta, \quad (14)$$

$$b = (N \sum x_{0i} \sum z_{1i} - \sum x_{0i} \sum z_{1i}) / \Delta, \quad (15)$$

где 
$$\Delta = N \sum z_{1i}^2 - (\sum z_{1i})^2. \quad (16)$$

После расчетов по формулам (14), (15), (16) были получены значения  $a=1,513E-04$ ,  $b=3,041$ , т.е. усредненная зависимость между  $x_0$  и  $z_1$  имеет вид

$$x_0 = 0,0001513 + 3,041z_1. \quad (17)$$

Зависимость (17) имеет важное значение при наладке динамических характеристик центробежной установки. Она использовалась для решения задачи динамической балансировки ротора на месте без разборки. Так как в точке А измерить горизонтальные колебания практически невозможно, то измерялись вертикальные колебания в точке В и, используя формулу пересчета (17), определялись горизонтальные колебания ротора в точке А.