



**ВЕСТНИК  
НАЦИОНАЛЬНОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
«ХПИ»**

**К 125 летию юбилея Национального Технического Университета  
«Харьковский Политехнический Институт»**

**41'2010**

**Харьков**



# ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА "ХПИ"

Сборник научных трудов  
Тематический выпуск

## 41'2010

"Технологии в машиностроении"

Издание основано Национальным техническим университетом "Харьковский политехнический институт" в 2001 году

Государственное издание  
Свидетельство Госкомитета по  
информационной политике Украины КВ  
№ 5256 от 2 июля 2001 года

### КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ:

#### Председатель

Л.Л.Товажнянский, д-р техн. наук, проф.

#### Секретарь координационного совета

К.А. Горбунов, канд. техн. наук, доц.

А.П.Марченко, д-р техн. наук, проф.  
Е.И.Сокол, д-р техн. наук, проф.;  
М.Д.Годлевский, д-р техн. наук, проф.;  
А.И.Грабченко, д-р техн. наук, проф.;  
В.Г.Данько, д-р техн. наук, проф.;  
В.Д.Дмитриенко, д-р техн. наук, проф.;  
В.Б.Клепиков, д-р техн. наук, проф.;  
О.К.Морачковский, д-р техн. наук, проф.;  
М.И.Рыщенко, д-р техн. наук, проф.;  
В.Б.Самородов, д-р техн. наук, проф.;  
Ю.В.Тимофеев, д-р техн. наук, проф.;  
А.В.. Бойко, д-р техн. наук, проф.;  
Е.Е. Александров, д-р техн. наук, проф.;  
Л.М. Бесов, д-р ист. наук, проф.;  
Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.;  
И.Ф. Домнин, д-р техн. наук, проф.;  
Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;  
В.А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.;  
П.Г. Перерва, д-р экон. наук, проф.;  
В.И. Николаенко, канд. ист. наук, проф.;  
В.С. Лупиков, д-р техн. наук, проф.;  
П.А. Качанов, д-р техн. наук, проф.;  
С.И. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.;  
В.М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.;  
В.И. Кравченко, д-р техн. наук, проф.;  
Г.В. Лисачук, д-р техн. наук, проф.;  
В.В. Епифанов, д-р техн. наук, проф.;  
Ю.И. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;  
И.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

#### Ответственный редактор:

Ю.В.Тимофеев, д-р техн. наук, проф.

#### Ответственный секретарь:

В.В.Фролов, канд. техн. наук, доц.

С.С.Добротворский, д-р техн. наук, проф.;  
В.Е. Карпуть, д-р техн. наук, проф.;  
А.Я. Мовшович, д-р техн. наук, проф.;  
Ю.А.Сизый, д-р техн. наук, проф.;  
В.Д. Хицан, д-р техн. наук, проф.;  
А.А. Пермяков, д-р техн. наук, проф.;  
А.Н. Шелковой, д-р техн. наук, проф.

Адрес редколлегии: 61002, Харьков,  
ул. Фрунзе, 21. НТУ "ХПИ".  
Каф. ТМС, Тел. (057) 7076-625.

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – №41 . – 134с.

В збірнику представлені теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками різних організацій та установ.

Для викладачів, наукових співробітників, спеціалістів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты исследований и разработок, выполненных преподавателями высшей школы, аспирантами, научными сотрудниками различных организаций и предприятий. В области технологии машиностроения, металлорежущего оборудования, оснастки, средств автоматизации.

Для преподавателей, научных сотрудников, специалистов.

**Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ"  
Протокол № 7 від «01» жовтня 2010 р.**

**ISSN 2079–004X**

**А.А. ПЕРМЯКОВ**, д-р техн. наук; проф, НТУ «ХПИ», г.Харьков

**НАУКОВА ШКОЛА ПРОЕКТУВАННЯ, ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ АГРЕГАТОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ МЕХАНООБРОБКИ**

Агрегативні технологічні системи механообробки (АТСМ) і агрегатні верстати (АВ) широко поширені в українському машинобудуванні й машинобудуванні найбільш промислово-розвинених країн (10-15% парку металорізального устаткування), становлячи основу високоорганізованих і найбільш ефективних виробництв. Верстати й системи, як і більшість технічних об'єктів, пройшли період уніфікації. Це привело до виникнення ідеї створення технологічного устаткування на базі загальних цільових вузлів-агрегатів. Агрегативання дозволило забезпечити: скорочення строків і вартості проектування й виготовлення (до 12 разів); підвищення продуктивності обробки за рахунок високої концентрації операцій (до 8 разів); зниження собівартості обробки (до 28 разів); скорочення виробничих площ (до 16 разів); спрощення обслуговування й ремонту; оборотність і гнучкість.

Ідеологами агрегативаного технологічного устаткування та засновниками наукової школи в цьому напрямку в Харкові слід вважати першого завідувача кафедри «Технологія машинобудування та



проф. Тимофієв Ю.В.



проф. Хіцан В.Д.

металорізальні верстати» Харківського політехнічного інституту Корольова Пилипа Кузьмича та доцента кафедри, директора Харківського заводу агрегатних верстатів Рябко Харитона Григоровича. Вони заклали фундамент та створили передумови розвитку науково-технічних ідей, сприяли підготовці висококваліфікованих фахівців в галузі агрегатованого верстатобудування. Розвиток цього напрямку та остаточне оформлення наукової школи відбулося під керівництвом теперішнього завідувача кафедри професора Тимофієва Юрія Вікторовича. Його докторська дисертація «Основи аналізу та синтезу систем механообробки методами технологічного подіб'я» у 1985 році була кваліфікована спеціалізованою вченою радою Тульського політехнічного інституту як новий розділ теорії технологічних систем.

У подальших роботах, виконаних на кафедрі "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" у тісному науково-технічному співробітництві з Харківським виробничим об'єднанням агрегатних верстатів (ХВО АВ) на основі узагальнення багаторічного досвіду проектування, виробництва, впровадження й експлуатації в промисловості різних зразків



Кафедра «Технологія машинобудування та металорізальні верстати»  
Верхній ряд зліва направо: Савченко А., Ши Сюнь Мао, Серов Б.С.,  
Уляшевич В., Пестунов В.М.  
Середній ряд: Коротченко М.М., Лисак А.Г., Цимбал І.Л., Волошин А.Н.,  
Борисова І.Б., Гришко Я.А.  
Нижній ряд: Іванов В.В., Богатирьов В.Н., Корольов П.К., Воробьов С.А., Рябко Х.Г.,  
Яковлев М.І.

агрегатних верстатів, автоматичних ліній і робототехнічних комплексів у 80-90х роках минулого сторіччя були розроблені та впроваджені загальні принципи й методики автоматизованого проектування АТСМ, створено основи компонетики (теорія компонувань) АТСМ, які дозволяють створювати ефективно високопродуктивне агрегатоване металорізальне устаткування.

Велика заслуга в розвитку ідей принципу агрегування у верстатобудуванні належить генеральному директору ХВО АВ Хіцану Валерію Дмитровичу, нині професору кафедри "Технологія машинобудування й металорізальні верстати". Він є засновником нового типу верстатів – малі агрегатні верстати-автомати з централізованим приводом, а його докторська дисертація «Наукові основи удосконалення та розвитку принципу агрегування при створенні технологічних систем металообробки різанням», що була захищена у 1996 році, не тільки вирішувала значну науково-технічну проблему та концентрувала багаторічний досвід створення агрегатних верстатів, а ї показувала подальші напрямки розвитку цього високоєфективного технологічного обладнання. Науковим консультантом роботи був професор Тимофієв Ю.В.



проф. Карпусь В.Є.

Принципову можливість переналадки технологічного обладнання, що створюється за принципом агрегування, була теоретично обґрунтована в докторській дисертації професора кафедри Карпуся Владислава Євгеновича «Технологічні основи структурно-параметричного синтезу компонок багатомономенклатурного агрегатованого металорізального обладнання» в 1998 році. Розроблені технологічні принципи структурно-параметричного синтезу багатомономенклатурних АВ на основі використання запропонованого критерію інтенсивності формоутворення, а також розробка елементної бази та компонок АВ зі змінними багатошпіндельними коробками визначили нові перспективи розвитку агрегованих систем. Науковим консультантом роботи був професор Тимофієв Ю.В.



проф. Пермяков О.А.

В 2002 році на кафедрі була захищена наступна докторська дисертація професором Пермяковим Олександром Анатолійовичем «Теоретичні основи компонетики агрегованих технологічних систем». В роботі вперше розроблена методологія композиційного проектування багатопозиційних агрегованих технологічних систем із круговим транспортуванням заготовки. На основі

розробки узагальненої моделі, принципів спрямованого синтезу просторового компонування АТСМ на базі апарату афінних перетворень координатних систем елементів, що компонуються, оптимізації компоновочних рішень за критеріями компактності й економічності на різних стадіях деталізації проекту розроблені методика і комплекс інформаційного та алгоритмічного забезпечення автоматизованого проектування виділеного класу технологічних систем. Науковим консультантом роботи був професор Тимофіїв Ю.В.

В 2004 році професор Шелковий Олександр Миколайович захищає докторську дисертацію «Організаційно-технологічні основи реінжинірінга виробничих систем металообробки», яка вирішувала значну науково-технічну проблему забезпечення життєвого циклу технологічного обладнання та систем механообробки. Науковим консультантом роботи був професор Тимофіїв Ю.В.

Крім того, за останні два десятка років у цьому напрямку було підготовлено й захищено одинадцять кандидатських



проф. Шелковий О.М.



дисертацій, науковим керівником вісьмох з них був професор Тимофієв Ю.В. Учні професора Тимофієва Ю.В. успішно працюють не тільки в нашому університеті. Декан машинобудівного факультету Української інженерно-педагогічної академії (м.Харків) Сичов Юрій Іванович та професор Мельниченко Олександр Анатолійович пройшли наукову школу професора Тимофієва Ю.В. і плідно працюють в своєму ВУЗі. В свій час закінчили аспірантуру, стали кандидатами наук та фахівцями вищої кваліфікації під керівництвом професора Тимофієва Ю.В. громадяни Іраку, Нігерії, Домініканської республіки, Китаю.

**Хронологія захисту дисертацій наукового напрямку:**

1985	д.т.н.	Тимофієв Ю.В.
1992	к.т.н.	Яковенко І.Е.
1992	к.т.н.	Шелковий О.М.
1993	к.т.н.	Акінсей О. (Нігерія)
1994	к.т.н.	Рацімбазафі Ц. (Домініканська респ.)
1994	к.т.н.	Пермяков О.А.
1996	д.т.н.	Хіцан В.Д.
1997	д.т.н.	Мельниченко О.А.
1998	к.т.н.	Гаврилюк Ю.Р.
1998	д.т.н.	Карпусь В.Є.
1998	к.т.н.	Приходько О.Ю.
2001	к.т.н.	Тань Яо (КНР)
2002	д.т.н.	Пермяков О.А.
2004	д.т.н.	Шелковий О.М.
2006	к.т.н.	Фадєєв А.В.
2007	к.т.н.	Сичов Ю.І.
2008	к.т.н.	Кондратюк О.Л.

Науковий напрямок, пов'язаний зі створенням спеціального високопродуктивного металорізального устаткування, що створюється за агрегатно-модульним принципом, технологічна гнучкість якого забезпечена можливістю його перекомпонування, включений до Державної цільової науково-технічної програми розвитку прогресивних матеріалів та технологічного обладнання для машинобудування на 2011-2015 роки.

*А.А. ПЕРМЯКОВ*, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХП», г. Харьков;  
*А.А. ЖИЖЕВ*, инж.-технолог НКМЗ, г.Краматорск.

### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УПОРНЫХ ЦЕНТРОВ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ УСТАНОВКИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ПРИ ШЛИФОВАНИИ.**

У статті досліджується вплив конструкції упорних центрів, та швидкості обертання виробу на точність установки прокатного валка під час шліфування. Запропонована нова конструкція біметалічного упорного центра. Проведено експериментальні дослідження впливу режиму роботи на стійкість центрів та на похибку установки валків при шліфуванні.

In this article investigated influence of the dead centre design, and velocity of work piece rotation on the positional location accuracy of mill rolls during grinding operation. New design of dead centre for heavy grinding machine is proposed. Experimentally tested how operating conditions influence efficient life of dead centers and work piece setting error.

Шлифование рабочих и опорных прокатных валков на ЗАО НКМЗ выполняется как на станках оснащенных вращающимися центрами – «Herkules», так и на круглошлифовальных станках с упорными центрами – «Giorgia» и «Waldrich Siegen». При установке заготовок большой массы (от 5 до 50т) в упорных центрах, распространенными дефектами являются приваривание центра к детали, образование задиров, трещин и сколов на рабочих поверхностях центров [1]. При повреждении базовых поверхностей – центровых отверстий прокатного валка или рабочего конуса упорного центра, валок изменяет свое положение на станке, что приводит к увеличению радиального биения и может сделать невозможной дальнейшую обработку. При образовании значительных погрешностей установки заготовку прокатного валка снимают со станка, исправляют центровые отверстия, шлифуют или заменяют изношенные упорные центра. Это значительно увеличивает трудоемкость механической обработки и может привести к неисправимому браку. Для предотвращения указанных неполадок в настоящее время применяются малоэффективные технологические способы – уменьшение осевого усилия на задней бабке при закреплении детали – это снижает нагрузку на центр, но при этом также уменьшается надежность закрепления детали, что может привести к увеличению радиального биения. Принудительное охлаждение шеек валка затруднительно, так как СОЖ не попадет в зону контакта центра и детали, а процесс шлифования может длиться более 10 часов. Уменьшение частоты вращения детали является наиболее эффективным способом устранения перегрева центров и образования задиров, но при этом уменьшается минутная подача и производительность шлифования. Малая скорость вращения детали также может являться одним из факторов, вызывающих образование поверхностных температурных дефектов, так как при меньшей

скорости вращения детали увеличивается тепловая нагрузка на поверхность валка [2].

Наиболее рациональным способом устранения дополнительных погрешностей установки является повышение износостойкости и температурной стойкости рабочих поверхностей центров. Целью данной работы является совершенствование конструкции упорных центров для тяжелых шлифовальных станков за счет выбора оптимального материала для наплавки рабочего конуса центра.

В качестве технологических баз на прокатных валках используются центровые отверстия формы «С» и «Е» с углом конуса  $75^\circ$  по ГОСТ14034-74. Для установки применяются упорные центра изготовленные по ГОСТ 18259-72 из стали У8, а также наплавленные материалом «Сормайт», электродами марки ЦС-1. предлагается изготавливать центра с рабочим слоем наплавленным материалом УТР 690. Данный материал обеспечивает более высокую износостойкость, твердость, температурную стойкость и качество рабочего слоя наплавленных изделий [3,4].



Рис. 1 – Биметаллический упорный центр.

Более высокая закаливаемость и красностойкость материала УТР 690 обеспечиваются за счет высокого содержания хрома, молибдена, вольфрама и ванадия. Легирование карбидообразующими элементами W, Mo, V способствует повышению твердости и появлению способности наплавки к вторичному твердению – за счет чего увеличивается износостойкость. Высокое содержание в ранее используемых электродах марки ЦС-1 хрома – до 31% создавало опасность образования в наплавленном слое горячих трещин [3].

Для определения преимуществ материала УТР 690 в сравнении с используемым согласно ГОСТ 18259-72 материала «Сормайт» было проведено металлографическое исследование образцов из стали У8, наплавленных электродами УТР690 и электродами ЦС-1 [5]. Микроисследования проводились при помощи металлографического микроскопа «Неофот-30» при увеличении  $100^x$ ,  $500^x$  и  $1000^x$ .

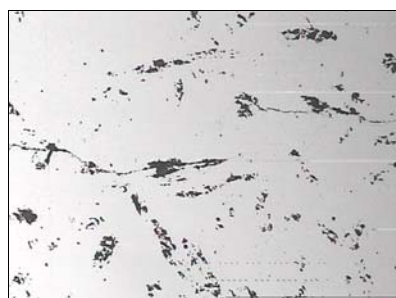
Таблица 1 – Химический состав материала наплавки.

№ образца	Содержание элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V
№1 – УТР690	0,9	0,8	0,5	4,5	-	8,0	2,0	1,2
№2 – ЦС-1	2,5-3,3	2,8-3,5	0,4-1,5	27-31	3,5	-	-	-

Исследованием нетравленных образцов установлено, что загрязненность неметаллическими включениями наплавленных материалов незначительна и не превышает 2 балл шкал ГОСТ 1778-70. В слое, наплавленном электродами УТР 690, выявлены нитевидные трещины которые располагаются в виде сетки (рис. 2, а). В слое, наплавленном электродами ЦС-1 имеют место множественные прерывистые трещины, которые сопровождаются участками выкрашиваний металла (рис. 2, б).



а)



б)

Рис. 2 – Микроструктура наплавленного слоя до травления.  
а) УТР690; б) ЦС-1

Микроструктура наплавленного материала УТР690 после травления – мартенсит, оцениваемый 2 баллом шкалы №3 ГОСТ 8233-56, и ледебурит. Мартенсит светлой травимости соответствует закаленному состоянию микроструктуры (рис. 2, а), темной травимости – отпущенному состоянию (рис. 2, б). Ледебурит располагается в виде сетки.

Микроструктура наплавленного материала ЦС-1 – феррит и ледебурит. Величина зерна матрицы оценивается 8-9 номерами дополнительной шкалы № 1 ГОСТ 5639-82. В микроструктуре присутствует интерметаллидная фаза ( $\sigma$ -фаза) в виде игл и включений неправильной геометрической формы, сопровождающимися участками выкрашиваний – рис. 4.

Таким образом, результаты металлографического исследования наплавленного материала позволяют сделать вывод о том, что материал УТР690 имеет более высокие механические свойства чем «Сормайт», что должно обеспечивать увеличение стойкости упорных центров, а также уменьшение погрешности установки прокатных валков на шлифовальных станках.

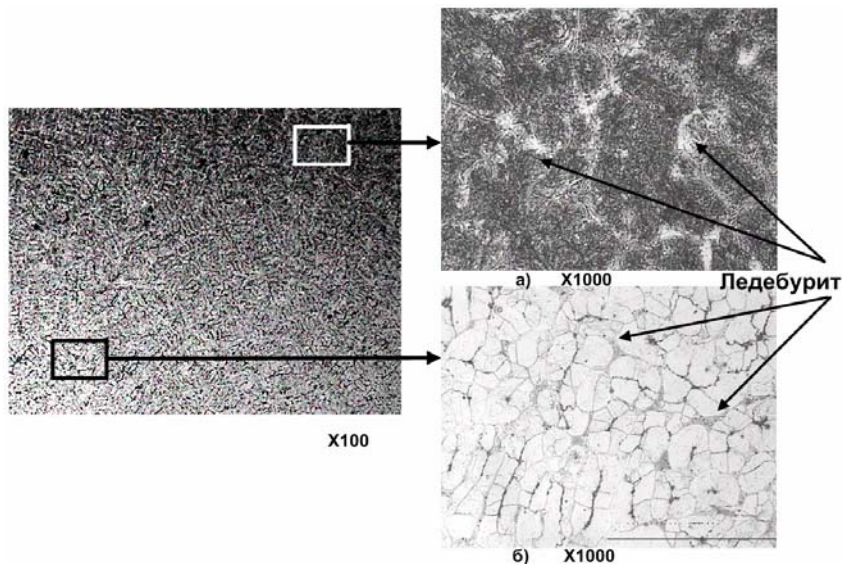


Рис. 3 – Микроструктура наплавленного материала УТР 690  
а) закаленное состояние; б) отпущенное состояние

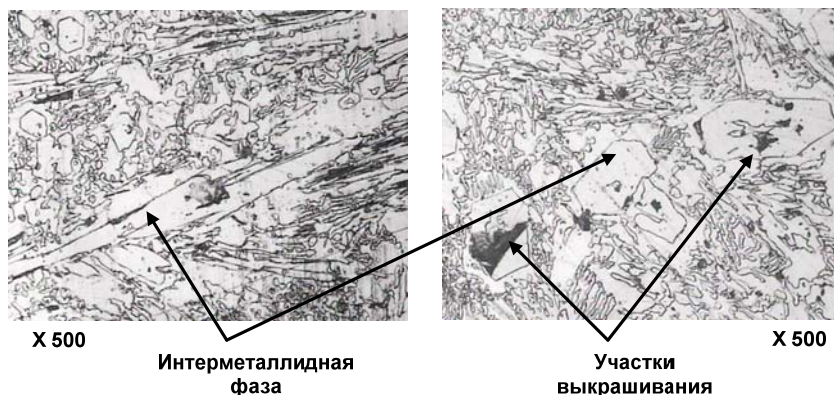


Рис. 4 – Микроструктура наплавленного материала «Сормайт ЦС-1».

При внедрении центров новой конструкции в производство эффективность оценивалась по двум критериям – обеспечению стабильности положения заготовки – величине радиального биения на шейке в процессе

шлифования, и времени эксплуатации центра до перешлифовки – изменению шероховатости рабочей поверхности. Измерение точности установки в процессе шлифования проводилось на станке «Giorgia» R/150-500x5000 в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 5.

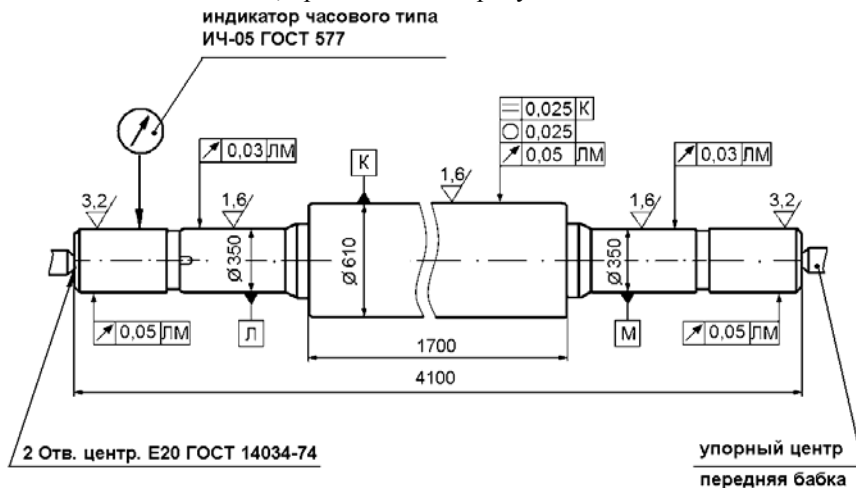


Рис. 5 – Схема измерения точности положения прокатного валка на шлифовальном станке .

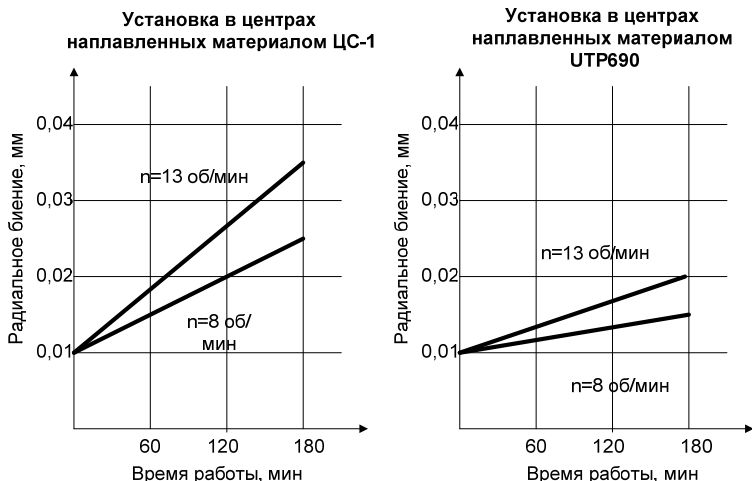


Рис. 6 – Зависимость точности положения детали на шлифовальном станке от частоты вращения заготовки.

До начала шлифования валок устанавливался с точностью до 0,01 мм. Выполнялось шлифование бочки – величина удаляемого припуска – 0,8 мм

на диаметр, предварительно – 0,7 мм, машинное время – 120 мин и окончательно – 0,1 мм, машинное время 60 мин. Масса детали – 5800 кг.

Для определения износостойкости центров после обработки валка измерялась шероховатость рабочей поверхности центра. Наплавленная поверхность центров до начала работы была шлифована с шероховатостью  $Ra=0,6\text{мкм}$ , измерения проводились профилометром SURTRONIC.

На основании результатов измерения шероховатости рабочей поверхности центров – рис. 7, можно сделать вывод о том, что стойкость упорного центра наплавленного материалом УТР690 превышает стойкость центра наплавленного «Сормайтом» в 4 – 5 раз.

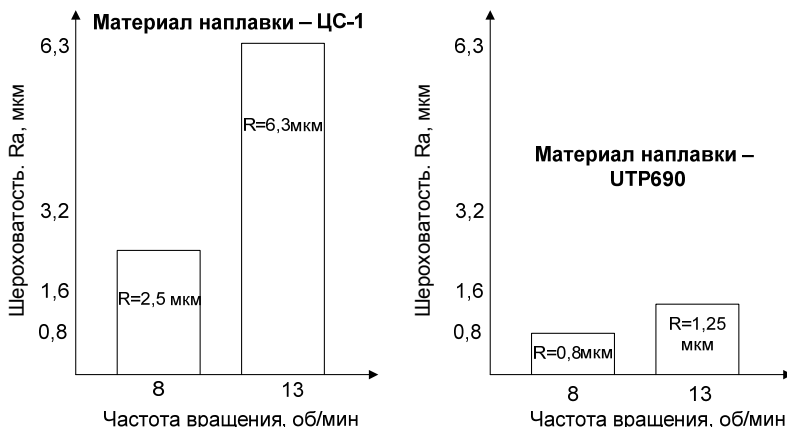


Рис. 7 – Зависимость шероховатости рабочей поверхности упорного центра от частоты вращения заготовки.

Таким образом, предложенное усовершенствование конструкции упорного центра – наплавка рабочего слоя высоколегированным материалом УТР690 позволяет значительно снизить затраты на изготовление и восстановление технологической оснастки, повысить надежность установки прокатных валков на шлифовальных станках, повысить точность шлифования и обеспечить возможность шлифования с повышенной скоростью вращения детали.

**Список литературы:** 1. Валки листовых станов холодной прокатки. Новиков В.Н., Белосевич В.К., Гамзков С.М. и др. М.: Металлургия, 1970. – 336с. 2. Агасарян Р.Р. Абразивная обработка закаленных сталей типа 9Х (На примере обработки рабочих валков холодной прокатки) /Ред. С.Г. Кандаян. – Ереван. Айстан, 1971.-127с. 3. Сварка и свариваемые материалы: Справочник в 3-х томах Том 1 Свариваемость материалов под ред. Э.Л. Макарова. – М. Металлургия, 1991. – 528с. 4. Каталог аналогов зарубежных и отечественных основных сварочных материалов. РД 26.260 – 2004. 5. А.П. Гуляев, Металловедение. – М.Металлургия, 1986. – 544с.

Поступила в редколлегию 20.09.2010

**В.Є. КАРПУСЬ**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», г. Харків;  
**М.С. ІВАНОВА**, аспірант НТУ «ХПІ», г. Харків

## **ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНОГО ОСЬОВОГО ІНСТРУМЕНТА**

Стаття присвячена проблемі ефективного застосування комбінованих осьових інструментів. Розглянуто сучасні конструкції таких інструментів, виготовлених закордонними та вітчизняними виробниками. Проаналізовані їх переваги та умови використання в сучасній механообробці. Визначені задачі та шляхи вдосконалення комбінованого осьового інструмента з урахуванням виробничих умов.

The article is dedicated to issue of effective application of combined axial cutting tools. The modern constructions of such cutting tools produced by foreign and domestic manufacturers are considered. Advantages and utilization conditions according to up-to-date machining processes are analyzed. Issues and ways of upgrading of combined axial cutting tools subject to manufacturing conditions are defined.

Актуальною задачею досліджень в галузі інструментального виробництва є пошук способів підвищення продуктивності обробки металорізальним інструментом із одночасним забезпеченням потрібної точності та якості поверхонь деталей.

Перспективними з точки зору підвищення продуктивності обробки є комбіновані осьові інструменти (КОІ), які складаються з двох та більше однотипних або різнотипних осьових інструментів і дозволяють обробляти отвори за один робочий хід, завдяки суміщенню технологічних переходів.

Ці інструменти розробляються та виготовляються спеціально для обробки конкретного отвору, що обумовлює велику кількість КОІ, які відрізняються між собою конструкцією, розмірами, технологічним призначенням тощо.

На основі аналізу вітчизняної та закордонної літератури, патентної інформації, конструкторсько-технологічної документації та досвіду виробничого впровадження КОІ розроблена їх класифікація.

За конструктивним виконанням КОІ бувають: суцільні (рис. 1, а), з напаяними пластинами, з механічним кріпленням пластин (рис.1, б), зі вставними ножами та збірні (рис. 1, в). Враховуючи високу вартість інструментального матеріалу і те, що зношуються в основному різальні кромки інструмента, доцільно використовувати КОІ з напаяними пластинами, механічним кріпленням пластин та збірні. Суцільні КОІ доцільно застосовувати лише для обробки отворів малих розмірів з невеликим перепадом діаметрів.





a/



б/



в/

Рис. 1 – Двоступінчасті свердла фірми Iskar: а – суцільне;  
б – з механічним кріпленням пластин;  
в – збірне

На рис 2, а показано суцільний інструмент «свердло-розвертка», запатентований у США в 1985 р. [1], складається зі спірального свердла і розвертки, які мають спільну робочу частину та дві спільні спіральні канавки для виведення стружки із зони різання. Різальні кромки розвертки заточують так, щоб кут їх нахилу був протилежним куту нахилу спіральних канавок. Цим інструментом можна просвердлити наскрізний отвір високої якості поверхні за один робочий хід.

Інструмент для обробки отворів, запатентований у США у 2007 р. німецькою фірмою Reiner Quanz GmbH & Co (рис. 2, б) [2], поєднує в собі спіральне свердло, мітчик та зенківку і також має спільні спіральні канавки для виведення стружки.

КОІ (рис. 2, в), запатентований в 2008 році Сполученими Штатами Америки, як представником National Aeronautics and Space Administration (NASA) [3] складається зі свердла та багатоступінчастого мітчика. Цей інструмент призначений для свердління та обробки ступінчастих різьбових отворів за один робочий хід.

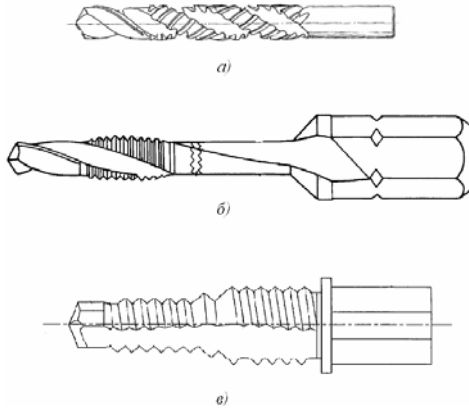


Рис. 2 – Суцільні різнотипні КОІ:

а – свердло-розвертка; б – свердло-мітчик; в – свердло-двоступінчастий мітчик

КОІ можуть бути як однотипними, наприклад, ступінчасті свердла (див. рис. 1, рис. 4, а), ступінчасті зенкери (рис. 4, б, в), так і різнотипними, наприклад, свердло-розвертка (див. рис. 2, а, рис. 3, а), зенкер-розвертка (рис. 3, б), свердло-мітчик (див. рис. 2 б, в).

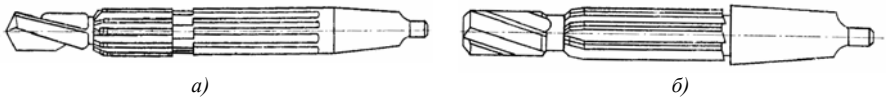


Рис. 3 – Різнотипні КОІ: а – свердло-розвертка; б – зенкер-розвертка

За кількістю ступенів КОІ виготовляють дво-, три-, чотири-, п'ятиступінчасті та більше. Наприклад, ВАТ «Специнструмент» (Росія) по кресленнях замовників виготовляє ступінчасті свердла та зенкери, що складаються з суцільного корпусу потрібної форми, на якому закріплені змінні багатогранні пластини (див. рис. 4) [4].

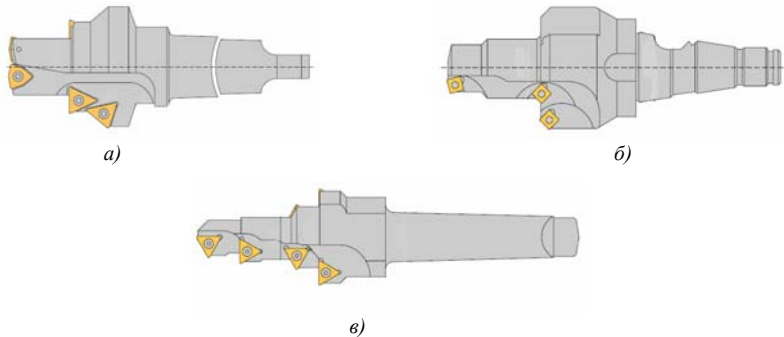


Рис. 4 – КОІ з механічним кріпленням пластин: а – триступінчасте свердло; б – триступінчастий зенкер; в – чотириступінчастий зенкер

Послідовність реалізації технологічних переходів обумовлює принцип роботи ступенів КОІ: послідовний, паралельний та послідовно-паралельний. Наприклад, обробляючи гладкий отвір інструментом «зенкер-розвертка» або «зенкер-розвертка-мітчик», суміщення технологічних переходів відбувається послідовно, а ступені інструмента працюють за послідовою схемою різання. При одночасній обробці співвісних поверхонь, що знаходяться на деякій відстані одна від одної, ступені КОІ здійснюють паралельну обробку, якщо одночасно починають обробку та одночасно її закінчують. Найпоширенішим є послідовно-паралельний принцип роботи ступенів, при якому починає оброблення перший ступінь, далі інші, таким чином, що деякий час усі ступені працюють одночасно. Це характерно для таких КОІ, як «свердло-зенкер-зенківка», ступінчасті зенкери тощо.

Для підвищення точності отворів на виробництві можуть застосовувати додаткове спрямування (по кондукторних втулках або за конструктивним елементом КОІ).

В умовах сучасного машинобудування фірми-виробники інструмента пропонують збірний КОІ, як більш економічний, ефективний та зручний у експлуатації.

Конструкція збірного інструмента для обробки отворів (рис. 5), запатентована компанією Everede Tool Company (США) у 1982 р [5], складається з корпусу 1, в якому за допомогою гвинтів 2 на потрібній довжині фіксується осьовий інструмент (свердло 3 або розвертка 4). На корпусі 1 гвинтами 5 в певному положенні кріпиться змінна різальна пластинка 6 для обробки фаски. Таким чином, можна отримати «свердло-зенківку» (рис. 5, а) або «розвертку-зенківку» (рис. 5, б).

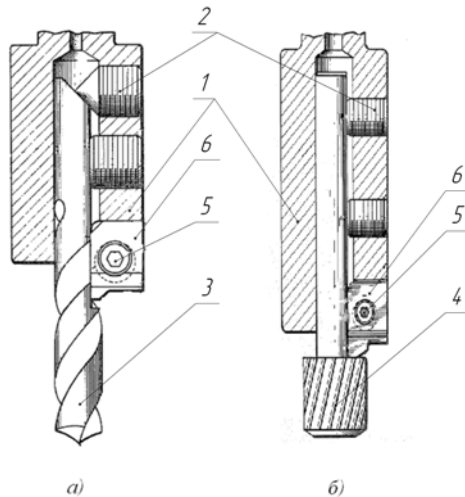


Рис. 5 – Збірний КОІ компанії Everede Tool Company у виконанні:  
а – свердла-зенківки; б – розвертки-зенківки

Збірне ступінчасте свердло Карла Х. Ліндена (рис. 6), запатентоване в 1985 р. у США [6], складається з декількох окремих елементів різних діаметрів, які мають свої різальні кромки та спіральні канавки для виведення стружки з зони різання. Всі елементи, крім першого, у передній частині мають уніфікований різьбовий отвір, у який загвинчується попередній елемент меншого діаметра, таким чином, щоб утворювалося ступінчасте свердло. Така конструкція збірного КОІ дозволяє складати ступінчасте свердло з потрібною кількістю ступенів та набором діаметрів (див. рис. 6 б, в).

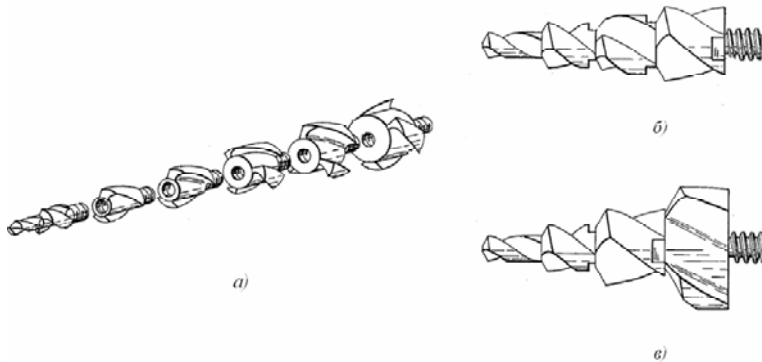


Рис. 6 – Збірне ступінчасте свердло Карла Х. Ліндена

КОІ (рис. 7), який був запатентований компанією Hayes Lemmerz International у 2007 р. [7] складається із суцільного ступінчастого корпусу 1, в передню частину меншого діаметру якого встановлюється перове свердло 2, а на середню частину більшого діаметра гвинтами 3 кріпляться пластини 4. Цей інструмент призначений для свердління отвору з фаскою. Така конструкція забезпечує швидку заміну різальних кромки інструмента.

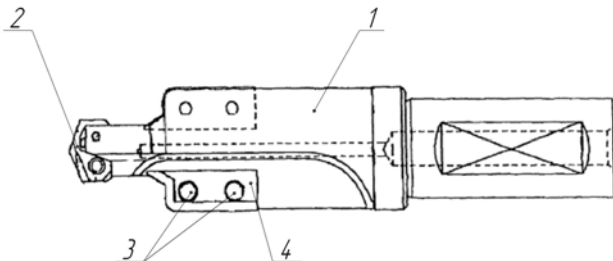


Рис. 7 – Свердло-зенківка фірми Hayes Lemmerz International

Фірма Kennametal одержала патент США у 2006 р. на збірний КОІ «свердло-зенківка» [8], що складається зі спірального свердла 1 та

закріпленої на ньому гвинтами 2 різальної насадки 3, яка має дві змінні різальні пластини 4. Між свердлом і різальною насадкою у спіральних стружкових канавках є вставка 5 для плавного спрямування стружки зі стружкової канавки спірального свердла у стружкову канавку різальної насадки. Така конструкція «свердла-зенківки» передбачає можливість налагодження довжини вильоту свердла на потрібну довжину оброблюваного отвору за рахунок пересування різальної насадки 3 уздовж осі спірального свердла 1.

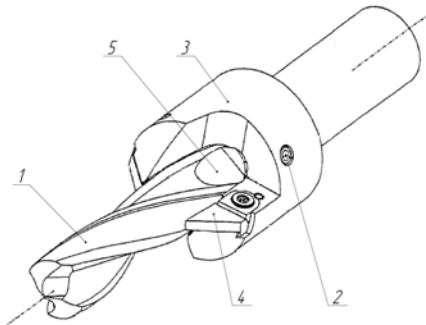


Рис. 8 – «Свердло-зенківка» фірми Kennametal

Фірма Kennametal також виготовляє «свердло-зенківку» KenTIP BF (рис. 9, а) [9]. Цей інструмент складається з основного корпусу 1, в середину якого гвинтами 4 кріпиться свердло KenTIP 2. На корпус гвинтами 5 закріплюються змінні твердосплавні пластини BF 3. Свердла KenTIP (рис. 9, б) мають твердосплавну змінну різальну частину, яка легко замінюється на нову при спрацюванні, що дозволяє скоротити час налагодження інструмента та збільшити термін його дії на 74 % порівняно з суцільним твердосплавним КОІ.

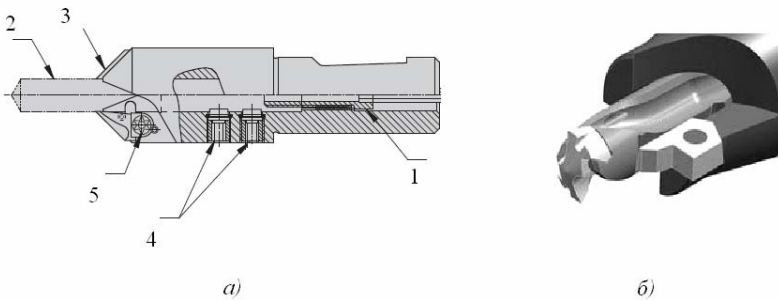


Рис. 9 - Збірний КОІ «свердло-зенківка» KenTIP BF фірми Kennametal

Компанія Seco Tools (Швеція) у 2006 р. одержала патент на свою конструкцію збірного «свердла-зенківки» (рис. 10) [10]. Цей інструмент складається зі свердла 1, зенківки 2, до якої пригвинчується цанга 3. Зенківка 2 має пази, в яких гвинтами 4 кріпляться змінні пластини 5. Ці пази і пластини мають рифлення, за допомогою яких фіксується положення пластин відносно осі свердла. Така конструкція дозволяє використовувати зенківку 2 зі свердлами різних діаметрів. Осьове положення зенківки 2 відносно свердла 3 фіксується гвинтом 6.

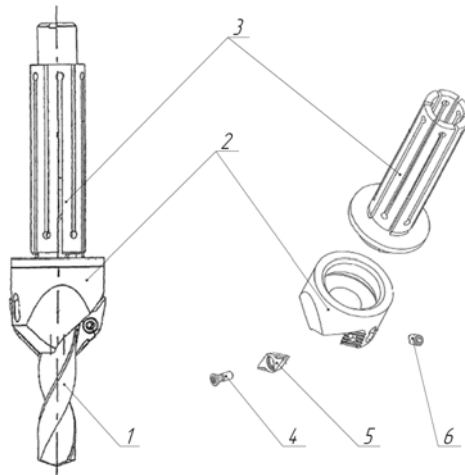


Рис. 10 – Свердло-зенківка фірми Seco Tools

Компанія Granlund Tools AB (Швеція) пропонує збірний КОІ (рис. 11) [11] наступної конструкції: В тримач 1 встановлюється цеківка 2, що має осьовий отвір, в якому розташовується спіральне свердло 3. Осьове положення цеківки та свердла фіксується гвинтами 4 і 5 відповідно. Всередині тримача 1, збоку хвостовика є гвинт 6, який призначений для налагодження свердла на потрібну довжину обробки.

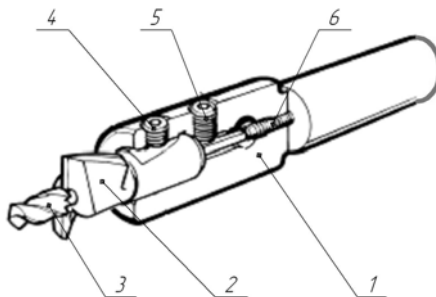


Рис. 11 – Свердло-цеківка фірми Granlund Tools AB

Використання КОІ для обробки отворів в машинобудуванні має наступні переваги:

- підвищення продуктивності процесу обробки отворів за рахунок концентрації технологічних переходів;
- підвищення точності обробки співвісних поверхонь та отворів;
- зменшення допоміжного часу на заміну та налагодження інструмента;
- скорочення числа технологічного устаткування (зменшення кількості верстатів на поточних та автоматичних лініях, свердлильних головок у агрегатних верстатах; потрібно менше позицій в інструментальних магазинах верстатів з ЧПК, а також зменшується кількість допоміжних інструментів), що призводить до зменшення кількості працюючих, виробничої площі, і, як наслідок, собівартості продукції.

Разом з тим їх використання у виробництві обмежується наступними факторами:

- складність виготовлення та переточування із-за великої кількості різальних кромки, і, як наслідок, більша вартість порівняно зі стандартними інструментами;

- велике число одночасно працюючих різальних кромки спричиняє концентрацію сил різання, зростання температури, що може привести до збільшення величини розбиття отвору та прискореного спрацювання інструмента;

- збільшення обсягу матеріалу, який зрізується, що ускладнює відведення стружки і може спричинити її пакетування;

- призначення величини подачі по лімітуючому ступеню меншого діаметра веде до неповного використання потенційних можливостей ступенів КОІ більших діаметрів.

Зменшити вплив цих недоліків можна на стадії розробки та проектування інструмента. Так, для забезпечення надійного відведення стружки із зони різання усіма ступенями розміри та кут нахилу стружкових канавок збільшують, а також використовують стружколоми та внутрішнє підведення ЗОР, що також зменшує температуру різання.

Для полегшення процесу експлуатації КОІ, потрібно використовувати збірні інструменти з різальними кромками у вигляді твердосплавних закріплених механічно пластин. Їх застосування виключає необхідність заточування різальних кромки, дозволяє підвищувати швидкість різання, стійкість, а також економити дороговартісний інструментальний матеріал та час на оновлення різальних кромки порівняно з суцільним КОІ або інструментом з напаяними пластинами.

Для збільшення ефективності застосування КОІ бажано призначити режими різання враховуючи величину середньозваженого діаметру інструмента, що об'єктивно характеризує його жорсткість. Це створює передумови для більш ефективного використання потенційних можливостей нелімітуючих ступенів КОІ.

Як показали наші дослідження, перспективним напрямком підвищення ефективності КОІ та зменшення їх впливу на зростання собівартості продукції є впровадження модульних конструкцій КОІ, що складаються з окремих модулів, які входять до комплексу уніфікованих елементів. Це дозволяє максимально використовувати ресурси кожного з елементів, що входять до складу даного КОІ.

Таким чином, запропоновані шляхи вдосконалення конструкцій КОІ, пов'язані з підвищенням рівня уніфікації їх елементів та обґрунтуванням методики інтенсифікації режимів різання при збереженні точності та якості обробки, формують науково-технічну базу для більш широкого впровадження КОІ у виробництво.

**Список літератури. 1.** United States Patent 4507028, Int. CL B23B 51/08, U.S. CL 408/230, 408/227, 408/229, Combined drill and reamer / Masahiro Matsushita; assignee Densaburo Sakai, Osaka, Japan – Appl №. 422439, Sep. 23, 1982; Date of Patent Mar. 26, 1985. **2.** United States Patent 721409, Int. CL B23B 51/08, B23B 51/10, U.S. CL 408/1 R, 408/218, 408/191, 408/192, 408/225, Drill countersink assembly / James L. Wienhold; – Appl №. 11/082379, Mar. 17, 2005; Date of Patent Dec. 12, 2006. **3.** United States Patent 7357606 B1, Int. CL B23G 5/20, B23B 51/08, U.S. CL 408/222, 408/1 R, 408/225, 470/199, Self-advancing step-tap tool / Donald R. Pettit, Ronald K. Penner, Larry D. Franklin, Charles J. Camarda; assignee United States of America as represented by the Administrator of the National Aeronautics and Space Administration – Appl №. 11/357461, Feb. 3, 2006; Date of Patent Apr. 15, 2008. **4.** Осевой инструмент для обработки отверстий. [Электронный ресурс]: Каталог продукции. – Россия: ОАО «Специнструмент» - 2010. Режим доступа до каталогу: <http://www.spinstrument.ru/catalog.htm>. **5.** United States Patent 4353670, Int. CL B23B 51/10, U.S. CL 408/193, 408/201, 408/713, Machining tool / Charles A. Jorgensen; assignee Everede Tool Company – Appl №. 155103, Jun. 2, 1980; Date of Patent Oct. 12, 1982. **6.** United States Patent 4561812, Int. CL B23B 51/08, U.S. CL 408/1 R, 408/22, 408/26, 408/224, 408/713, Extensible drill / Karl H. Linden; – Appl №. 511164, Oct. 11, 1982; Date of Patent Dec. 31, 1985. **7.** United States Patent 7226250 B2, Int. CL B23B 51/02, B23B 51/08, U.S. CL 408/1 R, 408/218, 408/191, 408/192, 408/225, Tool and method for forming a lug hole / Gepffrey L. Gattton, Dave Seiler, assignee Hayes Lemmerz International, Inc; – Appl №. 10/744118, Dec. 22, 2003; Date of Patent Jun. 5, 2007. **8.** United States Patent 7090447 B2, Int. CL B23B 51/08, B23B 51/10, U.S. CL 408/118, 408/191, 408/224, Twist drill for drilling with a countersink cutting arrangement, and a cutting tool with a countersink arrangement and a cutting-chamfering tool/ Horst Jager, Berthold Zeug, assignee Kennametal Inc.; – Appl №. 10/617519, Jul. 11, 2003; Date of Patent Aug. 12, 2006. **9.** High-performance combination tools [Електронний ресурс]: Каталог продукції. - Kennametal Inc. – 2010. Режим доступа до каталогу: [http://www.kennametal.com/en-S/products\\_services/metalworking/holemaking/HP\\_combination\\_tools/HP\\_combination\\_tools\\_products.jhtml](http://www.kennametal.com/en-S/products_services/metalworking/holemaking/HP_combination_tools/HP_combination_tools_products.jhtml). **10.** United States Patent 7131798 B2, Int. CL B23B 51/08, B23B 51/10, U.S. CL 408/191; 408/118; 408/181; 408/224, Countersink for chip removing machining tool / Ronny Karlsson, Alain Freyermuth, assignee Seco Tools AB; – Appl №. 10/878053, Jun. 23, 2004; Date of Patent Nov. 1, 2006. **11.** Grunland. Main Catalogue EN. Каталог фірми Grunland, Швеція – 2009, 40 с. **12.** Hole making. Cutting tools. E-Catalog. [Електронний ресурс]: Каталог продукції. – Israel: Iskar Member IMC Group, LTD – 2010. Режим доступа до каталогу: <http://www.iscar.com/ecat>. **13.** Кожевников Д.В. Режущий инструмент: учебн. для вузов / [Д. В. Кожевников, А. А. Гречишников, С. В. Кирсанов, В. И. Кокарев, А. Г. Схиртладзе]; под ред. С. В. Кирсанова. – [2-е изд.]. – М. : Машиностроение, 2005. – 528 с.

*Надійшла до редколегії 08.09.10*



**С. С. ДОБРОТВОРСКИЙ**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**Е. В. БАСОВА**, асп., НТУ «ХПИ»

## **МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ: ОБЗОР**

Основна проблема механообробки - досягнення необхідної якості виробу. На жаль, таку характеристику якості, як шорсткість поверхні, важко гарантувати. Метою даної статті є подання різних методологій і методик, які сьогодні використовуються закордонними дослідниками для пророкування шорсткості поверхні. У роботі представлений опис кожного з підходів, з деякими перевагами й недоліками.

The general manufacturing problem can be described as the achievement of a redefined product quality with given equipment, cost and time constraints. Unfortunately, for some quality characteristics of a product such as surface roughness it is hard to ensure that these requirements will be met. This paper aims at presenting the various methodologies and practices that are being employed by foreign researchers for the prediction of surface roughness. Each approach with its advantages and disadvantages is outlined and the present and future trends are discussed.

### **Введение**

В производственном процессе инженеры сталкиваются с двумя главными практическими задачами. Во-первых, необходимо определить значения параметров процесса, которые обеспечивают желаемое качество изделия, и, во-вторых, необходимо максимизировать системные производственные рабочие характеристики, используя доступные ресурсы. Решения, принятые инженерами-технологами, базируются не только на их опыте и компетентности, но и на характере наблюдаемых явлений, которые имеют место во время обработки.

Шероховатость поверхности – широко используемый индекс качества изделия. Достижение желаемого качества обработанной поверхности необходимо для функционального поведения изделия. С другой стороны, природа подчиненного процесса механизма образования шероховатости наряду с многочисленными неуправляемыми факторами, влияющими на соответствующие явления, делают почти невозможным прямое решение проблемы получения требуемой шероховатости. Наиболее распространенная стратегия требует выбор консервативных параметров процесса, которые и не гарантируют достижения желаемого качества поверхности, и достижение высоких производительностей съема металла [1].

Цель этой работы состоит в том, чтобы представить и обсудить различные методологии и стратегии, принятые зарубежными исследователями для прогнозирования шероховатости поверхности. Представление каждого подхода наряду с его преимуществами и недостатками должно помочь как исследователям, так и практикующим специалистам. Особое внимание в работе уделяется токарной и фрезерной обработке, поскольку они являются

наиболее распространенными процессами резания и большинство опубликованных работ посвящено им.

Шероховатость поверхности зависит от отклонения номинальной поверхности с третьего до шестого порядка. Порядок отклонения определен в международных стандартах [2]. Отклонения первого и второго порядка относятся к форме, т.е. плоскостность, округлость, и т.п., и соответственно к волнистости, и зависят от погрешности механообрабатывающего оборудования, деформации заготовки, ошибочной установки и зажиму, вибрации и неоднородности материала заготовки. Отклонения третьего и четвертого порядков относятся к периодическим: канавки, трещины и полуразрушенные состояния, которые связаны с формой и состоянием режущих кромок, стружкообразованием и кинематикой. Пятый и шестой порядки отклонений соответствуют структуре материала заготовки, которая связана с физико-химическими свойствами, действующими на зерно и размер решетки (скольжение, диффузия, окисление, остаточные напряжения и т.д.). Отклонения различных порядков накладываются друг на друга и образуют профиль шероховатости поверхности (рис. 1).

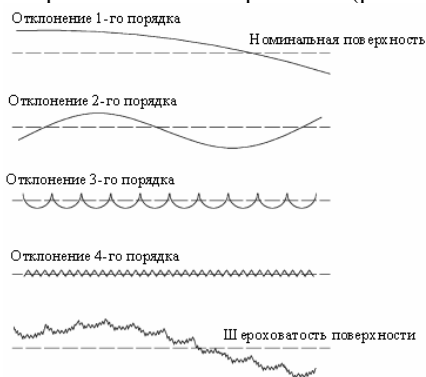


Рис. 1 – Форма отклонений поверхности

## 1. Классификация подходов

Классифицировать отдельные работы было нелегко из-за двух главных причин. Во-первых, многие из них строго не следуют за определенной методологией, они скорее выбирают некоторые из ее основных принципов и комбинируют их в «новый» подход. Во-вторых, есть много случаев, когда исследователи смешивают различные стратегии в единственный подход, и поэтому невозможно выработать единую классификацию.

Принимая во внимание вышеупомянутое, для классификации отдельных работ было создано четыре основные категории. К ним относятся: (I) подходы, основанные на теории обработки для разработки аналитических моделей и/или компьютерных алгоритмов представления обрабатываемой

поверхности; (II) подходы, изучения влияния различных факторов, через проведения экспериментов и анализ полученных результатов; (III) подходы, которые используют метод планирования экспериментов, и (IV) подходы искусственного интеллекта (ИИ).

## **2. Подход, основанный на теории обработки**

Эта категория включает подходы, которые делают акцент на определенных аспектах из теории обработки, таких как кинематика процесса, свойства режущего инструмента, механизм стружкообразования и т.д. Методы и инструменты системы автоматизированного проектирования (CAD) используются для достижения цели построения модели, которая будет в состоянии моделировать образование профиля обработанной поверхности, таким образом, визуализируя поверхностную топографию и оценивая шероховатость поверхности.

Вообще, геометрическое моделирование формирует базис подхода через строгие математические уравнения. Эту модель затем осуществляет компьютерный алгоритм, необходимый для управления сложными вычислениями. Кроме того, есть некоторые теоретические модели, которые связывают шероховатость поверхности с параметрами резания, такими как скорость подачи [3]. Такие модели на сегодняшний день являются не точными, их усовершенствованием, с введением дополнительных параметров, в настоящее время занимаются многие исследователи.

В любом случае эксперименты проводятся с целью сравнения теоретического результата с фактическим. Необходимо отметить, что явления, ведущие к образованию поверхностной шероховатости, имеют очень сложную природу взаимодействия, поэтому комплексное решение этого вопроса ещё не найдено.

Теоретические основания, использованные для научно-исследовательских работ в этой категории, являются необходимым условием для тех, кто занимается исследованием механообработки.

### **2.1. Исследования теории механообработки**

В 1996 г. Grzesik [4] использовал минимальную недеформированную толщину стружки для определения величины шероховатости при токарной обработке. Для математического моделирования трибологических эффектов в области контакта стружки и режущего инструмента были использованы молекулярно-механическая теория трения (теория Крагельского) и теория пластичности (Hencky-Пыушин). Подход был основан на предположении, что разница между теоретической и фактической величиной шероховатости поверхности связана с адгезией в области контакта стружки и режущего инструмента и что минимальная недеформированная толщина стружки зависит от перехода от грубого процесса резания к микрорезанию. Таким образом, была усовершенствована существующая на тот момент модель прогнозирования шероховатости поверхности и значительно снижена разница между теоретическими и фактическими результатами.

В работе [5] была создана поверхностная имитационная модель топографии для моделирования профиля поверхности образованного после токарной обработки с известными вибрационными характеристиками. Модель объединила воздействие геометрии инструмента, параметры процесса резания и влияние относительного движения между режущим инструментом и заготовкой на качество обработанной поверхности, которое анализировалось в трёх направлениях: радиальном, тангенциальном и осевом. Соотношение частоты колебаний, которое было определено как отношение вибрационных колебаний к частоте вращения шпинделя, дало возможность определить периодичку поверхностной волнистости вдоль осевого направления. Было также определено, что радиально направленные вибрации влияют на величину шероховатости поверхности гораздо больше, чем тангенциально направленные или осевые вибрации, чего и следовало ожидать.

В исследовании Ваек и др. [6] представлена модель поверхностной шероховатости для торцевого фрезерования, учитывающая габариты и ошибку биения каждой вставки в корпусе режущего инструмента. Было установлено, что из-за производственных погрешностей при создании режущего инструмента имеют место погрешности биения как осевые (воздействующие на глубину резания) так и радиальные (воздействующие на шероховатость поверхности). Для формирования геометрической модели во внимание была принята и скорость подачи. После обоснования правильности модели с экспериментальными данными процесса резания норма удельного съема материала была максимизирована через оптимизацию скорости подачи с шероховатостью поверхности, посредством алгоритма оптимизации деления пополам.

Методика компьютерного моделирования, разработанная в работе [7], представила спектр компонентов поверхностной топографии, классифицируя по форме, волнистости и шероховатости, в зависимости от способа подходящего для генерации макро- и микро-уровня команд конечного положения. Для осуществления такого подхода трёхмерный (3D) фильтр разрабатывался в четыре этапа. Во-первых, было использовано фильтрование профиля поверхности для удаления поверхностного профиля из контролируемых данных, которые могут привести к естественной форме поверхности. На следующем этапе, для определения шероховатости и волнистости, использовался анализ внешней топографии методом 3D лейтмотивного фильтра, что дало возможность рассчитать погрешность внешнего профиля как среднее отклонение теоретического и фактического профиля поверхности в пределах каждого элемента поверхностной волнистости. Затем для формирования шероховатости, волнистости и погрешности профиля поверхности, ранее удаленные профиль поверхности был снова добавлен. Наконец, модель шероховатости поверхности была получена с помощью B-spline кривой, подходящей для регенерирования значений шероховатости в пределах каждого её элемента. Аналогичным

образом и модели волнистости поверхности и модели погрешности формы поверхности могут быть получены регенерированием данных посредством B-spline кривой. Вся модель основана на созданных трехмерных элементах и необходимых правилах их комбинации.

Ehmann и Hong [8] ввели новый метод представления процесса формирования поверхности, который имеет название «система формирования поверхности». Эта система состояла из двух частей: первая моделировала кинематику металлообрабатывающего оборудования, вторая – геометрию режущего инструмента. Для инструмента определённый интерес заключался в области режущей кромки, описанной как пересечение грани инструмента и боковой поверхности с учётом соответствующих углов. В целом «система формирования поверхности» смогла выдать отчёт о биении шпинделя и вибрациях станка, в то время как дополнительное исследование для оценки сил резания было все еще в процессе разработки. В работе система была применена для моделирования 3D топографии отдельно фрезерованной поверхности.

Kim и Chu [9] заявили, что шероховатость поверхности может быть определена максимальной высотой гребешка. Благодаря процедуре наложения структур была сформирована трехмерная структура поверхности в соответствии с заданными условиями резания и типом режущего инструмента. Эффект биения (классифицированный как геометрическое биение, вызванное эксцентриситетом оси и неровностями режущей кромки и как динамическое биение вызванное вибрацией и отклонением инструмента) был включен, чтобы теоретическую поверхность максимально можно было приблизить к фактической. Обобщенное описание режущего инструмента было создано путём введения представления радиуса переходной кривой как переменной, что обеспечило описание концевых сферических фрез, закруглённых концевых фрез и торцевых концевых фрез. Данный метод помимо обеспечения текстуры механообработанной поверхности может использоваться для определения оптимальной траектории движения режущего инструмента.

В работе Lee и др. [10] рассматривается формирование шероховатости поверхности и профиля в процессе высокоскоростного концевой фрезерования. Представлен метод имитации обработанной поверхности, в котором вместо сил резания использован сигнал ускорения. Было установлено, что вибрация вызванная высокой скоростью шпинделя ухудшает геометрическую точность обработанной поверхности. Для моделирования смещения концевой фрезы и угла наклона была использована геометрическая модель концевой фрезерования. Был разработан компьютерный алгоритм согласно условиям параметров биения, геометрии режущего инструмента и заготовки, и параметров биения для определения углового положения фрезы. Координаты позиций концов желобков были получены с использованием геометрического моделирования процесса концевой фрезерования и пиковым частотным компонентам сигнала

ускорения. Таким образом, из полученных данных может и быть посчитана шероховатость поверхности, и интегрирован профиль.

## **2.2 Вывод**

Делая вывод, отметим, что эти теоретические исследования по большей мере моделируют процесс резания с точки зрения кинематики и свойств режущего инструмента. Более точные модели и впечатляющие результаты получились при попытке включения в математические модели дополнительных параметров, таких как вибрации. Недостатком такого подхода является то, что многие другие факторы (износ и отклонение режущего инструмента, тепловые явления), влияющие на механизм формирования шероховатости не рассматриваются. Интеграция этих факторов к уже существующим моделям необходима для того чтобы увеличить их точность, что особенно актуально при использовании усовершенствованных моделей в случаях конечных операций.

## **3. Подход, основанный на экспериментальных исследованиях**

Экспериментальный подход может считаться самым «тривиальным» методом, т. к. заключается в экспериментах, результаты которых используются для исследования влияния каждого фактора на наблюдаемые качественные характеристики. Для построения моделей, основанных на экспериментальных данных, часто используется регрессионный анализ. Интуиция исследователя и проницательность играют значительную роль в этот подходе, но для получение желаемого результата необходимо и глубокое понимание исследуемого явления. Экспериментальный подход в основном принят в тех случаях, когда невозможно аналитическим путём разработать причинно-следственные связи между различными факторами.

### **3.1. Экспериментальные исследования**

Отношения между износостойкостью инструмента, шероховатостью поверхности и вибрациями рассматривалось в работе [11]. Были учтены следующие переменные: скорость резания, скорость подачи, глубина резания, радиус передней части инструмента, вылет инструмента, угол врезания, длина и диаметр заготовки, и ускорение в радиальном направлении и направлении подачи. Сигналы ускорения подавались на анализатор (FFT), который выработывал ASCII файлы. Для создания модели регрессионного анализа были проанализированы экспериментальные данные.

Для контроля износа инструмента и корреляции между прогрессией износа инструмента и шероховатостью поверхности при тчении Ghani и Choudhury [12] разработали подобный подход, в котором в основу положили сигнал вибрации. Эксперименты проводились на закалённом чугуне инструментом с керамическим покрытием, нечто приводило к очень короткому периоду стойкости инструмента (около 1,5 мин.).

Jang и др. [13] сосредоточились на развитии онлайн метода измерения шероховатости, изучая влияние вибрации механообработки во время токарной обработки деталей высокой твердости. Было предположено, что средняя шероховатость поверхности – результат наложения теоретического

профиля (кинематика процесса) и колебательного профиля (динамика процесса). Для измерения относительного перемещения между режущим инструментом и заготовкой использовался индуктивный датчик перемещения. Результаты показали, что у шероховатости поверхности вдоль обрабатываемой детали имелись определенные частотные компоненты, которые были определены подачей в низком частотном диапазоне, и которые были тесно связаны с собственными частотами системы шпиндель-заготовка в высокочастотном диапазоне.

Для прогнозирования качества поверхности в работе [14] был использован акустический анализ излучения. Акустическая эмиссия (АЭ) определяется как класс явлений, посредством которых переходные эластичные волны производят быстрое освобождение энергии от локализованных источников в пределах материала. В случае точения, такие источники могут иметь место в первичных (за счет образования стружки), вторичных (из-за трения между режущим инструментом и стружкой) и третичных (из-за трения между режущим кромкой инструмента и заготовкой) зонах резания. Вместо того, чтобы использовать среднее квадратичное значение измеряемых сигналов АЭ в работе была введена новая величина  $A E_{RMS20}$  и установлено соотношение с шероховатостью поверхности.

Потенциал для использования криогенного охлаждения в процессе резания и особенно его результатах на износ инструмента, размерную точность и качество поверхности был исследован в работе [15]. С этой целью было выполнено сравнение между влиянием струи жидкого азота на режущий инструмент и сухой обработкой. Результаты показали, что криогенное охлаждение улучшило качество поверхности, уменьшая износ вспомогательной режущей кромки (вызванного трением), процесс стружкообразования и появления зазубрин.

В работе [16] была проведена серия экспериментов, направленных на определение скорости резания для составной режущей кромки образованной в процессе точения. Основываясь на экспериментальные данные, было создано две математические модели, которые коррелируют шероховатость поверхности с параметрами резания. Одна из которых включает влияние радиуса закругления режущего инструмента, подачи, скорости резания и глубины резания, а во второй модели в добавок рассматривается твердость обработанной поверхности.

Подробное исследование о влиянии геометрии режущей кромки и твердости обработанной заготовки на качество поверхности и силы резания при чистой токарной обработке деталей высокой твердости приведено в работе [17]. Экспериментальное изучение включало:

- точную характеристику геометрии режущей кромки, для измерения особенностей режущей кромки;
- эксперименты на жестком оборудовании с хорошей шпиндельной точностью, для минимизации вибраций;

- дисперсионный анализ, для установления статистического значения параметров.

Результаты показали значительное влияние деформированного радиуса режущей кромки и твердости заготовки на шероховатость поверхности и силы резания.

В работе [18] авторы сосредоточились на анализе качества сложной поверхности после 3- и 5-осевого фрезерования, основываясь на таких параметрах, как величина перебега «stepover» и направление подачи. При сравнении результатов 5-осевого фрезерования концевой сферической фрезой и торцевой фрезой определили, что малое значение шероховатости может быть получено в процессе фрезерования торцевой фрезой наклоненной в направлении подачи.

В работе [19] использован другой подход, в пределах которого в процессе мониторинга и контроля шероховатости поверхности была разработана ультразвуковая система. Сверхзвуковой чувствительный элемент, подсоединенный к ПК, воспроизводит импульс, а затем измерял амплитуду возвращенного сигнала, который отражался поверхностью заготовки. Система, посредством данных полученных с иглы профилометра, способна была воспроизвести фактические значения шероховатости. Главное преимущество состояло в том, что в сравнении с другими недоработанными схемами процесса на результат не влияла смазочно-охлаждающие жидкости и стружкообразование. Кроме того была продемонстрирована схема управления, которая направлена на поддержание постоянной шероховатости поверхности в процессе износа инструмента.

В работе [20] представлен аргумент утверждающий, что длина сечения, число зубьев, силы резания и зацепление зуба режущего инструмента с заготовкой воздействуют на относительную позицию режущего инструмента и заготовки, а, следовательно, на срок службы инструмента, износ инструмента и шероховатость поверхности воздействуют те же факторы.

В работе [21] исследовалось отношение между колебаниями и формированием поверхности при плоском фрезеровании. Поскольку периодическая структура микроуглублений, полученная последовательным зацеплением зуба, является основным параметром шероховатости поверхности, было высказано предположение, что в динамическом процессе, различные профили поверхности будут зависеть от амплитуды, частоты и фазы относительного движения между заготовкой и режущим инструментом. Был проведен анализ влияния каждого из зубов режущего инструмента на конечный профиль поверхности посредством экспериментов с известными вибрационными характеристиками.

### **3.2 Выводы**

Подход, основанный на экспериментальных исследованиях – самый обычный подход. Стратегия эксперимент-наблюдения-вывод – краеугольный камень каждой научно-исследовательской деятельности. Преимущество такого подхода заключается в том, что его не трудно реализовать, и что, в



зависимости от уровня понимания явлений и процессов, он может выдать очень хорошие результаты. С другой стороны, полученные выводы имеют малое либо вообще не имеют применения. Необходимо подчеркнуть, что эксперименты могут и не выдать ожидаемые результаты, т. к. существует большое количество факторов, требующих рассмотрения – не только относящиеся к исследуемым явлениям, но и к применяемому оборудованию.

#### **4. Подход метода планирования экспериментов**

Причиной классификации экспериментов в другую категорию послужило то, что они представляют собой систематический метод, касающийся планирования экспериментов, сбор и анализ данных с почти оптимальным использованием имеющихся ресурсов.

Методология поверхностной чувствительности и метод планирования эксперимента Taguchi являются наиболее распространенными методологиями для решения проблемы прогнозирования шероховатости, именно поэтому мы описали их ниже.

##### **4.1 Методология поверхностной чувствительности**

В методологии поверхностной чувствительности (МПЧ) факторы, которые рассматривают как самые важные, используются для построения полиномиальной модели, в которой независимая переменная - результат эксперимента. Для определения глобального минимума чувствительности планируются и проводятся эксперименты, которые уменьшают чувствительность поверхности. Градиент чувствительности поверхности использован с алгоритмом сверхбыстрого перемещения, как указано в работе [22].

###### **4.1.1 Этап 1**

- Выбор факторов, которые необходимо исследовать.
- Проектирование и управление двухуровневым экспериментом в локализованной области реакции поверхности.
- Вычисление расчётных данных результатов и, следовательно, вычисление коэффициентов линейной модели:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n . \quad (1)$$

- Выбор эталонного показателя, который будет использован в качестве ориентира при планировании получения необходимого результата в кратчайшие сроки.
- Выбор ряда экспериментальных условий и управление испытаниями, для определения увеличения реакции. Если реакция перестала увеличиваться – необходимо генерировать новый подход.
- Если необходим новый подход – необходимо повторное моделирование и управление двухуровневым экспериментом. Все шаги повторяются до тех пор, пока не будет получен существенно улучшенный результат.

###### **4.1.2 Этап 2**

- Проектирование и управление трёхуровневым экспериментом, если путь «наименьшего сопротивления» в результате не дает существенного усовершенствования.

- Вычисление коэффициентов модели:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + \dots + b_{12} X_1 X_2 + \dots + b_{n-1,n} X_{n-1} X_n. \quad (2)$$

- Использование данной модели позволяет определить характер стационарных точек чувствительной поверхности. Только в стационарных точках градиент равен нулю.

Последовательность характера рассмотренной методологии в процессе исследования позволяет узнать больше о процессе или исследуемой системе. В результате применения этой методологии исследователь гарантировано научится:

- определять необходимое количество репликации;
- определять расположение оптимальной области;
- определять, какой тип аппроксимирующей функции требуется;
- сделать правильный выбор экспериментальных проектов;
- определять требуется ли преобразование чувствительности или любой из переменных процесса.

#### **4.2 Метод планирования эксперимента Taguchi**

Метод планирования эксперимента Taguchi основан на ряде шагов, которые нацелены на улучшение понимания результата или рабочих характеристик процесса [24].

*Фаза планирования:*

1. Постановка проблемы.
2. Постановка цели эксперимента.
3. Выбор качественных характеристик и систем измерения.
4. Выбор факторов, которые могут влиять на качественные характеристики.
5. Выбор уровней факторов.
6. Выбор соответствующих матриц Taguchi или ортогональных массивов.
7. Выбор взаимодействий, которые могут влиять на качественные характеристики.
8. Представление факторов в ортогональные массивы и поиск взаимодействий.

*Фаза выполнения:*

9. Проведение предварительного эксперимента посредством ортогонального массива.

*Аналитическая фаза:*

10. Анализ экспериментальных результатов, например с использованием дисперсионного анализа.
11. Проведение подтверждающего эксперимента.

Существует три типа ортогональных массивов (ОМ): двухуровневое распределение показателей, трёхуровневое и смешанное. Выбор соответствующего ОМ основан на следующих критериях: количество показателей и интерактивность пользы, количество уровней качественных показателей, желаемое экспериментальное решение или ограниченная стоимость. Первые два определяют наименьшие ОМ, которые возможно использовать, а третий дает возможность проводить больше экспериментов с более высоким разрешением.

Для распределения критериев в столбцы ОМ необходимо учитывать математические свойства приведенные работе [24].

#### **4.3 Исследования спланированных экспериментов**

Целью Davim [25] было установление корреляции между скоростью резания, подачей, глубиной резания и шероховатостью поверхности при токарной обработке. Для этого был смоделирован и осуществлён план экспериментов, основанный на методе Taguchi. Результаты показали, что скорость резания имела огромное влияние, меньшее влияние имела подача. Достигнутая погрешность оказалась гораздо меньшей, чем у геометрико-теоретической модели.

В работе [26] была предпринята попытка прогнозирования шероховатости поверхности при точении высокопрочной стали с помощью МПЧ. В соответствии с разработанной моделью результат не очень хороший: влияние подачи на шероховатость поверхности гораздо больше, чем влияние скорости резания.

Feng и Wang [27] для построения математической модели чистового точения ввели шесть параметров: твердость заготовки, подачу, вершину инструмента, глубину резания, скорость вращения шпинделя и время обработки. Проверив гипотезу была установлена адекватность модели. Подача и время обработки были определены как наиболее важные факторы.

Методология поверхностной чувствительности была использована в работе [28] для оценки влияния прошлых технологических процессов на шероховатость обработанных поверхностей. Результаты показали, какие параметры механообработки должны использоваться для различных комбинаций режущий инструмент–материал заготовки для достижения требуемой шероховатости поверхности. Позже теми же учёными в работе [29] было проведено исследование влияния свойств обрабатываемого материала, параметров резания и TiN покрытия на шероховатость поверхности полученной в процессе сухого точения с применением метода Taguchi.

Глубокое исследование влияния колебаний режущего инструмента на образование шероховатость поверхности в процессе сухого точения приведено в работе [30]. Во внимание было принято шесть параметров, в том числе заготовка и длина режущего инструмента. Дисперсионный анализ и анализ взаимодействия экспериментальных данных показал, что подача и радиус закругления режущего инструмента – самые влиятельные параметры

и, что лучшая шероховатость была получена при высокоскоростной обработке с малыми подачами и большим радиусом закругления режущего инструмента. Кроме того, была измерена амплитуда естественной частоты вибраций инструмента, в результате было определено, что изменение стружки ведет себя как динамическая сила, возбуждающая вибрации инструмента.

Ещё реализация методологии поверхностной чувствительности встречается в работах [31, 32]. В этих работах были сформированы модели шероховатости поверхности для концевоего фрезерования стали 190 ВНН и Inconel 718. Наряду с диаграммами профиля были построены модели первого и второго порядка, позволяющие быстрее выбирать необходимые комбинации скорости резания и подачи, что дало возможность увеличить скорость удаления металла с рабочей зоны без ущерба качества поверхности.

Целью работы [33] было изучение влияния режимов резания и геометрии режущего инструмента на качество обрабатываемой поверхности и построение математической модели предсказания остаточной шероховатости. Так же проводилось исследование влияния вышеперечисленных факторов на остаточные напряжения. Инновация работы заключается в том, что для разработки модели был использован симбиоз методов МПЧ и Taguchi.

Методология поверхностной чувствительности нашла своё успешное применение в моделировании шероховатости поверхности труднообрабатываемых материалов, таких как EN 32 (упрочненная углеродистая корпусная сталь) [34]. Построенные модели акцентировались на скорости резания, подаче и осевой глубине резания в условиях сухой механообработки. Модель первого порядка объединяла диапазон скоростей 30-35 м/мин, а модель второго порядка – 24-38 м/мин.

#### **4.4 Выводы**

Общей целью исследованных методов является организация экспериментальной процедуры и необходимой обработки данных, однако, пути достижения этой цели у каждого из них свои. МПЧ – процедура разработки модели, направленная на исследование влияния факторов на результат эксперимента и ведёт к формированию полиномиальных моделей первого и второго порядка, которые включают рассматриваемые параметры и их статические значения. Эти модели используются для создания профильных диаграмм, которые имеют большую практическую ценность, чем используемые полиномиальные функции. С другой стороны метод Taguchi – процедура разложения-скрининга для определения значения каждого фактора, т. е. этот метод определяет наиболее важные параметры и значения, которые выдают необходимый результат, без разработки какого-либо рода модели. Тем не менее, следует отметить, что из-за их всеобщности и сильного статистического фона, определенные задания этих методологий могут быть выделены и применены к широкому спектру технических задач, где необходимо сузить размер области поиска.

## 5. Подход основан на применении искусственного интеллекта

Искусственный интеллект в инженерных задачах осуществляется посредством разработки моделей искусственных нейронных сетей (ИНС), генетических алгоритмов (ГА), нечётких логических схем и экспертных систем. Применение ИНС и ГА дают возможность быстро и качественно обрабатывать информацию и принимать решения, именно поэтому применение этих систем при решении задачи прогнозирования шероховатости поверхности сегодня вызывают широкий интерес.

### 5.1 Обзор искусственных нейронных сетей

ИНС – система обработки информации, которая проявляет функции биоаналога. По существу, это математическая модель, которая имитирует человеческое мышление и нейробиологию, и основана на следующих предположениях [35]:

- Обработка информации осуществляется рядом простых элементов называемых нейронами.
- Сигналы между нейронами передаются через соединительные связи.
- Каждая соединительная связь имеет взаимодействующее влияние, которое умножает передаваемый сигнал.
- Каждый нейрон использует активацию функции входящего сигнала для определения его выходного значения (рис. 2).

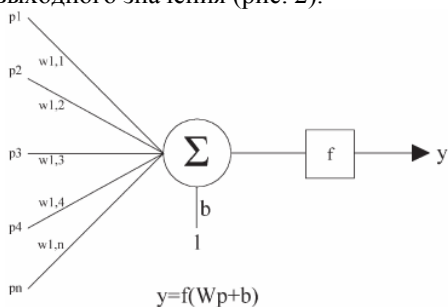


Рис. 2 – Нейронная модель

ИНС в основном используются для распознавания образов, распознавания и классификации связей, условной оптимизации и моделирования систем с приложениями, начиная от простой обработки сигналов до медицинской диагностики.

Существует две основные характеристики ИНС:

1. Распознавание архитектуры сети, которая определяет тип задач, которые могут быть решены.
2. Метод определения влияния соединений, либо с использованием учебного алгоритма (контролируемое обучение), либо выводением классификаций (неконтролируемое обучение).

Наиболее распространенные типы ИНС, использованные в проанализированной литературе – прогнозирование с управлением ИНС связанной с некоторой вариацией алгоритма обратной связи.

Типичная архитектура таких ИНС представлена на рис. 3. Нейроны расположены слоями: входной слой, скрытый слой и выходной слой (слева направо). Входной слой используется для представления данных в ИНС, а выходной – для получения реакции ИНС.

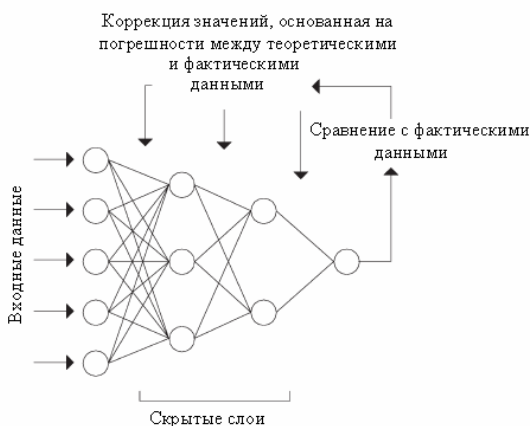


Рис. 3 – Структура искусственной нейронной сети

## 5.2 Обзор нечётких нейронных систем

Нечёткая логика основана на концепции нечётких множеств, которые не имеют четко определённые границы и могут содержать элементы с частичной степенью членства (между 0 и 1). Более строгое определение гласит, что нечётким множеством  $M$  от  $X$  является функция из множества  $X$  в единичном интервале, т. е.  $m: X \rightarrow [0,1]$ . Характеристикой нечеткого множества выступает функция принадлежности (Membership Function).

Для нечетких множеств, как и для обычных, определены основные логические операции. Самыми основными, необходимыми для расчетов, являются пересечение и объединение.

Нечеткая переменная описывается набором  $(N, X, A)$ , где  $N$  – это название переменной,  $X$  – универсальное множество (область рассуждений),  $A$  – нечеткое множество на  $X$ .

Основой для проведения операции нечеткого логического вывода является база правил, содержащая нечеткие высказывания в форме "Если-то" и функции принадлежности для соответствующих лингвистических термов.

Результатом нечеткого вывода является четкое значение переменной  $y^*$  на основе заданных четких значений  $x_k$ ,  $k=1..n$ .

Нечеткие нейронные сети (fuzzy-neural networks) осуществляют выводы на основе аппарата нечеткой логики, однако параметры функций принадлежности настраиваются с использованием алгоритмов обучения НС. Поэтому для подбора параметров таких сетей применим метод обратного распространения ошибки, изначально предложенный для обучения многослойного персептрона. Для этого модуль нечеткого управления представляется в форме многослойной сети. Наибольшее распространение в настоящее время получили архитектуры нечеткой НС вида ANFIS и TSK. Доказано, что такие сети являются универсальными аппроксиматорами. Быстрые алгоритмы обучения и интерпретируемость накопленных знаний – эти факторы сделали сегодня нечеткие нейронные сети одним из самых перспективных и эффективных инструментов мягких вычислений.

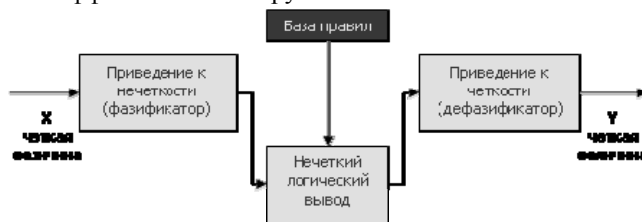


Рис. 4 – Система нечеткого логического вывода.

Глубокое описание нечетных нейронных сетей приведено в работах [36, 37, 38].

### 5.3 Обзор генетических алгоритмов

Генетические Алгоритмы - адаптивные методы поиска, которые в последнее время часто используются для решения задач функциональной оптимизации, основанные на дарвиновской теории эволюции. Отличительной особенностью генетического алгоритма является акцент на использование оператора «скрещивания», который производит операцию рекомбинации решений-кандидатов.

ГА состоит из следующих компонент:

- *Хромосома.* Решение рассматриваемой проблемы. Состоит из генов.
- *Начальная популяция* хромосом.
- *Набор операторов* для генерации новых решений из предыдущей популяции.
- *Целевая функция* для оценки приспособленности (fitness) решений.

Стандартные операторы для всех типов генетических алгоритмов это: селекция, скрещивание и мутация.

ГА является достаточно мощным средством и может с успехом применяться для широкого класса прикладных задач, включая те, которые трудно, а иногда и вовсе невозможно, решить другими методами. Однако, ГА, как и другие методы эволюционных вычислений, не гарантирует

обнаружения глобального решения за полиномиальное время. ГА-мы не гарантируют и того, что глобальное решение будет найдено, но они хороши для поиска "достаточно хорошего" решения задачи "достаточно быстро". Там, где задача может быть решена специальными методами, почти всегда такие методы будут эффективнее ГА и в быстродействии и в точность найденных решений. Главным же преимуществом ГА-мов является то, что они могут применяться даже на сложных задачах, там, где не существует никаких специальных методов. Даже там, где хорошо работают существующие методики, можно достигнуть улучшения сочетанием их с ГА. Принципы работы ГА описаны в работе [39].

#### **6.4 Исследование искусственного интеллекта**

Для оценки шероховатости поверхности и отклонения номинального размера во время токарной операции в работе [40] использован метод сенсорного слияния. Систематический метод выбора типа датчиков в среде системы измерения определялся средним влиянием каждого. Датчики, с наилучшими рабочими характеристиками объединялись с использованием ИНС моделирования. Результаты показали, что модели, созданные данным методом точнее, чем разработанные для сравнения модели регрессионного анализа.

Датчик слияния, включающий ИНС, также описывается в работе [41]. Емкостные, индуктивные и волоконно-оптические датчики были использованы так, чтобы охватить как можно более широкий диапазон применения определенных особенностей, которые не могут быть обнаружены одним типом датчика. Значение МПЧ из трех датчиков вместе с типом производственного процесса (точение, фрезерование, электроэрозионная обработка и шлифование), все из которых были закодированы в двоичном формате, были использованы для обучения  $17 \times 20 \times 15$  ИНС, а полученные результаты можно охарактеризовать как достаточно хорошие.

Работы Chien и Chou [42] можно разделить на две части. Первая часть посвящена построению трех интеллектуальных моделей с использованием многослойных функционально связанных сетей: 1 – для шероховатости поверхности; 2 – для сил резания; 3 – для срока службы инструмента. Вторая часть сосредоточена на поиске оптимальных режимов резания путем объединения шероховатости поверхности и сети срока службы инструмента с генетическим алгоритмом. Таким образом, были получены режимы резания, которые максимизируют скорость удаления металла из зоны резания с учетом ограничений шероховатости поверхности и срока службы режущего инструмента.

Suresh и др. [43] также приняли двухступенчатый подход к оптимизации шероховатости поверхности. Во-первых, экспериментальные результаты были использованы для создания двух математических моделей шероховатости поверхности по методу регрессии соответственно МПЧ. Во-вторых, в качестве целевой функции была взята математическая модель



второго порядка, оптимизированная посредством ГА для определения условия обработки поверхности с предопределённым качеством.

В работе [44] рассматривались полиномиальные сети для построения соотношений между параметрами процесса резания (скоростью резания, подачей, глубиной резания) и производительностью резания (сроком службы инструмента, шероховатостью поверхности и силы резания). При сравнении полиномиальных сетей и сетей прямого распространения было определено, что первые имеют высшую точность прогнозирования и меньше внутренних связей. Кроме того, лучшая сетевая структура была определена с помощью алгоритма синтеза полиномиальных сетей (ASPN). Принцип критерия ASPN – выбор сети требуемой точности, но минимальной сложности.

Li и др. [45] разработали гибридные модели обработки, которые объединяют аналитические модели и нейронные сетевые модели для прогнозирования всех характеристик процесса обработки. Аналитический компонент, основанный на интеллектуальной теории обработки, предложенный Oxley [46] служил предиктором силы резания, температуры в зоне резания и геометрии стружки. Он также служил в качестве модели нейронной сети предварительной обработки, для предсказания износа инструмента, шероховатости поверхности и скола стружки, т. е. тех параметров, которые не могли быть полностью рассмотрены аналитическим образом.

Другой подход, использовавший критерий определения архитектуры сети можно найти в работе [47], цель которой заключалась в разработке модели прогнозирования, предшествующей осуществлению самого процесса обработки, для установления определенных режимов резания (скорости резания, подачи и глубины резания) для получения желаемого значения шероховатости поверхности и значения силы резания. Кроме того, используя полученную силу резания, можно рассчитать мощность резания и оптимальную скорость удаления металла. Абдуктивные сети, которые были созданы с использованием критерия ожидаемой погрешности (PSE) являются более точными, чем соответствующие модели регрессионного анализа.

В работе [48] был представлен подход, осуществляющий оценку влияния характеристик станка на процессы резания с использованием адаптивного прогнозирования. Сети для прогнозирования шероховатости поверхности имели в качестве входа скорость резания, взаимосвязь режущего инструмента и заготовки, неоднородность стружки, структуру сборной режущей кромки (которая оценивается по средней температуре режущей кромки), ширину износа и теоретическую шероховатости с учетом износа инструмента.

ИНС моделирование, с использованием спланированных экспериментов, было применено Benardos и Vosniakos [49] для процесса плоского фрезерования. Была создана конечная модель пересчета скорости подачи на зуб, глубины резания, зацепления режущего инструмента, использования смазочно-охлаждающей жидкости и компонентов сил резания

в направлении подачи. Результаты этого исследования показали, что ИНС могут быть чрезвычайно точными, даже если они используются для решения сложных задач, таких как обработка алюминиевых сплавов. Кроме того, использование разработанных экспериментов дало в результате систематический скрининг ИНС топологий с целью оптимизации окончательной используемой топологии.

В исследовании Tsai и др. [50] в процессе обработки был применён акселерометр в качестве датчика. После сбора данных вибраций системы станок-заготовка в процессе концевого фрезерования на вертикальном обрабатывающем центре, ИНС прямого распространения прошел обучение и испытания не только для достижения цели распознавания шероховатости поверхности в процессе, но и для увеличения скорости обработки и улучшения качества продукции. Кроме того, была разработана статистическая модель многократной регрессии и сравнена с предложенной моделью ИНС. Входными параметрами являлись скорость вращения шпинделя, скорость подачи, глубина резания и средняя вибрация за один оборот. В результате определили, что модели ИНС показали себя лучше во всех ситуациях.

В работе [51] представлен новый подход измерения поверхностной шероховатости посредством системы внешнего распознавания, использовавшей нечеткие нейросети и датчики тестирования системы. Подготовка процедуры состояла из пяти этапов:

1. Разделение входного пространства в нечетких областях;
2. Генерирование нечетких правил из данных пар через эксперименты;
3. Аннулирование противоречивых правил;
4. Развитие базы комбинированных нечетких правил;
5. Определение отображения система, основанного на базе нечетких правил.

Затем были определены нечёткие правила и функции принадлежности, которые были скорректированы в соответствии с требованиями контрольных параметров фрезерной системы. Изначально метод предназначался для одного типа материала и режущего инструмента, но позже он был расширен исследователями Chen и Savage [52], посредством добавления нового набора параметров (в том числе диаметра инструмента и характеристик обрабатываемого материала).

В работе [53] для прогнозирования шероховатости поверхности при токарной обработке была использована адаптивная нечёткая нейросистема и компьютерный анализ. Система компьютерного анализа, охватывая цифровую камеру (присоединённую к ПК) и соответствующие источники света, обеспечила внешние изображения, которые анализировались для вычисления средней арифметической величины серых уровней. Результаты вычислений и параметры резания (в общей сложности 4 входа) были использованы для получения адаптивной нечёткой нейросистемы (ANFIS) и определения значений шероховатости.

## **5.5 Выводы**

Несмотря на то, что эти методики были разработаны несколько десятилетий назад, последние достижения в этой области (например, учебные алгоритмы ИНС) и быстрый рост доступных вычислительных способностей возобновили интерес исследователей. Очевидно, что подходы, описанные в данном разделе могут произвести очень хорошие результаты и одновременно дать возможность оперативного мониторинга и / или управления процессом.

Главное преимущество ИНС в сравнении с классическим программированием – возможность управления шумовыми или некомплексными данными, при этом нет необходимости явно формулировать проблему, алгоритм решения или писать код; процесс сбора информации, распределяется по нейронам, работающим параллельно, поэтому в результате увеличивается вычислительная мощность, в отличие от последовательной работы современных компьютеров. Наиболее очевидным недостатком ИНС является то, что нет никакой гарантии их производительности в результате применения.

У ГА существует два основных преимущества: простота эксплуатации и эффективное решение проблемы многокритериальной оптимизации. С момента появления готового к применению ГА отпала необходимость писать код для выбранного приложения с нуля. Единственным условием является кодирование данных для формирования хромосом и разработки соответствующей функции соответствия. Основной недостаток ГА – привязанность к вычислительной способности, на платформе типичного ПК результат может быть получен через несколько дней с момента запуска.

## **6. Выводы и обсуждения**

В текущей работе представлен обзор различных подходов, используемых зарубежными исследователями для прогнозирования шероховатости поверхности. Замечания, касающиеся каждого подхода, отмечены в соответствующих разделах. Как видно из рассмотренных работ, в последние годы наблюдалась повышенная научно-исследовательская активность в этой области; представлены хорошие результаты, но учитывая стремительный переход на повышенные скорости обработки, моделей, рассматривающих многоосевую высокоскоростную механообработку, в большом объеме найти не удалось. Необходимо отметить, что на сегодняшний день в рамках одной модели прогнозирования шероховатости невозможно описать последовательные стадии механообработки. Формирующаяся тенденция призывает к построению большего количества автоматизированных систем для он-лайн мониторинга, измерения и контроля, главным образом за счет автоматизации самих процессов. Все представленные методики могут обладать преимуществами и недостатками в сравнении друг с другом, но, учитывая эту тенденцию, наиболее перспективными считаются теоретические подходы и подходы ИИ.

Сравнение этих двух подходов показывает, что ИИ модели учитывают особенности используемого оборудования и реальных явлений механической

обработки. С другой стороны, теоретический подход основан на допущениях и идеализации, которые ответственны за ошибки и ограничения. Удивительно, что комбинированные усилия, которые включали бы как ИИ, так и аналитическое моделирование, для проверки уточнения или корректировки теоретических моделей в литературе не были найдены.

Оптимизация режимов резания для определения шероховатости поверхности является той областью, которая не получила достаточно большого внимания. ГА и другие алгоритмы оптимизации можно с высокой эффективностью использовать для прогнозирования шероховатости поверхности в сочетании с развитыми моделями, но как видно из выше написанного, на сегодняшний день очень мало подобных подходов было найдено.

Следует отметить, что, несмотря на разработанные точные модели, есть еще вопросы, которые требуют глубокого изучения. Задачи точности обработки, где шероховатость поверхности имеет большое значение, по-прежнему исследуются. Для описания фактической шероховатости поверхности в разрабатываемые модели необходимо ввести такие факторы, как отклонение режущего инструмента и тепловые условия. Интеграция существующих моделей в более общую консультативную систему, которая может быть использована, например оператором станка, может принести большую практическую пользу.

На рис. 5 схематически отображены широко исследуемые параметры, влияющие на шероховатость поверхности.



Рис. 5 – Параметры, влияющие на шероховатость поверхности

Из обзора работ зарубежных авторов следует, что описанию шероховатости материалов уделяется огромное внимание. Однако работы по описанию шероховатости сложных поверхностей при современных условиях высокоскоростной многокоординатной обработки носят эпизодический или рекламный характер. Это можно, с одной стороны, объяснить сложностью в математическом описании процесса и вычислительными трудностями, а с другой стороны, большим коммерческим интересом производителей современного многокоординатного оборудования и разработчиков программного обеспечения к проводимым научным исследованиям, и как следствие, конфиденциальности полученной информации.

Становится очевидным, что конечное качество поверхности изделий, требования к которому непрерывно растут, требует прогнозирования качества поверхности не только на этапе финишной операции, но и на предварительных этапах обработки, что невозможно выполнить в рамках одной модели или математического описания.

Например, известно, что высокоскоростное фрезерование позволяет производить механическую обработку сталей, как в исходном, так и в закаленном состоянии. Качество поверхности, получаемой в последнем случае сравнимо со шлифованной. Таким образом, проанализировав существующие методы зарубежных исследований с исследованиями авторов этой статьи, мы пришли к выводу, что при прогнозировании шероховатости при высокоскоростном фрезеровании сложных поверхностей на предварительных этапах обработки эффективно использование геометрических моделей [54]. По мере улучшения качества перспективно перейти к использованию вейвлет функций, а на предельных финишных операциях – рассматривать поверхность как стохастический процесс и моделировать шероховатость поверхности с использованием интегрального квадратичного функционала. Такой подход к моделированию шероховатости поверхностей сегодня развивают на кафедре «Технологи машиностроения и металлорежущих станков» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» [55, 56].

**Список литературы:** 1. *Benardos P.G.* Predicting surface roughness in machining: a review./ *P.G. Benardos, G.C. Vosniakos*// International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2003. – №3. – pp. 833-844. 2. *DIN4760*, Form Deviations; Concepts; Classification System, Deutches Institut Fuer Normung, e.V., 1982. 3. *Boothroyd G.* Fundamentals of Machining and Machine Tools/ *G. Boothroyd, W.A. Knight*. – New York: Marcel Dekker, 1988. – 542 p. 4. *Grzesik W.* A revised model for predicting surface roughness in turning./ *W. Grzesik*// Wear. – 1996. – №194. – pp. 143-148. 5. *Lin S.C.* A study on the effects of vibrations on the surface finish using a surface topography simulation model for turning./ *S.C. Lin, M.F. Chang*// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1998. – №38. – pp. 763-782. 6. *Baek D.K.* Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model./ *D.K. Baek, T.J. Ko, H.S. Kim*// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2001. – №41. – pp. 451-462. 7. *Chen C.-C.A.* A surface topography model for automated surface finishing./ *C.-C.A. Chen, W.-C. Liu, N.A. Duffiel*// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1998. – №38. – pp. 543-550. 8. *Ehmann K.F.* A generalized model of the surface generation process in metal cutting./ *K.F. Ehmann, M.S. Hong*// CIRP Annals. – 1994. – №43. – pp. 483-486. 9. *Kim B.H.* Texture prediction of milled surfaces using texture superposition method./

B.H. Kim, C.N. Chu// Computer Aided Design. – 1999. – №31. – pp. 485-494. **10.** Lee K.Y. Simulation of the surface roughness and profile in high speed end milling./ K.Y. Lee, M.C. Kang, Y.H. Jeong and athter.// Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – №113. – pp. 410-415. **11.** Abouelatta O.B. Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations./ O.B. Abouelatta, J. Madl// Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – №118. – pp. 269-277. **12.** Ghani A.K. Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool./ A.K. Ghani, I.A. Choudhury// Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – №127. – pp. 17-22. **13.** Jang D.Y. Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning./ D.Y. Jang, Y.G. Choi, H.G. Kim, A. Hsiao// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1996. – №36. – pp 453-464.

**14.** Beggan C. Using acoustic emission to predict surface quality./ C. Beggan, M. Woulfe, P. Young, G. Byrne// International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 1999. – №15. – pp. 737-742. **15.** Dhar N.R. The influence of cryogenic cooling on tool wear, dimensional accuracy and surface finish in turning AISI 1040 and E4340C steels./ N.R. Dhar, S. Paul, A.B. Chattopadhyay// Wear. – 2001. – №249. – pp. 932-942. **16.** Munoz-Escalona P. Influence of the critical cutting speed on the surface finish of turned steel./ P. Munoz-Escalona, Z. Cassier// Wear. – 1998. – №218. – pp. 103-109. **17.** Thiele J.D. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel./ J.D. Thiele, S.N. Melkote// Journal of Materials Processing Technology. – 1999. – №94. – pp. 216-226. **18.** Baptista R. Three and five axis milling of sculptured surfaces./ R. Baptista, J.F. Antune Simoes// Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – №103. – pp. 398-403. **19.** Coker S.A. In-process control of surface roughness due to tool wear using a new ultrasonic system./ S.A. Coker, Y.C. Shin// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1996. – №36. – pp. 411-422. **20.** Diniz A.E. Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process./ A.E. Diniz, J.C. Filho// Wear. – 1999. – №232. – pp. 67-75. **21.** Heisel U. Vibrations and surface generation in slab milling./ U. Heisel// CIRP Annals. – 1994. – №43. – pp. 337-340. **22.** Garcia-Diaz A. Principles of Experimental Design and Analysis. / A. Garcia-Diaz, D.T. Phillips. – London: Chapman and Hall, 1995. – 409 pp. **23.** Myers R.H. Response Surface Methodology, Process and Product Optimization Using Designed Experiments./ H. Myers, D.C. Montgomery. – New York: Wiley, 1995. –710 pp. **24.** Ross P.J. Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design./ P.J. Ross. – New York: McGraw-Hill, 1996. – 329 pp. **25.** Davim J.P. A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments./ J.P. Davim// Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – №116. – pp. 305-308. **26.** Choudhury I.A. Surface roughness in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments./ I.A. Choudhury, M.A. El-Baradie// Journal of Materials Processing Technology. – 1997. – №67. – pp. 55-61. **27.** Feng C.X.J. Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning./ C.X.J. Feng, X. Wang// International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2002. – №20. – pp. 348-356. **28.** Kopac J. Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product./ J. Kopac, M. Bahor// Journal of Materials Processing Technology. – 1999. – №92-93. – pp. 381-387. **29.** Kopac J. Optimal machining parameters for achieving the desired surface roughness in fine turning of cold preformed steel workpieces./ J. Kopac, M. Bahor, M. Sokovic// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2002. – №42. – pp. 707-716. **30.** Thomas M. Effect of tool vibrations on surface roughness during lathe dry turning process./ M. Thomas, Y. Beauchamp, A.Y. Youssef, J. Masounave// Computers in Industrial Engineering. – 1996. – №31. – pp. 637-644. **31.** Alauddin M. Computer-aided analysis of a surface roughness model for end milling./ M. Alauddin, M.A. El-Baradie, M.S.J. Hashmi// Journal of Materials Processing Technology. – 1995. – №55. – pp. 123-127. **32.** Alauddin M. Optimization of surface finish in end milling inconel 718./ M. Alauddin, M.A. El-Baradie, M.S.J. Hashmi// Journal of Materials Processing Technology. – 1996. – №56. – pp. 54-65. **33.** Fuh K.H. A proposed statistical model for surface quality prediction in end milling of Al alloy./ K.H. Fuh, C.F. Wu// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1995. – №35. – pp. 1187-1200. **34.** Mansour A. Surface roughness model for end milling: a semi-free cutting carbon casehardening steel (EN32) in dry condition./ A. Mansour, H. Abdalla// Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – №124. – pp. 183-191. **35.** Faussett L. Fundamentals of Neural Networks, Prentice-Hall

International Editions./ *L. Fausest*. – NJ.: Englewood Cliffs, 1994. – 461 pp. **36.** *Nauck D.* Foundations of Neuro-Fuzzy Systems./ *D. Nauck, F. Klawonn, R. Kruse*. –New York: Wiley, 1997. – 305 pp. **37.** *Рутковская Д.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы./ *Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский*. – М.: Горячая Линия - Телеком, 2007. – 452 с. **38.** *Кружлов В.В.* Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода./ *В.В. Кружлов, М.И. Дли*. – М.: Физматлит, 2002. – 256 с. **39.** *Mitchell M.* An Introduction to Genetic Algorithms, MIT Press./ *M. Mitchell*. – MA.: Cambridge, 1999. – 209 pp. **40.** *Azouzi R.* On-line prediction of surface finish and dimensional deviation in turning using neural network based sensor fusion./ *R. Azouzi, M. Guillot*// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1997. – №37. – pp. 1201-1217. **41.** *Varghese S.* A multi sensor approach to inprocess monitoring of surface roughness./ *S. Varghese, V. Radhakrishnan*// Journal of Materials Processing Technology. – 1994. – №44. – pp. 353-362. **42.** *Chien W.T.* The predictive model for machinability of 304 stainless steel./ *W.T. Chien, C.Y. Chou*// Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – №118. – pp. 442-447. **43.** *Suresh P.V.S.* A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model./ *P.V.S. Suresh, P. Venkateswara Rao, S.G. Deshmukh*// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2002. – №42. – pp. 675-680. **44.** *Lee B.Y.* An investigation of modeling of the machining database in turning operations./ *B.Y. Lee, Y.S. Tarn, H.R. Lii*// Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – №105. – pp. 1-6. **45.** *Li X.P.* A hybrid machining simulator based on predictive theory and neural network modeling./ *X.P. Li, K. Inkaran, A.Y.C. Nee*// Journal of Materials Processing Technology. – 1999. – №89-90. – pp. 224-230. **46.** *Oxley P.L.B.* Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability, Ellis Horwood./ *P.L.B. Oxley*. – UK.: Chichester, 1989. – 242 pp. **47.** *Lin W.S.* Modeling the surface roughness and cutting force for turning./ *W.S. Lin, B.Y. Lee, C.L. Wu*// Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – №108. – pp. 286-293. **48.** *Matsumura T.* An evaluation approach of machine tool characteristics with adaptive prediction./ *T. Matsumura, H. Sekiguchi, E. Usui*// Journal of Materials Processing Technology. – 1996. – №62. – pp. 440-447. **49.** *Benardos P.G.* Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments./ *P.G. Benardos, G.C. Vosniakos*// Robotics and Computer Integrated Manufacturing. – 2002. – №18. – pp. 343-354. **50.** *Tsai Y.H.* An in-process surface recognition system based on neural networks in end milling cutting operations./ *Y.H. Tsai, J.C. Chen, S.J. Lou*// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1999. – №39. – pp. 583-605. **51.** *Lou S.J.* In-process surface recognition of a CNC milling machine using the fuzzy nets method./ *S.J. Lou, J.C. Chen*// Computers in Industrial Engineering. – 1997. – №33. – pp. 401-404. **52.** *Chen J.C.* Fuzzy-net-based multilevel in-process surface roughness recognition system in milling operations./ *J.C. Chen, M. Savage*// International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2001. – №17. – pp. 670-676. **53.** *Ho S.-Y.* Accurate modeling and prediction of surface roughness by computer vision in turning operations using an adaptive neuro-fuzzy inference system./ *S.-Y. Ho, K.-C. Lee, S.-S. Chen, S.-J. Ho*// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2002. – №42. – pp. 1441-1446. **54.** *Добротворский С.С.* High speed machining – современный метод механической обработки./ *С.С. Добротворский, Е.В. Иващенко*// Технологии в машиностроении; под ред. Ю.В. Тимофеева. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2010 – №24. – с. 3-8. **55.** *Добротворский С.С.* Шероховатость поверхности и контроль ее качества./ *С.С. Добротворский, А.С. Мазманивили Л. Г. Добровольская* // Технологии в машиностроении; под ред. Ю.В. Тимофеева. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2006 – №18. **56.** *Добротворский С.С.* Теоретический анализ и контроль шероховатости шлифованных поверхностей. / *С.С. Добротворский, А.С. Мазманивили Л. Г. Добровольская* // Технологии в машиностроении; под ред. Ю.В. Тимофеева. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2007. – №1. – с. 32-39.

*Поступило в редколлегию 1.09.10*

**Ю.А.СИЗЫЙ**, докт. техн. наук, НТУ «ХПИ», г. Харьков,  
**Д.В.СТАЛИНСКИЙ**, докт. техн. наук, ГНТЦ «Энергосталь», г. Харьков,  
**А.Н.УШАКОВ**, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ», г. Харьков.

## **ТЕПЛОФИЗИКА МАССОВОГО РЕЗАНИЯ АБРАЗИВНЫМИ ЗЕРНАМИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА**

У статті представлено аналітичне рішення задачі теплопровідності процесу різання одиничним абразивним зерном. На основі цього рішення розроблена й проаналізована кінцево-різницева модель нагрівання обробленої поверхні в процесі шліфування як результат різання одиничними абразивними зернами.

In this article the analytic solution of the heat conduction task of cutting process by single abrasive grain are considered. On the base of this solution the finite-difference model of heating machining surface in the process of grinding as a result of cutting by single abrasive grains are worked and analysed.

Первый, наиболее распространенный и хорошо разработанный Сипайловым В.А. [1], рассматривает источник тепла как сплошную поверхность контакта круга с обрабатываемой заготовкой. При этом плотность теплового потока в результате работы шлифования получают исходя из мощности шлифования, определяемой экспериментально. Другой подход [2,3,4] предполагает описание массового резания единичными абразивными зёрнами, т.е. источником тепла является работа резания единичными зёрнами.

Этот, второй подход, более сложный для его описания. Однако он привлекает к себе внимание возможностью более глубоко уяснить теплофизическую картину шлифования, а значит и более грамотно управлять процессом. Именно этот подход и является объектом исследований представленных в данной статье.

Описание теплофизики массового резания абразивными зёрнами основывается на решении тепловой задачи применительно к резанию единичным абразивным зерном, чему посвящается первая часть статьи.

### Теплофизика резания единичным абразивным зерном.

Решение задачи нагрева обрабатываемой поверхности от резания абразивным зерном обязательно предполагает схематизацию процесса резания, которая включает в себя выбор формы зерна, кинематики и механики процесса взаимодействия зерна с обрабатываемой поверхностью, определение источников тепла, определения величины сопротивления обрабатываемой поверхности пластическим деформированием и трению на контактной поверхности и др. У авторов [2,3,4,5] занимавшихся тепловыми процессами при резании единичным зерном перечисленные вопросы



решались по разному. Однако общее, что их объединяет – это игнорирование тепла уносимого стружкой.

Кроме этого также общим для них является то, что принимается теплопроводность абразивного зерна на порядок меньше обрабатываемой стали. Поэтому получается, что выделяемое тепло при резании зерном не уносится стружкой и не переходит в само зерно.

Если обратиться к плоской классической ортогональной схеме механики резания зерном, которая используется Корчаком С.Н. [4] и показанной на рис.1 то источниками тепла являются работа деформации на плоскости сдвига и трения на площадке износа. Работа трения стружки о переднюю поверхность зерна учитывается, согласно Корчака С.Н., величиной угла сдвига, в формулу расчета которого входит усадка стружки как результат трения ее о переднюю поверхность.

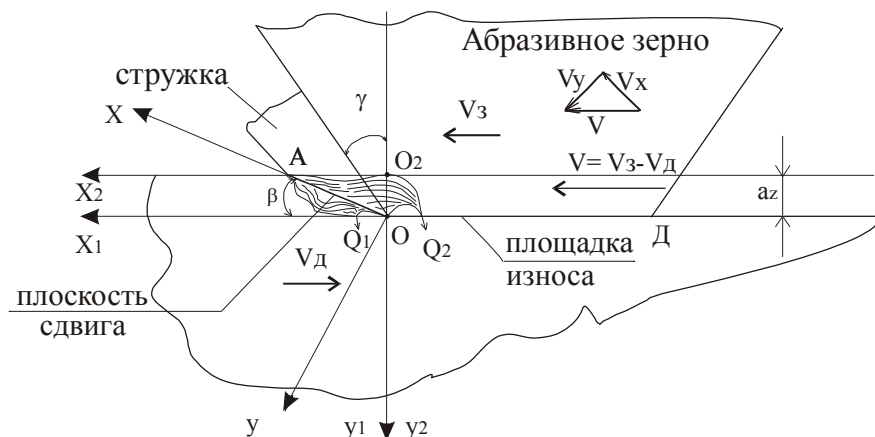


Рис. 1.

Поскольку, как предполагается, тепло работы резания все переходит в обрабатываемую поверхность, то следующим естественным шагом было "положить" плоскость сдвига на обрабатываемую поверхность. В результате получается плоский источник тепла, состоящий из двух участков: первый (фронтальный) представляет собой источник тепла от работы деформации, а второй – от работы трения на площадке износа.

Такая схематизация тепловой задачи резания зерном сразу упрощает ее окончательное решение, что и выполнено в работе Корчака С.Н. Однако, принятое предположение, что теплопроводность абразивного зерна на порядок меньше стали никем из упомянутых авторов не подтверждается, нет ни ссылок на литературу, ни данных собственных исследований. Этот "миф" как бы гуляет сам по себе еще начиная с работы Лурье Г.Б. [6].

Если обратиться к [7], то коэффициент теплопроводности электрокорунда  $\lambda_{\text{э}}=0.197$  Дж/см·с·град, а стали Х18Н10Т -  $\lambda_{\text{с}}=0.226$  Дж/см·с·град. С учетом объемной теплоемкости электрокорунда  $C_{\text{в}}=3.016$  Дж/см<sup>2</sup>·град и стали  $C_{\text{в}}=4.5$  Дж/см<sup>2</sup>·град получены коэффициенты температуропроводности соответственно 0.05 см<sup>2</sup>/с и 0.06 см<sup>2</sup>/с. Таким образом, следует говорить не о значительном различии, а наоборот, о большой близости теплофизических констант электрокорунда и стали Х18Н10Т. А для таких сталей как ШХ15, 30ХГС, 40Х [3] имеет место почти полное совпадение. Следовательно, учитывая то, что теплопроводность стружки также одинакова с теплопроводностью обрабатываемого материала, можно говорить о том, что источник тепла от работы деформации – плоскость сдвига движется со скоростью резания в однородной среде. Естественно, при этом отметить, что тепло впереди движущейся с высокой скоростью плоскости сдвига будет очень сжато перед источником и в основном сосредоточено за источником, т.е. в стружке и зерне. Поэтому, плоскость сдвига нельзя "ложить" на обрабатываемую поверхность, а надо принимать ее как она есть наклонной к направлению скорости резания или обработанной поверхности.

Решение такой задачи получено методом источников [8] и имеет следующий вид:

$$T(x_2, y_2) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \int_0^{\tau} \int_0^l \frac{1}{\tau - t} \exp \left[ \frac{-[x_2 \cos \beta + \sin(a_z - y_2) - x_u + V(\tau - t) \cdot \cos \beta]^2 - [\cos \beta (y_2 - a_z) + x_2 \sin(\beta) + V(\tau - t) \cdot \sin \beta]^2}{4 \cdot a(\tau - t)} \right] dx_u dt, \quad (1)$$

где  $l=a_z/tq\beta$ ,  $q$  - плотность теплового потока от работы деформации;  
 $x_u$  - размер источника тепла (плоскость сдвига) вдоль оси X.

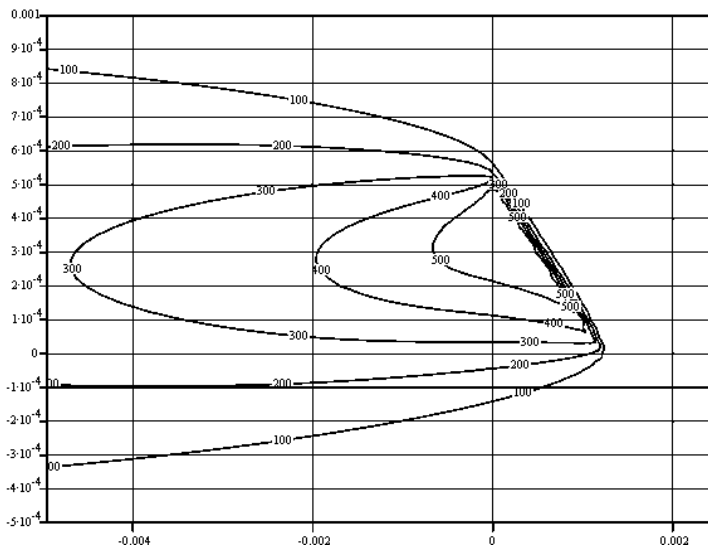
Приняв  $q=0.05$  см<sup>2</sup>/с,  $V=40$  м/с,  $a_z=0.0005$  см,  $\lambda=0.226$  Дж/см·с·град,  $a=0.05$  см<sup>2</sup>/с,  $\beta=0.3837$  [4] получено установившееся температурное поле в обработанной поверхности, стружке и зерне показанное на рис.2. Из этого рисунка видно, что тепло в основном сосредоточено за источником тепла, т.е. в области отрицательных значений X2 (абсциссы). При этом обрабатываемую поверхность, т.е. в области значений Y2 (ординаты) больших  $a_z=5 \cdot 10^{-4}$  см, переходит значительно меньшая доля выделившегося тепла. Количественный анализ [8] показывает, что она менее 20% .

Установлен, также интересный факт, что нагрев поверхности от работы деформации не зависит от толщины среза при одинаковой плотности теплового потока на плоскости сдвига, что понятно, если иметь ввиду преобладающее распределение тепла от работы деформации в стружку и зерно.

$$\begin{aligned}
az &:= 0.0005 & \lambda &:= 0.226 & a &:= 0.05 & v &:= 4000 & i &:= 0.100 & q &:= 0.4 \cdot 10^7 & \beta &:= 0.3837 & \tau &:= 2 \cdot 10^{-6} \\
i &:= 0.80 & \Delta 1 &:= \frac{az \cdot 6}{\tan(\beta) \cdot 80} & \Delta 1 &= 9.289 \times 10^{-5} & x2_1 &:= \frac{-az \cdot 4}{\tan(\beta)} + i \cdot \Delta 1 \\
j &:= 1..60 & \Delta &:= \frac{3 \cdot az}{60} & \Delta &= 2.5 \times 10^{-5} & y2_j &:= -0.0005 + \Delta \cdot j & \frac{az}{\tan(\beta)} &= 1.239 \times 10^{-3} \\
& & & & & & & & l &:= \frac{az}{\sin(\beta)} & l &= 1.336 \times 10^{-3}
\end{aligned}$$

$$T(x_2, y_2) := \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \int_0^\tau \int_0^l \frac{e^{-\frac{-(x_2 \cos(\beta) + \sin(\beta) \cdot (az - y_2) - xu + v(\tau - t) \cos(\beta))^2 - [\cos(\beta) \cdot (y_2 - az) + x_2 \sin(\beta) + v(\tau - t) \sin(\beta)]^2}{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}}}{\tau - t} dx_1 dt$$

$$M_{i,j} := T(x_2, y_2)$$



M

Рис. 2.

Учесть нагрев от работы трения на площадке износа достаточно просто. Это решение задачи теплопроводности от движущегося плоского источника тепла по поверхности полупространства (обработанной поверхности). Такая задача решена в [8] и объединив задачи нагрева от работы деформации и трения на задней поверхности получено общее решение задачи нагрева поверхности при резании абразивным зерном.

Кроме описанного решения задачи теплопроводности для процесса резания единичным зерном в последние годы получил распространение

подход, предложенный Якимовым А.В. и развиваемый Новиковым Ф.В. [9] представления срезаемого слоя металла зерном или шлифовальным кругом как совокупность адиабатических стержней. Этот оригинальный подход позволяет углубить существующее понимание теплофизических явлений при шлифовании, описав их достаточно простыми зависимостями, облегчающими, их использование на практике.

Расчетная схема микрорезания (резания единичным зерном) при таком подходе показана на рис.3.

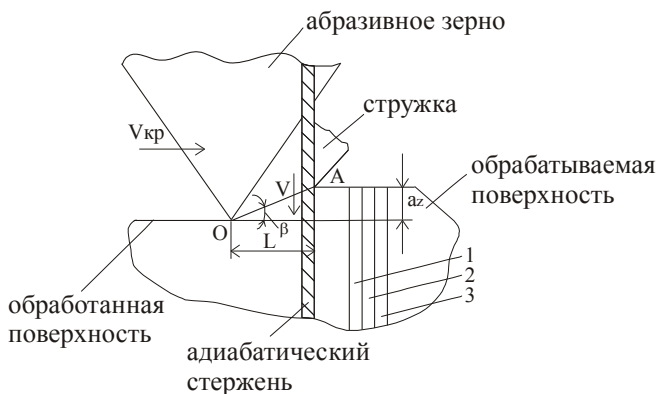


Рис. 3.

На рис.3 зерно абсолютно острое (нет площадки износа) и передний угол резания как и на рис.1 отрицательный. Вращательное движение со скоростью резания  $V_{кр}$  заменяем на поступательное и принимаем, что зерно стоит, а движется обрабатываемая поверхность в направлении противоположном  $V_{кр}$ . След плоскости сдвига на плоскости рис.3 – линия OA. Обрабатываемая поверхность представляется как совокупность стержней 1,2,3 и т.д. Когда такой стержень входит в зону резания, т.е. выходит на плоскость сдвига, перерезается ею и как бы продлевается в стружку и абразивное зерно.

Так как теплофизические константы электрокорунда и стали близки, то заштрихованный стержень можно принять однородным и бесконечным в обе стороны от источника тепла (плоскости сдвига). Упрощая задачу теплопроводности принимаем этот стержень адиабатическим, т.е. не отдающим тепло в боковые от оси стержня стороны. Такое допущение обосновывается следующим образом. Каждый стержень соседствует с обеих сторон с такими же стержнями, перерезаемыми плоскостью сдвига. Причем, при небольшом угле сдвига  $\beta$  смещение плоскости сдвига вдоль стержня и соседних с ним не велико. Поэтому нагрев этих боковых поверхностей

различается незначительно и тепло в основном устремляется вдоль стержней, т.е. с какой-то погрешностью, которую считаем небольшой, стержень движущийся в противоположном направлении скорости резания, можно принять адиабатическим.

Математическая постановка задачи для плоского источника тепла движущегося со скоростью  $V$  вдоль (по оси  $X$ ) адиабатического стержня с источником тепла в начале системы координат ( $X=0$ ) имеет следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + V \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\text{при } T(x, t)|_{t=0} = 0; T(\pm \infty, t) = 0.$$

Краевые условия  $T(\pm \infty, t) = 0$  обоснованы тем, что источник тепла движется с большой скоростью и время действия его очень мало. Поэтому тепло впереди и за источником распространяется недалеко и при ограниченности стержня вдоль его оси размерами детали с одной стороны и стружкой и зерном с другой можно принять, что тепло не достигнет концов стержня.

Решение этой задачи методом источников следующее [10]:

$$T(\tau) = \frac{q}{2 \cdot c \rho \sqrt{\pi} \cdot a} \int_0^{\tau} \frac{dt}{\sqrt{\tau-t}} \exp\left(-\frac{[x+V(\tau-t)]^2}{4 \cdot a(\tau-t)}\right). \quad (3)$$

Полезно знать значение мгновенной максимальной температуры поверхности при резании зерном. Она будет в источнике ( $X=0$ ) и в момент  $\tau_{\text{мгн}}$ , когда стержень минует плоскость сдвига:

$$T(\tau)|_{x=0} = \frac{q}{c \rho \cdot V} \operatorname{erf}\left(\frac{V\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}\right). \quad (4)$$

В выражении (4) дробь  $\frac{V\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}$  - безразмерный комплекс который обозначен буквой  $S$  и который в параметрах процесса резания для времени

$\tau_{\text{мгн.}} = \frac{a_z}{\operatorname{tg}\beta \cdot V_{\text{кр}}}$  будет иметь следующий вид:

$$S = \frac{V\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}} = \sqrt{\frac{V_{\text{кр}} \cdot a_z \cdot \operatorname{tg}\beta}{4 \cdot a}}.$$

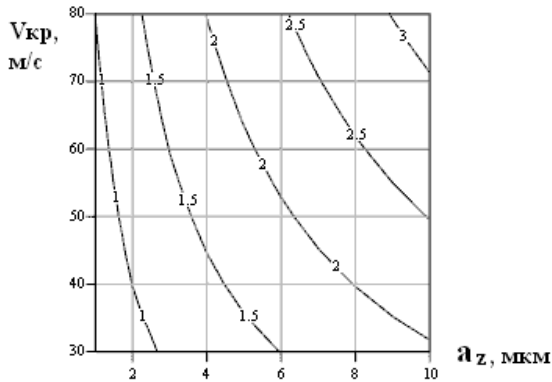
Установившееся значение температуры в источнике тепла будет соответствовать времени  $\tau = \infty$ . В этом случае  $\text{erf}(\infty) = 1$  и значение установившейся температуры:

$$\tau_{уст.} = \frac{q}{c\rho \cdot V} = \frac{q}{c\rho \cdot V_{кр} \cdot \beta}$$

Функция  $\text{erf}(S)$  практически равна 1 уже для  $S \geq 2$ . Полезно знать каким сочетаниям значений  $V_{кр}$  и  $a_z$  соответствует условия достижения установившейся температуры. На рис.4 приведен график с изменениями  $S$  в координатах  $V_{кр}$ ,  $a_z$ . Из этого графика видно, для каких сочетаний  $V_{кр}$  и  $a_z$  мгновенные значения температуры будут меньше установившегося.

$$\beta := 0.384 \quad a := 8 \quad i := 0..9 \quad a_{z_i} := 1 + 1 \cdot i \quad j := 0..10 \quad V_{кр_j} := 30 + 5 \cdot j$$

$$S(a_z, V_{кр}) := \sqrt{\frac{V_{кр} \cdot a_z \cdot \tan(\beta)}{4 \cdot a}} \quad M_{i,j} := S(a_{z_i}, V_{кр_j})$$



М

Рис. 4.

Это область значений  $V_{кр}$  и  $a_z$  для которых  $S < 2$ . Это условия малых  $a_z$  и больших  $V_{кр}$ . Таким образом, для уменьшения температуры мгновенной необходимо уменьшать  $a_z$  и увеличивать  $V_{кр}$ .

Представляет определенный интерес распределение температуры при резании единичным зерном по оси нормальной к обрабатываемой поверхности. При этом построение таких зависимостей для решения (1) с источником тепла наклонного к вектору скорости резания и для решения с представлением обрабатываемой поверхности в виде адиабатических стержней позволяет сравнить количественно эти решения. Такое сравнение следует произвести в условиях, когда обрабатываемая поверхность достигнет

вершины зерна, т.е. точки О на рис.1 и рис. 3. При этом источник тепла от работы деформации в адиабатическом стержне пройдет вдоль оси Х путь равный  $a_z$  и это будет соответствовать времени  $\tau = \frac{a_z}{V \cdot \operatorname{tg} \beta}$ . Чтобы

сравнить (3) с (1) необходимо в (1) начало системы координат поместить в т. О, т.е. перейти от системы  $X_2O_2Y_2$  к системе  $X_1OY_1$ . После такого перехода и выражения координат  $X_1, Y_1$  через  $X$  и  $Y$  уравнение (1) принимает следующий вид:

$$T(x, y) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \int_0^\tau \frac{1}{\tau - t} \left[ \frac{-[x \cos \beta - y \sin \beta - x_u + V(\tau - t) \cdot \cos \beta]^2 + [x \sin \beta + y \cos \beta + V(\tau - t) \cdot \sin \beta]^2}{4 \cdot a(\tau - t)} \right] dx_u dt. \quad (5)$$

Для сравнения решений (3) и (5) целесообразно координату нормальную к обработанной поверхности в (3) обозначить как и в (5) буквой У.

Результаты расчета при идентичных условиях решений (3) и (5) приведены на рис.5. Приведенные графики на рис.5 обнаруживают близкое совпадение по характеру и величинам распределения температуры по нормали к обрабатываемой поверхности в момент выхода ее из под вершины зерна. Различие максимальных температур составляет  $1233-1177=56^\circ$  или  $\approx 5\%$ .

Таким образом, следует важный вывод о возможности описания температурного поля в детали от работы деформации уравнением (3), значительно более простым, чем (5). Плоская задача теплопроводности может быть заменена одномерной.

Второй важный результат анализа графиков рис.5 тот, что очевидно значительная разница в распределении тепла, впереди и за источником тепла (в положительной и отрицательной области значений координаты У). Превалирующее количество тепла (более 90%) сосредоточено за движущимся источником тепла.

При выполненном сравнении время наблюдения за температурным полем принято равным времени действия работы деформации. Если же время наблюдения принять несколько большим, чем действие работы деформации, то картина распределения тепла резко меняется.

Обратимся к рис.6, который является продолжением файла, представленного на рис.5. Здесь анализируется температура  $T_1$  как функция времени наблюдения  $\tau$  и координаты У. Учитывается, что при окончании работы деформации на плоскости сдвига перемещение источника тепла по адиабатическому стержню также прекращается, что отражено в формуле  $T_1(\tau, y)$ .

$$az := 0.0005 \quad \lambda 1 := 0.226 \quad a1 := 0.05 \quad v := 4000 \quad \beta := 0.3837 \quad \sigma i := 250000 \quad \beta 1 := 0.593$$

$$cp := 4.52 \quad y := -0.0015, -0.0014 \dots 0.001 \quad qs := \sqrt{3.25} \cdot \frac{\sigma i}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\beta 1) \cdot 40 \quad l1 := \frac{az}{\sin(\beta)}$$

$$TOL := 10^{-6} \quad x := 0 \quad qs = 8.631 \times 10^6$$

$$\tau := \frac{az}{v \cdot \tan(\beta)} \quad \tau = 3.096 \times 10^{-7}$$

$$T(y) := \frac{qs}{4 \cdot \pi \cdot \lambda 1} \cdot \int_0^{\tau} \int_0^{l1} \frac{e^{-\frac{[x \cdot \cos(\beta) - y \cdot \sin(\beta) - xu + v \cdot (\tau - t) \cdot \cos(\beta)]^2 + [x \cdot \sin(\beta) + y \cdot \cos(\beta) + v \cdot (\tau - t) \cdot \sin(\beta)]^2}{4 \cdot a1 \cdot (\tau - t)}}}{\tau - t} dx dt$$

$$T1(y) := \frac{qs}{2 \cdot cp \cdot \sqrt{\pi \cdot a1}} \cdot \int_0^{\tau} \frac{e^{-\frac{[y + v \cdot \tan(\beta) \cdot (\tau - t)]^2}{4 \cdot a1 \cdot (\tau - t)}}}{\sqrt{\tau - t}} dt \quad T1(0) = 1.177 \times 10^3$$

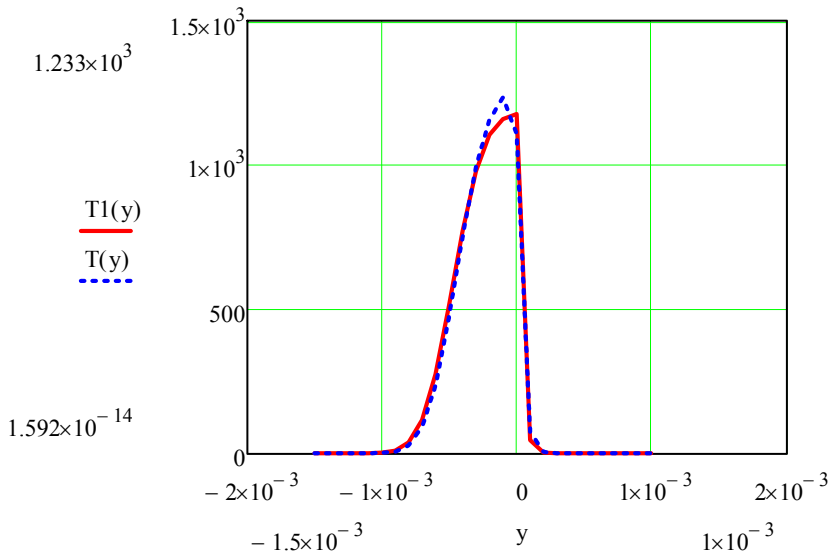


Рис. 5. Сравнение температурных полей от работы деформации при наклонном источнике тепла  $T(Y)$  и плоском в адиабатическом стержне  $T1(Y)$ .

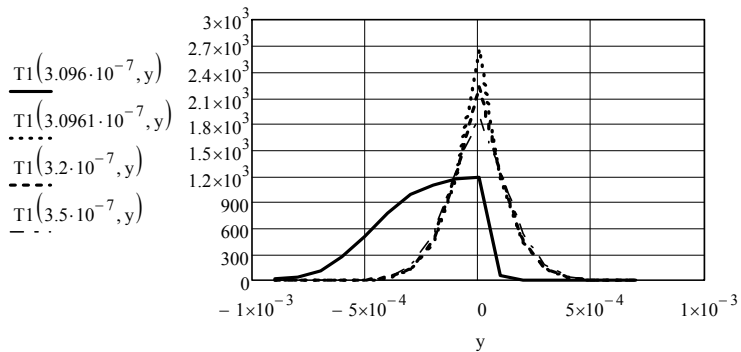


$$y := -9 \cdot 10^{-4}, -8 \cdot 10^{-4} .. 7 \cdot 10^{-4} \quad \tau := 0,00001 \cdot 10^{-7} .. 6 \cdot 10^{-7} \quad \tau_1 := 3,096 \cdot 10^{-7}$$

$$T1(\tau, y) := \frac{qs}{2 \cdot c \rho \cdot \sqrt{\pi \cdot a l}} \int_0^{\text{if}(\tau \leq \tau_1, \tau, \tau_1)} \frac{1}{\sqrt{\tau - t}} \cdot e^{\frac{-[y + \text{if}(\tau \leq \tau_1, v \cdot \tan(\beta), 0) \cdot (\tau - t)]^2}{4 \cdot a l \cdot (\tau - t)}} dt$$

$$T1(3,096 \cdot 10^{-7}, 0) = 1.177 \times 10^3$$

$$T1(3,0961 \cdot 10^{-7}, 0) = 2.666 \times 10^3$$



$$T2(\tau, y) := \frac{qs}{2 \cdot c \rho \cdot \sqrt{\pi \cdot a l}} \int_0^{\text{if}(\tau \leq \tau_1, \tau, \tau_1)} \frac{1}{\sqrt{\tau - t}} \cdot e^{\frac{-y^2}{4 \cdot a l \cdot (\tau - t)}} dt$$

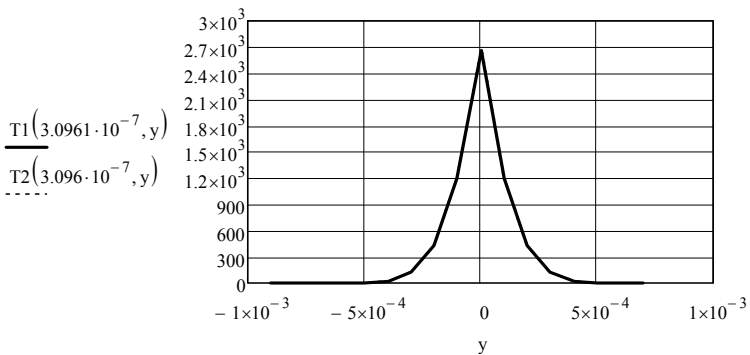


Рис. 6.

На верхнем графике рис.6 видно, что в момент времени  $3,0961 \cdot 10^{-7}$  с. температура (пунктирная линия) распределена равномерно относительно

координаты  $Y=0$ , т.е. равномерно относительно обработанной поверхности, и при этом значение ее для  $Y=0$  значительно, раза в два, больше чем температура в момент окончания действия работы деформации  $T_1(3.0960 \cdot 10^{-7}, 0)$ . Таким образом, через мгновение равное  $0.0001 \cdot 10^{-7}$  с. температура на поверхности после прекращения работы деформации резко возрастает. Тепло, сосредоточенное за движущимся источником тепла (в области отрицательных значений координаты  $Y$ ) мгновенно перетекает в поверхность детали и распределяется равномерно относительно ее. Такое явление никем не наблюдалось и имеет очевидное объяснение. При движении источника тепла с большой скоростью вдоль стержня тепло в основном сосредотачивается в стружке и зерне. Когда же источник тепла останавливается, то в положительном направлении оси  $Y$  образуется большой градиент температуры и тепло накопившееся в абразивном зерне "броском" переходит в обработанную поверхность. Это имеет место только в том случае, если зерно не абсолютно острое, т.е. после прекращения работы деформации зерно контактирует с поверхностью детали – площадкой износа, что обычно и имеет место при шлифовании. На нижнем графике рис.6 иллюстрируется еще один важный факт анализа моделей резания единичным зерном при представлении обработанной поверхности набором адиабатических стержней. На этом графике приведены две зависимости  $T_1(3.0961 \cdot 10^{-7}, y)$  и  $T_2(3.0960 \cdot 10^{-7}, y)$ . Зависимость  $T_1(3.0961 \cdot 10^{-7}, y)$  соответствует распределению температуры в стержне от движущегося со скоростью  $V \cdot \operatorname{tg} \beta$  источника тепла, а зависимость  $T_2(3.0960 \cdot 10^{-7}, y)$  для неподвижного, непрерывно действующего в течении времени от нуля до  $\tau = 3.0960 \cdot 10^{-7}$  с. Указанные зависимости практически совпадают, что позволяет сделать еще один важный вывод. Движущийся источник тепла с большой скоростью можно заменить неподвижным, непрерывно действующим, который в этом случае называют быстродвижущимся [3]. Этот прием упрощающий описание температурных полей хорошо известен и широко применяется [3]. При этом Резниковым А.Н. предложен критерий  $Pe = \frac{V \cdot l}{a} \geq 10$ , соблюдение которого позволяет заменить движущийся источник неподвижным с погрешностью не более 8%. В рассмотренном нашем случае размер источника тепла  $l$  в направлении его движения равен нулю и критерий Пекле ( $Pe$ ) также нулю и принимать согласно условия  $Pe \geq 10$  такой источник быстродвижущимся нельзя. Однако, как показано на нижнем графике рис.6 это вполне приемлемо и надо понимать именно для условий резания абразивным зерном с площадкой износа.

В рассмотренных примерах плотность теплового потока  $q_s$  от работы деформации на плоскости сдвига определялась на основании ортогональной схемы резания [11], показанной на рис.7.

где  $P_S$  - сила сдвига на плоскости сдвига,  $P_{NS}$  - нормальная сила на плоскости сдвига. Эти силы, согласно исследований Корчака С.Н. [4], определяются по следующим формулам:

$$P_S = \frac{a}{\sin \beta} \cdot \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}; \tag{6}$$

$$P_{NS} = \frac{1.5 \cdot a}{\sin \beta} \cdot \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}, \tag{7}$$

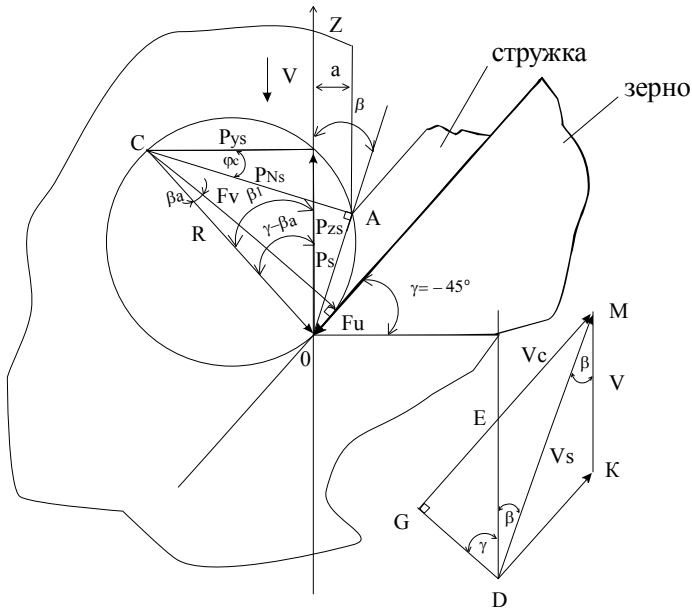


Рис. 7.

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений при скорости и степени деформации, соответствующих шлифованию.

В этих формулах отражено соотношение между напряжением сдвига  $\tau_s$  и нормальным напряжением  $\sigma$  на плоскости сдвига установленное Корчаком С.Н. [4]:

$$\tau_s = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}; \sigma = 1.5 \cdot \tau_s. \quad (8)$$

На основании формул (6) и (7) Корчаком получена формула расчета теплового потока от работы пластической деформации:

$$q_s = \sqrt{3.25} \cdot \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \cos \beta_1 \cdot V_{кр}, \quad (9)$$

где  $\beta_1$  – угол между равнодействующей пластической деформацией и скоростью резания  $V_{кр}$ .

В дальнейших наших исследованиях расчет  $q_s$  несколько изменен и выполнен в соответствии с [11]:

$$q_s = \frac{P_s \cdot V_s}{S_s} = \frac{\sigma_i \cdot \cos \gamma}{\sqrt{3} \cos(\gamma + \beta)} \cdot V_{кр}, \quad (10)$$

где  $V_s = \frac{V \cdot \cos \gamma}{\cos(\gamma + \beta)}$  [11] - скорость сдвига;

$S_s = \frac{a}{\sin \beta}$  - площадь плоскости сдвига единичной ее ширины.

Так при  $V=50$  м/с,  $\gamma = -45^\circ$  и  $\beta=22^\circ$  [4] получаем:

$$q_s = 52 \cdot \sigma_i \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}.$$

Тепловой поток от работы трения на задней поверхности вычисляется согласно формулы предлагаемой Корчаком С.Н. [4]:

$$q_{mp} = 0.15 \cdot \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \cdot V, \quad (11)$$

и при  $V=50$  м/с,  $q_{mp}=4.33 \cdot \sigma_i$ .

Выше описано и проанализировано распространение тепла от работы деформации на плоскости сдвига. После выхода стержня с плоскости сдвига он начинает перемещаться через площадку износа. В результате трения на площадке износа в стержне действует неподвижный вдоль его оси источник тепла  $q_{тр}$  в течение времени перемещения стержня через площадку износа.

Решение такой задачи имеет следующий вид:

$$T_3(y, t) = \frac{q_{тр}}{2 \cdot C \rho \cdot \sqrt{\pi} \cdot a} \cdot \int_{\tau_1}^{\tau} \frac{dt}{\sqrt{\tau - t}} \exp\left(-\frac{y^2}{4 \cdot a \cdot \sqrt{(\tau - t)}}\right). \quad (12)$$

где  $\tau_1$ – время действия работы пластической деформации;  
 $\tau$  - время наблюдения за температурным полем.

Решение (12) такое же, как и выражение  $T_2(\tau, y)$  на рис.6 и отличается от него только пределами интегрирования.

Как установлено выше тепловой поток от работы деформации распределяется поровну в стружку-зерно и обрабатываемый материал. Тепловой поток от работы трения в дальнейшем нами также распределяется поровну между зерном и деталью. Такое решение объясняется тем, что как электрокорунд, так и сталь имеют примерно одинаковую теплопроводность и температура, как поверхности детали, так и площадки износа при входе стержня на нее одинакова.

На основании выполненных исследований тепловых явлений при резании единичным абразивным зерном можно перейти к исследованию массового ими резания. Это исследование выполняется при следующих допущениях. Предполагается, что каждый установившийся процесс шлифования характеризуется какой-то средней толщиной среза  $a_z$  на зерно. Поэтому можно воспользоваться полученными формулами, если известно среднее значение  $a_z$ .

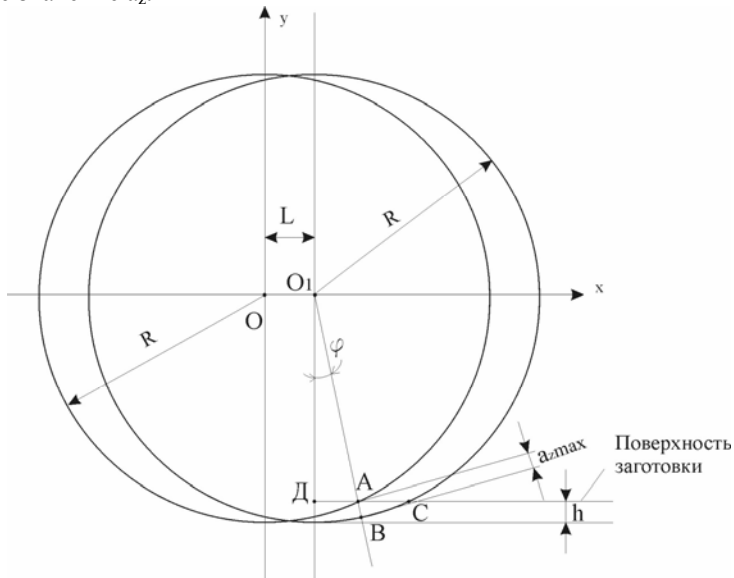


Рис. 8.

Однако для моделирования массового резания зерна след в след с определенной постоянной толщиной среза надо установить время между резами  $t_{mp}$ , количество резов  $n$  исходя из режимов шлифования: скорости резания  $V_{кр}$ , скорости подачи  $S$ , глубины резания  $h$ . Для этого рассмотрим схему, показанную на рис.8. Упрощая задачу расчета -  $t_{mp}$  принимаем, что за время реза единичным зерном, поскольку оно очень мало, перемещение

круга или заготовки со скоростью подачи принимаем равным нулю. Тогда согласно рис.8 зная  $a_z$  можно найти  $L$  - перемещение круга за время между резами в направлении подачи. Это расстояние  $L$  находится из решения квадратного уравнения [12]:

$$L^2 + 2 \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot h - h^2} \cdot L + 2 \cdot R \cdot h - h^2 + (R - h)^2 - (R - a_z)^2 = 0. \quad (13)$$

Вычислив  $L$  находим  $t_{\text{м.р.}} = \frac{L}{S}$  и количество резов  $n$  до выхода точки А (рис.8) из зоны резания находим делением координаты  $X_A$  на  $L$ :

$$n = \frac{x_A}{L} = \frac{\sqrt{2 \cdot R \cdot h - h^2}}{L}, \quad (14)$$

а расстояние  $L_p$  между режущими зернами – находим из:

$$L_p = t_{\text{м.р.}} \cdot V_{\text{кр}}. \quad (15)$$

Близость расчетов по предложенным формулам (13), (14), (15) к расчету по формулам Островского В.И. [5] можно выявить сравнением их. У Островского В.И. расчет  $L_p$  можно получить из формулы:

$$a_{zm} = 2 \left( \frac{V_d}{V_{\text{кр}}} \right) \cdot \left( \frac{h}{2R} \right) \cdot \delta, \quad (16)$$

где  $a_{zm}$  - максимальная толщина среза  $V_d$   $V_{\text{кр}}$  - скорости детали и круга,  $R$  - приведенный радиус круга,  $\delta$  - расстояние между режущими зернами. Перейдя к обозначениям принятым в (13), (14), (15) и заменив радиус круга

эквивалентным радиусом  $Re = \frac{R}{1 + \frac{r}{R}}$ , где  $r$  - радиус детали выполнены

расчеты для условий круглого наружного шлифования:  $R=375$  мм,  $r=50$  мм,  $h=0.02$  мм,  $V_{\text{кр}}=50000$  мм/с,  $\delta=833$  мм/с,  $a_z=0.005$  мм. Получено, что согласно (13), (15)  $L_p=10.684$  мм, а согласно (16)  $L_p=9.967$  мм. Различие  $\approx 0.7$  мм, что составляет примерно 7% от  $L_p$  и такой погрешностью в дальнейшем пренебрегаем.

Далее необходимо при моделировании резания зернами след в след учесть, то, что с каждым резом круг, перемещаясь в направлении подачи срезает с адиабатического стержня участки с уменьшающейся длиной от реза к резу. Следовательно, время пребывания стержня на плоскости сдвига  $\tau$  с каждым разом уменьшается, как и толщина среза  $a_z$  при этом и скорость перемещения источника тепла  $V$  (плоскости сдвига) по стержню. Отмеченное обстоятельство хорошо видно из рис.9. На этом рисунке видно, что первое зерно режущее стержень (выделен жирной линией) срезает участок АС, второе – участок СN и т.д., а сам стержень до обрабатываемой поверхности уменьшается с  $h$  до  $h_1$ , далее до  $h_2$  и т.д.

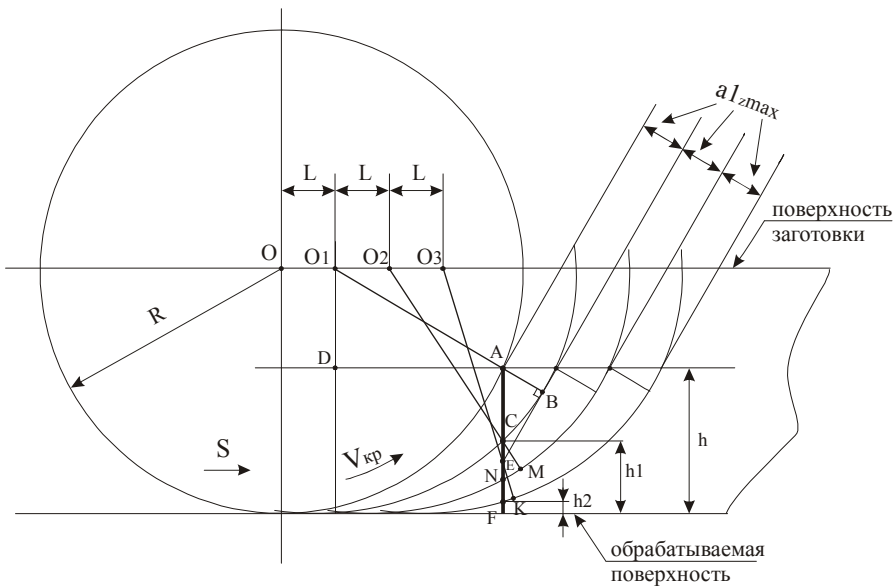


Рис. 9.

Если развернуть дугу окружности радиуса  $R$  с центром  $O_1$  в прямую линию то построение, показанное на рис.10, позволяет рассчитать время  $\tau_1$  резания стержня каждым последующим зерном.

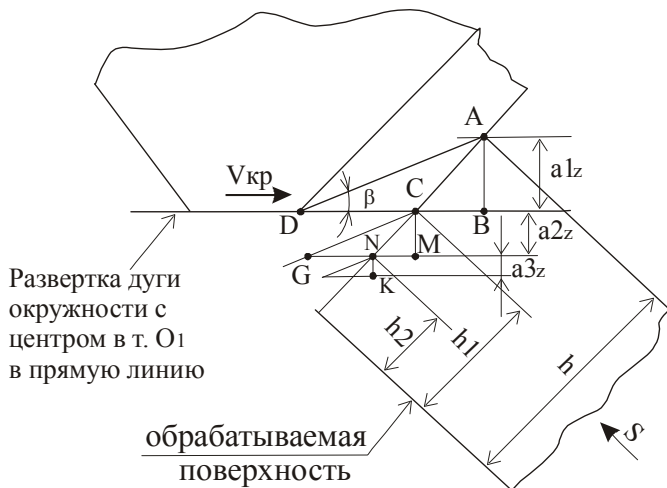


Рис. 10.

В [13] разработан алгоритм расчета  $a_{zi}$ ,  $\tau_i$ ,  $V_i$  и как пример приведены все эти значения для тех же условий, что и для расчета  $L_p$ , приведенного выше. Таблица 1 с значениями  $h_i$ ,  $a_{zi}$ ,  $\tau_i$  и  $V_i$  приведена ниже:

Таблица 1. Параметры резания каждым  $i$ -ым зерном

$i$ – номер реза	$X_i$ , мм	$a_{zi}$ , мм	$\tau_{i1}$ , сек
0	0.02	0.005	$2.6432 \cdot 10^{-7}$
1	0.014998	0.0042818	$2.667 \cdot 10^{-7}$
2	0.010715	0.0035637	$1.88968 \cdot 10^{-7}$
3	0.00715	0.0028456	$1.511194 \cdot 10^{-7}$
4	0.004305	0.002127	$1.131551 \cdot 10^{-7}$
5	0.0021776	0.00140939	$0.75075 \cdot 10^{-7}$
6	0.0007681	0.000691314	$0.3688 \cdot 10^{-7}$

Из таблицы видно, что толщина среза  $a_{zi}$  уменьшается с каждым последующим резом, начиная с  $a_{z0} = 5$  мкм на первом резе и заканчивая  $a_{z6} = 0.69$  мкм на седьмом. Очевидно, что при внедрении в обрабатываемую поверхность на очень малую глубину среза не произойдет и будет только скольжение зерна по поверхности. Предполагаем, что в рассмотренном примере при последнем срезе стружки не образуется и будет иметь место только трение.

Для приближения результатов расчета температуры поверхности при последовательном резании зернами след в след друг другу желательно учесть зависимость теплофизических свойств обрабатываемого материала и его сопротивляемости пластической деформации при резании от температуры.

Воспользуемся зависимостями полученными Корчаком С.Н. и приведенными в [4]. Так для стали X18H10T объемная термостойкость  $C_v$  и коэффициент теплопроводности в [4] описываются следующими зависимостями от температуры  $T$ :

$$\left. \begin{aligned} C_v(T) &= (3.856 + 0.000565 \cdot T) \text{ Дж / см}^3 \cdot \text{град}; \\ \lambda(T) &= (0.23 - 0.13e^{-0.002 \cdot T}) \text{ Дж / см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Вычисление коэффициента температуропроводности  $a(T) = \lambda / C_v$ ,  $\text{см}^2/\text{с}$  с использованием 17 неудобно и поэтому экспериментальная зависимость  $a(T)$  приведенная в [4] аппроксимирована полиномом 2-ой степени следующего вида:



$$a(T) = 0.024 + 4.213 \cdot 10^{-5} T - 2.098 \cdot 10^{-8} \cdot T^2. \quad (18)$$

В работе [4] приведена экспериментальная зависимость интенсивности напряжений  $\sigma_i$  от температуры для стали X18H9T и учитывая ее характер, она аппроксимирована кусочно тремя зависимостями:

в диапазоне  $T=(0 \div 600)^\circ\text{C}$

$$\sigma_i = 2.175 \cdot 10^5 - 187.5 \cdot T + 0.437 \cdot T^2, \quad (19)$$

в диапазоне  $T=(600 \div 1200)^\circ\text{C}$

$$\sigma_i = 6.005 \cdot 10^{-5} - 737.5 \cdot T + 0.313 \cdot T^2, \quad (20)$$

а в диапазоне  $T > 1200^\circ\text{C}$

$$\sigma_i = 1.442 \cdot 10^9 \cdot e^{-0.0077 \cdot T}. \quad (21)$$

Аналитическое решение задачи теплопроводности учитывающее изменение термодинамических свойств среды невозможно. В этом случае прибегают к численным методам решения либо методом конечных разностей, либо конечными или граничными элементами.

Поскольку обрабатываемая поверхность моделируется набором адиабатических стержней и вся история нагрева как поверхности, так и стружки с зерном рассматривается как распространение тепла в адиабатическом стержне, то, несомненно, что стержень проще всего представить набором элементов определяемых одним размером-величиной его  $\Delta h$  вдоль стержня. Таким образом и моделирование распространения тепла проще всего осуществляется методом конечных разностей.

Итак, ставится задача разработать конечно-разностную модель теплофизики резания абразивными зернами адиабатического стержня, представленному в модели набором элементов с какими-то размерами  $\Delta h_i$  вдоль стержня (по оси X). При этом место приложения источника тепла от работы деформации и трения с каждым разом должно дискретно перемещаться по оси X, т.е. прикладываться к стержню на каком-то расстоянии  $X_i$  от поверхности готовой детали. Время действия источника тепла от работы деформации  $\tau_{1i}$  с каждым  $i^{\text{-ым}}$  разом уменьшается как при этом и толщина среза  $a_{zi}$ . Источник тепла от работы деформации (плоскость сдвига) можно принять неподвижным и непрерывно-действующим в течение времени  $\tau_{1i}$  (что выше при анализе резания единичным зерном обосновано). При этом в обрабатываемую поверхность направлять только половину тепла от работы деформации. Такую задачу можно решить, создав "барьер" перетеканию тепла деформации в зерно путем назначения коэффициента теплопроводности элемента стержня, контактирующего с обрабатываемой поверхностью близким к нулю. Такой барьер создается только в том месте стержня, где действуют источники тепла от работы деформации и трения. Этим самым как бы отсекается от стержня участок, моделирующий стружку и зерно. Они уносят накопившееся в них тепло.

Математическую модель решаемой задачи можно представить одномерным уравнением теплопроводности и граничными условиями:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left( a(T(x,t)) \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right); \quad (22)$$

$$q(x,t) = \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = \begin{cases} q_p(X_i) & \text{при } t_i < t \leq t_i + \tau_{1i}; \\ q_p(X_6) = 0; & \end{cases}$$

$$q_{\text{тр}(X_i)} \text{ при } t_i + \tau_{1i} < t < t_i + \tau_{1i} + \tau_{\text{тр}};$$

$$q_{\text{тр}(X_6)} = q_{\text{тр}(X_i)}/2 \text{ при } t_6 + \tau_{16} < t < t_6 + \tau_{\text{тр}};$$

$$T(\pm \infty, t) = 20^\circ \text{C};$$

где  $i = 0, 1, \dots, 6$  номер реза;

$q_{\text{тр}(X_i)}$  - тепловой поток от работы деформации на плоскости сдвига;

$q_{\text{тр}(X_i)}$  - тепловой поток от работы трения на задней поверхности зерна;

$$t_i = t_{\text{мп}} \cdot i;$$

$t_i$  - время начало  $i$ -го реза;

$t_{\text{мп}}$  - время между резами;

$\tau_{1i}$  - время работы пластической деформации при  $i$ -ом резе;

$\tau_{\text{тр}}$  - время работы на задней поверхности;

$$X_i = h - \sum_{z=0}^i a_{zi};$$

$X_i$  - координата места реза на оси  $X$ ;

$h$  - глубина резания ( $h=0.02$  мм) кругом;

$a_{zi}$  - толщина среза на стержне при  $i$ -ом резе.

Из граничных условий видно, что при последнем шестом резе тепловой поток от работы деформации равен нулю. Это означает, что зерно на шестом резе не срезает стружку, т.к. глубина резания  $a_{z6}$  меньше микрометра (см.табл.1) и зерно только скользит по обрабатываемой поверхности и при этом действует только тепловой поток от работы трения. Поскольку нам не известно нормальное контактное напряжение на задней поверхности, когда зерно только скользит не снимая стружки, то принимаем, что оно изменяется от нуля, при касании зерна обрабатываемой поверхности, до значения равного нормальному напряжению на плоскости сдвига, когда зерно режет. Поэтому среднее контактное напряжение будет в два раза меньше контактного напряжения при резании. Таким образом, для последнего

(шестого) зерна тепловой поток от трения  $q_{тр(X_6)}$  будет в два раза меньше  $q_{тр(X_i)}$ .

Геометрический образ модели стержня представлен на рис.11.

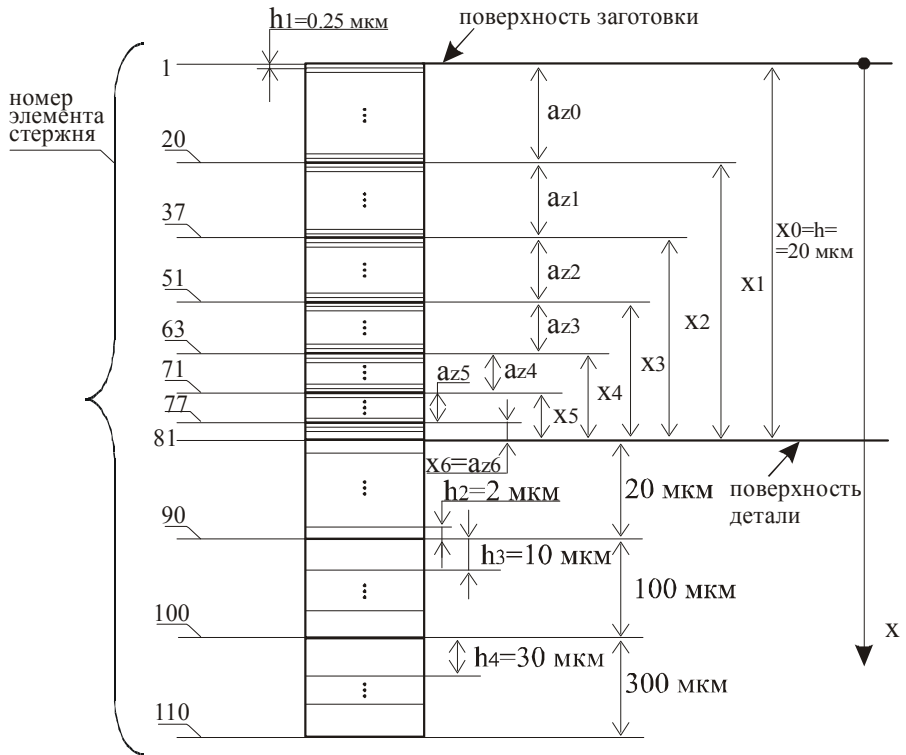


Рис. 11.

Отработка геометрического образа модели показала, что для устойчивого резания необходимо, чтобы размер  $h_i$  элемента стержня в местах, где действует источник тепла, был не более 0.25 мкм. Поэтому весь участок стержня длиной равной глубине шлифования 0.02 мм разбит на  $0.02/0.00025=80$  элементов.

На рис.11 стержень выделен жирными линиями. Его, выше поверхности детали, пересекают также жирные линии в местах, где прикладывается тепловой поток от деформации и трения. Эти места соответствуют номерам элементов указанных слева от стержня. Ниже поверхности детали жирными линиями отделены участки с большими значениями размеров элементов. Размеры их и количество определились при отработке модели, которая должна обеспечить на последнем элементе неизменную температуру  $T=20^{\circ}\text{C}$  в соответствие с граничным условием  $T(\pm \infty, t) = 20^{\circ}\text{C}$ .

Заменяя в (22) производные по координате X центральными конечными разностями получаем конечно-разностную модель  $i^{ro}$  элемента стержня:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = K_i \cdot (T_{i+1} - T_{i-1} - 2T_i), \quad (23)$$

где  $K_i = \frac{a(T_i)}{h^2}$ .

В месте, где контактируют элементы с различными размерами, например  $81^{nh}$  и  $82^{oh}$ , с размерами  $h_1$  и  $h_2$ , то для  $82^{ro}$  элемента уравнение (22) в конечных разностях будет следующим:

$$\frac{\partial T_{82}}{\partial t} = K_{82} \cdot (h_1 T_{83} + h_2 T_{81} - T_{82} (h_1 + h_2)), \quad (24)$$

где  $K_{82} = \frac{a(T_{82}) \cdot 2}{h_1 \cdot h_2 (h_1 + h_2)}$ .

Уравнения (23) и (24) просто моделируются в пакете "VisSim", в котором есть оператор интегрирования по времени.

Уравнений (23) и (24) столько, сколько элементов модели, т.е. 110. Элементы обозначаются буквой T с номером его и собраны группами в "compound blocs", которые обозначены диапазоном элементов, например T<sub>1</sub>-T<sub>37</sub>

Дискретный перенос источника тепла вдоль стержня потребовал довольно сложного программирования с присвоением каждому резу номера и в соответствии с этим номером присвоения времени действия работы деформации (согласно табл.1), вычисление  $\sigma_i(T)$  необходимое для расчета тепловых потоков от деформации и трения по формулам (10,11)  $q_p = 52 \cdot \sigma_i$  и  $q_{тр} = 4.33 \cdot \sigma_i$ , а также коэффициентов температуропроводности и теплопроводности. Учитывая, что в деталь из теплового потока от деформации  $q_p$  и трения  $q_{тр}$  половина идет в деталь, эти потоки уменьшены в два раза. Тепловые потоки моделируем, пользуясь законом Фурье:

$$q = -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x}.$$

Если, например, тепловой поток выделяется на элементе с номером 37, то к температуре T37 добавляется температура  $dT = \frac{q_p \cdot h1 \cdot 2}{\lambda(T37)}$ , а для

моделирования теплового потока от трения добавляется  $dT2 = \frac{q_{тр} \cdot h1 \cdot 2}{\lambda(T37)}$ .

Программно обеспечивается соответствующая продолжительность dT и последовательность dT и dT2.

Продолжительность действия теплового потока работы трения определяется величиной L площадки износа и скоростью резания  $t_{рp} = L/V_{кр}$ .

Подробно программа моделирования для рассматриваемого примера приведена в статье [14].

Анализ результатов моделирования производим по графикам изменения температуры на ряде элементов T1, T2, T38, T52, T64, T72, T78, T81, T110 показанных на рис.12. Температура T81 соответствует температуре поверхности детали. Остальные T1-T78 соответствуют температурам, отстоящими от места ввода теплового потока в стержень для резов с номерами 0...6 на 0.25 мкм, т.е. на  $(X_i - 0,00025)$  мм, где  $X_i$  - расстояние от детали до заготовки (см.табл.1). Температура T110 соответствует температуре конца стержня, т.е. на расстоянии 420 мкм в глубь детали.

Из графика элемента T110 видно, что его температура практически постоянная и равная 20°C, что свидетельствует о соблюдении граничного условия  $T(\pm \infty, t) = 20^\circ\text{C}$ .

Особый интерес представляет сигнал T81 – температура на поверхности обрабатываемой детали. Она с каждым резом возрастает, а при резе с номером 5 достигает значения 725°C. Постепенное нарастание температуры поверхности детали происходит за счет того, что источники тепла  $q_p$  и  $q_{тр}$  с каждым резом приближаются к поверхности детали в процессе ее перемещения через зону контакта с кругом со скоростью подачи. В то же время этот рост температуры сдерживается с другой стороны тем, что продолжительность действия теплового потока от работы деформации с каждым резом уменьшается.

Последнее зерно №6 только скользит по поверхности детали, тепловой поток от работы трения значительно меньше  $q_p$  и поэтому максимальная температура от этого зерна значительно меньше, чем от зерна №5.

Необходимо отметить, что если количество тепла, вносимое работой деформации с каждым резом уменьшается, то от работы трения оно не меняется, т.к. размеры площадки износа не меняются и время действия работы трения и ее величина неизменны. Поэтому влияние трения площадки износа на температуру поверхности является значительным. Не перестраивая модель можно проанализировать это влияние изменяя только размер площадки износа L1.

Для сигналов T1÷T78 общим является то, что элементы 1÷78 нагреваются до тех пор, пока последовательно режущее зерно не срежет их. Так элемент T21 нагревается нулевым и первым резом, а затем, после нагрева и срезания его первым резом он уже не нагревается.

На рис.13 приведен график изменения максимальной температуры на поверхности детали при изменении площадки износа L1. Владея данными о влиянии размеров площадки износа на максимальную температуру при шлифовании можно управлять процессом шлифования для ограничения размеров площадки износа своевременной правкой при шлифовании с затуплением круга или подбором режимов шлифования для удаления затупившихся зерен при шлифовании с самозатачиванием круга.

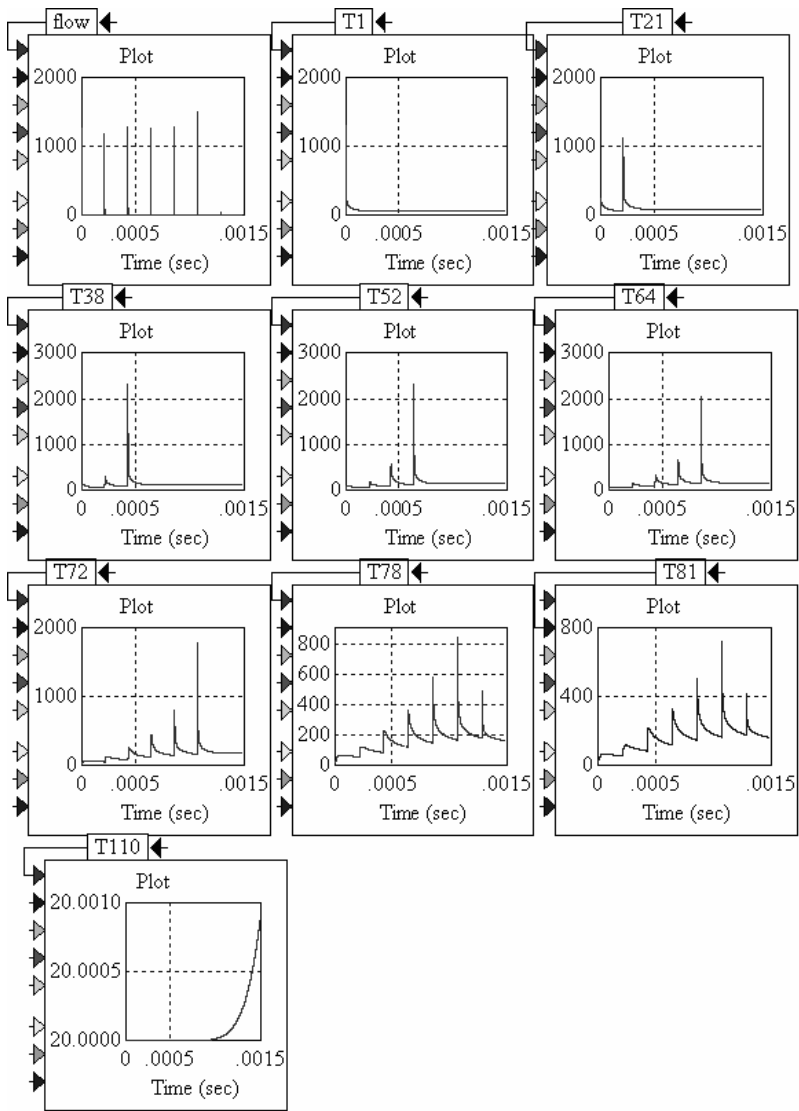


Рис. 12. Графики изменения температуры на участках стержня T1, T2, T38, T52, T64, T72, T78, T81, T110

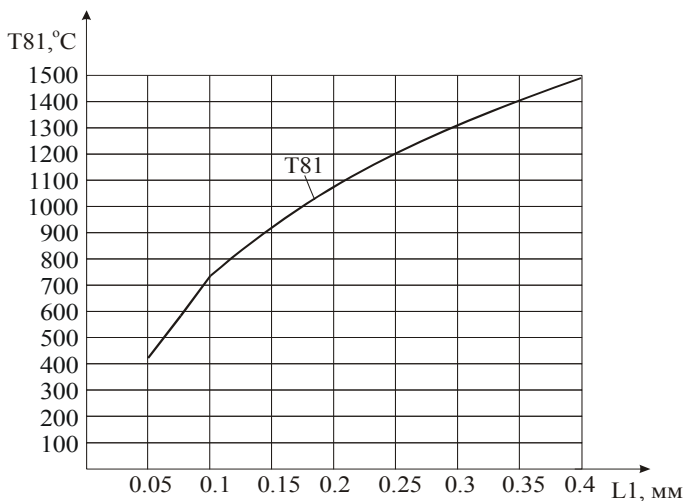


Рис. 13.

#### Выводы

1. Разработаны две математические модели теплообразования при резании единичным абразивным зерном. Первая представляет собой нагрев от работы деформации наклонным к направлению движения источником тепла движущимся со скоростью резания и следующим за ним также движущимся со скоростью резания источником тепла от работы трения на задней поверхности (площадке износа). Вторая модель теплообразования представляет собой адиабатический стержень, который движется через зону резания и вдоль этого стержня перемещается источник тепла от работы деформации, а после окончания его действия нагрев стержня продолжается источником от работы трения на площадке износа без движения его вдоль стержня.

2. Показана близость двух моделей при одинаковых условиях резания. Расхождение максимальных температур на поверхности детали от работы деформации не превышает 7%.

3. Показано, что при движении источника тепла от работы деформации на обеих моделях тепло в основном накапливается за источником, после прекращения его действия сразу через мгновение времени равные  $(1 \div 2) \cdot 10^{-10}$  с. тепло распределяется относительно обработанной поверхности в одинаковых долях. Это объясняется тем, что накопившееся тепло в стружке и зерне после прекращения действия работы деформации в связи с наличием большого градиента температуры на поверхности детали броском перетекает в поверхность детали.

4. Доказана возможность замены движущегося с большой скоростью источника тепла вдоль адиабатического стержня заменой непрерывнодействующим в течение времени работы деформации при размере источника тепла в направлении движения равным нулю.

5. Получены формулы расчета времени пребывания адиабатического стержня, моделирующего обрабатываемый материал, в зоне действия работы деформации при резании зернами след в след друг другу.

6. На основании исследований резания единичным абразивным зерном разработана конечно-разностная модель последовательного резания зернами круга режущими с одинаковой максимальной глубиной. Рассмотрены результаты работы такой модели при резании кругом с  $a_{zmax}=5$  мкм с глубиной 0.02 мм, стали X18H10T, со скоростью резания 50 м/с, скоростью подачи 0.833 м/с зернами с площадью износа от 0.05 мм до 0.4 мм.

7. Для исследования процесса шлифования с другим средним значением максимальной толщины среза  $a_{zmax}$ , другими скоростями резания и подачи необходимо перестраивать модель, т.к. количество режущих зерен при прохождении поверхности детали через зону контакта с кругом меняется.

8. Установлено большое влияние размеров площадки износа на максимальную температуру поверхности.

**Список литературы:** 1. *Сипайлов В.А.* Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности.- М.: Машиностроение, 1978.- 168 с. 2. *Редько С.Г.* Процессы теплообразования при шлифовании металлов. Изд-во Саратовского университета, 1962, 231 с. 3. *Резников А.Н.* Теплофизика резания. М., Машиностроение, 1969, 288 с. 4. *Корчак С.Н.* Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с. 5. *Островский В.И.* Теоретические основы процесса шлифования. Изд-во Ленинградского университета, 1981, 141 с. 6. *Лурье Г.Б.* Шлифование металлов. М.: Машиностроение, 1969. – 174 с. 7. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента. /*Ковальчук Ю.И. и др.*.-М., 1984 8. *Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Пирогов А.Ю.* Теплофизика резания единичным абразивным зерном. "Восточно-европейский журнал передовых технологий"1/5 (31) 2008, 30-40 с. 9. *Новиков Ф.В.* Математическая модель определения температуры при шлифовании на основе учета баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь. "Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка". Випуск 61, Харків 2007, 23-33 с. 10. *Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Ушаков А.Н.* О мгновенной температуре шлифования. // Вестник национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – 2009. – №2. – С. 97-106. 11. *Yusuf Altintas.* Manufacturing Automation. Metal cutting mechanics, machine tool vibration, and CNC design. Cambridge University Press. 2000. 12. *Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Ушаков А.Н.* Температура самоподогрева при шлифовании. "Восточно-европейский журнал передовых технологий" 1/5 (37) 2009, 24-37 с. 13. *Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Ушаков А.Н.* Расчет параметров процесса резания единичными абразивными зернами шлифовального круга при стержневой модели обрабатываемой поверхности. // Вестник национального технического университета "Харьковский политехнический институт". –2010. – №25. – С.144 – 59-66 с. 14. *Сизый Ю.А., Чайка Э.Г., Ушаков А.Н., Сталинский Д.В.* Температура поверхности обработанной шлифованием как результат последовательного резания единичными абразивными зернами. Резание и инструмент в технологических системах. Междунар. науч.-техн. сб. - Харьков: НТУ"ХПИ", 2010.-Вып. 78.- С. 210 – 140-156 с.

*Поступило в редколлегию 1.09.10*



*А.В. ФЕСЕНКО*, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»  
*Ю.Н. ЛЮБИМЫЙ*, асп., НТУ «ХПИ»

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ПРИ АКТИВАЦИИ И РАЦИОНАЛЬНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СОЖ**

Анотация. Розглянуто питання, пов'язані з підвищенням ефективності процесу круглого зовнішнього переривчастого шліфування. На основі аналізу процесів в зоні різання та існуючих способів приготування, відновлення, активації, підведення мастильно-охолодної рідини запропоновано ряд конструктивних і технологічних схем кавітаційної обробки МОР в круглошліфувальному верстаті. Розроблено модуль збірний шліфувального круга з введенням МОР по радіальним каналам з кавітаторами.

Abstract. Questions, related to the increase of efficiency of process of the round external irregular polishing, are considered. On the basis of analysis of processes in the zone of cutting and existent methods of preparation, renewal, activating, tricking into of liquids, the row of structural and technological charts of cavitation treatment liquids on a circular grinding machine is offered. The module of collapsible grinding wheel with liquids introduction from the radial ductings with kavitators is developed.

**Введение.** Качество поверхностного слоя деталей машин, определяющие их эксплуатационные характеристики в большинстве случаев формируются при шлифовании. Этот процесс характеризуется высокой тепловой напряженностью и большой вероятностью появления в поверхностных слоях шлифованных деталей дефектов в виде прожогов и микротрещин, снижающих их эксплуатационные свойства. Одним из путей снижения тепловой напряженности процесса шлифования и улучшения качества шлифованных деталей является применение эффективных составов смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), их активизация и использование рациональных способов подачи в зону резания.

В процессе резания охлаждающая жидкость производит смазочное, охлаждающее, моющее, диспергирующее и демпфирующее действия. Диспергирующее действие проявляется в том, что под действием высоких температур и давлений, развиваемых в зоне резания, компоненты охлаждающей жидкости разрушаются с образованием атомов и химических радикалов, которые вступают в реакцию с контактными площадками абразивного зерна (АЗ) и стружки. При этом образуются твердые смазочные пленки. В результате смазывания уменьшаются силы трения, снижается тепловыделение и повышается стойкость режущего инструмента. Охлаждающее действие СОЖ заключается в отводе теплоты от нагретых контактных площадок режущего инструмента и стружки. Моющее действие выражено в вымывании из зоны резания твердых частиц карбидов, мелкой стружки и неметаллических включений. Демпфирующее действие приводит к уменьшению амплитуд колебаний сил резания и обрабатываемой заготовки. [1].

**1. Работа шлифовального круга.** Одним из важных требований к СОЖ является обеспечение увеличения стойкости режущего инструмента и повышение качества обрабатываемой поверхности при соблюдении заданной точности обработанной поверхности.

В процессах абразивной обработки зерна циклически испытывают силовое, тепловое и химическое воздействия, в результате которых они подвергаются следующим видам изнашивания и затупления: истиранию с элементами микроскальвания, адгезионных и диффузионных взаимодействий с металлом заготовки и внешней средой с образованием площадок износа на вершинах; микроскальванию вершин режущих кромок с образованием новых острых кромок, что характерно для наиболее хрупких абразивных материалов и вырыванию из связки.

При абразивной обработке в той или иной мере всегда присутствуют все перечисленные виды изнашивания зерен. Преобладание какого-либо одного вида изнашивания зависит от физико-химических свойств зерен, прочности их удержания связкой инструмента, силовых и тепловых нагрузок, действующих на зерна, состава СОЖ и его расхода, а также от других факторов, определяющих характер контактного взаимодействия при обработке. Вид преобладающего изнашивания определяет режим работы абразивного инструмента [1].

Режим равномерного самозатачивания характеризуется микровыкрашиванием и разрушением абразивных зерен, вырыванием их из связки, которому предшествует затупление вершин с образованием площадок износа до тех пор, пока увеличивающаяся по мере изнашивания сила микрорезания не разрушит зерно или удерживающую его связку.

Режим работы абразивного инструмента с преимущественным затуплением характеризуется образованием площадок износа на вершинах зерен и налипанием на них металла (засаливание инструмента), микроскальванием и незначительным разрушением зерен. При этом размерный износ круга невелик, что является необходимым условием большинства операций точного шлифования, хонингования и суперфиниширования и в значительной степени определяется составом СОЖ, находящегося в зоне контакта зерна с заготовкой. Причем количество проникшего в эту зону СОЖ зависит в основном от двух факторов: скорости потока и вида контакта абразивного инструмента с заготовкой (линейного, поверхностного, точечного). Установлено, что если при давлении до 0,1 МПа жидкости, транспортируемой в зону обработки, электрокорунд проявляет способность к микроскопически заметной пластической деформации лишь при температуре около 1250 К, то при давлении 0,25 МПа он "течет" уже при нормальной температуре.

Следует также учитывать, что с повышением температуры до 1073..1273 К (средней контактной температуры шлифования стальных заготовок кругами на керамических связках) теплопроводность алмаза,

электрокорундов и большинства других твердых тел резко снижается. Недостаточный расход СОЖ через зону обработки и неправильно выбранный ее состав могут быть причиной уменьшения твердости абразивного зерна, что коренным образом изменит характер его износа [1].

**2. Применение кавитационных технологий для интенсификации шлифования.** В настоящее время одним из перспективных методов интенсификации химико-технологических процессов и повышения эффективности технологического оборудования признаются методы, основанные на энергетических воздействиях с применением различных физико-химических эффектов, в частности, использующих эффект кавитации в жидких средах.

Одним их эффективных методов интенсификации химико-технологических процессов в жидкостях является кавитационное воздействие на обрабатываемую среду [2]. Кавитация представляет собой средство локальной концентрации энергии низкой плотности в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков. В фазе разрежения акустической волны или за счет местного понижения давления при обтекании твердого тела в жидкости образуются каверны (кавитационные пузырьки), которые заполняются насыщенным паром данной жидкости. В фазе сжатия под действием повышенного давления и сил поверхностного натяжения каверна захлопывается, а пар конденсируется на границе раздела фаз. Через стены каверны в нее диффундирует растворенный в жидкости газ, который затем подвергается сильному адиабатическому сжатию. В момент схлопывания кавитационной каверны давление и температура газа локально могут достичь значительных величин (по расчетным данным до 100 МПа и до 10000 К соответственно) [2]. После схлопывания каверны в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве. При генерировании импульсных растягивающих напряжений в жидкости, присутствующие в ней зародыши кавитации (устойчивые паровые и газовые пузырьки малых размеров) начинают расти, образуя кавитационный кластер, форма и размеры которого определяются начальным спектром размеров кавитационных зародышей, характером прикладываемого напряжения и граничными условиями.

В кавитационную каверну могут проникать пары жидкости, растворенные газы, а также вещества с высокой упругостью пара и не могут проникать ионы или молекулы нелетучих растворенных веществ. Выделяющейся в процессе схлопывания каверны энергии достаточно для возбуждения, ионизации и диссоциации молекул воды, газов и веществ с высокой упругостью пара внутри кавитационной каверны. Эрозия твердого тела (разрушение поверхности), очистка поверхностей, диспергирование твердых частиц, растворение, экстрагирование, эмульгирование, гомогенизация, пенообразование осуществляются, в основном, за счет двух

характерных проявлений кавитации: ударных волн и кумулятивных струек, образующихся при схлопывании кавитационных пузырьков. Кумулятивные струйки разрушают поверхностные слои и поверхность твердого тела за счет кинетической энергии жидкости. Мелкие частицы твердого тела, размеры которых соизмеримы с поперечным сечением кумулятивных струй, увлекаются ими и дают дополнительный вклад в процесс разрушения поверхностных слоев и самих твердых частиц, находящихся в жидкости. В промышленности для кавитационного воздействия на жидкость используются гидродинамические, электродинамические, пьезоэлектрические, магнитострикционные и механические генераторы кавитации. В ультразвуковом диапазоне наиболее распространены пьезоэлектрические и магнитострикционные генераторы кавитации. В этих электроакустических преобразователях используется прямой магнитострикционный и пьезоэлектрический эффект в переменных магнитных и электрических полях. Диапазон частот возбуждения преобразователей является очень широким (от 8 до 44 кГц и выше). Ультразвуковые колебания от преобразователя передаются к обрабатываемым веществам через специальные трансформирующие и согласующие устройства (концентраторы, пластины и др.), заканчивающиеся излучающей поверхностью [3]. В гидродинамических кавитаторах типа роторных импульсных аппаратов, в основном, реализуется гидродинамическое и акустическое воздействие в жидкости за счет развитой турбулентности, пульсаций давления и скорости потока жидкости, интенсивной кавитации, ударных волн и вторичных нелинейных акустических эффектов. При вращении ротора, его каналы периодически совмещаются с каналами статора. В резонансных гидродинамических генераторах используется возбуждение колебаний резонирующих элементов в виде пластин, стержней или мембран набегающей струей жидкости. Колебания резонирующих элементов создают акустическое поле излучателя. Наиболее распространенной модификацией таких излучателей являются пластинчатые излучатели с консольным или двухточечным креплением вибрирующей пластины. Струя, вытекающая с большой скоростью из конусно-цилиндрического или щелевого сопла, попадает на пластину с клиновидным краем. При этом происходит срыв струи, и возникают вихревые пульсации и кавитация.

Множество динамически развивающихся пузырьков можно рассматривать как своего рода микротрансформаторы, преобразующие аккумулированную в системе потенциальную энергию в кинетическую энергию жидкости, распределенную дискретно в пространстве и во времени [4].

В общем виде спектр влияния кавитации на обработку заготовок шлифованием можно представить схемой, показанной на рисунке 19.

За счет кавитации снижается трение в зоне резания. Уменьшение трения приводит к снижению силы резания, температуры в зоне резания, что в свою

очередь уменьшает упругие отжатия заготовки, степень уплотнения стружки, увеличивает плотность и размеры сети капилляров. Кавитация способствует пластической деформации, что уменьшает образование заусенцев и, как следствие, силы резания.

Кавитационная обработка жидкости – высокоэнергетическая обработка, способствующая снижению наростообразования на периферии режущего инструмента, разрыву высокомолекулярных соединений, уменьшение размеров которых облегчает их попадание в субмикрокапилляры.

За счет микровзрывов парогазовых каверн, интенсификации испарения и конденсации, увеличения количества и размеров капилляров в заготовке улучшаются условия попадания СОЖ в микрокапилляры. Увеличение площади контакта заготовки приводит к повышению смачивающей способности, которая способствует повышению всех функциональных действий СОЖ.

В целом кавитационная обработка приводит к повышению точности, качества при неизменной производительности обработки.

В настоящее время кавитационная обработка СОЖ находит применение при приготовлении и восстановлении эмульсий [5], при воздействии на процессы резания, правки и очистки шлифовальных кругов. В работе Е.С. Киселева [6] подробно рассматриваются вопросы использования энергии ультразвукового поля при механической обработке. При этом указывается на следующие эффекты: кавитацию; звукокапиллярный эффект, при котором обеспечивается глубокое проникновение жидкости в капилляры и узкие щели под действием ультразвуковых колебаний; эффект снижения трения и увеличения пластичности смещений относительно граничной поверхности; ультразвуковое распыление жидкости в колеблющемся слое жидкости или в ультразвуковом фонтане на высоких частотах.

Перспективным является получение данных эффектов при использовании гидродинамических способов воздействия на СОЖ за счет преобразования энергии потока жидкости в кавитационное воздействие на среду с целью интенсификации процессов при шлифовании.

**3. Прерывистое шлифование.** Известно, что процесс прерывистого шлифования в сравнении со сплошным обеспечивает снижение максимальной температуры примерно на 30-40%, что подтверждается теоретическими расчетами, выполненными в работах [7, 8, 9].

Анализ этих исследований при прерывистом шлифовании показал, что в фазу отсутствия контакта круга с обрабатываемой поверхностью охлаждение ее в основном обеспечивается теплопроводностью этой поверхности. При этом высокая интенсивность оттока тепла от поверхности в тело детали обусловлена большим градиентом температуры после контакта с кругом в направлении нормальном к обрабатываемой поверхности. Дополнительный отток тепла от нагретой поверхности обеспечивается за счет конвективного

теплообмена с окружающей средой (воздухом или смазочно-охлаждающей жидкостью).

Однако охлаждающее действие СОЖ оказывает недостаточное влияние на отбор тепла в фазу отсутствия контакта круга с деталью. Это объясняется не только меньшей интенсивностью теплопередачи конвективным теплообменом по сравнению с теплопроводностью, но и тем, что попадание СОЖ в пространство между выступами прерывистой поверхности круга затруднено. Поток СОЖ в пространство между выступами круга препятствует поток воздуха, увлекаемого кругом, который вращается с большой скоростью. Для обеспечения интенсивной подачи СОЖ в пространство между режущими выступами круга делаются попытки подвода СОЖ через круг. Это достигается, например, подачей СОЖ через корпус сборных абразивных сегментов круга в промежутки между выступами. Кроме этого, повышение эффективности возможно при подаче СОЖ непосредственно в зону контакта выступа круга с деталью через поры круга.

Была получена формула для определения температуры в зоне резания при круглом наружном прерывистом шлифовании с учетом подвода СОЖ при ее активном попадании или отсутствии между абразивными брусками.

На рисунке 1 показаны графики сравнения процесса шлифования без применения охлаждения, а также с охлаждением сухим воздухом и напорной струей жидкости на водной основе.

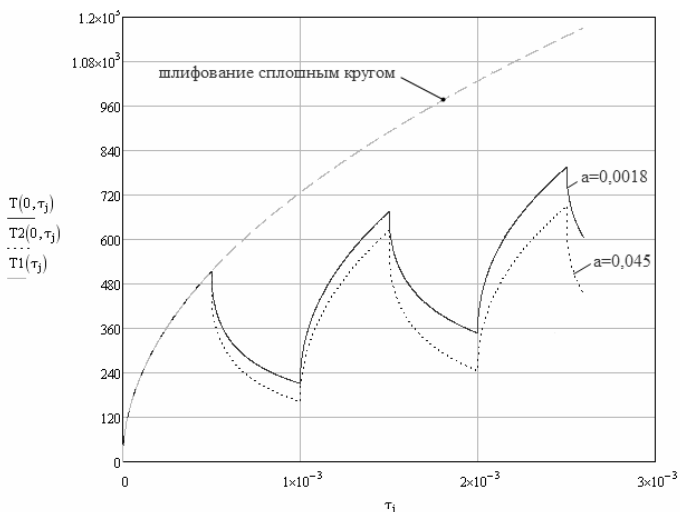


Рис. 1 – Сравнение температуры нагрева поверхности заготовки

Результаты проведения компьютерного эксперимента с применением полученных формул показали, что в обычных условиях охлаждающее действие СОЖ позволяет незначительно (примерно до 10%) уменьшить

максимальную температуру при прерывистом круглом наружном шлифовании. Интенсифицируя подачу СОЖ через круг или корпус сборного круга, можно прогнозировать возможность уменьшения максимальной температуры шлифуемой поверхности как за счет охлаждающего действия СОЖ, так и за счет ее комплексного физико-химического воздействия [10].

**4. Нанотехнологии в приготовлении СОЖ.** Использование нанотехнологий позволит качественно поменять физико-химическое состояние СОЖ и эффективность ее воздействия на процессы резания. Например, наночастицы дисульфида  $\text{MoS}_2$  хорошо известны исключительно в трибологических процессах. Такие добавки предназначены для минимизации расхода СОЖ при шлифовании чугуна. Результаты показали, что жидкости с применением новых  $\text{MoS}_2$ -наночастиц значительно понижают тангенциальную силу шлифования и трение между поверхностями круга и заготовки, возрастает коэффициент шлифования и во всех случаях повышается эффективность процесса шлифования при минимальном расходе СОЖ [11]. На рисунке 2 показана гистограмма сравнения нескольких видов СОЖ с различной концентрацией наночастиц  $\text{MoS}_2$  по показателю – коэффициент шлифования.

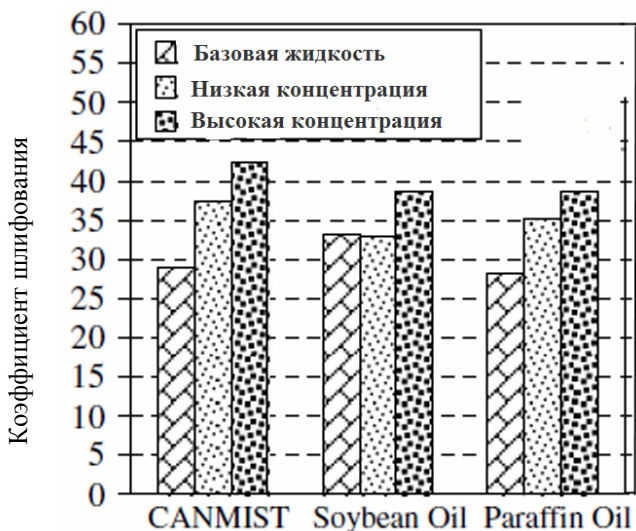


Рис. 2 – Влияние наночастиц  $\text{MoS}_2$  на коэффициент шлифования

Использование наночастиц при подготовке СОЖ должно способствовать увеличению коэффициента шлифования. А применение при этом кавитационной обработки повысит эффективность шлифования. Поэтому данное направление является перспективным, но необходимы теоретические обоснования и экспериментальная проверка.

### 5. Технологическая система использования СОЖ при шлифовании.

Использование кавитации для активации СОЖ при шлифовании позволит наряду с улучшением физико-химического состояния эмульсии, повысить эффективность процесса резания и стойкость инструмента.

На рисунке 3 показана структура технологической системы использования СОЖ в шлифовальном станке. Исходными параметрами являются конструктивные особенности используемых систем и физико-химическое состояние выбранной СОЖ.

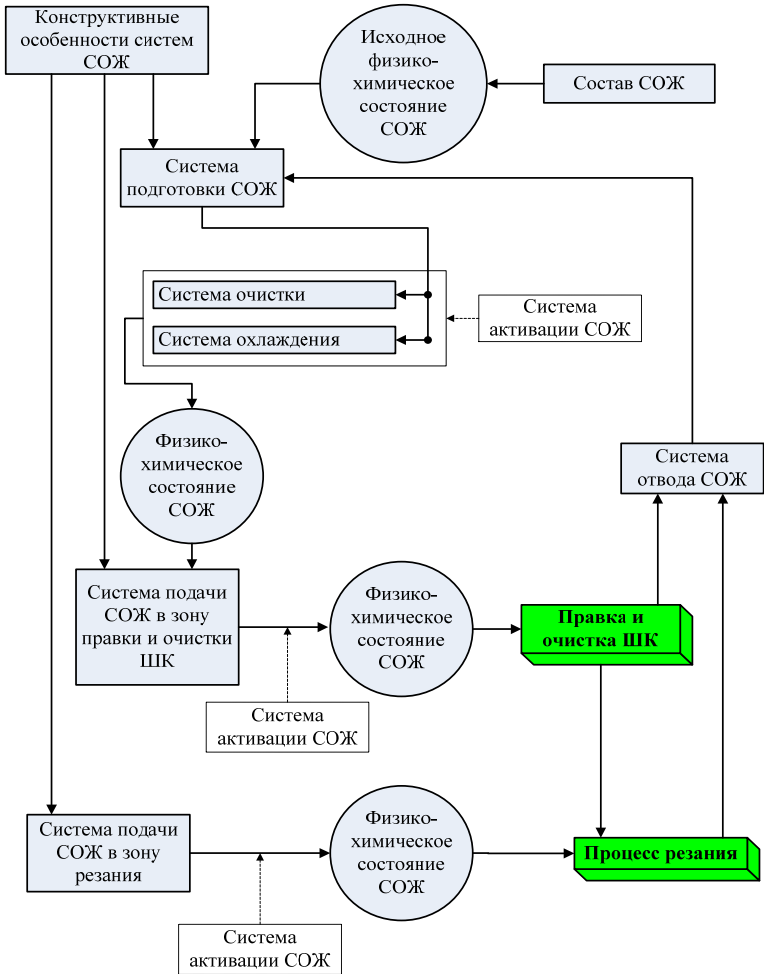


Рис. 3 – Структура технологической системы использования СОЖ при шлифовании



Индивидуальная система подготовки СОЖ включает в себя элементы очистки, охлаждения и устройства, обеспечивающие подачу эмульсии в зону резания, правки и очистки шлифовального круга. С целью обеспечения мелкодисперсной и гомогенной СОЖ в системе подготовки могут быть установлены элементы кавитационной обработки: пассивные или активные. Пассивные устанавливаются после насоса и могут включать в себя устройства перемешивания и кавитационные насадки. Активные могут быть в виде гидродинамического активатора, выполняющего роль и насоса и кавитатора одновременно. Такая подготовка СОЖ перед использованием в дальнейших процессах обеспечивает потенциальные возможности повышения эффективности обработки и увеличения бактериологической стойкости СОЖ.

Выполним анализ элементов системы с целью обеспечения рационального построения и эффективного воздействия на процессы резания, правки и очистки шлифовального круга.

**6. Особенности подачи СОЖ в зону резания.** Многолетние исследования огромного числа ученых, так же как и практика использования СОЖ при шлифовании убедительно доказывают, что действие СОЖ в наибольшей степени проявляется только при условии ее проникновения непосредственно в зону взаимодействия вновь образующихся на заготовке, круге и стружке поверхностей. Использование избыточного количества СОЖ не приводит к дополнительным положительным результатам, а лишь повышает производственные расходы. Поэтому несомненный научный и практический интерес представляют исследования, направленные на определение условий своевременного и надежного транспортирования СОЖ к образующимся при шлифовании ювенильным поверхностям при использовании минимально необходимых расходов СОЖ.

Анализ механизмов смазывающего, смачивающего и проникающего, охлаждающего, моющего, режущего и пластифицирующего действия СОЖ позволяет сделать вывод о том, что для повышения эффективности действия СОЖ необходимо повышать ее давление и скорость течения в зонах контакта абразивных зерен и металла заготовки [12]. Отмечается, что при шлифовании без СОЖ взаимодействие абразивного инструмента и заготовки происходит в более экстремальных условиях, чем при шлифовании с СОЖ. В отсутствие защитных пленок и ряда эффектов, обеспечиваемых при использовании СОЖ, значительно интенсифицируются контактные физико-химические явления. Под воздействием высоких температур и давлений в зоне резания происходит адгезионное схватывание абразива с обрабатываемым материалом, взаимная диффузия химических элементов, увеличение работы трения связи и абразивных зерен с обрабатываемой заготовкой и, как следствие, разупрочнение и разрушение абразивных зерен, а также формирование поверхностного слоя детали с неблагоприятными эксплуатационными характеристиками.

Наиболее распространенным способом подачи СОЖ является полив свободной струей. Но этот способ подачи жидкости в зону резания обладает рядом недостатков: большой расход жидкости (10-16 л/ч), разбрызгивание, слабое смазочное действие.

Некоторые исследователи считают наиболее эффективным способ охлаждения – охлаждение распыленной эмульсией, которая подается в зону резания со стороны задней поверхности инструмента, причем при выходе из сопла воздушно-жидкостная смесь расширяется, вследствие чего происходит некоторое понижение ее температуры. Когда частицы жидкости попадают на нагретые поверхности заготовки и инструмента, они мгновенно испаряются и отводят большое количество теплоты. Достоинством этого способа охлаждения является то, что при небольшом расходе жидкости эффективно используются ее смазочные и охлаждающие свойства, а также происходит увеличение стойкости инструмента.

Экспериментально установлено, что шлифовальный круг на керамической связке обладает хорошей вентилирующей способностью [12]. Из-за значительной шероховатости его поверхностей создаются вихревые воздушные потоки, препятствующие проникновению СОЖ в зону шлифования. Возможности подвода СОЖ в зону резания в основном определяется смачиваемостью поверхности детали жидкостью, ее затягиванием вследствие капиллярного эффекта и микровибраций высокой частоты, а также благодаря некоторым гидродинамическим явлениям, аналогичным явлениям в гидравлическом клине.

При подаче СОЖ гидроаэродинамическим способом энергия воздушных потоков, создаваемых вращающимся кругом, используется для повышения скорости движения жидкостного потока относительно рабочей поверхности круга и шлифуемой заготовки. С помощью специальных устройств активированный поток СОЖ направляется на рабочую поверхность круга в область его контактирования с заготовкой. Известно достаточно много разновидностей гидроаэродинамического способа подвода СОЖ и множество конструкций кожухов, торцевых насадков и т.п., позволяющих разгонять СОЖ за счет вращения инструмента и одновременно перемещать ее к зоне обработки. Важнейшей положительной особенностью данных способов является то, что повышение скорости движения СОЖ относительно заготовки, обеспечивается за счет использования самого вращающегося абразивного круга. Общим недостатком известных конструкций является то, что, несмотря на разгон СОЖ практически до скоростей резания, они не обеспечивают гарантированной транспортировки СОЖ ювенильным поверхностям заготовки.

При подаче СОЖ напорной струей давление жидкости в соплах насадок повышают до 1,0-1,5 МПа, а при скоростном и силовом шлифовании до 130-150 МПа и более. Однако указанные значения давления являются давлением жидкости в соплах, а не в зоне взаимодействия круга и заготовки, что совсем не одно и то же. Использование повышенного давления СОЖ в соплах

позволяет повысить скорость движения потока СОЖ относительно заготовки, что интенсифицирует отвод тепла от шлифуемой заготовки и облегчает преодоление воздушных потоков, генерируемых вращающимся инструментом, но не гарантирует надежного попадания СОЖ в зону резания.

Подача СОЖ может выполняться по радиальным каналам в абразивном материале или в корпусе сборного шлифовального круга (см. рис. 4).

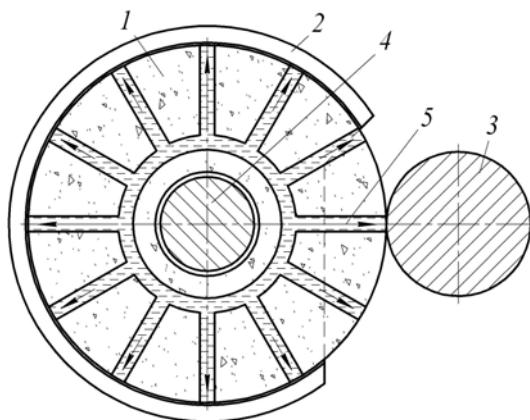


Рис. 4 – Подача СОЖ через каналы в абразивном материале

1 – абразивный круг; 2 – защитный кожух; 3 – заготовка;

4 – шпиндель; 5 – каналы для подвода СОЖ

В этом случае эмульсия попадает на деталь перед началом резания абразивными зернами. Подачу СОЖ через каналы в шлифовальном круге применяют пока очень редко, так как промышленность не выпускает круги с радиальными или наклонными каналами. Однако способ подачи СОЖ через каналы в шлифовальном круге оказывается весьма перспективным: СОЖ подается непосредственно в зону контакта шлифовального круга с деталью, в результате чего эффективно осуществляется смазочное и охлаждающее действие СОЖ, а расход СОЖ во много раз меньше, чем при подаче СОЖ свободно падающей струей, что, в свою очередь, позволяет уменьшить мощность насосной станции системы охлаждения станка. СОЖ, поступающая через каналы на рабочую поверхность круга, равномерно смачивает ее, способствуя созданию на абразивных зернах прочных защитных пленок и осуществляя моющее действие, хотя и в меньшей степени, чем при подаче СОЖ через поры круга.

Если охлаждающее действие СОЖ, подаваемой через каналы круга, окажется недостаточным, то можно применить комбинированный способ: через каналы круга подавать СОЖ, обладающую высокими смазочными

свойствами, а снаружи – свободно падающей струей подавать другую СОЖ, имеющую высокие охлаждающие свойства. Однако для определения работоспособности новых шлифовальных кругов необходимы дальнейшие исследования.

Значительным преимуществом подвода СОЖ через поры круга является то, что при использовании небольшого количества СОЖ последняя в виде химически и физически связанной жидкости достигает зоны непосредственного контакта абразивных зерен и шлифуемого материала. Проникающая способность СОЖ значительно усиливается за счет ее распыления при выбросе из круга и благодаря значительной интенсификации фильтрационных процессов под воздействием ультразвукового капиллярного эффекта.

Различными авторами отмечается, что использование метода подвода СОЖ через поры круга обеспечивает снижение контактной температуры в 2 раза и повышение производительности обработки в 1,3 – 1,8 раза при использовании бесприжоговых режимов обработки [12].

Несмотря на большое разнообразие конструкций и способов подвода СОЖ через поры в инструменте, существует ряд недостатков, препятствующих широкому распространению метода. Отсутствие готовых сборных кругов и систем подачи СОЖ, а также необходимость модернизации шлифовального оборудования не позволяют широко использовать этот метод на производстве. В связи с вытеканием жидкости на торцевую поверхность в центральном сечении круга выделяется больше жидкости, чем у кромок круга. Вследствие этого на участки, на которых происходит наиболее интенсивный сьем металла, поступает меньшее количество охлаждающей жидкости. При большом диаметре абразивной части, возникает необходимость изолировать торцы для предотвращения непродуктивных потоков СОЖ. Необходима тщательная очистка СОЖ, т.к. при засорении пор эффективность охлаждения снижается и возможно возникновение дисбалансов абразивного инструмента.

Дальнейшие работы по использованию методов подачи СОЖ через поры должны быть направлены на решение перечисленных выше проблем.

**7. Система подвода СОЖ в зону резания.** В работах Е.С. Киселева [6, 13] для интенсификации процессов, происходящих в зоне резания, используется наложение ультразвуковых колебаний при подаче СОЖ через насадки, установленные на торцах шлифовального круга. Это существенно изменяет механизм проникновения СОЖ в зоны шлифования и правки: жидкость выбрасывается из пор круга непосредственно в зону его контакта с заготовкой. При этом отмечается, что функциональные действия СОЖ, как правило, усиливаются и оказывают существенное влияние на производительность и качество поверхностного слоя обработанных деталей. Обращается внимание на то, что кавитация СОЖ в зоне резания способна коренным образом изменить условия формообразования новых поверхностей. Наложение колебаний способствует ускорению движения

СОЖ сквозь сеть капиллярных каналов к зонам контактного взаимодействия инструмента с материалом заготовки. Акустическое распыление СОЖ с помощью энергии ультразвукового поля позволяет создать воздушно-жидкостные аэрозоли, размеры капель жидкости в которых соизмеримы с размерами поперечных сечений образующихся при резании капилляров.

В предлагаемой нами системе подачи СОЖ в зону резания (см. рис. 5) используется подвод ее по радиальным каналам кассеты сборного шлифовального круга. На выходе канала установлены насадки, обеспечивающие активацию СОЖ за счет гидродинамической кавитации. В дальнейшем активированная СОЖ через поры шлифовального круга поступает на его периферию.

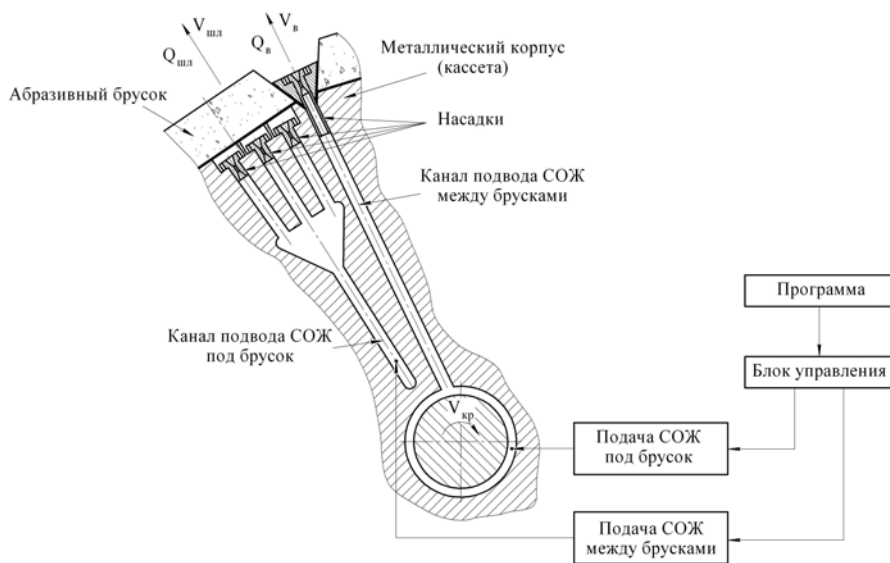


Рис. 5 – Подвод СОЖ по каналам шлифовального круга

Для определения энергетических и гидродинамических параметров потоков СОЖ, обеспечивающих возникновение кавитации, следует провести соответствующие исследования.

Увеличение скорости движения СОЖ через поровое пространство круга и соответствующее увеличение ее расхода через зону обработки является результатом действия ударных волн от захлопывающихся кавитационных полостей, локализованных в сечении поровых каналов. Оптимизация конструктивных параметров насадок, гидродинамических параметров потока, спектра частот колебаний и диапазона амплитуд звукового давления должны обеспечить эффективную кавитацию жидкости.

Для выбора параметров кавитационных насадок и определения условий возникновения кавитации были проведены экспериментальные исследования на проточном стенде. Схема данного экспериментального стенда показана на рисунке 6.

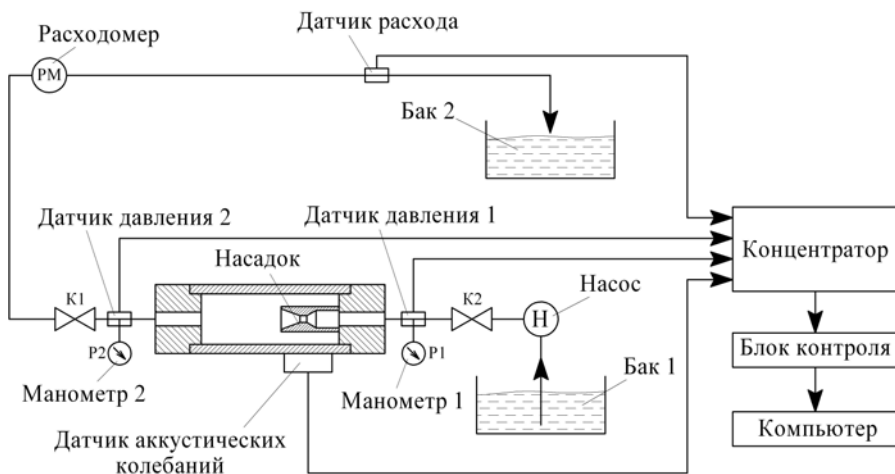


Рис. 6 – Схема экспериментального стенда

Рабочая жидкость из бака 1 подается насосом на испытываемый кавитатор, который изготовлен из прозрачного материала и установленный в стеклянной трубе, и далее к баку 2. Регулировка параметров потока выполнялась кранами K1 и K2. Из бака 2 брались пробы для анализа физико-химического состояния эмульсии после обработки. За протеканием процесса на выходе кавитатора в стеклянной трубе велись визуальные наблюдения с фиксацией в журнале.

При проведении экспериментов использовалась автоматизированная система контроля. От датчиков давления, расхода и акустических колебаний сигналы поступали в концентратор и через блок контроля в компьютер. Обработка информации выполнялась по специальным программам с выводом таблиц и графиков.

В качестве контрольных приборов для определения текущих значений давления на входе и выходе использовались манометры (P1 и P2), а расход определялся по счетчику (PM).

На рисунке 7 показан измерительный блок с кавитатором и датчиком давления. После прохождения кавитационной обработки жидкость поступает на слив обратно в бак. По результатам проведенных испытаний определялись параметры кавитаторов и режимы работы, обеспечивающие интенсивную кавитацию в потоке.



Рис. 7 – Измерительный блок

При подаче СОЖ сквозь поры вращающегося шлифовального круга она может перемещаться по поровым каналам под действием гравитационных и капиллярных сил. При определенном значении центробежной силы часть физически связанной СОЖ под действием вибраций также может перемещаться по поровым каналам, однако ее большая часть, а также вся химически связанная СОЖ в виде адсорбционных пленок, проникает в точки непосредственного контакта АЗ с заготовкой и правящим инструментом [6]. Проводимость круга по отношению к СОЖ характеризуется его проницаемостью. По мере фильтрации даже чистой СОЖ гидравлическое сопротивление круга непрерывно возрастает. После прекращения подачи СОЖ и возобновления ее через некоторое время сопротивление оказывалось близким к исходному. Это явление, называемое фильтрационным эффектом, обусловлено образованием в поровых каналах абразивных кругов паровоздушных пузырьков, которые или выносятся СОЖ из поровых каналов, или закупоривают их, увеличивая гидравлическое сопротивление круга [6].

Для исключения фильтрационного эффекта необходимо либо увеличить давление подаваемой СОЖ, либо подавать ее с наложением УЗК. Последнее вызывает в поровом пространстве круга кавитацию и способствует, с одной стороны, интенсивному захлопыванию паровоздушных пузырьков, с другой стороны – интенсификации капиллярного подъема СОЖ по микроканалам порового пространства и уносу паровоздушных пузырьков при одновременном увеличении расхода жидкости из-за уменьшения гидравлического сопротивления в порах круга.

Известно, что фильтрации СОЖ сквозь поровое пространство абразивного круга препятствует образование паровоздушных пузырьков в его порах. Предотвратить этот процесс можно путем увеличения жидкостного давления [14] или возбуждением кавитации. Однако увеличение жидкостного

давления, в свою очередь, препятствует образованию кавитации. При одновременном увеличении жидкостного давления и возбуждении кавитации в СОЖ эффект от наложения ультразвуковых колебаний на фильтрующуюся жидкость проявляется лишь в области относительно невысокого давления подаваемой СОЖ (избыточное давление до 0,3 МПа). Использование высоконапорных систем подачи СОЖ на практике связано с необходимостью резкого увеличения производственных площадей и энергозатрат. Использование кавитации в низконапорных системах подачи СОЖ, также обеспечивающее повышение эффективности процессов шлифования и правки, свободно от указанных недостатков.

**8. Система правки шлифовального круга.** Известно также, что состояние рабочей поверхности шлифовального круга, сформированное при его правке, оказывает доминирующее влияние на процесс шлифования. От качества правки зависят теплообразование в зоне шлифования, период стойкости круга и производительность обработки, параметры качества шлифованных деталей.

Одним из важнейших факторов, обеспечивающих высокую производительность шлифования и заданные характеристики качества шлифованных деталей, является рациональное применение СОЖ, которые коренным образом изменяют характер протекания контактных взаимодействий при шлифовании, оказывают позитивное влияние на работоспособность шлифовальных кругов и правящих инструментов.

Для восстановления геометрии рабочей поверхности шлифовального круга, увеличения стойкости, уменьшения его засаливания в настоящее время используются различные методы и способы правки и очистки. Способы правки зависят от конструкции станка и требований к рабочей поверхности ШК. Системы, обеспечивающие подвод СОЖ при правке, определяются способом правки. От условий правки зависят расход круга и правящего инструмента и состояние их рабочих поверхностей, а следовательно, период стойкости круга, производительность и себестоимость обработки, качество шлифованных деталей.

Расход шлифовальных кругов на правку составляет 90 – 95 % от общего их расхода, а затраты на правку достигают 70 % от себестоимости операций [15].

Известны два основных способа правки, различающихся совокупностью формообразующих движений правящего инструмента и шлифовального круга: точением и шлифованием. К первому относят правку алмазом в оправе, алмазной иглой, алмазным карандашом, алмазной пластиной, ко второму – правку алмазным кругом или роликом.

При правке способом точения происходит сверхскоростное точение хрупкого абразивного материала шлифовального круга алмазным резцом (правящим инструментом). Возникающие в процессе правки радиальные силы, вследствие незначительной площади контакта алмаза с кругом по



величине невелики, порядка 20 – 100 Н [16] и не могут вызывать заметных упругих деформаций, влияющих на точность формы круга. Поэтому способ точения обеспечивает удовлетворительную точность правки при небольшой глубине разрушения поверхностного слоя и благодаря простоте реализации.

Учитывая, что коэффициент трения АЗ шлифовального круга и алмазов правящего инструмента, а также угол деформации и скола АЗ в существенной степени определяются смазочными свойствами среды, находящейся в контактной зоне (воздух, аэрозоль, СОЖ), можно утверждать, что критическая глубина правки является величиной переменной. Изменяя условия реализации потенциальных свойств СОЖ и ее химический состав можно оказывать влияние на состояние рабочей поверхности шлифовального круга.

Результаты правки можно охарактеризовать макро- и микроэффектами. Макроэффект обусловлен формой правящего инструмента и условиями правки: во время правки АЗ срезаются и разрушаются режущей частью правящего инструмента, описывающей определенную траекторию относительно АЗ, находящихся на рабочей поверхности круга. Микроэффект проявляется в откалывании от АЗ отдельных частиц с образованием новых режущих кромок. Острота кромок зависит от хрупкости абразива и условий правки. В случае тонкой правки от АЗ откалываются очень мелкие частицы, в результате чего на зернах образуется развитый микро- и субмикрорельеф. При грубой правке от АЗ откалываются большие частицы или зерна выламываются из связки полностью, обнажая новые зерна с новыми острыми режущими кромками, образуя при этом развитый режущий макрорельеф круга.

Сочетание макро- и микроэффектов в общем случае создает на рабочей поверхности круга высокую плотность распределения малых режущих кромок при тонкой правке и низкую плотность распределения режущих кромок при грубой правке. При этом на результирующее состояние рабочей поверхности круга основное влияние оказывают геометрия инструмента, производящего правку, элементы режима и кинематика правки.

Влияние СОЖ на процесс правки проявляется в уменьшении контактной температуры в зоне правки, а следовательно, уменьшается линейное расширение алмаза, относительная стабилизация его теплопроводности и твердости, что в свою очередь уменьшает вероятность возникновения растягивающих напряжений в алмазе, его графитизации и абразивного износа. Использование СОЖ приводит к изменению коэффициента трения контактирующих зерен круга и правящего инструмента. При этом возможно изменение критической глубины правки, определяющей характер процесса обновления рабочей поверхности шлифовального круга.

На основе вышеизложенного можно наметить следующие пути интенсификации охлаждения зоны правки: использование в качестве СОЖ жидкости, обладающей высокой теплопроводностью, теплоемкостью, плотностью и наименьшей кинематической вязкостью, хорошими

смазочными свойствами; создание условия перехода СОЖ в смежное агрегатное состояние; увеличение скорости относительного перемещения объектов; целенаправленное изменение теплофизических характеристик контактирующих объектов.

Следовательно, активация СОЖ при правке, создавая благоприятные условия резания правящим инструментом, способствует формированию необходимых условий работы ШК. В предлагаемой технологической системе в зону правки может подаваться СОЖ, активация которой выполняется в общей системе после ее очистки и охлаждения (см. рис. 3). Также, для улучшения условий обновления режущей поверхности ШК гидродинамическая кавитация может выполняться в специальной насадке непосредственно перед подачей на алмазный резец (см. рис. 8). При этом для улучшения аэродинамических условий на периферии ШК используется специальная насадка с экраном, уменьшающим влияние воздушных потоков.

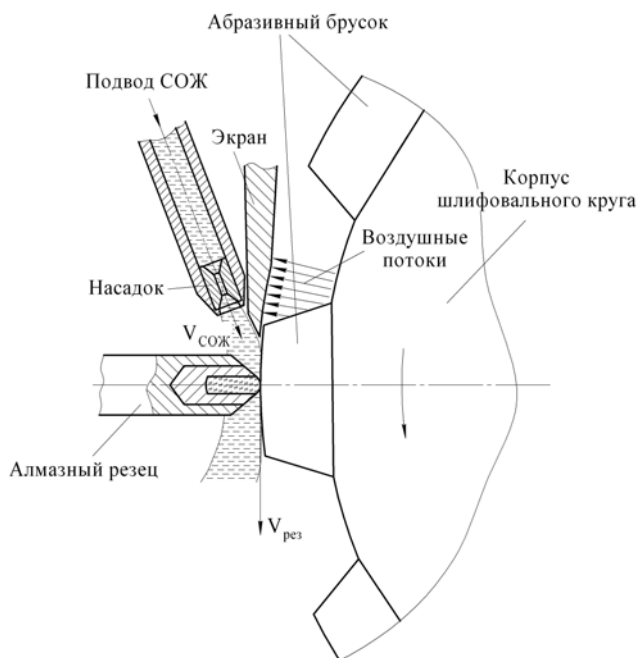


Рис. 8 – Подвод СОЖ при правке

**9. Система очистки шлифовального круга.** Одной из причин повышения сил резания, увеличения температур в зоне контакта, т.е. потери режущей способности шлифовальным кругом является засаливание рабочей поверхности и снижения коэффициента резания. Установлено, что основной причиной налипания частиц материала (металла) заготовки на абразивные

зерна в процессе шлифования является схватывание [17]. Существует взаимосвязь интенсивности налипания с давлением в контактных зонах и локальной температурой.

Интенсивность засаливания рабочей поверхности круга при шлифовании, наряду с другими факторами, можно снизить путем предотвращения непосредственного контакта ювенильных поверхностей абразивных зерен (АЗ) и материала заготовки путем создания на них экранирующих пленок достаточной толщины и прочности, уменьшения теплосилового напряженности процесса за счет выбора оптимальной характеристики ШК, режимов обработки, состава и техники применения СОЖ [17].

Основной причиной потери режущей способности шлифовальных кругов при обработке заготовок из пластичных сталей и сплавов является засаливание их рабочих поверхностей вследствие налипания частиц материала заготовки на АЗ (первопричина) и заполнения пространства между зернами и пор круга отходами шлифования. В работе [17] показано, что при шлифовании заготовок из пластичных материалов для снижения локальных температур и интенсивности налипания частиц материала заготовки на АЗ следует снижать и стабилизировать коэффициент трения зерна о заготовку и износ АЗ, использовать СОЖ, обладающие высокими смазочными свойствами и АЗ из материала с большими значениями коэффициента теплопроводности и теплоемкости. Здесь же рассмотрено влияние налипов на режущую способность АЗ круга, в том числе на критическую глубину микрорезания, коэффициент навалов и силы микрорезания.

Установлено, что режущие свойства ШК существенно изменяются при варьировании техникой подачи СОЖ в зону правки [17], причем сформированный при правке рельеф рабочей поверхности круга оказывает доминирующее влияние на его режущую способность и показатели шлифования лишь на начальном этапе работы круга, с течением времени это влияние нивелируется.

Интенсивность функциональных действий СОЖ в значительной степени определяется способом и техникой их применения. В плане интенсификации смазочного и моющего действий СОЖ по отношению к ШК наиболее эффективны струйно-напорный внезонный (СНВС) и гидроаэродинамический способы подачи СОЖ, а также ультразвуковая (УЗ) очистка рабочей поверхности круга [17].

Установлено, что механическая очистка рабочей поверхности ШК позволяет увеличить его период стойкости до 70 %, уменьшить расход на 45 %, стабилизировать теплосиловую напряженность шлифования и повысить качество шлифованных деталей. Гидроочистка позволяет увеличить период стойкости ШК до 2,5 раз или на 25..35 % повысить производительность обработки. Ультразвуковую очистку ШК и подачу СОЖ к его торцу целесообразно осуществлять с использованием амплитудно-модулированных колебаний. УЗ техника подачи СОЖ к торцу ШК позволяет увеличить период

стойкости ШК до трех и более раз, или поднять на 50.60 % производительность обработки при сохранении или улучшении характеристик качества шлифованных деталей.

Считается [17], что наиболее радикальными средствами повышения режущей способности ШК за счет минимизации их засаливания представляются механическая очистка их рабочих поверхностей абразивными брусками на эластичной связке, подача СОЖ с наложением ультразвуковых колебаний и гидроочистка кругов.

Использование кавитации для интенсификации моющего действия СОЖ с целью уменьшения снимаемого при правке слоя абразива реализовано в способах правки шлифовального круга по авторским свидетельствам (а.с.) 1523320 и 1710317. Аналитически обоснована [17] и экспериментально подтверждена возможность использования гидродинамической кавитации, возникающей в радиальных отверстиях вращающегося алмазного ролика, для усиления моющего действия СОЖ. При этом оптимизированы окружная скорость ролика, длина и диаметр канала, через который подается СОЖ в зону правки, и величины зазора между роликом и кругом.

Для гидроочистки ШК предложено использовать эрозионное воздействие потока СОЖ, в которой при определенных условиях возникает гидродинамическая кавитация. При этом используются устройства, в которых кавитация возникает в радиальных отверстиях вращающегося ролика и в отверстиях с сужающе-расширяющимися участками неподвижного сопла (см. рис. 9). Высокая эффективность амплитудно-модулированных колебаний при УЗ – очистке круга и подаче СОЖ к его торцу является следствием интенсификации очистки круга и пропитки его порового пространства жидкостью за счет вовлечения в процесс кавитации большего количества пузырьков [18].

Понижение уровня колебаний в зоне контакта круг – правящий инструмент, как и при шлифовании, вероятно, может быть достигнуто в том случае, когда СОЖ создаст пленки, разделяющие трущиеся поверхности зерен круга и правящего инструмента (демпфирующее действие [19]). Снижение уровня колебаний сил правки приведет к уменьшению амплитуды и частоты колебаний в технологической системе.

Как и при шлифовании, эффективность функциональных действий СОЖ во многом определяется техникой подачи их в зону правки. Изменяя условия транспортирования СОЖ в зону правки, можно усиливать те или иные функциональные действия одной и той же СОЖ. Так, например, смазочное действие СОЖ можно усилить путем использования УЗ-техники подачи СОЖ в зону правки через клиновые полуоткрытые насадки, расположенные с торцов круга [13].

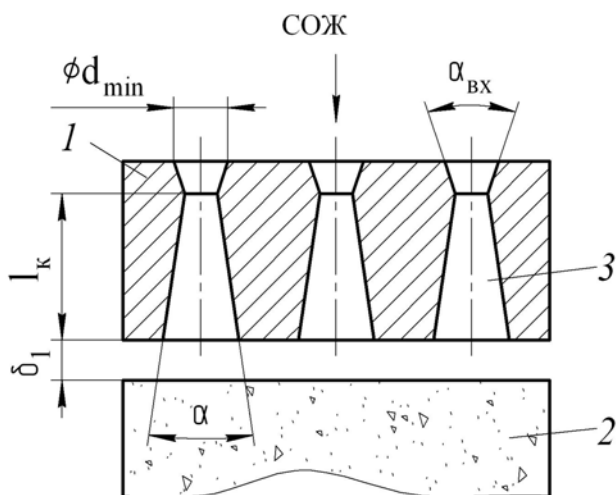


Рис. 9 – Подвод СОЖ через неподвижные сопла  
 1 – сопло; 2 – шлифовальный круг; 3 – отверстие

Одним из способов очистки поверхности шлифовального круга от засаливания предполагается использование кинетической энергии потока для создания механических колебаний упругих пластин. С помощью этих пластин создаются акустические колебания высокой частоты, обеспечивающие кавитационные процессы в потоке СОЖ. Используется энергия, выделяемая при схлопывании парогазовых каверн и образовании кумулятивных микроструй. Воздействие гидроударов на рабочую поверхность ШК позволяет повысить эффективность очистки поверхности ШК и способствует удалению отходов шлифования.

Таким образом, нами предложена конструкция устройства для подвода смазочно-охлаждающей жидкости (см. рис. 10), которое состоит из металлического корпуса 1, на поверхности которого закреплены элементы 2 (лепестки), изготовленные из упругого материала. Лепестки могут быть выполнены в форме, например, прямоугольников. Необходимо обеспечить максимально возможное приближение упругих лепестков к шлифовальному кругу 3. Для регулирования расстояния  $\delta$  предназначена центральная гайка 4. Верхняя и нижняя гайки 4, пружины 5 и шарниры 6 с шарнирными чашками 7 предназначены для изменения угла наклона устройства подвода смазочно-охлаждающей жидкости относительно периферии круга, которое установлено в металлическом корпусе 8 через втулки 9 и 10.

При вращении шлифовального круга 3 создаются гидроаэродинамические потоки, которые оказывают силовое воздействие на упругие лепестки за счет кинетической энергии движущейся воздушно-эмульсионной смеси. При вращении шлифовального круга в полости между

ним и устройством подвода СОЖ возрастает кинетическая энергия потока. В момент гидроудара жидкости об упругие лепестки последние отклоняются от положения равновесия, вследствие чего основная часть кинетической энергии жидкости переходит в потенциальную энергию упругого деформирования лепестков, которые затем отбрасывают жидкость, перенаправляя ее на поверхность шлифовального круга. Таким образом, СОЖ преодолевает сопротивление воздушного потока, попадает на периферию круга и в зону резания, обеспечивая смазочные, охлаждающие, чистящие и другие действия. При колебаниях лепестков в потоке жидкости возникает гидроакустическая кавитация, что способствует интенсификации ее перемешивания, активации протекания физико-химических процессов, а также вырыванию стружки с поверхности шлифовального круга.

Регулирование расстояния  $\delta$  между металлическими лепестками и шлифовальным кругом, вследствие его износа, можно выполнять либо автоматически по командам системы управления станком через специальный механизм (на рисунке не показан).

Такой способ очистки ШК позволяет существенно повысить производительность обработки и стойкость инструмента.

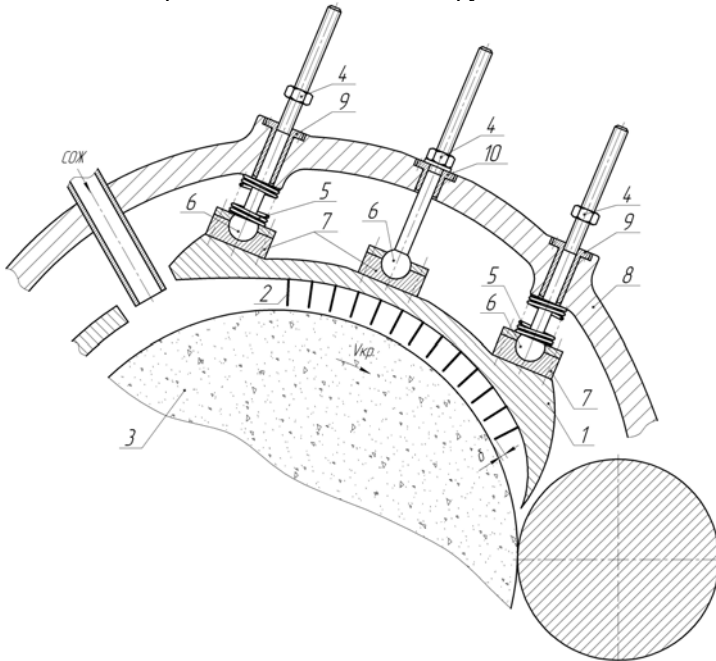


Рис. 10 – Устройство для подвода смазочно-охлаждающей жидкости

**10. Охлаждение поверхности детали вне зоны резания.** В процессе круглого наружного шлифования до 80 % тепла уходит в заготовку,

остальное уходит на шлифовальный круг и снимаемую стружку. При эффективном использовании СОЖ жидкость отводит до 10 % тепла за счет охлаждающего действия. При этом количество теплоты, образовавшееся в зоне резания за счет смазывающего действия СОЖ, может снизиться приблизительно на 30 %. Несмотря на это значительное количество тепла уходит в тело заготовки, постепенно нагревая ее. Чем меньше размеры заготовки и выше ее требуемая точность, тем больше на нее сказываются температурные изменения.

Одним из вариантов дополнительного охлаждения заготовки является подвод СОЖ на выходе поверхности из зоны резания. В этом случае также используются специальные насадки. Поскольку кавитация способствует более интенсивному проникновению СОЖ в микрощели заготовки, целесообразно применить подвод СОЖ с ее кавитацией на поверхности обрабатываемого материала. Кроме того, поверхность заготовки при следующем цикле врезания будет подготовлена к процессу резания, т.к. пройдет достаточно времени для протекания физико-химических реакций с образованием смазочных пленок, а СОЖ за счет микрокапиллярного эффекта заполнит все микрощели. Однако эффективность данного способа охлаждения требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

**11. Модуль подвода и активации СОЖ круглошлифовального станка.** Из сказанного выше следует, что для повышения производительности и качества шлифования, наряду с другими методами, необходимо осуществлять комплексный подход к использованию СОЖ, включающий в себя выбор рационального состава, обеспечение ее эффективного использования при шлифовании и правке. Такие технологические схемы обработки должны обеспечивать снижение силовых нагрузок и теплонапряженности процесса.

Выполнение поставленной задачи осуществляется при помощи модуля (см. рис. 11), включающего в себя корпус, устанавливаемый на шлифовальной бабке станка, сборный шлифовальный круг, установленный на шпинделе, две отдельные системы подвода СОЖ под абразивные бруски и в промежутки между ними, а также систему с упругими элементами для очистки ШК. Такой модуль может быть установлен на различных круглошлифовальных (и не только) станках и использован для обработки любых материалов и сплавов.

Сборный шлифовальный круг (см. рис. 12) состоит из диска (кассеты) 1 с каналами 2 и 3 для подвода СОЖ, установленного на шпинделе станка 4 и закрепленного на нем посредством болта 5. На периферии диска с помощью прижимных элементов 6 закреплены абразивные сегменты 7. Прижимные элементы 6 содержат отверстия 3 закрепленными в них кавитаторами 8. Под абразивными сегментами в каналах 3 установлены кавитаторы 9. Прижимные элементы 6 крепятся с помощью левой 10 и правой 11 крышек шлифовального круга. Для балансировки шлифовального круга в собранном виде предусмотрены грузики 12.

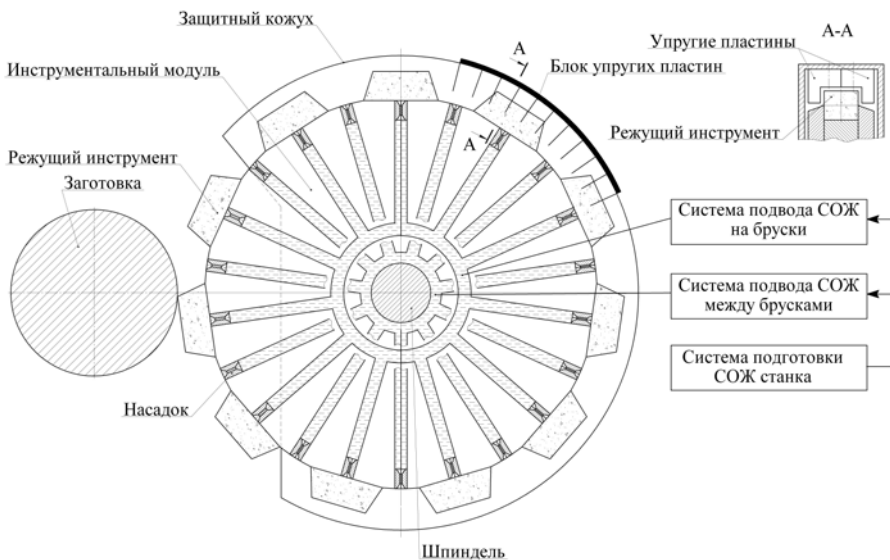


Рис. 11 – Модуль охлаждения и активации СОЖ

Сборный круг размещен в корпусе и закрыт левой 13 и правой 14 крышками защитного кожуха, который неподвижно прикреплен винтами 15 к фланцу 16 шлифовальной бабки. Использование сменной посадочной втулки позволяет устанавливать корпус на станках, имеющих посадочные элементы аналогичной конструкции.

На внутренней части защитного кожуха закреплены упругие лепестки 17 посредством кольца 18 и винтов 19 и 20. К левой крышке защитного кожуха через стакан 21 с помощью болтов 22 и 23 прикреплены втулки ввода СОЖ 24 и 25. Изоляция каналов подвода СОЖ выполняется с помощью манжет, установленных в стаканах 21 и 27 соответственно.

Подвод СОЖ в зону резания осуществляется через две разделенные системы каналов, одна из которых обеспечивает подачу СОЖ к абразивным сегментам, а вторая – между ними.

Между абразивными брусками СОЖ подается через втулку 25. Втулка с крыльчаткой 26 обеспечивает предварительный разгон эмульсии. Далее СОЖ попадает в канал 2 диска 1, где дополнительно разгоняется за счет кинетической энергии при вращении шлифовального круга и направляется к его периферии между абразивными сегментами 7. При этом на выходе с каналов установлены насадки 8, которые за счет эффекта кавитации обеспечивают ее мелкодисперсное перемешивание, интенсификацию химико-физических процессов, происходящих в СОЖ и зоне резания.



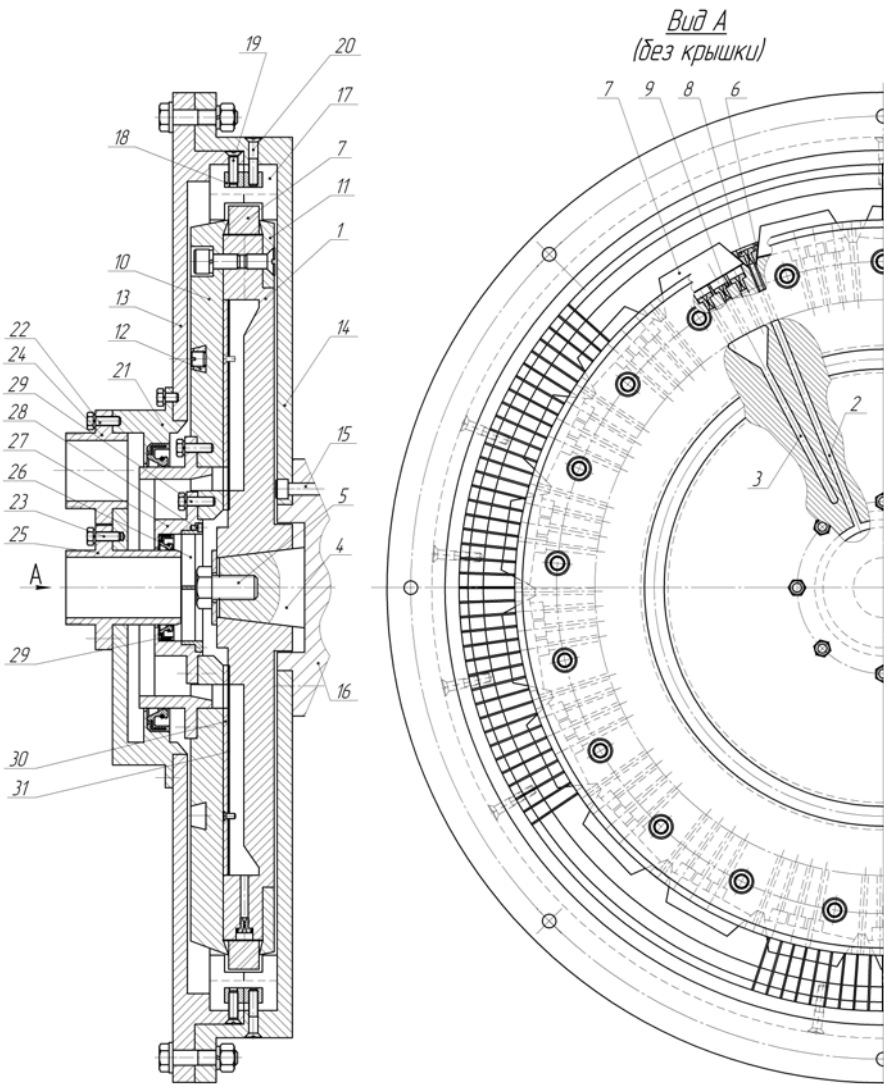


Рис. 12 – Модуль сборного шлифовального круга

Проходя участок кавитации СОЖ попадает в пространство между сегментами перед ее контактом с заготовкой.

Под абразивный сегмент подача СОЖ выполняется следующим образом. Через втулку ввода 24 жидкость попадает во втулку 27. Далее через отверстия в крышке 30 и прокладке 31 поступает в канал 3 диска 1, где дополнительно разгоняется за счет кинетической энергии при вращении шлифовального круга и направляется к его периферии под абразивный

сегмент 7. При этом на выходе с каналов установлены насадки 9, которые за счет эффекта кавитации обеспечивают мелкодисперсное перемешивание СОЖ, интенсификацию химико-физических процессов, происходящих в зоне резания. На рабочую поверхность сегмента СОЖ попадает через поры в абразивном материале.

В корпусе по периферии шлифовального круга в крышках 13 и 14 установлены упругие элементы 17, которые под воздействием потока СОЖ совершают механические колебания, создающие эффект акустической кавитации СОЖ, создавая условия для очистки рабочей поверхности сегментов.

На рисунках 13-15 показаны 3D-модели общего вида модуля сборного шлифовального круга, кавитаторов, установленных в нем и упругих лепестков, закрепленных в защитном кожухе устройства.

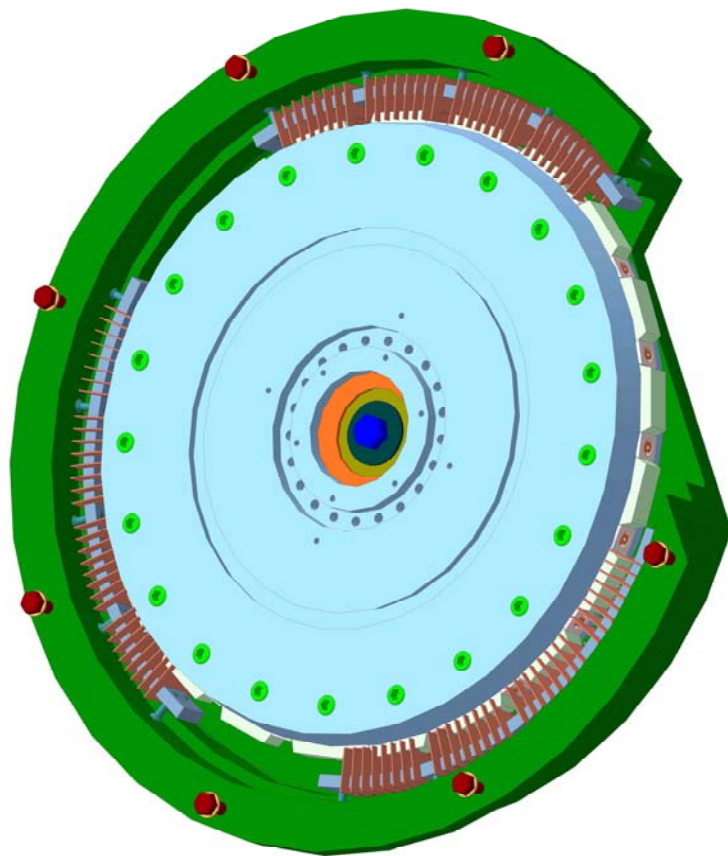


Рис. 13 – 3D-модель модуля сборного шлифовального круга

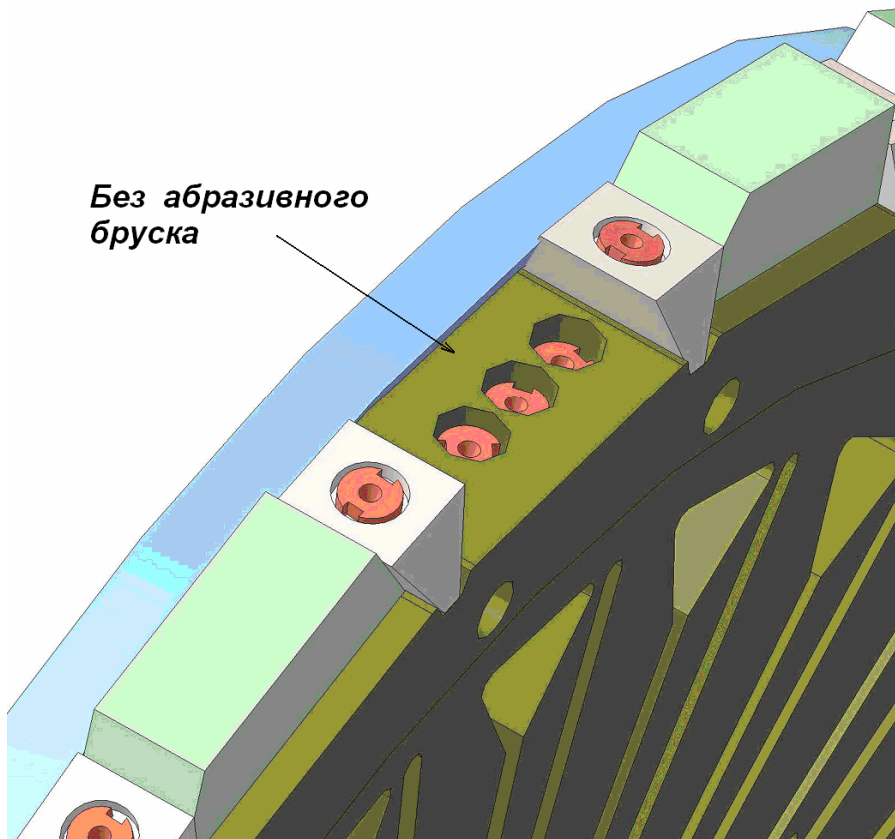


Рис. 14 – Кавитаторы, установленные в модуле

Используемая в модуле комбинированная система подвода СОЖ позволяет обеспечить гарантированное попадание ее на рабочую поверхность абразивных сегментов. При этом обеспечивается процесс мелкодисперсного перемешивания СОЖ, интенсифицируются химико-физические процессы, происходящие в СОЖ и зоне резания, активно очищается поверхность абразивного сегмента от засаливания, повышаются охлаждающее, смазывающее, смачивающее и другие воздействия, что в целом приводит к повышению производительности, качества обработки и стойкости режущего инструмента.

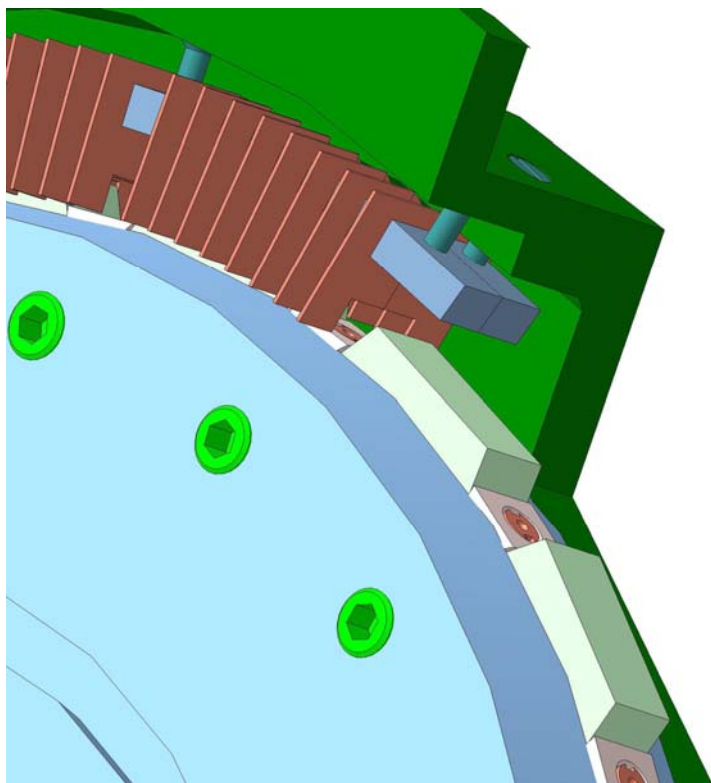


Рис. 15 – Упругие лепестки кожуха модуля

Кроме того, круги такой конструкции позволяют при необходимости регулировать расход СОЖ через каналы, отключать их, подключать по отдельности, подключать оба не останавливая процесс обработки. В каналы также можно подавать два различных вида СОЖ, один из которых обладает, например, преимущественно охлаждающими, а второй – смазывающими свойствами.

Насосы, установленные в каждом из каналов, позволяют дополнительно использовать регулировку потока СОЖ по расходу и давлению.

Применение данного сборного шлифовального круга изменяет представление о режущем инструменте, т.к. основная конструкция может быть отнесена к категории вспомогательного инструмента (кассета). Режущими инструментами являются только сменные абразивные бруски. Замена брусков позволяет значительно экономить абразивный материал и обеспечивает возможность применять бруски из любого необходимого для данной обработки материала.

Универсальность предлагаемой конструкции заключается в том, что сменные втулки на шпинделе и корпусе позволяют устанавливать этот модуль на ряде однотипных шлифовальных станков.

Данная конструкция позволяет значительно улучшить динамические показатели работы станка. Кассета до установки абразивных брусков подвергается тщательной статической и динамической балансировке. После установки брусков выполняется дополнительная балансировка с помощью грузов, установленных в круговой канавке. Из-за малого объема и веса абразивных брусков колебания, вызванные неравномерностью абразивного материала, разной его плотностью и износом, незначительны.

В производственных условиях используются две (или больше) кассеты. Пока один сборный круг находится на станке, оператор перезаряжает вторую кассету.

Устройство кассеты позволяет регулировать подачу СОЖ в зону резания и в промежуток между брусками, что может быть использовано при рационализации подачи СОЖ в цикле (изменением давлений и объемов), а также гибко использовать в автоматизированных и адаптивных системах, например, при отслеживании изменения коэффициента резания.

Кавитация СОЖ перед подачей в зону резания через брусок способствует ее более свободному прохождению через поры абразивного инструмента, а разгон жидкости в радиальных каналах кассеты практически исключает ее вытирание на торцах.

В большинстве случаев при вращении круга кинетической энергии достаточно для создания кавитации в специальных насадках на выходе радиальных каналов, однако, при необходимости, дополнительное давление и увеличение объемов подаваемой жидкости может быть обеспечено насосами модуля.

Установленные в кожухе упругие элементы используют энергию периферийного потока СОЖ и предназначены для получения колебаний с целью создания акустической кавитации, способствующей очистке рабочей поверхности шлифовальных брусков от налипания металла, засаливания и вымывания отходов.

**Выводы.** На основе анализа процессов, происходящих при шлифовании, предложен комплексный подход повышения эффективности СОЖ за счет ее кавитационной обработки на стадии подготовки в системе станка, применения гидродинамической кавитации СОЖ при резании, правке и очистке шлифовального круга. В результате чего обеспечивается стабилизация режущей способности шлифовальных кругов и минимизация засаливания их рабочих поверхностей. Использование комплексного подхода к подготовке и использованию СОЖ при шлифовании позволяет увеличить производительность обработки, повысить качество шлифованных деталей, сократить расход абразивных материалов и правящих инструментов, и, следовательно, снизить себестоимость процесса шлифования.

**Список литературы. 1.** Худобин Л.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Бульжжев и др. / Под общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с. **2.** Промтов. М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов // Вестник ТГТУ. – 2008. – Том 14. – № 4. – С. 861-869. **3.** Кнэпп Р и др. Кавитация / Перевод с англ. д-ра техн. наук Э.А. Аиратова; под ред. д-ра физ.-мат. наук В.И. Полежаева. – М.: Мир, 1974. – 668 с. **4.** Долинский А.А. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах: теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии / А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий. – К.: Наук. думка, 2008. – 381 с. **5.** Фесенко А.В. Сравнительный анализ гидродинамических установок для диспергирования, гомогенизации и нагрева жидкости / А.В. Фесенко, Ю.Н. Любимый // Вісник Сумського державного університету. Серія: технічні науки. – Суми: Видавництво СумДУ. – 2009. – № 4. – С. 103–109. **6.** Киселев Е.С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля: Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 186 с. **7.** Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с. **8.** Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с. **9.** Якимов А.В. Прерывистое шлифование. – Киев; Одесса: Вища шк., 1986. – 174 с. **10.** Сизый Ю.А. Влияние давления подачи СОЖ на нагрев заготовки при врезном шлифовании / Ю.А. Сизый, М.С. Степанов // Вісник національного технічного університету «ХП» – Х.: НТУ «ХП». – 2005. – С. 210-214. **11.** Bin Shen, Ajay P. Malshe, Parash Kalita, Albert J. Shih. Performance of novel MoS<sub>2</sub> nanoparticles based grinding fluids in minimum quantity lubrication grinding. – Volume 36. – 2008. – 357-364 pp. **12.** Блурицян Д.Р. Уменьшение расхода СОЖ при шлифовании. МИ ВлГУ, г. Муром, 2002. **13.** Киселев Е.С. Эффективность ультразвуковых устройств для подачи СОЖ при шлифовании заготовок и правке абразивных кругов / Е.С. Киселев, А.Н. Унянин // СТІН. – 1995. – № 2. – С. 24–28. **14.** Яцерицын П.И., Караим И.П. Шлифование с подачей СОЖ через поры круга / П.И. Яцерицын, И.П. Караим. – Минск: Наука и техника, 1974. – 255 с. **15.** Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1973. – 136 с. **16.** Дубовик Н.П. Исследование работоспособности и создание роликов из синтетических материалов для правки шлифовальных кругов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: Одесский политех. институт, 1974. – 24 с. **17.** Худобин Л.В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин; под ред. Л.В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с. **18.** Унянин А.Н. Научное и технологическое обеспечение шлифования заготовок из пластичных сталей и сплавов с предотвращением засаливания абразивных кругов : автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / Унянин А.Н. ; Ульян. гос. техн. ун-т ; науч. консультант Худобин Л.В. – Ульяновск : УлГТУ, 2006. – 32 с. **19.** Худобин И.Л. О демпфирующем действии СОЖ при шлифовании // Вестник машиностроения. – 1981. – № 5. – С. 55–57.

*Поступила в редколлегию 04.09.2010*

*А.А. ПЕРМЯКОВ*, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ», г. Харьков;  
*А.П. ПАЦИОРА*, инж.-технолог НКМЗ, г.Краматорск

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА НА НАПРАВЛЯЮЩИХ ОПОРАХ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ

На основі гідродинамічної теорії змащування розглянута можливість формування гідродинамічного тиску на напрямних опорах інструмента для обробки глибоких отворів. Отримані рівняння течії змащувально-охолоджуючої рідини між напрямними опорами і обробленим отвором. Виведена система рівнянь, що описує рух інструмента за умов гідродинамічного ефекту на напрямних опорах

The possibility of the hydrodynamic pressure forming on guiding pads of tools for the deep holes machining is considered on the ground of the hydrodynamic theory of the lubrication. Flow equations for the coolant oil in the gap between guiding pads and the hole are received. The motion system of equations for the tool in the hydrodynamic contact condition on guiding pads is given.

**Введение.** Наиболее производительным способом обработки глубоких отверстий на сегодняшний день является система STS (Single Tube System) - одноштанговая система. Отличительной особенностью способа есть то, что СОЖ подаётся в зону резания через зазор между поверхностью борштанги и обрабатываемым отверстием, а затем вместе со стружкой удаляется через отверстие в борштанге. Применение такой системы исключает необходимость в стружечной канавке, что делает инструмент максимально жёстким. Подача СОЖ осуществляется шестеренчатými или винтовыми насосами через маслоприёмник под давлением 2,5 - 4 МПа при расходе СОЖ до 2000л/мин в зависимости от диаметра обрабатываемого отверстия. Высокое давление в зоне резания обеспечивает эффективный теплоотвод и беспрепятственное удаление стружки, что в сочетании с большой жёсткостью инструмента обеспечивает наибольшую производительность способа. Кроме того, интенсивная подача СОЖ под высоким давлением служит для поддержки и смазки направляющих опор режущей головки. Сверление осуществляется путём противоположного вращения борштанги со скоростью  $n_c$  и обрабатываемой детали  $n_d$  и продольной подачи режущей головки (рис. 1, а). Головка глубокого сверления содержит корпус 1, сменные многогранные твердосплавные пластины (СМТП) – периферийная 2, промежуточные 3, центральная 4, сменные направляющие опоры 5, вспомогательную опору 6, каналы для отвода СОЖ 7 и резьбовую часть 8 для крепления на борштанге.

Направляющие опоры 5 служат для базирования инструмента по уже обработанному отверстию, тем самым, воспринимая нагрузку от сил резания, возникающих на режущих кромках СМТП при сверлении. На сегодняшний день малоисследованным остаётся вопрос износа направляющей части

инструмента для обработки глубоких отверстий, хотя данное явление во многом определяет качество обработанной поверхности, точность отверстия и работоспособность инструмента. Износ направляющих опор приводит к потере жёсткости режущих головок, снижению их ресурса и стойкости режущих пластин. Работа с изношенными направляющими опорами приводит к снижению шероховатости, разбивке отверстия и появлению винтообразной огранки по длине обработанного отверстия. При обработке сверхглубоких отверстий ( $l/d > 100$ ) с большим вылетом инструмента потеря жёсткости является одной из причин увода оси [1, 2]. В отечественной литературе вопрос износа направляющих опор инструмента для обработки глубоких отверстий практически не освещён. В работах, посвящённых этой теме, анализируется площадь контакта и коэффициент трения между направляющими опорами и обработанным отверстием [3]. При этом исследуются условия контакта при величинах шероховатости поверхности направляющих опор  $Ra_{0,8-3,2}$  мкм. Как показал опыт эксплуатации направляющих опор с шероховатостью на один порядок меньшей, чем указанная в [3], на большей части направляющих опор отсутствует непосредственный контакт и такие параметры как площадь контакта, коэффициент трения, износ и пр. носят абсолютно иной характер. Поэтому исследования в этой области требуют пересмотра решений и изыскания нового подхода в трактовке механизма изнашивания направляющих опор. Частично проблему износа большинство производителей решают, благодаря применению в качестве материала направляющих опор твёрдого сплава на основе карбида вольфрама WC и кобальта Co (твёрдость HV90..100), а также достижением шероховатости их поверхности  $Ra_{0,08 - 0,2}$  мкм. Стоимость таких направляющей для потребителя колеблется в пределах 100-150\$. Высокая цена требует новых решений в области обеспечения долговечности направляющих опор. Наиболее эффективным направлением в этой области является исследование гидродинамических явлений, возникающих в зоне контакта направляющих опор с обработанной поверхностью. Достижение гидродинамического эффекта по всей длине направляющих опор позволит исключить явление износа и решить проблему качества и производительности обработки глубоких отверстий на принципиально новом уровне.

**Основная часть.** Рассмотрим явление формирования гидродинамического эффекта в масляном зазоре между направляющими опорами и обработанной поверхностью детали. Диаметр инструмента по направляющим опорам 5 (рис. 1, а) всегда на  $\Delta = 0,05-0,1$  мм меньше диаметра по периферийной пластине 2, что исключает заедание сверлильной головки в отверстии. В процессе резания под действием результирующей нагрузки  $R$  инструмент смещается в пределах данного зазора (рис. 2, б), на некоторую величину  $0 < e < \Delta$ . Тем самым между направляющими 5 и обработанной поверхностью отверстия создаётся клиновидный зазор, заполненный подаваемой под давлением  $P_0$  СОЖ. При вращении сверлильной головки



СОЖ прилипает к поверхности направляющих 5 и отверстия и вовлекается в зазор. В зазоре, в силу разности скоростей частиц у поверхности направляющих и отверстия, появляется относительное скольжение частиц СОЖ, чему препятствуют силы вязкости. Схема образования гидродинамического давления в зазоре между направляющими инструмента и поверхностью отверстия приведена на рисунке 2.

На элементарный объём с гранями  $dx$ ,  $dz$  действует гидродинамическое давление  $p$  и касательное напряжение  $\tau$ . Если пренебречь силами инерции условие равновесия действующих сил для выделенного объёма в направлении  $x$  будет иметь вид [4]:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (1)$$

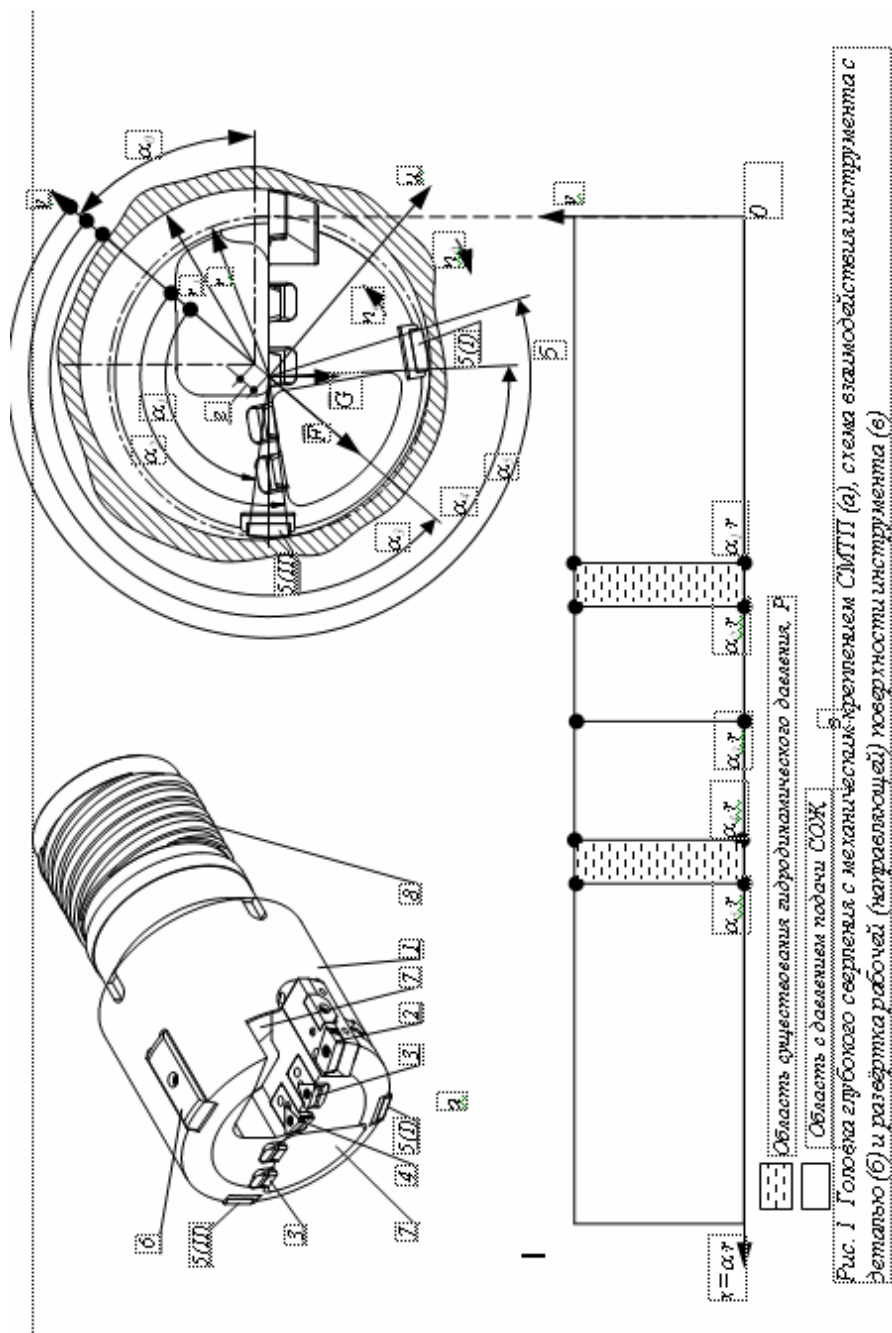
Чтобы уравновесить силы вязкости на элементарном объёме СОЖ повышается давление. Это давление передаётся на твёрдые поверхности и разделяет их от непосредственного контакта.

Давление в смазочном слое вначале сужающейся, а затем расширяющейся щели (зазоре) вначале возрастает, а затем, достигнув максимума в зоне, располагающейся до места минимальной толщины, уменьшается. Таким образом, реализуются условия для создания гидродинамического давления, передаваемого на поверхности направляющих инструмента и обработанного отверстия. Рассмотрим силы в системе инструмент-деталь (рис. 1, а, б). Во время работы на инструмент действуют силы резания на кромках режущих пластин 2, 3, 4. Результирующая сил резания при неизменности внешних условий является постоянной по величине, а вектор силы вращается относительно центра масс инструмента с частотой  $n_c$ , равной частоте вращения сверла. В работе [5] все силы резания приведены к одной результирующей силе  $F$ , разработана модель, позволяющая точно определять её величину и направление, относительно направляющих опор.

Уравнение движения инструмента в абсолютной системе координат имеет вид:

$$m \frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{F}(t) + \vec{P}(t) + \vec{G}, \quad (2)$$

где  $m$  – масса инструмента;  $u$  – скорость движения центра масс инструмента;  $F(t)$  – результирующая внешних сил (сил резания);  $P(t)$  – реакция смазочного слоя,  $G$  – сила тяжести системы инструмент-борштанга;  $t$  – время.



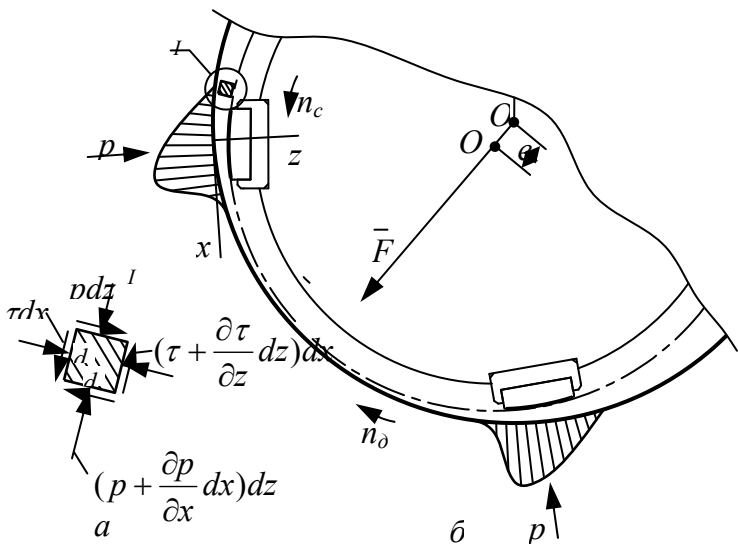


Рис.2 Схема образования гидродинамического давления: *a* – элементарный объём СОЖ, *б* – эпюра гидродинамического давления

Для удобства определения проекций реакции смазочного слоя введём вращающуюся вместе с инструментом систему координат ( $uv$ ) с началом отсчёта в центре масс инструмента (рис. 1, б). Пренебрегая моментами пуска и остановки шпинделя, принимаем равномерное движение инструмента, в силу чего  $\overline{du}/dt = 0$ . Тогда уравнение (2) в проекции на оси  $uv$  примет вид:

$$\begin{cases} -F - mg \cdot \sin(\alpha + \alpha_0) = P_V(\chi, \alpha, \frac{d\alpha}{dt}, \mu), \\ mg \cdot \cos(\alpha + \alpha_0) = P_U(\chi, \alpha, \frac{d\alpha}{dt}, \mu), \end{cases} \quad (3)$$

где  $\chi = e/\Delta$  - относительный эксцентриситет инструмента;  $\alpha$  - угол поворота подвижной системы координат;  $\alpha_0$  - начальный угол поворота подвижной системы координат относительно горизонтальной оси;  $\mu$  - динамический коэффициент вязкости СОЖ.

Для определения правой части уравнений (3) сначала изучим распределение скоростей жидкости по сечениям смазочного слоя. Для этого рассмотрим систему уравнений Рейнольдса для смазочного слоя:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial p}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $v_x$  – скорость течения жидкости вдоль оси  $x$  (в поперечном к оси направлении);  $v_y$  – скорость течения жидкости вдоль оси  $y$  (параллельно оси инструмента).

Процесс обработки глубоких отверстий в системе STS с целью эффективного стружки и теплоотвода сопровождается обильной подачей СОЖ. Например, при сплошном сверлении  $\varnothing 200$  расход СОЖ, согласно рекомендаций фирмы Sandvik Coromant, должен составлять  $q=700$  л/мин при давлении 1МПа. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать температуру в зоне жидкостного трения как постоянную величину. Кроме того, для упрощения расчётов примем: вязкость жидкости не зависящей от давления, поверхности направляющих опор и отверстия - идеально гладкие, направляющие опоры строго параллельны поверхности отверстия, т.е.  $z=h(y)=const$ ; сила трения в условиях гидродинамического контакта принята равной  $\theta$  в виду малого коэффициента жидкостного трения.

Дважды проинтегрировав первые два уравнения системы (4), получим:

$$\begin{cases} \mu \cdot v_x = \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{z^2}{2} + C \cdot z + D; \\ \mu \cdot v_y = \frac{\partial p}{\partial y} \cdot \frac{z^2}{2} + C_1 \cdot z + D_1; \end{cases} \quad (5)$$

Постоянные интегрирования определим из граничных условий:

1. на поверхности обработанного отверстия при  $z=0$   $v_y=0$   $v_x=-U_\theta$ , тогда  $D=-\mu \cdot U_\theta$ ,  $D_1=0$ ;
2. при  $z=h$   $v_y=s$   $v_x=U_c$ ,

где  $U_\theta$  – окружная скорость детали;  $U_c$  – окружная скорость инструмента;  $h$  – толщина слоя СОЖ в данной точке.

Подставив значения  $D$  и  $D_1$  в систему (6) найдём  $C$  и  $C_1$ :

$$C = \mu \frac{U_c + U_\theta}{h} - \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{h}{2}; \quad C_1 = \mu \frac{s}{h} - \frac{\partial p}{\partial y} \cdot \frac{h}{2}$$

После ряда преобразований, с учётом выражений для постоянных интегрирования, получим систему уравнений, описывающих распределение скоростей по сечению смазочного слоя:

$$\begin{cases} v_x = (U_c + U_o) \frac{z}{h} - U_o - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} z(h-z), \\ v_y = s \frac{z}{h} - \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} z(h-z). \end{cases} \quad (6)$$

Определим расход СОЖ в направлении осей  $x$  и  $y$ , отнесённый к длине направляющих опор  $l$ :

$$\begin{cases} Q_x = \int_0^h v_x dz, \\ Q_y = \int_0^h v_y dz. \end{cases} \quad (7)$$

После подстановки (6) в (7) и вычисления интегралов получим:

$$\begin{cases} Q_x = \frac{U_c - U_o}{2} h - \frac{1}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} h^3, \\ Q_y = \frac{s}{2} h - \frac{1}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} h^3 \end{cases} \quad (8)$$

На основании уравнения неразрывности расход через любое сечение имеет одно и то же значение. Вычислим его для сечения, в котором давление

$$\text{достигло экстремума, т.е. } \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \text{ и } \frac{\partial p}{\partial y} = 0 : \begin{cases} Q'_x = \frac{U_c - U_o}{2} h_0, \\ Q'_y = \frac{s}{2} h_0, \end{cases} \quad (9)$$

где  $h_0$  – толщина слоя СОЖ на участке максимального и минимального давления

Подставив выражения расхода СОЖ при экстремальных значениях давления в уравнения (8) получим частный случай уравнения Рейнольдса для исследования смазочного слоя в зазоре между направляющими опорами инструмента и деталью:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} = 6\mu(U_c - U_o) \frac{h - h_0}{h^3}, \\ \frac{\partial p}{\partial y} = 6\mu \cdot s \frac{h - h_0}{h^3}, \end{cases} \quad (10)$$

Подставляя выражения для  $\frac{\partial p}{\partial x}$  и  $\frac{\partial p}{\partial y}$  в (6) получим уравнения для исследования распределения скоростей в слое СОЖ:

$$\begin{cases} v_x = (U_c + U_d) \frac{z}{h} - U_d - 3(U_c - U_d) \frac{h-h_0}{h^3} z(h-z), \\ v_y = s \left( \frac{z}{h} - 3 \frac{h-h_0}{h^3} z(h-z) \right). \end{cases} \quad (11)$$

Продифференцировав уравнения системы (10) получим:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{6\mu}{h^3} (U_c - U_d) \frac{\partial h}{\partial x}, \\ \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{6\mu}{h^3} \cdot s \frac{\partial h}{\partial y}, \end{cases} \quad (12)$$

или

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\mu(U_c - U_d) \frac{\partial h}{\partial x} + 6\mu \cdot s \frac{\partial h}{\partial y} \quad (13)$$

Поскольку положение направляющих опор и направление вектора результирующей нагрузки удобнее описывать в угловых координатах (рис. 1б, в) произведём замены линейных величин.

Координата  $x$ :  $x = \alpha \cdot R$ , где  $R$  – радиус инструмента по направляющим опорам.

Толщина слоя СОЖ на координате  $\alpha$ :  $h = (R_1 - R) + e \cdot \cos \alpha$ , где  $R_1$  – радиус обработанного отверстия;  $e$  – эксцентриситет (величина смещения оси инструмента относительно оси обрабатываемого отверстия)

Представим эксцентриситет через величину минимального зазора  $h_0$  в сечении с экстремальным давлением:  $e = (R_1 - R) - h_0$ .

Обозначим разницу  $R_1 - R$ , как  $\Delta$  - зазор между направляющими опорами и деталью в ненагруженном состоянии тогда толщина слоя СОЖ по координате  $\alpha$ :  $h = \Delta + (\Delta - h_0) \cdot \cos \alpha$

Подставим замены  $x$  и  $h$  в первое уравнение системы (12):

$$\frac{1}{R} \frac{\partial^2 p}{\partial \alpha^2} = \frac{6\mu}{(\Delta + (\Delta - h_0) \cos \alpha)^3} (U_c - U_d) \frac{\partial(\Delta + (\Delta - h_0) \cos \alpha)}{\partial(\alpha \cdot R)};$$

Проинтегрируем левую и правую часть уравнения по координате  $\alpha$  получим:

$$\frac{\partial p}{\partial \alpha} = \frac{6\mu(U_c - U_d)}{(\Delta + (\Delta - h_0) \cos \alpha)^2}.$$

Тогда уравнение изменения давления по координате  $\alpha$  имеет вид:

$$p = \int \frac{6\mu(U_c - U_d)}{(\Delta + (\Delta - h_0) \cos \alpha)^2} d\alpha \quad (14)$$

Составляющие  $P_v$  и  $P_u$  уравновешивающей нагрузки  $P$  реакции смазочного слоя определим интегрированием давления  $p$ , распределённого по рабочей поверхности направляющих опор, ограниченных углами  $\alpha_1 - \alpha_2$  и  $\alpha_3 - \alpha_4$ . В виду малой величины коэффициента трения при жидкостном трении, влиянием силы трения пренебрегаем.

Для направляющей опоры  $II$ :

$$P_{VII} = r \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_0^B p \cdot \cos \alpha d\alpha dy;$$

$$P_{VII} = r \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_0^B p \cdot \sin \alpha d\alpha dy.$$

Для направляющей опоры  $I$ :

$$P_{VI} = r \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} \int_0^B p \cdot \cos \alpha d\alpha dy;$$

$$P_{VI} = r \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} \int_0^B p \cdot \sin \alpha d\alpha dy.$$

Подставив выражения (14) в полученные уравнения и, сложив соответствующие проекции сил, получим:

$$P_U = r \left( \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_0^B \frac{6\mu(U_c - U_d)}{(\Delta + (\Delta - h_0) \cos \alpha)^2} d\alpha \cdot \sin \alpha d\alpha dy + \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} \int_0^B \frac{6\mu(U_c - U_d)}{(\Delta + (\Delta - h_0) \cos \alpha)^2} d\alpha \cdot \sin \alpha d\alpha dy \right)$$

$$P_V = r \left( \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_0^B \frac{6\mu(U_c - U_d)}{(\Delta + (\Delta - h_0) \cos \alpha)^2} d\alpha \cdot \cos \alpha d\alpha dy + \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} \int_0^B \frac{6\mu(U_c - U_d)}{(\Delta + (\Delta - h_0) \cos \alpha)^2} d\alpha \cdot \cos \alpha d\alpha dy \right). \quad (15)$$

Подставив выражения (15) в систему (3) получим систему уравнений, описывающих движение инструмента в подвижной системе координат  $uv$ :

$$\begin{cases} -F - mg \cdot \sin(\alpha + \alpha_0) = r \left( \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_0^B \frac{6\mu(U_c - U_d)}{(\Delta + (\Delta - h_0) \cos \alpha)^2} d\alpha \cdot \cos \alpha d\alpha dy + \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} \int_0^B \frac{6\mu(U_c - U_d)}{(\Delta + (\Delta - h_0) \cos \alpha)^2} d\alpha \cdot \cos \alpha d\alpha dy \right), \\ mg \cdot \cos(\alpha + \alpha_0) = r \left( \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_0^B \frac{6\mu(U_c - U_d)}{(\Delta + (\Delta - h_0) \cos \alpha)^2} d\alpha \cdot \sin \alpha d\alpha dy + \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} \int_0^B \frac{6\mu(U_c - U_d)}{(\Delta + (\Delta - h_0) \cos \alpha)^2} d\alpha \cdot \sin \alpha d\alpha dy \right), \end{cases}$$

**Выводы.** Полученная система уравнений движения инструмента в сочетании с математической моделью [5] результирующей нагрузки  $F$  позволяет полностью описать условия работы направляющих опор инструмента для глубокого сверления (растачивания), работающего с определённой базированием.

В дальнейшем предполагается оценка влияния шаговых и высотных параметров шероховатости направляющих опор и обработанной поверхности на условия формирования гидродинамического клина, а также исследование температурных полей в зоне контакта и их влияние на вязкость СОЖ. Предполагается также связать геометрию режущей части инструмента и режимы резания с режимами жидкостного трения направляющих опор, для обеспечения наиболее благоприятных условий формирования гидродинамического клина. На основе полученных зависимостей возможен количественный расчёт параметров инструмента, СОЖ и режимов резания для работы с достижением полного гидродинамического эффекта на направляющих опорах, что позволит повысить качество и точность глубоких отверстий на стадии проектирования технологического процесса, а также снизить износ направляющих опор.

**Список литературы.** 1. *Троицкий Н.Д. Глубокое сверление.* - Л.: Машиностроение, 1971-276с. 2. *Уткин Н. Ф., Кижняев Ю. И., Немцев Б. А., Шаманин А. А. и др.* Обработка глубоких отверстий. — Л.: Машиностроение, 1988. —269с. 3. *Пашовкин С.А.* Фактическая площадь контакта и коэффициент трения поверхностей направляющих сверла для глубокого сверления и обрабатываемого отверстия. Вестник машиностроения, 2009, №4, с. 67 – 71. 4. *Петров Н.П.* Гидродинамическая теория смазки. Избранные работы. Под ред. Лейбензона Л.С. – М.: Издательство Академии Наук СССР, 1948, 550с. 5. *Пермяков А.А., Пацiora А.П.* Математическая модель силового взаимодействия инструмента и заготовки при обработке глубоких отверстий в условиях определённости базирования. «Надежность инструмента и оптимизация технологических систем». Сборник научных трудов. – Краматорск, вып. №24, 2009. – с.272 – 276.

*Поступила в редакцию 20.09.2010*



*А.Н. ШЕЛКОВОЙ*, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ», г. Харьков;  
*И.В. КОВАЛЕВА*, г. Харьков

## **КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «КРОНШТЕЙН» НА ОБРАБАТЫВАЮЩЕМ ЦЕНТРЕ VA 500 МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

В этой статье рассматривается метод планирования организационно-технологических механизмов производственных систем, в основу которых положено 3D моделирование

In the article considered the method of planning of organizational-technological arrangements of the production systems is offered on the basis of 3D – designs.

**Введение.** Современная технологическая практика характеризуется высокой интенсивностью процесса проектирования и достоверностью технологических решений. Для этого используются методы проектирования, построенные на математических моделях, в основу которых положено трехмерное моделирование (3D – моделирование). В статье изложена методика создания организационно-технологических структур технологических систем обработки металлов резанием на основе 3D – моделирования ее компонентов.

**Постановка задачи.** В качестве иллюстрации методической основы организационно-технологического проектирования проведено исследование гибкой производственной системы на базе обрабатывающего центра модели VA 500 и промышленного робота портального типа модели MA160P при обработке группы деталей типа «Кронштейн» (рис. 1).

Общая задача проектирования разбита на следующие этапы:

конструкторско-технологический анализ системы изготовления детали «Кронштейн» на обрабатывающем центре в условиях мелкосерийного производства; разработка группового технологического процесса (ГТП) получения деталей типа «Кронштейн»; разработка технологического оснащения системы обработки; разработка управляющих программ изготовления деталей типа «Кронштейн» на вертикальном обрабатывающем центре VA500; имитационное организационно-технологическое моделирование системы изготовления деталей типа «Кронштейн»; расчет экономических показателей системы обработки.

*Разработка группового технологического процесса.* Групповой технологический процесс изготовления деталей типа «Кронштейн» формируется в АСТПП «ТехноПро 5.0+» в следующей последовательности (рис. 2): 1. Разрабатывается обобщенный маршрут обработки (эквивалент ГТП) деталей «Кронштейн 1»; «Кронштейн 2» и «Кронштейн 3»; 2. Формируются групповые технологические операции обработки изделия;

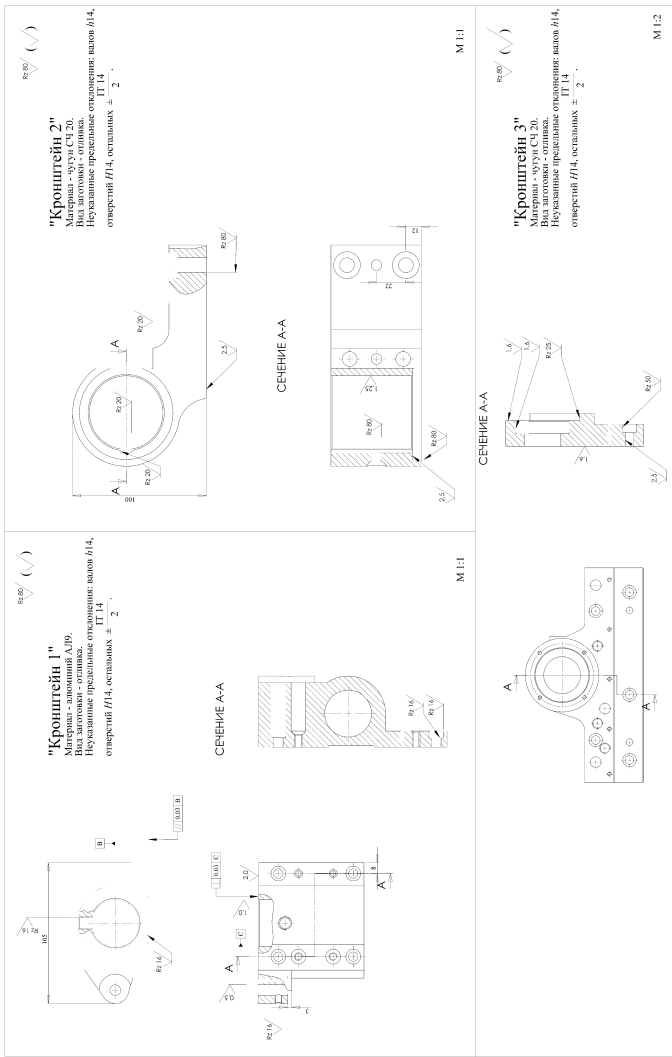


Рис.1

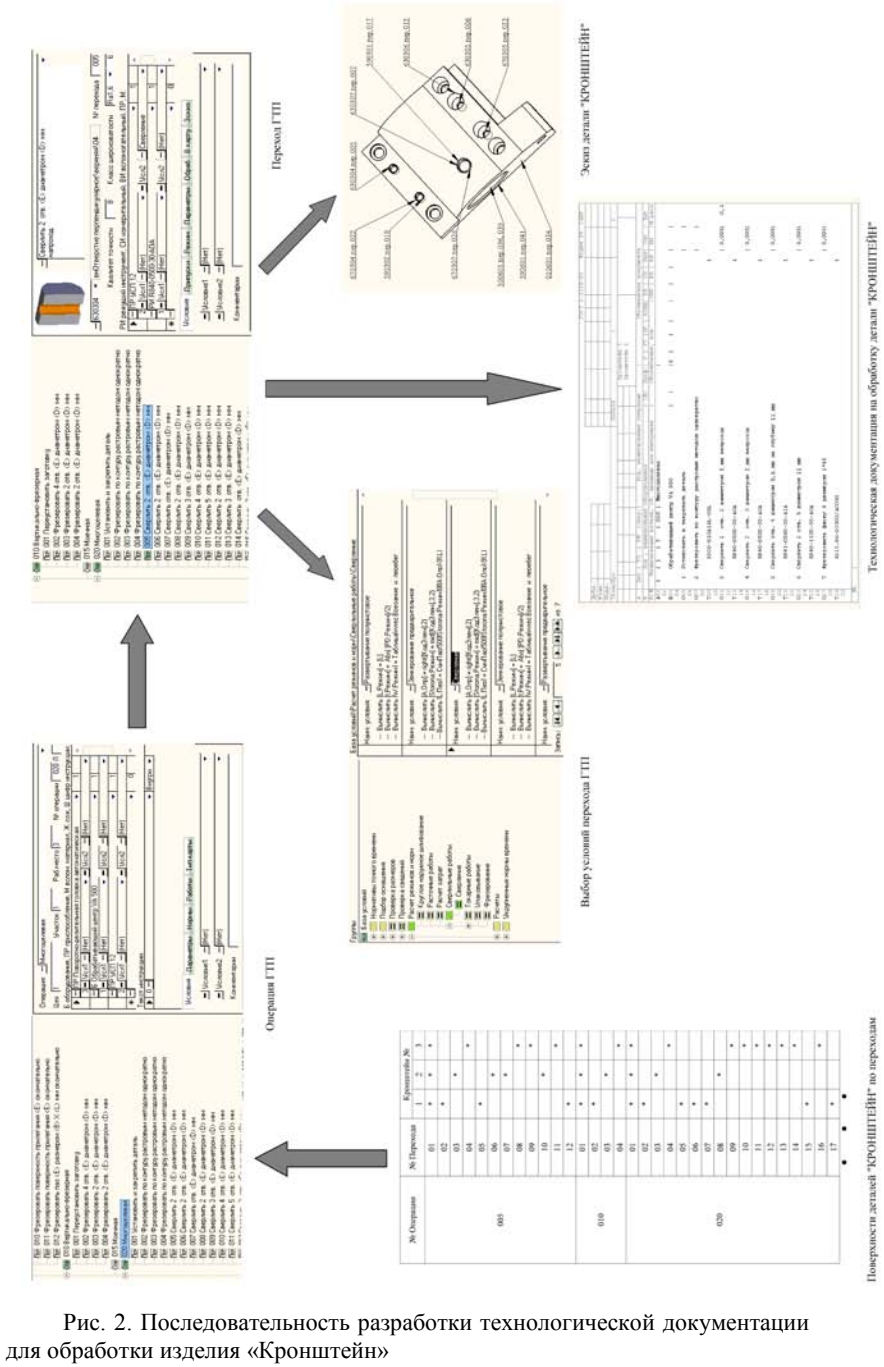


Рис. 2. Последовательность разработки технологической документации для обработки изделия «Кронштейн»

3. Подбираются основное и вспомогательное оборудование, технологическая оснастка и режущий инструмент (система CoroGuid 2007.1);
4. Определяются расчетные значения снимаемых припусков (система Priskus), режимы обработки (система CoroGuid 2007.1), нормы времени;
5. Формируются эскизы обработки (система SolidWorks 2007);
6. На основе ГТП в автоматизированном режиме формируются технологические процессы изготовления деталей «Кронштейн 1», «Кронштейн 2» и «Кронштейн 3»;
7. Проводится проверка правильности построения технологических процессов;
8. Готовится организационно-технологическая документация.

*Разработка технологического оснащения системы обработки.* Для обработки детали «Кронштейн» на обрабатывающем центре VA-500 применено приспособление, собранное из деталей комплекта УСП-12 (рис. 3).

Базирование осуществлено на плоскость и два пальца (цилиндрический и срезанный), при этом заготовка лишается 6 степеней свободы. Крепление заготовки к приспособлению осуществляется болтами и гайками. Формула базирования представлена на рисунке 3.

Расчет погрешности базирования выполнен с использованием программ «Fingers» и «Pogreshnost».

В состав приспособления входят: «Плита» ГОСТ 15197-70 (1 шт.); «Болт пазовый» ГОСТ 15379-70 (5 шт.); «Опора» ГОСТ 15411-70 (3 шт.); «Шпонка» ГОСТ 15345-70 (2 шт.); «Гайка» ГОСТ 15395-70 (2 шт.); «Гайка» ГОСТ 5915-70 (2 шт.); «Шайба» ГОСТ 18123-72 (2 шт.); «Палец базовый цилиндрический» (1 шт.); «Палец базовый срезанный» (1 шт.).

Для деталей «Кронштейн 1», «Кронштейн 2», «Кронштейн 3» неизменными в размерах являются плита, опоры и шпонки, а остальные элементы приспособления подбираются в соответствии с размерами деталей (табл. 1).

Выбор инструментального оснащения и расчет режимов резания осуществляется с использованием пакета CoroGuid 2007.1 по схеме (рис. 4):

1. Определение типа инструментального оснащения (выбор модульного или цельного инструментального оснащения).

2. Выбор тип адаптера.
3. Определение типоразмера модульного соединения.
4. Выбор базовой оснастки.
5. Выбрать переходников и удлинителей.

Расчет режимов резания выполняется в следующей последовательности (рис. 4):

1. Выбор области применения инструмента
2. Выбор типа операции.
3. Выбор размеров инструмента.
4. Выбор места и размеров обработки на заготовке.

5. Определение геометрии режущей части инструмента и типа режущих пластин.

6. Определение параметров обработки (глубины резания, толщины стружки

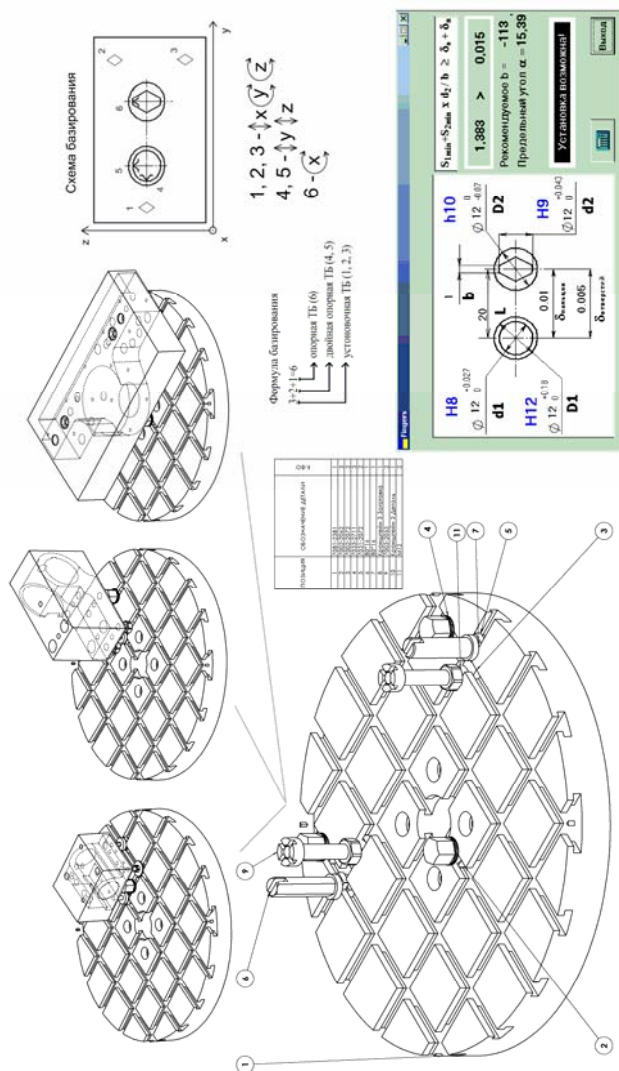


Рис 3. Структура и параметры группового зажимного приспособления для обработки деталей типа „Кронштейн” и др.).

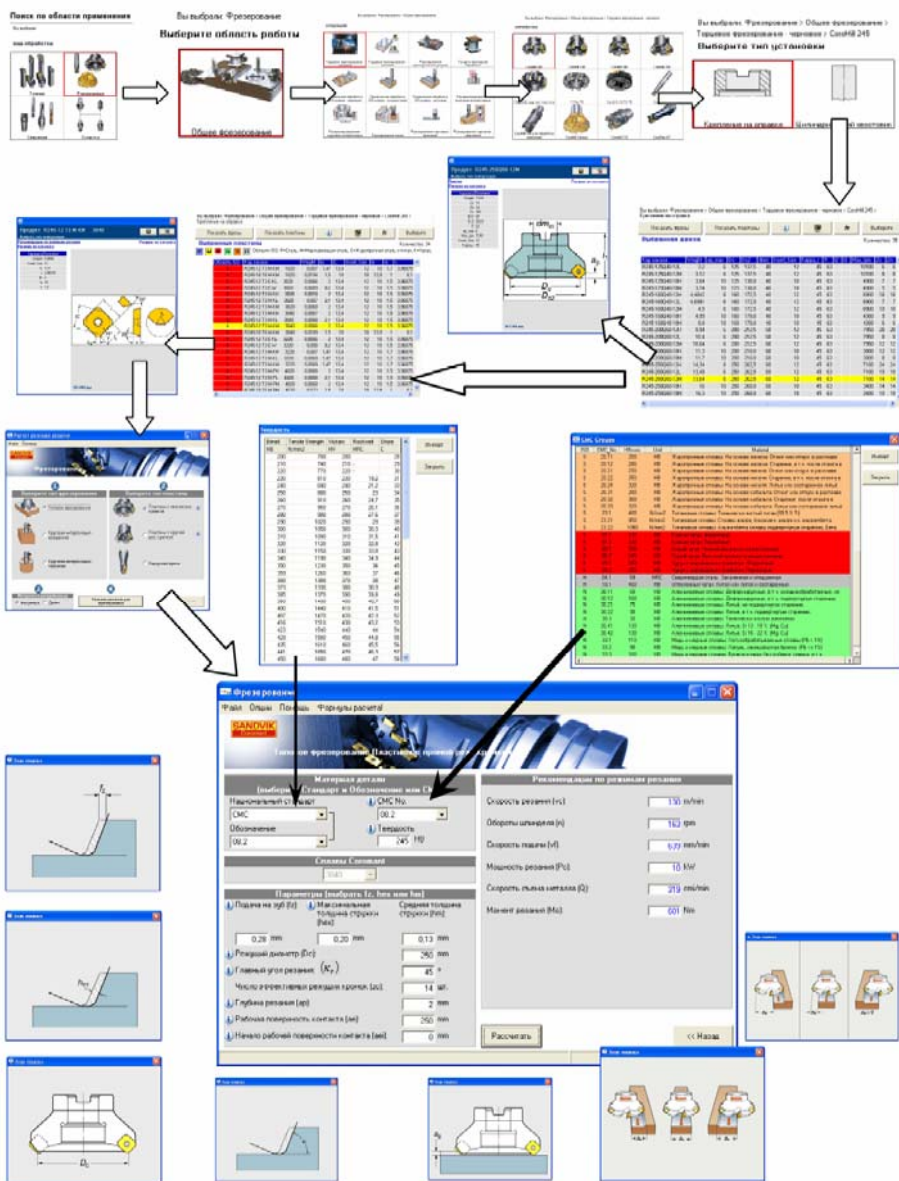


Рис. 4. Последовательность выбора режущих инструментов фирмы Sandvik Coromand и расчет режимов резания при обработке на ОЦ VA500

Таблица 1.

Наличие элементов приспособления для разных деталей.

Наименование элемента	ГОСТ	Длина элемента, мм	Диаметр элемента, мм	Кронштейн №		
				1	2	3
Болт пазовый	15379-70	20	12	.	*	*
Болт пазовый	15379-70	35	6	*		
Болт пазовый	15379-70	70	6	*		
Болт пазовый	15379-70	10	18		*	
Болт пазовый	15379-70	70	12			*
Гайка	15395-70	10	10	*		
Гайка	15395-70	10	18		*	
Гайка	15395-70	10	22			*
Гайка	5915-70	5	M6	*		
Гайка	5915-70	8	M10		*	
Гайка	5915-70	10	M12			*
Шайба	18123-72	2	24	*		
Примечание: * - элемент принадлежит к приспособлению для соответствующей детали.						

*Разработка управляющих программ.* Управляющие программы (УП) для обработки группы деталей типа «Кронштейн» формируются в среде системы SolidCAM 2007, которая, в свою очередь, интегрирована в систему SolidWorks 2007. Структура системы и набор данных для разработки УП на операции «Сверление основного отверстия» на детали «Кронштейн 1» представлены на рис. 5, а ее фрагмент приведен ниже:

```

O5000 (D_DRILL_T1.TAP)
(MCV-OP) (04-JUN-2009)
(SUBROUTINES: O2 .. O0)
G90 G17
G80 G49 G40
G54
G91 G28 Z0
G90
M01
N1 M6 T1
(TOOL -1- ROUGH DIA 35.0 MM)
G90 G00 G40 G54
G43 H1 D31 G0 X41. Y25. Z100. S1364 M3
M8
...

```

(D-DRILL-T1 - DRILL)

...  
X41. Y25. Z100.  
G98 G81 Z0. R102. F0.25  
G80  
M30  
%

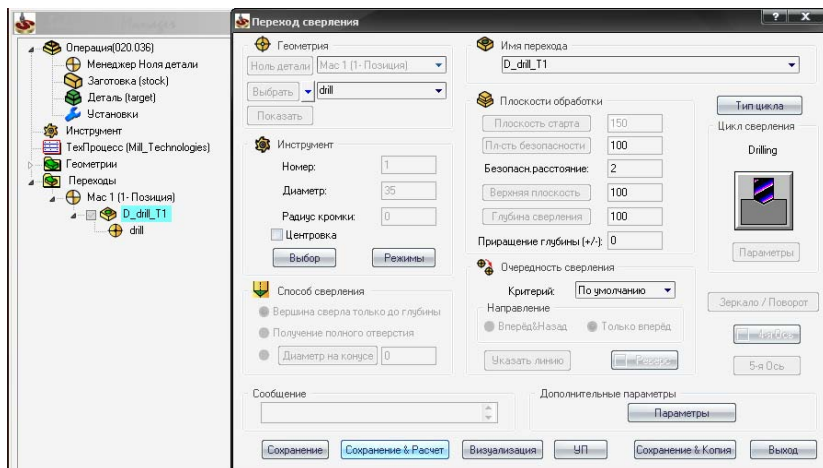


Рис. 5. Интерфейс системы SolidCAM при разработке управляющих программ обработки деталей типа «Кронштейн»

Имитационное моделирование организационно-технической и технологической структур ОЦ VA500 (рис. 6) является заключительным этапом оптимизации структуры и параметров системы групповой обработки детали «Кронштейн».

В состав организационно-технологической системы изготовления детали «Кронштейн» входят: вертикальный обрабатывающий центр VA 500, стол-накопитель, а также порталный робот MA160П (рис. 6).

Этот процесс реализуется в следующей последовательности:

1. Разрабатывается эскиз планировки участка обработки.
2. В CAD SolidWorks 2007 разрабатывается 3D – модель конструктивной компоновка ОЦ VA500 с учетом его технологического оснащения, необходимого для групповой обработки деталей типа «Кронштейн».

3. Модель системы обработки экспортируется из системы SolidWorks в систему CreateModul.

4. Разрабатывается программа имитационного моделирования работы модуля, фрагмент которой показан ниже:



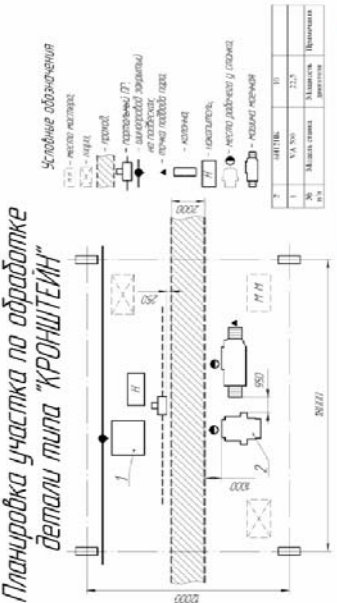
Сдвиг,Каретка робота,0,7922,0,1,0  
 Поворот,Цилиндр-2,0,30,0,1,0  
 Одновременно,5  
 Поворот,Схват-5,0,-30,0,1,0  
 Поворот,Схват-6,0,30,0,1,0  
 Поворот,Схват-7,0,-30,0,1,0  
 Поворот,Схват-8,0,30,0,1,0  
 Сдвиг,Рука-2,0,0,-82,1,0  
 Одновременно,4  
 Поворот,Схват-5,0,30,0,1,0  
 Поворот,Схват-6,0,-30,0,1,0  
 Поворот,Схват-7,0,30,0,1,0  
 Поворот,Схват-8,0,-30,0,1,0  
 Пауза,1  
 Привязка,Деталь-2,Рука-2  
 Одновременно,2  
 Сдвиг,Рука-2,0,0,80,1,0  
 Поворот,Цилиндр-2,0,-29,0,1,0  
 Сдвиг,Каретка робота,0,-7089,0,1,0  
 Поворот,Цилиндр-2,0,27,0,2,0  
 Сдвиг,Рука-2,0,0,-80,2,0  
 Пауза,1  
 Привязка,Деталь-2,Шпиндель-2  
 Сдвиг,Кулачек-6,0,0,28,1,0  
 Сдвиг,Кулачек-4,-20,0,-20,1,0  
 Сдвиг,Кулачек-5,20,0,-20,1,0

5. Выполняется имитационное моделирование обработки изделия, результатом которого являются данные для технико-экономического анализа эффективности принятой организационно-технологической и технической компоновки производственной системы.

*Расчет экономических показателей системы обработки.* Технико-экономический анализ эффективности групповой обработки деталей типа «Кронштейн» выполняется по следующим направлениям:

1. Экономическое обоснование варианта механической обработки (табл. 3).
2. Расчет элементов технологической себестоимости (табл. 4).
3. Расчет капитальных затрат (табл. 5).
4. Расчет себестоимости, стоимости детали и расходов на производство продукции (табл. 6).
5. Расчет сметы расходов на производство (табл. 7).
6. Расчет основных технико-экономических показателей системы обработки (табл. 8).

*Планировка участка по обработке детали типа «КРОНШТЕЙН»*



- Условные обозначения
- 1 - 2 - место установки
  - 3 - 4 - место установки
  - 5 - 6 - место установки
  - 7 - место установки
  - 8 - место установки
  - 9 - место установки
  - 10 - место установки
  - 11 - место установки
  - 12 - место установки

№	ИД	Имя файла	Дата создания	Последнее изменение
1	VA-500	22.5	22.5	22.5
2	Машинная станция			
3				

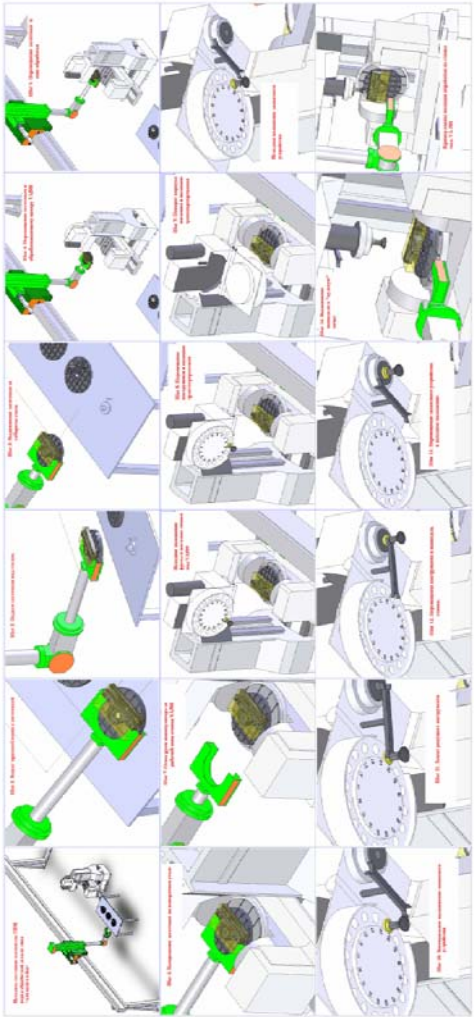
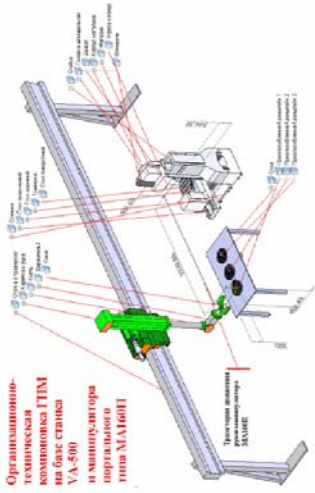


Рис. 6. Имитационное моделирование процесса обработки детали «Кронштейн» на ОЦ VA500

Таблица 2.

Режущие инструменты для обработки деталей типа «Кронштейн» на ОЦ VA500

№ перех ода	Тип инструмента	Код инструмента	Код пластины	Материал режущей части
002	фреза профильная	R300-010A16L-05L	R300-0517E-PM	CT 530
003	фреза профильная	R300-016B20L-08L	R300-0828M-KH	GC 3040
004	фреза профильная	R300-016B20L-08L	R300-0828M-KH	GC 3040
005	сверло	R840-0500-30-AOA	-	GC 1220
006	сверло	R840-0500-30-AOA	-	GC 1220
007	сверло	R840-1100-30-AOA	-	GC 1220
008	сверло	R840-1100-30-AOA	-	GC 1220
009	сверло	R840-1300-30-AOA	-	GC 1220
010	сверло	R840-0500-30-AOA	-	GC 1220
011	сверло	R840-0500-30-AOA	-	GC 1220
012	сверло	R840-1000-30-AOA	-	GC 1220
013	сверло	R840-1400-30-AOA	-	GC 1220
014	сверло	R840-1600-30-AOA	-	GC 1220
015	сверло	R840-1100-30-AOA	-	GC 1220
016	фреза концевая	R216.24- 20050IAK38P	-	GC 1630
017	фреза концевая	R215.86- 03000/AC05G	-	GC 1620
018	фреза концевая	R215.85- 02000/AC30G	-	GC 1620
019	фреза концевая	R215.85- 02000/AC30G	-	GC 1620
020	фреза концевая	R215.85- 02000/AC30G	-	GC 1620
021	сверло	R840-2000-30-AOA	-	GC 1220
022	фреза резьборезная	R217.14C045100A C13N	-	GC 1630
023	фреза резьборезная	R217.14C045100A C13N	-	GC 1630
024	фреза резьборезная	R217.14C075150A K21N	-	GC 1630
025	фреза резьборезная	R217.14C045100A C13N	-	GC 1630
026	фреза резьборезная	R217.14C045100A C13N	-	GC 1630
027	фреза резьборезная	R217.15C120200A K34N	-	GC 1630

028	расточный инструмент	R820A-BR11SCFC06A	CCMT060208-KR	GC 3215
029	расточный инструмент	R820D-BR18SCFC09A	CCMT09T308-KR	GC 3215
030	расточный инструмент	R825B-AF17STUP0902A	TPMT090204-KF	GC 3215
031	фреза концевая	R215.64-32A32-4512	SPMT 12 04 08-WH	H12A
032	фреза концевая	R215.64-32A32-4512	SPMT 12 04 08-WH	H12A
034	фреза торцевая	R245-050Q22-12M	R245-12T3M-KM	H13A
035	фреза торцевая	R245-050Q22-12M	R245-12T3M-KL	GC 3020
036	расточный инструмент	391.68A-1-03213C06A	CCMT060204-MM	H10
037	расточный инструмент	R820C-BR16SCFC09A	CCMT09T308-KR	GC 3215
038	расточный инструмент	R820B-BR12SCFC06A	CCMT060208-KR	GC 3215
039	расточный инструмент	R825A-AF11STUP06T1A	TCGX06T104-AL	H10
040	расточный инструмент	R825B-AF17STUP0902A	TPMT090204-KF	GC 3215
041	фреза концевая	R215.64-32A32-4512	SPMT 12 04 08-WH	H12A
042	фреза концевая	R215.64-32A32-4512	SPMT 12 04 08-WH	H12A
043	сверло	R840-0794-30-A1A	-	GC 1220
045	фреза концевая	R215.36-08050-BC19L	-	GC 1620
046	фреза профильная	R300-010A16L-05L	R300-0517E-PM	CT 530
047	фреза профильная	R300-016B20L-08L	R300-0828M-KH	GC 3040
049	фреза концевая	R215.64-32A32-4512	SPMT 12 04 08-WH	H12A
050	фреза концевая	R215.64-32A32-4512	SPMT 12 04 08-WH	H12A
051	фреза торцевая	R230-012B16L-05L	R230-12T308E-ML	H13A
053	сверло	R840-0420-30-AOA	-	GC 1220
054	сверло	R840-0800-30-AOA	-	GC 1220

055	фреза концевая	R215.85-02000/AC30G	-	GC 1620
056	сверло	R840-2000-30-AOA	-	GC 1220
057	Фреза резьборезная	R217.13-032070AC08N	-	GC 1630

Таблица 3.

Исходные данные для экономического обоснования варианта  
механической обработки

Наименование	Единицы измерения	Обозначение	Проектный вариант
Годовой выпуск деталей	Шт.	Ng	2000
Оборудование: 1. модель 2. количество 3. цена при одах.			6Н12ПБ 1 300000 6Н12ПБ 1 300000 VA 500 1 800000
Норма штучного времени	Хв.	$t_{шт}$	3,44 1,37 0,98
Норма машинного времени	Хв.	$t_0$	1,98 0,53 0,16
Мощность двигателя	кВт	Ny	10 10 22,5
Разряд рабочих.			4 4 5
Количество рабочих	Чел.		3
Производственная площадь	м <sup>2</sup>		32,7
Тарифная ставка рабочего	Грн/год	Cч	4,2 4,2 5,2
Цена производственной	1м <sup>2</sup> Грн.	Cпл	337

Наименование	Единицы измерения	Обозначение	Проектный вариант
площади			
Коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату		К <sub>д</sub>	1,2
Процент, учитывающий отчисления на социальное страхование		К <sub>с</sub>	0,39
Тариф на энергию	Грн/кВт Т	С <sub>ен</sub>	0,42
Норма амортизации	%	Н <sub>д</sub>	15
Действительный фонд времени	время	Ф <sub>д</sub>	2040
Режущий инструмент: 1. наименование			Фрезы торцевые, концевые, фасонные, резьбонарезные, сверла, развертки
2. количество	Шт.	n <sub>и</sub>	7, 16, 7, 7, 21, 8
3. цена при одах.	Грн.	С <sub>и</sub>	5, 6, 5, 18, 6, 15
Период стойкости инструмента	Хв.	Т	45, 30, 45, 20, 20, 100

Таблица 4.

Расчет технологической себестоимости изделия

Название расходов	Проектный вариант
1. Основная и дополнительная зарплата рабочего (вируб.)	$Z_{п} = C_{ч1} \cdot K_{Т1} \cdot t_{шт} \cdot K_{об} \cdot K_{д} \cdot K_{с}$ , грн. $Z_{п\text{пр1}} = 4,2 \cdot 2,57 \cdot 3,44 \cdot 0,5 \cdot 1,2 \cdot 0,39 = 8,689$
2. Расходы на силовую энергию	$Z_{ен} = [N_{у} \cdot K_{п} \cdot (T_{шт} - T_{м}) + N_{у} \cdot K_{м} \cdot T_{м}] \cdot$ , грн. $Z_{ен} = [14,1 \cdot 0,2 \cdot (3,44 - 1,98) + 14,1 \cdot 0,65 \cdot 1,98] \cdot$ $\frac{0,42}{60 \cdot 100} = 0,001558$
3. Расходы на амортизацию оборудования	$Z_{А} = \frac{C_{об} \cdot K_{Т} \cdot N_{а} \cdot n_{о}}{N}$ , грн. $Z_{А} = \frac{467000 \cdot 1,13 \cdot 0,15 \cdot 1}{2000} = 39,578$

Название расходов	Проектный вариант
4. Расходы на текущий ремонт оборудования	$Z_p = Z_A \cdot 0,33$ , грн. (7.9)
	$Z_p = 39.578 \cdot 0,33 = 13.061$
6. Затраты на резательный инструмент	$Z_{и} = \frac{(C_{и} + C_{пер} \cdot n_{пер}) \cdot t_{м}}{T \cdot (n_{пер} + 1) \cdot 60} \cdot K_{уб}$ , грн.
	$Z_{и} = \frac{(8.15 + 1 \cdot 8) \cdot 1.98}{43 \cdot (1 + 1) \cdot 60} \cdot 1,05 = 0.00651$
7. Расходы на технологическую площадь	$C_{пл} = \frac{N_{пл} \cdot S \cdot n}{N_r}$ , грн.
	$C_{пл} = \frac{337 \cdot 32.7}{2000} = 5.51$
8. Затраты на материалы	$Z_M = M_z \cdot K_T \cdot Ц_M - (M_p - M_{и}) \cdot Ц_o$ , грн.
	$Z_M = 9.98311,05 \cdot 1.5321 - (9.9831 - 4.088) \cdot 1.5321 \cdot 0,23 = 139825$
Сумма, грн	$C_{пр} = 206,671$

Таблица 5.

## Расчет капитальных затрат

Название вложений	Проектный вариант
1. Капитальные вложения в оборудование, грн	$K_{об} = K_{тр} \cdot Ч_{цоб} \cdot Ч_n$
	$K_{об} = 1,125 \cdot 467000 \cdot 1 = 525375$
2. Капитальные расходы на производственную площадь, грн	$K_{пл} = Ц_{пл} \cdot S \cdot Ч_n$
	$K_{пл} = 337 \cdot 32,7 \cdot 1 = 11020$
Сумма, грн	$K_1 = 536395$

Таблица 6.

## Калькуляция на деталь «Кронштейн»

№	Наименование статей	Сумма, грн	Примечания
1	Основные материалы	139,83	$M_z \cdot Ц_{мат}$
2	Транспортно-заготовительные расходы	2,8	2% от п1
3	Обратные отходы	20,77	$M_{отх} \cdot Ц_{отх}$
Материалы основные		121,86	$\Sigma n1 \div n3$
4	Основная зарплата основных рабочих	0,106	$\frac{\sum t_{ум} \cdot 1,1}{60}$
5	Дополнительная зарплата основных	0,013	12% от п4

№	Наименование статей	Сумма, грн	Примечания
	рабочих		
6	Отчисление в соцстрах	0,046	39% от (п4+п5)
7	Расходы на содержания и эксплуатации оборудования	0,071	60% от (п4+п5)
8	Общие производственные расходы	0,05	42% от (п4+п5)
	Производственная себестоимость	122,146	$\Sigma n1 \div n8$
9	Административные расходы	0,044	37% от (п4+п5)
10	Расходы на сбыт	1,22	1% от (п9+С <sub>пр</sub> )
	Полная себестоимость	123,41	С <sub>пр</sub> +п9+п10
11	Плановая прибыль	12,34	10% вот С <sub>пол</sub>
	Оптовая цена	135,75	С <sub>пол</sub> +п11
12	ПДС	27,15	20% от Ц <sub>онт</sub>
	Отпускная цена товарного выпуска	162,9	Ц <sub>онт</sub> +НДС

Таблица 7.

## Расчет сметы расходов

№	Наименование статей	Сумма, тыс. грн	Примечания
1	Основные материалы	279660	$N_{\Gamma} M_3 C_M$
2	Транспортно-заготовительные расходы	5593,2	2% от п1
3	Обратные отходы	41540	$N_{\Gamma} (M_3 - M_d) C_o$
	Материалы основные	243713,2	$\Sigma n1 \div n3$
4	Основная зарплата основных рабочих	212	$\frac{\sum t_{um} \cdot 1,1 \cdot N_{\Gamma}}{60}$
5	Дополнительная зарплата основных рабочих	25,44	12% от п4
6	Отчисление в соцстрах	92,60	39% от (п4+п5)
7	Расходы на содержания и эксплуатации оборудования	142,46	60% от (п4+п5)
8	Общие производственные расходы	99,73	42% вот (п4+п5)
	Производственная себестоимость	244285,43	$\Sigma n1 \div n8$
9	Административные расходы	87,85	37% от (п4+п5)
10	Расходы на сбыт	2443,73	1% от (п9+С <sub>пр</sub> )
	Полная себестоимость	246816,91	С <sub>пр</sub> +п9+п10
11	Плановая прибыль	24681,69	10% вот С <sub>пол</sub>
	Оптовая цена	271498,60	С <sub>пол</sub> +п11
12	ПДС	54299,72	20% от Ц <sub>онт</sub>
	Отпускная цена	325798,32	Ц <sub>онт</sub> +НДС



Таблица 8.

## Основные технико-экономических показатели обрабатывающего модуля

№ п/п	Наименование показателей	Единица измерения	Величина
<b>АБСОЛЮТНЫЕ</b>			
1	Годовой выпуск деталей: - количество изделия (комплектов) - по оптовой стоимости - по трудоемкости	шт. грн. Нормочас.	2000 271498,6 0
2	Общая площадь участка, также производственная	м <sup>2</sup>	32,7
3	Количество рабочих мест: также металлорежущее оборудование	од. 3	3 3
4	Сумма добавления	грн.	24681,69
<b>ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ</b>			
5	Стоимость выпускаемой продукции на: - одного рабочего - 1 м <sup>2</sup> производственной площади	грн.	108599,4 4 9963,25
6	Производственная себестоимость единицы продукции	грн.	122,146
7	Уровень рентабельности изделия	%	10
8	Удельная площадь на станок	м <sup>2</sup>	10,9

**Выводы.** Установлено, что средняя себестоимость деталей типа «Кронштейн», изготовленная на обрабатывающем центре VA500 высококачественными режущим инструментами в мелкосерийном производстве составит 123,41 грн., а плановая прибыль на каждую деталь составляет 12,34 грн. При этом средний уровень рентабельности изделий 10%.

**Список литературы:** 1. *Шелковий О.М., Феденюк Д.В.* Постановка задачі підвищення ефективності систем механоскладального виробництва на основі тривимірного моделювання //Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Збірка наукових праць. Тематичний випуск Технології в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2010. - №24. - С.95 -111; 2. *Фадеев В.А., Пермяков А.А., Тимофеев Ю.В., Шелковой А.Н.* Опыт организационно-технологической подготовки предприятий аэрокосмической промышленности //Технологические системы, научно-технический журнал. – 2010, № 1(50). – С.82 – 87.

Поступила в редколлегию 20.09.2010

**О.Л.КОНДРАТЮК**, канд. тех. наук; УПА, г. Харьков

**А.О.СКОРКІН**, асистент; УПА, г. Харьков

**В.О.СКОРКІНА**, інженер; УПА, г. Харьков

## **ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ МІТЧИКІВ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ЕФЕКТУ МІКРОВІБРАЦІЙ ПРИ НАРІЗУВАННІ РІЗЬБЛЕНЬ У ГЛУХИХ ОТВОРАХ**

Стаття присвячена рішення актуальної задачі - підвищенню ефективності різьбо нарізання глухих отворів за рахунок ефекту мікровібрацій. Це завдання вирішується, за рахунок застосування силових вузлів з новими компоновальними і технологічними характеристиками, які реалізують складні цикли руху подачі, та представляються найбільш перспективними силовими вузлами агрегованих технологічних систем даного класу.

*The article deals with an urgent problem - increasing the efficiency of thread cutting bores through microvibration effect. This problem is solved, through the use of power nodes with arranging new and technological characteristics that implement complex motion feeding cycles, and represented the most promising power nodes modular technological systems of the class.*

### **Введення**

Одним з найбільш ефективних напрямків нарізування внутрішніх різьб при автоматичному циклі обробки в отворах малого діаметра є застосування агрегатних мехатронних силових головок.

Так на кафедрі МОіТС (УПА) була спроектована силова електромагнітна головка з адаптивною системою керування (див. рис.1). Одним з керуючих факторів даною системою керування, є зміна крутного моменту, що дозволило захистити мітчик від поломки й забезпечити раціональні режими різання.

При експериментальних дослідженнях роботи силової головки, спостерігався ефект що нагадує віброрізання, яке дозволило забезпечити одержання стружки правильної форми та стабільний її вивід із зони різання.

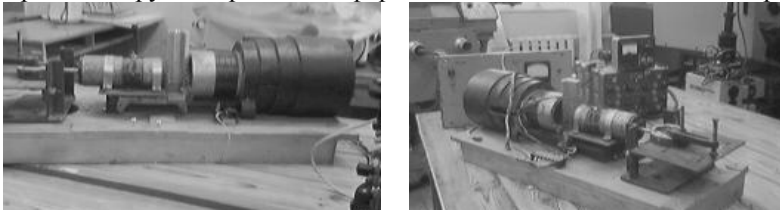


Рис.1. Силова головка з електромагнітним приводом подач для різьбонарізання в малих отворах.

## Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою роботи є вивчення впливу мікровібрацій на процес нарізання внутрішніх різьб мітчиком.

## Виклад основного матеріалу статті

Встановлено, що застосування мікровібрацій при різьбонарізанні дозволяє поліпшити якісні характеристики поверхневого шару, точність нарізування різьб та інших. Однак, у порівнянні з нарізуванням наскрізних різьб, формування різьб у глухих отворах володіє рядом істотних особливостей.

Нарізування різьб в наскрізному отворі включає, як видно з рис. 2, *а*, що впливають основні етапи:

- врізання ріжучої частини (ділянка *OA*);
- нарізування різьб по всій глибині отвору (ділянка *AB*);
- вихід ріжучої частини та калібрування нарізаної різьби (ділянка *BP*);
- зупинка та вигвинчування мітчика з обробленого отвору.

При нарізуванні різьб в глухих отворах процес складається з наступних етапів (рис. 2, *б* та 2, *в*):

- врізання ріжучої частини (ділянка *OA*);
- нарізування різьб на задану глибину (ділянка *AB*);
- зупинка мітчика в отворі та вигвинчування його з обробленого отвору (ділянка *BX*).

Відмінною рисою процесу є також і те, що в процесі обробки в глухих отворах на дні накопичуються стружки, що відокремилися, а наприкінці різьбової частини отвору в момент зупинки мітчика утворюються стружки, невідокремлені від основної маси матеріалу. При зворотному ході мітчика кожен зуб ріжучої частини, проходячи зазначену зону, піддається дії сили  $P_{см}$  (рис. 2), що треба, зокрема з аналізу осцилограмм крутного моменту.

Тоді, при нарізуванні різьб до середини глибини отвору (рис. 2, *б*) процес складається з наступних етапів:

- врізання ріжучої частини (ділянка *OA*);
- нарізування різьби на задану глибину (ділянка *AB*);
- зупинка мітчика (ділянка *BP*);
- початок вивертання мітчика (ділянка *CD*);
- змінання стружок, не відділених від основної маси матеріалу (ділянка *DE*);
- безперешкодне вивертання мітчика (ділянка *EX*).

Аналіз осцилограми при нарізуванні різьби в упор до дна отвору (рис. 1, *в*) показує, що у цьому випадку в початковий момент вигвинчування мітчика з отвору відбувається також змінання стружок, що нагромадилися в процесі різання на дні отвору (ділянка *BC*). Далі процес протікає аналогічно наведеному вище.

Як видно з осцилограм, при нарізуванні різьблень у глухих отворах, при зворотному ході спостерігається різке збільшення крутного моменту. Це супроводжується тим, що зубці ріжучої частини мітчика взаємодіють із

зазначеними елементами стружки, що в ряді випадків приводить до їхнього викрашування.

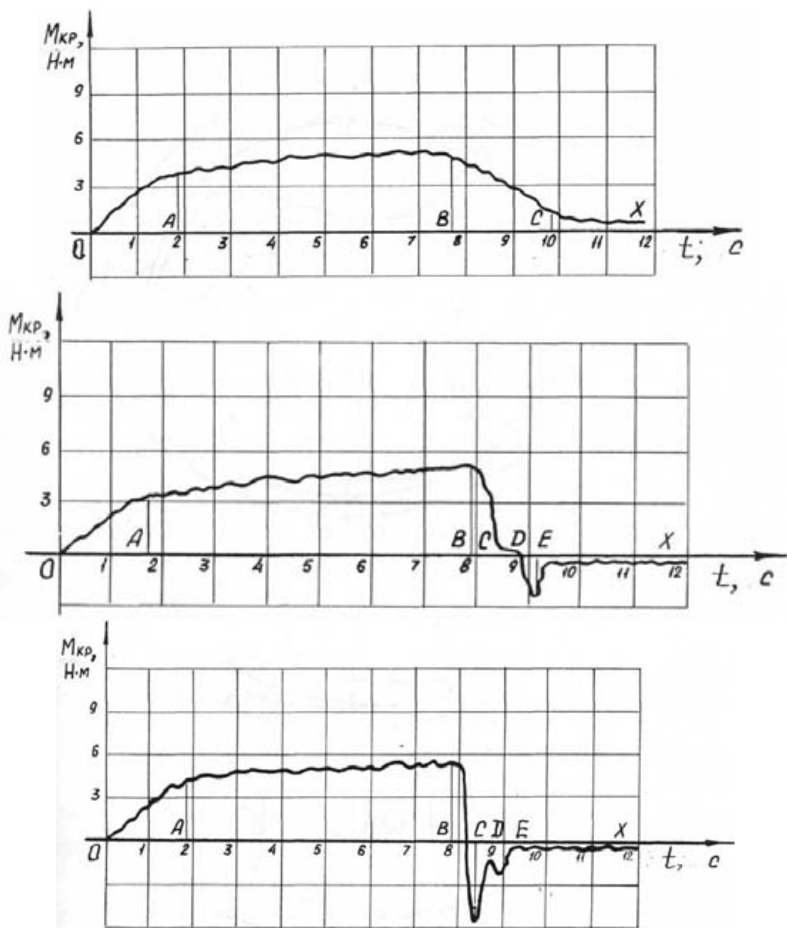


Рис. 2. Зміна крутного моменту при нарізуванні різьби мітчиком:  
 а – у наскрізному отворі; б – у глухому отворі; в – у глухому отворі до дна

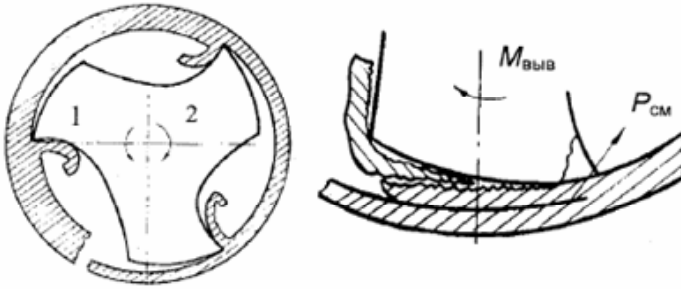


Рис. 3. Схема нарізування різьби в глухому отворі:  
1 – різання; 2 – вигвинчування

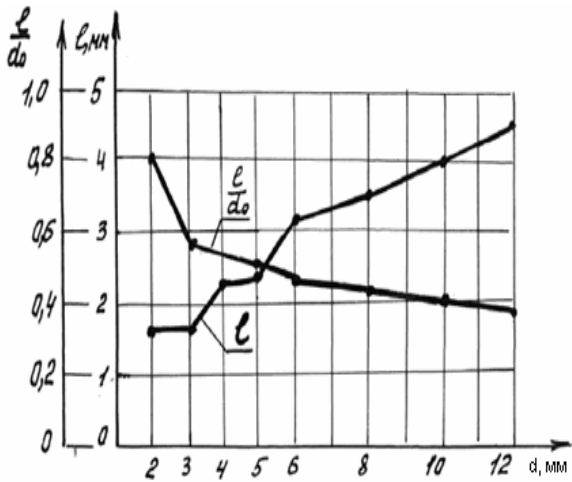


Рис. 4. До аналізу особливостей нарізування різьби у глухих отворах.  
Визначимо обсяг зрізаної стружки:

При нарізуванні різьби мітчиком відбувається видалення частини металу для утворення профілю різьблення (рис. 4).

$$V_{сш} = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi \cdot d_m^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \right) L \quad \text{або} \quad V_{сш} = \frac{\pi \cdot L}{8} (d_m^2 - d_0^2)$$

де  $d$ , мм – діаметр мітчика;

$d_0$  – діаметр отвору під різьбу;

$L$  – довжина нарізає резьб.

Висоту простору  $l$ , що займе зрізана стружка можна визначити, виходячи з рівності обсягів:

$$\frac{\pi \cdot L}{8} (d_m^2 - d_0^2) = \frac{\pi \cdot l \cdot d_0^2}{4}$$

звідки:

$$l = \frac{d_m^2 - d_0^2}{4} LK$$

де  $d_0$  – коефіцієнт, що враховує нещільне розміщення стружки на дні отвору

$K=1,15\dots1,25$ .

На рис.3 наведені графіки зміни величин  $l$  та  $l/d_0$  для різьб М4 ... М12. З наведених даних видно, що, зі зменшенням діаметра різьби, умови обробки погіршуються (величина  $l/d_0$ ) змінюється в межах від 0,4 до 0,8  $d_m$ . Очевидно, що впровадження мітчика в зону  $l$  приводить до різкого збільшення крутного моменту як при нарізуванні різьблення, так і при вигвинчуванні мітчика, за рахунок влучення стружок під затилові зубці ріжучої частини мітчика. Тому при нарізуванні різьб у глухих отворах необхідно виключити взаємодію ріжучих зубців мітчика зі зрізаною стружкою, наприклад, за рахунок її видалення з отвору в процесі обробки.

При проведенні дослідження впливу мікрівібрацій на працездатність мітчиків звертає увагу те, що при нарізуванні різьби у глухих отворах стрибок крутного моменту на початку вигвинчування мітчика з отвору у випадку накладення на інструмент мікрівібраційних коливань значно менше. Це добре видно з наведеної на рис. 5 осцилограми крутні моменти при нарізуванні різьби М8 у титановому сплаві ВТ9. Зниження значень крутного моменту при вигвинчуванні пов'язане зі зменшенням коефіцієнта тертя та защемлення ріжучих зубців мітчика. Стрибок крутного моменту при вигвинчуванні мітчика з отвору може досягати значень 30-40 % від крутного моменту різання й привести до відколу зубів мітчика.

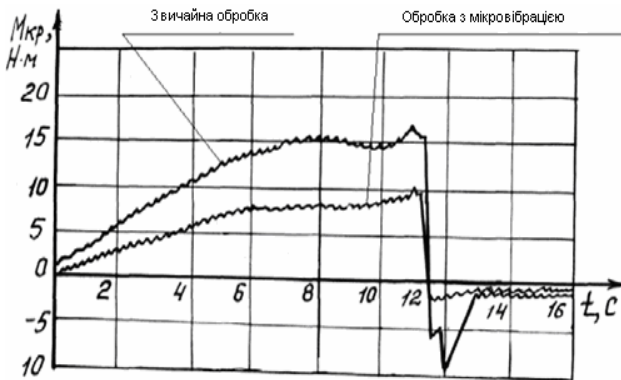


Рис. 5. Осцилограма  $M_{кр}$  при нарізуванні різьби М8 у титановому сплаві ВТ9

### **Висновки з даного дослідження**

Як видно із представлених даних підвищення працездатності мітчиків при мікровібраційному нарізуванні різьби у глухих отворах відбувається не тільки за рахунок зменшення значень крутного моменту різання, але й у значній мірі за рахунок зменшення стрибка крутного моменту в початковий момент вигвинчування мітчика. Ефект мікровібраційних коливань при нарізуванні різьб у глухих отворах дозволяє підвищити стійкість і працездатність інструмента в 3-5 разів, охоронити інструмент від перевантажень, забезпечити стабільний відвід стружки з оброблюваного отвору.

Проведені експериментальні дослідження нарізання різьб з мікровібраціями дозволили підтвердити: високу працездатність принципово нової різьбонарізної силової головки з електромагнітним приводом подачі; встановити найбільш раціональні експлуатаційні параметри; виявити істотне підвищення продуктивності обробки; достатню зносостійкість інструмента.

**Список літератури:** 1. Брон Л.С. Автоматизация обработки деталей с применением малогабаритных агрегатных станков //Станки и инструмент. – 1972, – № 2, – С. 21 – 23. 2. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. М.: Машиностроение, 1970. – 176 с. 3. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений/ А. Г. Суслов, В. П. Федоров, О. А. Горленко и др. Под ред. А. Г. Сусллова.- М.: Машиностроение, 2006.- 448 с. 4. Хати-Рао. Детерминированные и вероятностные методы определения оптимальных режимов механической обработки. – "Trans. of ASME", 1996, № 1, В98. 5. Мельниченко А.А., Тимофеев Ю.В., Корж О.В., Кондратюк О.Л. Принципиальная схема силовой головки с электромагнитным приводом для обработки отверстий малого диаметра. // Теоретичний і науково-практичний журнал. Вісник Інженерної Академії України. - Київ: 2001. - №3. - С.540-543.

*Поступила в редколлегию 20.09.2010*

*М.Э. КОЛЕСНИК*, аспирант НТУ «ХПИ»

*Е.В. НАБОКА*, к.т.н., доцент НТУ «ХПИ»

## **РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА АВТОМАТИЗАЦИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПЛАНОВО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОТДЕЛА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

У статті розглянута задача розробки проекту автоматизації діяльності планово-економічного відділу машинобудівного підприємства. Завдання вирішується в рамках умови скорочення часу на виконання документообігу відділу. Запропоновано зміна у функціонуванні підрозділу. Розглянуто можливі шляхи вирішення поставленого завдання на основі використання рекомендованої технології управління підприємством з використанням системи «Галактика».

В статье рассмотрена задача разработки проекта автоматизации деятельности планово-экономического отдела машиностроительного предприятия. Задача решается в рамках условия сокращения времени на выполнение документооборота отдела. Предложено изменение в функционировании подразделения. Рассмотрены возможные пути решения поставленной задачи на основе использования рекомендуемой технологии управления предприятием с применением системы «Галактика».

The article deals with the task of developing the project of automation of planning and economic department of mechanical engineering company. The problem is solved in the framework conditions for reducing the time to complete the documentation department. Proposed changes in the functioning of the unit. Possible solutions to the problem through the use of recommended technology enterprise management with the use of «Галактика».

**Актуальность.** Скорость перемен в современном мире стала настолько высокой, что привела к рождению новой эры бизнеса. В результате этого на сегодняшнем рынке стали доминировать абсолютно новые фирмы, которые совсем недавно еще даже не существовали, а из старых мировых лидеров-гигантов выжили только те, которые сумели научиться двигаться быстрее. Эта новая экономическая и деловая среда также характеризуется частыми технологическими прорывами, быстро меняющимися правилами игры на рынке, и формированием нового покупателя, который приспособился к этим быстрым переменам и приоритеты которого стали меняться со скоростью показа телевизионных реклам.

Отличительными особенностями успешных компаний являются гибкость, специализация, новаторство, глубокое понимание потребительских предпочтений, а также активное использование информационных технологий, которые играют определяющую роль в использовании передовых бизнес-моделей и в реализации стратегических целей. Они позволяют снизить операционные издержки и повысить рентабельность бизнеса.

Осознав это своевременные руководители предприятий ищут эффективные подходы, методы и технологии, которые помогут подготовить эффективное выполнение бизнес-процессов.



Решение задачи разработки проекта автоматизации деятельности планово-экономического отдела является актуальным не только для машиностроительного предприятия, но и для любого современного предприятия. Т.к. оптимизация и автоматизация деятельности планово-экономического отдела имеет стратегически важное влияние на перспективность деятельности самого предприятия.

В статье эта актуальная задача решается на примере планово-экономического отдела машиностроительного предприятия на основе использования технологии управления предприятием с применением системы «Галактика».

### **Качественная постановка задачи.**

Таким образом существует актуальная задача разработки проекта автоматизации документооборота планово-экономического отдела (ПЭО) машиностроительного предприятия для сокращения времени выполнения бизнес-процессов. Тогда постановка задачи формулируется следующим образом: разработать проект автоматизации деятельности планово-экономического отдела на примере планово-экономического отдела машиностроительного предприятия. Цель разработки проекта автоматизации заключается в создании инструмента, который помогает персоналу и руководству подразделения и предприятия в целом в стратегическом и оперативном управлении бизнес-процессами.

Следует отметить, что документооборот предприятия основан на использовании форм и первичных и отчетных документов, общепринятых на Украине для делопроизводства, сферы управления и учета. Используемые нестандартные формы документов – это формы документов для внутреннего использования, которые предназначены для первичного обобщения данных с целью подготовки стандартных результатных документов.

ПЭО машиностроительного предприятия является самостоятельным структурным подразделением, создается приказом директора и подчиняется заместителю директора по экономике и финансам. Отдел возглавляет начальник, который назначается и освобождается от занимаемой должности директором предприятия по представлению заместителя директора по экономике и финансам.

На рисунке 1 представлена структура планово-экономического отдела предприятия.

В рамках решения данной задачи были изучены все бизнес-процессы бюро технико-экономического планирования и статистики, бизнес-процессы бюро ценообразования и анализа цен на закупаемые материалы, а также бизнес-процессы бюро цехового планирования.

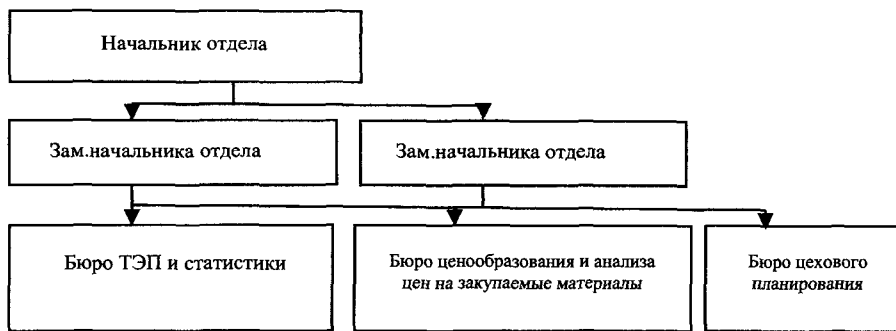


Рис. 1 – Структура планово-экономического отдела предприятия

На рисунке 2 представлен анализ деятельности планово-экономического отдела на примере одного из бизнес-процессов бюро технико-экономического планирования.

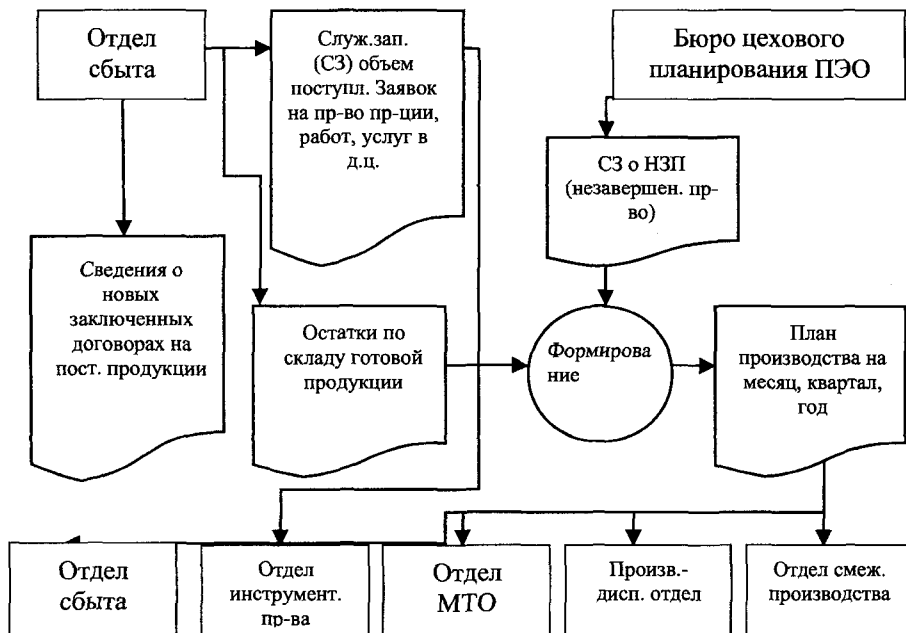


Рис. 2 – Бизнес-процесс разработки перспективных и текущих планов производства предприятия по установленному перечню технико-экономических показателей

Был изучен, проанализирован и детализирован документооборот ПЭО по подразделениям. На рисунке 3 приведен фрагмент сводной таблицы, отображающей документооборот технико-экономического планирования и статистики планово-экономического отдела.

№ п/п	Наименование документа	Документы, которые формируются на основании этого документа	Подразделения, в которых используется документ	Периодичность
	<u>согласованной заявки</u>			
4	Сведения о новых заключенных договорах на поставку продукции	План производства на год, квартал, месяц	Отдел сбыта	Ноябрь, декабрь, январь, февраль и др. в мес.
5	Остатки готовой продукции (по складам и цехам)	План производства на год, квартал, месяц	Отдел сбыта, Сборочный цех	1 раз в месяц
6	Данные по оплате труда по шифрам видов оплат (в разрезе подразделений Предприятия и категориям рабочих) ФОТ по типографии	Ф 1-ПВ и ТЭП отчет для Министрство промышленности Украины	Отдел АСУП	Ежемесячно
7	ФОТ по трудовым соглашениям, сумма фондовых путевок ФОТ редакции, з/у по видам оплат, сумма премий по профкому, ФОТ по профкому	Ф 1-ПВ и ТЭП	Бухгалтерия	Ежемесячно
8	Накладные по сдаче готовой продукции на склад	Ф 1-П и ТЭП	Сборочный цех, Механосборочный цех	Ежедневно
9	Служебная записка по позициям, указанным для отчета в Областное управление статистики (металлургический отчет)	Ф 1П	Цех литья, горячей обработки, Цех резанотехнических изделий	Ежемесячно
10	Служебная записка по объему поступления заявок на производство продукции, работ, услуг, в д.п.	Ф 1П	Отдел сбыта	До 1 числа мес.

Рис. 3 – Документооборот технико-экономического планирования и статистики планово-экономического отдела

Вся информация, полученная в ходе исследования деятельности ПЭО машиностроительного предприятия, была проанализирована с точки зрения концепции классического цикла управления предприятием, представленного на рисунке 4.

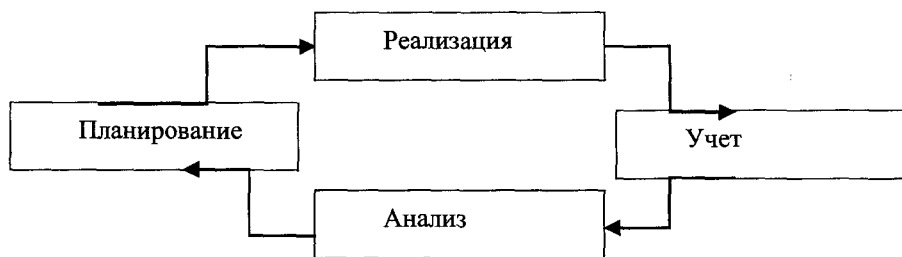


Рис. 4 – Последовательность автоматизации участков учета

Ввод в эксплуатацию КИС "Галактика" обеспечит автоматизацию следующих функций бюро технико-экономического планирования и статистики ПЭО:

1. Разработка перспективных и текущих планов производства по предприятию по установленному перечню технико-экономических показателей.

2. Разработка годовых, квартальных и месячных планов цехов по установленному перечню технико-экономических показателей.

3. Анализ договоров составленных отделом сбыта, на соответствие поставок требованиям по количеству, срокам и ценам изделий и комплектов.

4. Подготовка материалов за отчетный период для подведения итогов на заседании хозрасчетной комиссии

5. Формирование отчетности для предоставления в Министерство промышленной политики Украины, Областное статистическое управление, Районное статистическое управление.

6. Расчет плановой себестоимости товарной продукции по номенклатуре изделий в разрезе статей калькуляции на единицу продукции и на планируемый объем товарной продукции. Расчет плановой себестоимости в разрезе смет затрат.

7. Техничко-экономическое обоснование (расчет плановой рентабельности) освоения новых видов продукции, получения инвестиций в развитие и совершенствование производства (определение сроков окупаемости инвестиций).

8. Формирование отчетов для анализа основных технико-экономических показателей деятельности предприятия

9. Формирование отчетов для анализа фактической себестоимости товарной продукции в разрезах статей калькуляции и смет затрат.

10. Расчет ФОТ по предприятию в целом и по категориям рабочих промышленно-производственного персонала (ППП).

11. Формирование отчетов для анализа НЗП в разрезе производственных подразделений и по предприятию в целом.

12. Формирование цен на ТП.

Бюро технико-экономического планирования и статистики является центром обработки информации, который выполняет вышеуказанные функции. Выполнение этих функций связано с формированием отчетов и выполнением расчетов без ввода первичной информации, которая вносится в систему в других подразделениях. Автоматизация работы бюро достигается применением модуля «ТЭП». В ходе выполнения своих функций, бюро должно осуществить выпуск и расчет приблизительно 25 исходящих документов. Так как процесс планирования является итерационным процессом, то для выпуска одного документа необходимо произвести порядка 5-6 промежуточных или вариационных расчетов. Среднее время такого расчета порядка 1 часа. Соответственно нагрузка составит (25 документов / 22 рабочих дня) \* 5 итераций \* 1 час/итерацию = 6 часов. При продолжительности рабочего дня 8 часов такую нагрузку позволяет реализовать 1 лицензия (доступ к базе данных) модуля «ТЭП». Выполнение функции данных модуля «ТЭП». Выполнение функции «Анализ договоров составленных отделом сбыта, на соответствие поставок требованиям по количеству, срокам и ценам изделий и комплектов» требует наличие 1 лицензии модуля «Управление договорами» для получения доступа к информации о заключенных договорах.

В данной работе автоматизацию функций бюро, связанных с разработкой и анализом выполнения комплексных перспективных и текущих (месячных, квартальных, годовых) планов развития предприятия, обеспечивает модуль «ТЭП» Контура управления производством КИС «Галактика».

Следует отметить, что выполнение функций бюро во многом зависит от первичной информации, формируемой в других подразделениях предприятия (УМТС, отдел сбыта, отдел маркетинга, отдел главного конструктора, отдела главного технолога, бухгалтерия, ОТЗ), исходя из этого, рекомендуется внедрение системы в бюро на четвертом этапе автоматизации предприятия.

Для выполнения своих функций бюро использует документы, форма которых регламентирована требованиями законодательства Украины, отраслевыми и заводскими стандартами. Для приведения печатных форм документов к виду требуемому заводскими и отраслевыми стандартами необходимо их согласование на этапе разработки технических заданий (ТЗ).

Очевидно, что в тоже время бюро выполняет некоторые функции не свойственные ему, что приводит к снижению его производительности труда или же к ухудшению качества выполняемых им текущих функций. К таким функциям можно отнести:

1. Прием отчетов по труду (по отделам и цехам) и формирование показателей численности и отработанного времени.

Выполнение данной функции следует поручить Отделу труда и заработнойной.

2. Учет выпуска металлорежущих инструментов и оснастки. Выполнение данной функции следует поручить Отделу инструментального производства.

Информация полученная в результате выполнения своих функций ОТЗ и отделом инструментального производства будет вноситься в единую базу данных, где она будет доступна ПЭО для ее дальнейшей обработки.

**Результаты.** Результатом решения данной задачи является разработанный проект автоматизации деятельности планово-экономического отдела машиностроительного предприятия. Задача решена в рамках условий сокращения времени на выполнение документооборота отдела. Разработаны возможные пути решения поставленной задачи на основе использования рекомендуемой технологии управления предприятием с применением системы «Галактика».

**Список литературы:** 1. Сараев А.Д., Щербина О.А. Системный анализ и современные информационные технологии.—Симферополь: СОНАТ, 2006. 2. Никифоров В.В. Логистика. Транспорт и склад в цепи поставок.—М: ГроссМедиа, 2008. 3. Ларичев О.И., Петровский А.В. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы их развития: Итоги науки и техники.—М.: ВИНТИ, 1987. 4. Thierauf R.J. Decision Support Systems for Effective Planing and Control.—N.J: Prentice Hall, 1982. 5. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем.—М.: Высш.ш.к., 2001. 6. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ.—К.:МАУП, 2003. 7. Оре. О. Графы и их применение.—М.: «Мир», 1965. 8. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера.—К.: «Техніка», 1975. 9. Кузнецов Ю.Н., Кузубов В.И., Волощенко А.Б. Математическое программирование: учебное пособие.—М.: Высшая школа, 1980.

*Поступила в редколлегию 12.03.11*

## СОДЕРЖАНИЕ

Наукова школа проектування, виготовлення та використання високопродуктивних агрегативних технологічних систем механообробки.....	3
А.А.Пермяков, А.А. Жижев Совершенствование конструкции упорных центров с целью повышения точности установки прокатных валков при шлифовании.....	8
В.С. Карпусь, М.С.Іванова Перспективи застосування комбінованого основного інструменту.....	14
С.С.Добротворский, Е.В.Басова Методы прогнозирования шероховатости поверхности: обзор.....	23
Ю.А.Сизый, Д.В.Сталинский, А.П.Ушакон Теплофизика массового резания абразивными зернами шлифовального круга.....	46
А.В. Фесенко, Ю.Н. Любимый Повышение эффективности шлифования при активации и рациональном использовании СОЖ.....	71
А.А. Пермяков, А.П. Пациора Теоретические основы формирования гидродинамического эффекта на направляющих опорах инструмента для обработки глубоких отверстий.....	101
А.Н.Шелковой, Н.В. Ковалева Конструкторско-технологическая подготовка обработки деталей типа «кронштейн» на обрабатывающем центре VA 500 методами имитационного моделирования.....	111
О.Л. Кондратьюк, А.О. Скоркин, В.О. Скоркина Підвищення працездатності мітчиків шляхом застосування ефекту мікробібрації при нарізуванні різьблень у глухих отворах.....	128
М.Э. Колесник, Е.В. Набока Разработка проекта автоматизации деятельности планово-экономического отдела машиностроительного предприятия.....	134

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

# *ВІСНИК*

*НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО*

*УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"*

*Збірник наукових праць*

*Тематичний випуск*

*Технології в машинобудуванні*

*Випуск №41*

Науковий редактор д-р.техн.наук Тимофієв Ю.В.

Технічний редактор асп. Яковенко Е.И.

Відповідальний за випуск канд.техн.наук Обухова І.Б.

Обл.вид. № 201-10

Підп.до друку 12.07.2010 р. Формат 60x84 1/16. Папір Сору Paper.

Друк-ризографія. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,1.

Облік.вид. арк. 9,5. Наклад 300 прим. 1-й завод 1-100. Зам. № 118

Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ "ХПІ"

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

---

Отпечатанов типографии ГП ХМЗ «ФЭД»

Ул. Сумская,132 Зак №457

---

