

ISSN 2079–004X



**ВЕСТНИК
НАЦИОНАЛЬНОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
«ХПИ»**

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

40'2010

Харьков

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА "ХПИ"

Сборник научных трудов
Тематический выпуск

40'2010

"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. Елифанов, 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. – №40 . – 124с.

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

М.Э. КОЛЕСНИК, аспирант НТУ «ХПИ»
Е.В. НАБОКА, к.т.н., доцент НТУ «ХПИ»

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА

В статье рассмотрена задача разработки системы поддержки принятия решения для сокращения времени выполнения бизнес процесса. Предложено задание на разработку компонентов программного решения. Рассмотренные возможны пути ее решения на основе программной платформы автоматизации учета «1С:Предприятие».

In the article the task of development of decision support systems is considered for reduction of time of implementation business-process A task for development of components of programmatic decision is offered. The considered is possible the way of its decision on the basis of programmatic platform of automation of account «1С:nterprise».

Актуальность. Своевременная разработка и выполнение действий на рабочем месте - главные задачи работы управленческого персонала любой организации. Непродуманное решение или действие может дорого стоить компании. На практике результат одного решения заставляет нас принимать следующее решение и т.д. Осознав это, руководители предприятий ищут эффективные подходы, методы и технологии, которые помогут подготовить эффективное выполнение бизнес-процессов. Выполнять такую работу один человек не может, а привлекать большое количество сотрудников тоже неуместно. Поэтому компании пытаются решить эту актуальную задачу путем использования современных информационных технологий, которые в состоянии подготовить необходимое решение, а человек будет уже контролировать и корректировать определенные этапы выполнения бизнес-процесса.

В статье эта актуальная задача решается на примере бизнес-процесса доставки печатной продукции и с помощью систем поддержки принятия решений на базе технологий "1С Предприятие".

Качественная постановка задачи.

Таким образом существует актуальная задача разработки системы поддержки принятия решений для сокращения времени выполнения бизнес-процесса. Тогда постановка задачи формулируется следующим образом: разработать систему поддержки принятия решений для выполнения бизнес-процесса на примере доставки печатной продукции по регионам Украины.

Цель разработки системы поддержки принятия решений заключается в создании инструмента, который помогает руководству в стратегическом и оперативном управлении бизнес-процесса.

В зависимости от данных, с которыми эти системы работают, СППР условно можно разделить на оперативные и стратегические. Оперативные СППР предназначены для немедленного реагирования на изменения текущей

ситуации в управлении финансово-хозяйственными процессами компании. Стратегические СППР ориентированы на анализ значительных объемов разнородной информации, собираемой из различных источников. Важнейшей целью этих СППР является поиск рациональных вариантов развития бизнеса компании с учетом различных факторов, таких как конъюнктура целевых для компании рынков, изменения финансовых рынков и рынков капиталов, изменения в законодательстве и др. СППР первого типа получили название Информационных Систем Руководства (Executive Information Systems, ИСР). По сути, они являются конечным набором отчетов, построенных на основании данных из транзакционной системы предприятия, в идеале адекватно отражающей в режиме реального времени основные аспекты производственной и финансовой деятельности. Для ИСР характерны признаки: 1) отчеты обычно базируются на стандартных для компании запросах; 2) количество запросов относительно небольшое.

На рисунке 1 представлена классификация подходов реализации системы поддержки принятия решений по выполнению бизнес-процесса.

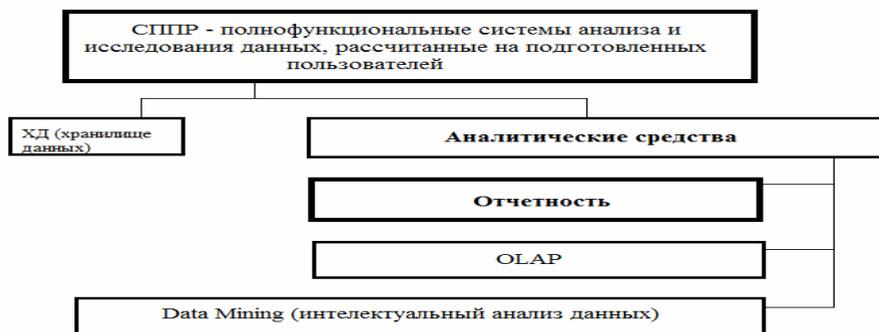


Рис. 1 - Классификация подходов реализации системы поддержки принятия решений по выполнению бизнес-процесса

В данной работе рассматривается ситуация, когда нужно принять несколько решений в условиях неопределенности, когда каждое решение зависит от исхода предыдущего решения или результатов испытаний. В таком случае применяют схему, называемую деревом решений (задач). Одним из типов разработки дерева задач является метод, когда выделяют цели, задачи, решения бизнес-процесса и непосредственные взаимосвязи между ними.

На рисунке 2 представлена разработанная схема, отражающая понимание целей, задач и решений в предметной области.

Следует отметить, что цели формирует непосредственный заказчик. Задачи формируются на уровне бизнес-процесса, а решение на уровне системы поддержки принятия решений.

В рамках применения метода дерева задач были выделены следующие цели на примере бизнес-процесса доставки печатной продукции: 1) доставить вовремя; 2) доставить полный комплект; 3) доставить в минимальные сроки.

Также были выделены следующие задачи: 1) задача составления графика поставки; 2) задача составления упаковочного листа; 3) задача учета (клиентов, товара).

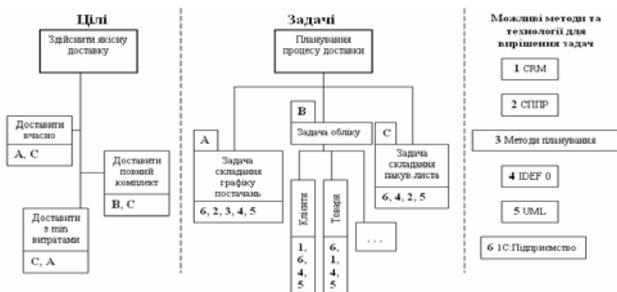


Рис. 2 – Схема отражающая цели, задачи и возможные решения

Очевидно, необходимо решение задачи учета и планирования. Задачу учета следует реализовывать на программной платформе 1С: Предприятие. Планирование требует особого подхода.

Решение задачи учета представлено на рисунке 3.

Таким образом, задача работы имеет вид: разработать систему поддержки принятия решений для решения задач учета, составление графика поставок и составление упаковочного листа.

Анализ задачи показывает, что для решения задач составления графика поставок и составление упаковочного листа необходимо дополнительно решить задачу коммивояжера. Данную задачу решают в рамках изменяющихся условий. Этап решения задачи коммивояжера представлен на рисунке 4.

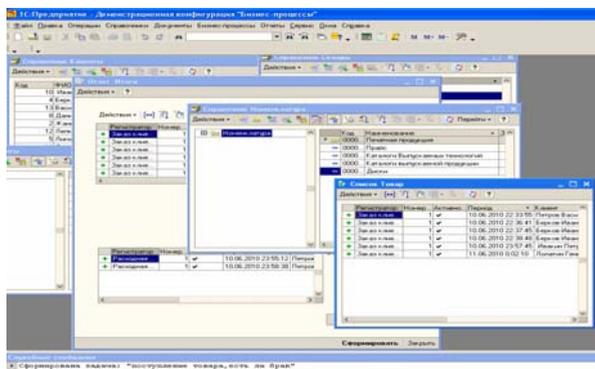


Рис. 3 – Экранные формы отчетов, документов, справочников

Початковий граф відстаней між містами

i \ j	Харків	Донецьк	Дніпропетровськ	Київ
Харків	M	335	213	478
Донецьк	335	M	252	727
Дніпропетровськ	213	252	M	533
Київ	478	727	533	M

Схема 1

Початковий граф витрат бензину на дорогу

i \ j	1	2	3	4	4
1	M	33,825	20,235	45,41	20,235
2	33,825	M	33,94	60,665	23,94
3	20,235	33,94	M	50,635	20,235
4	45,41	60,665	50,635	M	45,41

Схема 2

Схема 3

Обмеження:

- виділено бензину = 240 л;
- сер. витрати фургону 9,5л/100км;
- часовий проміжок 1 місяць;
- кількість журналів 3000.

В результаті по дереву гілкувань гамільтонов цикл утворюють ребра:

$$X_0 = (1,2)(2,3)(3,4)(4,1)$$

Харків-Донецьк-Дніпропетровськ-Київ-Харків

Обмеження:

- виділено бензину = 300 л;
- сер. витрати фургону 9,5л/100км;
- часовий проміжок 1 місяць;
- наявність 2х машини;
- кількість журналів 5000.

В результаті по дереву гілкувань гамільтонов цикл утворюють ребра:

$$1\text{я машина: } X_0 = (1,2)(2,3)(3,1)$$

Харків-Донецьк-Дніпропетровськ-Харків

$$2\text{я машина: } X_0 = (1,4)(4,1)$$

Харків-Київ-Харків

Обмеження:

- виділено бензину = 240 л;
- сер. витрати фургону 9,5л/100км;
- клієнт з Києва-термінове замовлення;
- кількість журналів 3000.

В результаті по дереву гілкувань гамільтонов цикл утворюють ребра:

$$X_0 = (1,4)(4,3)(3,2)(2,1)$$

Харків-Донецьк-Дніпропетровськ-Київ-Харків

Рис. 4 – Етап рішення задачі коммивояжера

Результаты. Результатом рішення данної задачі являється розроблена система підтримки прийняття рішень, яка заключається в інструменті, що допомагає керівництву в стратегічному і оперативному управлінні бізнес-процесом.

Список литературы: 1. Никифоров В.В. Логистика. Транспорт и склад в цепи поставок.–М.: ГроссМедиа, 2008. 2. Ларичев О.И., Петровский А.В. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы их развития: Итоги науки и техники.–М.: ВИНТИ, 1987. 3. Сараев А.Д., Щербина О.А. Системный анализ и современные информационные технологии.– Симферополь: СОНАТ, 2006. 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.шк., 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. 10. Митичкин С.А. Разработка в системе "1С:Предприятие 8.0".-М.: ООО «1С-Паблишинг», 2003.

Поступила в редколлегию 01.09.10

Н.Л. ШЕЛКУНОВА, инженер УИПА, г.Харьков

Г.Я.АНДРЕЕВ – ОСНОВАТЕЛЬ ШКОЛЫ ИНДУКЦИОННО - ТЕПЛОЙ СБОРКИ - РАЗБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ С ГАРАНТИРОВАННЫМ НАТЯГОМ

100-летию со дня рождения посвящается

Статья посвящена 100-річчю від дня народження ректора Української інженерно - педагогічної академії, ученого - засновника школи індукційно-теплової зборки-розбирання з'єднань із гарантованим натягом, наукового керівника лабораторії "Автоматизованих процесів у машинобудуванні".

The article is sacred to the 100year from the day of birth of rector the Ukrainian engineer - pedagogical academy, scientist - founder of school induction - thermal assembling are sorting out of connections with assured натягом, scientific leader of laboratory of the "Automated processes in an engineer".

Андреев Георгий Яковлевич родился 30 апреля 1910 года в с. Лавровка Шульгинского района Тамбовской губернии в многодетной крестьянской семье. В семье было пять братьев и сестра. Отец умер очень рано, в 1914 году. До 13 лет Георгий жил в деревне, а затем в 1923 году его старший брат, Василий Яковлевич, командир эскадрона Красного Козачества, увез его в Изъяславль Волынской губернии, где он трудился в кустарной мастерской, выполняя самую разную работу (был молотобойцем, учеником слесаря). Молодой и любознательный Георгий постоянно стремился получать все новые и новые знания, обучаясь в школе и зимой и летом, что дало ему возможность проходить за год два класса.

В 1926 году Георгий Яковлевич переехал в Луганск и поступил на паровозостроительный завод учеником слесаря. Жил в созданной при заводе коммуне рабочей молодежи, работал слесарем. Без отрыва от производства учился в вечерней школе, затем в вечернем рабочем университете (рабфаке), а с 1929 года - на подготовительных курсах Луганского вечернего машиностроительного института, который в 1933 г. объединился с Харьковским механико-машиностроительным институтом. Его становлению как инженера в значительной мере способствовала работа и дружба с опытными мастерами, инженерами старой закалки, которые привили ему любовь к технике, инженерному делу, пробудили жажду творчества, познания, чувство ответственности при выполнении любой работы.

Вспоминая, Георгий Яковлевич рассказывал, что когда работал в цехе на сборке паровозов и тендеров, у него был мастер Ткаченко. В то время мастер, кадровый рабочий, был уважаемый человек, его и боялись и почитали, а он держал себя достойно, пьянство было постыдно, не было и ругани. Так вот, как только Георгий осваивал определенную работу и начинал прилично зарабатывать, мастер переводил его на другой участок в новую бригаду. Так было несколько раз, пока наконец молодой Андреев возмужал и

отказался от очередного перехода на другую работу, мотивируя это тем, что он не хочет терять свой заработок. Мастер выслушал его и говорит: «Я хочу тебе добра. Ты должен ознакомиться со всеми деталями, узнать, как они обрабатываются, собираются. Я вижу, что ты хочешь учиться, послушай меня, потом скажешь мне спасибо». Прошли годы и вот, будучи уже начальником пролета, Георгий Яковлевич пришел к своему старому мастеру и сказал: «Кланяюсь Вам низко за то, что в свое время Вы меня правильно выучили, я теперь даже с закрытыми глазами все вижу, знаю и понимаю». Старый мастер растрогался до слез.

Организаторские способности Георгия Яковлевича проявились очень рано. Еще, будучи студентом четвертого курса вечернего института, он был назначен на должность Заместителя директора завода по новой технике, где он проявил себя с самой лучшей стороны. С конца 1933 года он был назначен начальником пролета, в котором изготовляли буксы для колес и колесные пары для паровозов. Так началась инженерная деятельность Георгия Яковлевича, которая в дальнейшем сыграла важную роль в его становлении как ученого. Молодой инженер проявлял творческий подход при решении сложных технических вопросов при создании мощных товарных магистральных паровозов серии ФД и пассажирских – серии ИС.

В августе 1942 года Андреев Г.Я. был назначен главным инженером Коломенского машиностроительного завода, а с 1943 по 1946 год директором этого же завода, основной продукцией которого были танки. За создание и выпуск новых паровозов серии Л (первый паровоз имел название «Победа») и многих видов военной продукции Георгий Яковлевич был награжден орденами Ленина, Трудового Красного знамени и Красной звезды. Коллектив завода три раза завоевывал переходящее Красное Знамя Государственного Комитета Обороны. В июле 1944 года коллективу завода за успешное выполнение заданий Правительства по выпуску металлургического оборудования и боеприпасов был вручен орден Трудового Красного Знамени.

Еще до окончания Отечественной войны завод в короткие сроки организовал производство мирной продукции для восстановления, разрушенного народного хозяйства. В сентябре 1944 года на имя директора Коломенского завода Андреева Г.Я. пришла телеграмма заместителя Председателя Совнаркома СССР Молотова В.М. с поздравлением коллектива завода с выпуском первой шахтной подъемной машины для Донбасса. Было организовано производство металлических тьюбингов для возобновленного строительства московского метрополитена, отремонтирована вращающаяся сцена МХАТ. С 1950 г. Г.Я.Андреев на преподавательской работе в ВУЗе, и одновременно занимается научными исследованиями. В 1952 году получает авторское свидетельство «Способ формирования железнодорожных, трамвайных и других колесных пар». Суть метода заключалась в нагреве колес, шкивов и других охватываемых деталей, сборкой с охватываемой деталью и последующее остывание, которое и позволяло получить тепловое соединение,

прочность которого, как доказал Г.Я. Андреев, на сдвиг и на прокручивание существенно выше, чем прессового. Помимо этого, процесс тепловой сборки легко поддавался автоматизации и исключалось громоздкое прессовое оборудование.

В 1953 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему исследования теплового соединения колесных пар. В 1950-1953 гг. - доцент Харьковского инженерно-экономического института, в 1954-1957 гг. - зав. кафедрой технологии горного машиностроения, декан электромашиностроительного факультета, в 1957-1964 гг. - проректор по научной работе и зав. кафедрой технологии горного машиностроения Харьковского института горного машиностроения, автоматики и вычислительной техники.

В 1962 г. Г.Я. Андреев утвержден в ученом звании профессора, в 1966 г. защитил докторскую диссертацию. В 1961 г. за заслуги в подготовке специалистов и развитие науки награжден медалью «За трудовую доблесть». За разработку машин и технологии в 1963 г., 1964 г., 1973 г. награждался ВДНХ золотыми медалями, в 1972 г. - серебряной. Среди удостоенных наградами направлений: исследование и разработка автоматической линии тепловой сборки вагонных колесных пар для Уралвагонзавода; разработка установки для изготовления стеклопластиковых труб.

С 1964 по 1978 гг. Г.Я. Андреев - ректор Украинского заочного политехнического института, профессор кафедры технологии машиностроения, научный руководитель Лаборатории автоматизации технологических процессов в машиностроении и Лаборатории Новых материалов МВССО УССР. С добротой вспоминает Г.Я. Андреева первый проректор академии по учебной работе с 1967 по 1995 годы, профессор кафедры экономики В.И. Лобунец: «Без преувеличения можно отметить, что его приход в УЗПИ стал началом становления этого вуза. Коренная перестройка учебно-лабораторной и административно-хозяйственной базы, создание прочной научно-исследовательской базы, организация учебного процесса на принципиально новой прогрессивной основе, укрепление организационных основ деятельности и, особенно кадрового потенциала позволили за короткий период поднять престиж учебного заведения, положительно сказалось на качестве подготовки инженерных кадров. В этот же период по инициативе ректора Г.Я. Андреева решился вопрос об открытии в институте подготовки инженеров-педагогов по дневной форме обучения. Для меня каждая встреча с Георгием Яковлевичем (я проработал с ним около двадцати пяти лет) всегда была событием. Мы всегда находили взаимопонимание во всех сложных вопросах организации подготовки кадров без отрыва от производства».

По воспоминаниям первого ученика Г.Я. Андреева, И.Ф. Малицкого, большое внимание Георгий Яковлевич уделял подготовке инженерных и научных кадров. Работая деканом, заведующим кафедрой, проректором вуза и наконец, ректором, сделал многое для улучшения учебного процесса. Там, где он появлялся в любой ипостаси, работа и дела начинали «кипеть». Будучи

назначенным, на должность ректора Украинского заочного политехнического института, Георгий Яковлевич поднял статус второстепенного учебного заведения до известного во всей стране и за рубежом ВУЗа. Георгий Яковлевич создал научную школу, на базе которой защищены 24 кандидатских диссертаций и три докторские. И мы, его ученики, благодарны ему за все то, что Он сделал и чему нас научил - постоянно повышать свой научный и педагогический уровень, любить своих учеников и беречь честь своего ВУЗа.[2,стр.33.]

М.К. Кравцов, проработавший более 10 лет под руководством Г.Я. Андреева в должности декана машиностроительного факультета, а потом 25-лет проректором по научной работе с гордостью отзывается о нем: «Под руководством Георгия Яковлевича к 1978 году объем научных исследований возрос до 3,3 млн. рублей, а численность научных работников - до 250 человек, причем процент ученых со степенями и званиями достиг – 20 человек. Особое внимание уделялось привлечению к научным исследованиям профессорско-преподавательского состава. В 1978 году примерно 240-250 преподавателей или 58-62% участвовали в научных исследованиях на условиях штатного совместительства, что являлось одним из наивысших показателей среди вузов Украины. Большое внимание уделялось уровню научных исследований, т.е. договорам, выполняемым по планам международного сотрудничества, Постановлениям правительства, планам государственного развития, планам отраслевых министерств. Количество таких договоров по годам колебалось в пределах 40-70%. Развитие научных исследований привело к заметному росту интереса к институту со стороны отдельных отраслей промышленности и промышленных ведомств. Начинается активная работа по укреплению связей с отраслями, что привело, в конечном счете, к созданию целого ряда отраслевых лабораторий. С 1969 по 1978 год в академии создается сеть отраслевых лабораторий шестью отраслевыми Министерствами СССР и УССР. До 30% объемов научных исследований выполнялось именно этими отраслевыми лабораториями. Широка была география этих исследований. Хозяйственные договора заключались с промышленными предприятиями Львова, Ивано-Франковска, Петропавловска-Камчатского, Советской Гавани, Норильска, Североморска, Ленинграда, Москвы, Ташкента и других городов.[1, стр.28.]

Научный руководитель лабораторий проф. Г.Я. Андреев, будучи неординарной личностью, в научном мире, сочетал научную интуицию с умением решать сложные технические проблемы. Всесторонне исследовались сборочные и разборочные процессы в машиностроении на основе индукционного нагрева токами промышленной частоты, автоматизировались технологические процессы путем использования электромагнитной сборки, изучались физические аспекты взаимодействия деталей в процессе тепловой сборки с целью существенного повышения прочности соединения. И эта задача была решена двумя способами: 1) с помощью тлеющего электрического разряда, 2) нанесением на поверхность

вала жидкого стекла перед его сборкой с нагретой втулкой. Такая сборка была впоследствии применена для получения сверхпрочных соединений, работающих при больших статических и динамических нагрузках. Несмотря на занятость, ректор Г.Я. Андреев один день в неделю выделял для непосредственной работы с сотрудниками лабораторий.

Сфера научных интересов лаборатории, выбранных самим Г.Я. в начале его творческой деятельности, включала исследования индукционно-тепловых способов сборки и разборки соединений с натягом, причем разрабатывались взаимосвязано технологические процессы выполнения этих операций и оборудование для их реализации. Исследования проводились на стыке нескольких фундаментальных наук: теории упругости, электротехники, электромагнетизма, технологии машиностроения».[1, стр.38.] Воспомянув о Г.Я. Андрееве, как о научном руководителе, старший научный сотрудник лаборатории автоматизации технологических процессов в машиностроении Добровенский Ю.М. отмечает, что им был организован научно-технический совет (НТС), в который входили все ответственные руководители тем, заведующий лабораторией и секретарь совета, которым мне довелось быть в течение почти шести лет. Совет собирался регулярно (это слово подчеркиваю особо) по четвергам, когда Г.Я. приходил в лабораторию и все вместе в продолжение 3-х-4-х часов обсуждали научные, материальные, финансовые и организационные вопросы. Научным вопросам уделялось наибольшее время и внимание. Особое внимание Г.Я. Андреев уделял молодым специалистам, своим аспирантам, причем не приглашая их на готовое, а предлагая работать в новых направлениях. Таким молодым специалистом стал и Н.К. Резниченко, будущий доктор наук, заведующий кафедрой «Интегрированных технологий в машиностроении и сварочного производства». «Мое знакомство с Г.Я. Андреевым началось в 1973 году, когда я стал, будучи еще студентом, сотрудником его лаборатории. Уже в те годы мне много раз приходилось обсуждать с ним материалы исследований и конструкторских разработок. Он внимательно выслушивал меня, не ограничивая во времени, особенно если это касалось физической сущности рассматриваемой проблемы. Когда через некоторое время я видел ту часть доклада или статьи, которая обсуждалась, я с удивлением отмечал, насколько глубоко, точно и ясно были изложены результаты. Теперь я отчетливо понимаю, что это и была та школа, которая учила обсуждать, обдумывать и писать. Это могучее научное направление создало кафедру и коллектив ученых» - вспоминает Николай Кириллович. [1, стр.34].

«Наблюдательность - ваш главный инструмент», «научитесь наблюдать - научитесь и осмысливать» - возможно, эти принципы и были залогом успеха Г.Я.Андреева и его школы. Результаты НИР этой школы внедрялись в производство на просторах СССР от Калининграда до Сахалина, от Мурманска до Баку и зарубежом. В 1967 г. за заслуги в подготовке специалистов и развитие науки награжден орденом «Знак Почета»; за многолетний труд на производстве и в высших учебных заведениях, значительный вклад в развитие

высшего образования УССР присвоено почетное звание «Заслуженного работника высшей школы УССР» в 1970г.

Проф. Г.Я.Андреев был создателем школы индукционно - тепловой сборки и разборки соединений с гарантированным натягом, выполнявшей теоретические и экспериментальные исследования, оригинальные разработки, защищенные авторскими свидетельствами, и внедренными во всех отраслях народного хозяйства – от агро – до авиационной промышленности.

Скончался Георгий Яковлевич 7 февраля 1978 г. после тяжелой и продолжительной болезни. Итогом научно-исследовательской работы Г.Я. Андреева стали 152 научные работы, в том числе 6 монографий; 43 авторские свидетельства; 20 технических усовершенствований; научная школа по тепловой сборке в машиностроении: 28 кандидатов наук.

Выводы. Все сказанное характеризует Георгия Яковлевича как человека, оставившего заметный след в науке по сборке неподвижных соединений тепловым способом. Будучи ректором, и одновременно научным руководителем лаборатории «Автоматизированных процессов в машиностроении», он явился пионером в области сборки прессовых соединений с предварительным нагревом охватывающей детали индукционным способом. В течение многих лет являлся истинным инициатором научных идей охватывающих все тенденции развития науки индукционного нагрева, и запросы различных отраслей народного хозяйства. Он создал коллектив единомышленников, основывал и руководил научно – исследовательской лабораторией, теоретические разработки которой позволили создать индукционно-сборочное оборудование, востребованное и внедренное в эксплуатацию на всей территории постсоветского пространства, а также за рубежом - Куба, Монголия, Вьетнам, Чехословакия.

И сегодня можно с гордостью подчеркнуть, что и в 21 веке научное творчество Георгия Яковлевича остается востребованным и продолжает свое развитие в исследованиях и работах его учеников. На кафедре и в лаборатории воспитано много кандидатов и докторов наук, и все это наследие мудрого ректора, ученого, человека - Георгия Яковлевича Андреева.

Кафедра «Интегрированных технологий в машиностроении и сварочного производства» Украинской инженерно-педагогической академии и по сей день, успешно ведет научные разработки и осуществляет внедрения оборудования, в основу которых положена научная идея Г.Я. Андреева.

Список литературы: 1. Н.К. Резниченко, И.Ф. Малицкий, В.А. Белостоцкий Георгий Яковлевич Андреев (к 100-летию со дня рождения): Библиографический указатель - Харьков, УИПА, 2010.- 56с. 2. С.Ф. Артюх, Е.И. Еремина, Е.Н. Онуфриева, Е.Н. Рыбальченко; науч. ред. Н.Н. Николаенко Андреев Георгий Яковлевич: к 100-летию со дня рождения: библиографический указатель. Харьков: УИПА, 2010. 72с. – (Ученые УИПА - юбиляры). 3. Резниченко Н.К. Технологические основы обеспечения качества и энергосбережения в процессах сборки и разборки с индукционным нагревом [Текст]: дис. работа на уч. ст. док. т.н. / Резниченко Н.К. – Х., 2008г.- 350с.

Поступила в редколлегию 20.09.2010

О.Л.КОНДРАТЮК, канд. техн. наук, УИПА, г.Харьков;
Ю.И.СІЧЕВ., канд. техн. наук, УИПА, г.Харьков;
А.О. СКОРКИН, аспирант, УИПА, г.Харьков;

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ДВИЖЕНИЙ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА.

При вивченні процесів свердлення найбільш важливим етапом є побудова динамічних моделей. У даній роботі розглядається аналіз розроблених алгоритмів математичного моделювання, показані їх переваги і недоліки. Приведені результати моделювання і зроблені висновки про стійкість системи.

There is a construction of dynamic models at the study of processes of boring the most essential stage. Analiz of the developed algorithms of mathematical design is examined in this work, their advantages and failings are shown. Design results are resulted and conclusions are done about stability of the system.

Одной из типовых и трудновыполнимых с высокой технологической надежностью операций в автоматизированном производстве есть операция сверления глубоких отверстий малого диаметра.

Процесс сверления отверстий малого диаметра характеризуется наиболее важными особенностями: во-первых, недостаточная прочность инструмента на изгиб; во-вторых, в результате накопления стружки в канавках сверла имеет место нарастание сил и крутящего момента. При обработке на неизменных режимах резания крутящий момент достаточно быстро достигает своего критического значения, а это приводит к поломке инструмента и неисправимому браку детали. В связи с этим при создании автоматизированного оборудования имеют место две проблемы: первая - определение оптимальных режимов резания (решению данной проблемы посвящено большинство исследований); вторая - управление процессом сверления без поломок инструмента и обеспечения необходимого количества выведений инструмента из зоны резания, которое возможно при создании силовых узлов с новыми компоновочными и технологическими характеристиками, которые реализуют сложные циклы обработки.

Решению второй проблемы, которая объединяет вопросы динамической диагностики и управления циклами обработки посвящена эта работа и имеет актуальность для науки и практики.

Работы по совершенствованию способов обработки глубоких отверстий проводятся на многих предприятиях. Созданы оригинальные конструкции инструмента и эффективные технологические процессы. Среди наиболее активных исследователей могут быть отмечены И. С. Веремейчук, Т. К. Крылов, М. А. Минков, В. Н. Подураев, М. В. Потягайло, Л. П. Телятников, Н. Д. Троицкий, С. А. Черничкин и др.

Публикации по вопросам обработки глубоких отверстий, как в отечественной, так и в зарубежной технической литературе сравнительно малочисленны и представлены в основном статьями в периодических изданиях, несколькими монографиями по отдельным способам обработки и двумя небольшими по объему книгами отечественных авторов — М. В. Потягайло и М. А. Минкова, содержащими обзор основных способов обработки глубоких отверстий. Однако многие из этих работ изданы давно.

Известные схемы сверления глубоких отверстий малого диаметра базируются на управлении скоростью подачи режущего инструмента при неизменной частоте вращения шпинделя. Однако можно существенно увеличить эффективность процесса, если обеспечить управление путем одновременного варьирования скорости подачи и частоты вращения шпинделя. Это связано с тем, что скорость резания существенно влияет на особенности динамики процесса и, особенно на интенсивность нарастания крутящего момента сверла, который непосредственно связан с вероятностью его поломки.

Схема динамической системы сверлильной головки показана на рис.1.

На станине 1 неподвижно установлен электромагнитный линейный двигатель 2, якорь 3 которого жестко соединен с двигателем 4, сообщаемым главное (вращательное) движение сверлу 5. Электродвигатель 4 с якорем 3 линейного двигателя установлены на каретке 6, которая под действием электромагнитной силы линейного двигателя перемещается по направляющим станины в направлении оси X. Каретка 6 присоединена к станине через пружину с жесткостью C и демпфером с коэффициентом

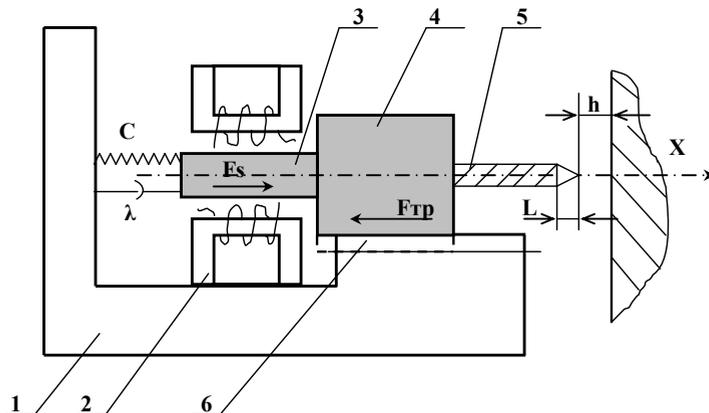


Рис. 1. Схема динамической системы силовой головки.

демпфирования λ . Пружина необходима для удержания силовой головки в отведенном положении при выключенной подаче.

Необходимость демпфера очевидна в связи с тем, что при подводе сверла к детали происходит значительный разгон каретки, что при врезании приведет к поломке инструмента из-за превышения условия прочности. Сила сопротивления демпфера пропорциональна скорости перемещения головки, что позволяет, выбрав значения λ и, как следствие, конструктивные параметры демпфера, уменьшить скорость врезания.

Как линейный электромагнитный двигатель, так и двигатель вращательного движения являются двигателями постоянного тока с бесступенчатым регулированием за счет изменения напряжения, подведенного на их якоря.

Поскольку глубокое сверление предполагает последовательное выполнение нескольких циклов врезания и отвода сверла из зоны резания для удаления стружки и охлаждения нами предложен следующий алгоритм управления силовой головкой (рис.2).

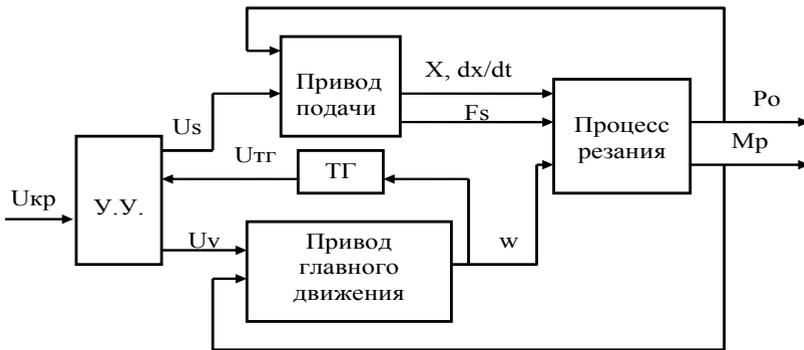


Рис. 2. Функциональная схема управления динамической системой сверлильной головки.

В исходном положении головка отведена от детали на расстояние h . Оба электродвигателя выключены. После установки заготовки и её закрепления включается двигатель вращательного движения и с небольшой задержкой - линейный двигатель. Сверло проходит путь h и начинает врезаться в заготовку. С увеличением глубины врезания крутящий момент $M_{кр}$ и осевая сила P_o увеличиваются в результате сопротивления сил трения при перемещении стружки в канавках сверла. Таким образом, как $M_{кр}$, так и P_o являются функциями глубины сверления X .

Известно, что наиболее важным с точки зрения прочности сверла является крутящий момент, и поэтому управление следует вести по предельно допустимому значению $M_{кр}$. Однако измерение его также является сложной задачей. В то же время известно, что рост момента сопротивления ведет к падению угловой скорости двигателя, которая

измеряется достаточно просто. Тем более что двигатели постоянного тока могут поставляться со встроенными тахогенераторами (ТГ), напряжение на выходе которого ($U_{тг}$) пропорционально угловой скорости ротора двигателя. Таким образом, можно ограничить крутящий момент $M_{кр}$ соответствующим напряжением на выходе тахогенератора $U_{тг}$.

”Входом” в привод подачи являются напряжение U_s , подведенное на якорь линейного двигателя, которое преобразуется в F_s – силу подачи. Выходными координатами привода подачи являются осевые перемещения сверла X , скорость этого перемещения dx/dt с силой подачи F_s . Входной координатой привода главного движения является напряжение U_v , подаваемое на якорь двигателя. Выходной координатой является угловая скорость ω ротора двигателя. Выходные координаты приводов преобразуются процессом сверления в осевую силу резания P_0 и крутящий момент $M_{кр}$. Эти выходные координаты процесса резания осуществляют обратные воздействия на приводы. Изменение момента резания ведет к изменению угловой скорости ротора, а изменение осевой силы резания ведет к изменению скорости dx/dt подачи.

Напряжение U_s и U_v задается в устройстве управления УУ, там же происходит сравнение напряжения на выходе тахогенератора $U_{тг}$ с $U_{кр}$, которое также задано в УУ. При $U_{тг} > U_{кр}$ привод подачи продолжает работать перемещая каретку в положительном направлении оси X : сверление продолжается. При падении $U_{тг}$ ниже $U_{кр}$ переключается полярность обмотки якоря линейного двигателя и происходит отвод головки.

Силовая головка в поступательном движении подачи (рис.1.) находится в равновесии под действием следующих сил:

$$F_s - P_0 - F_{мп} - F_{нр} - F_{д} = F_{ин}, \quad (1)$$

где $F_{нр}$ – сила упругости пружины, $F_{тр}$ – сила трения, $F_{д}$ – сила демпфирования, $F_{ин}$ – силы инерции, P_0 – осевой силы резания, F_s – электромагнитная сила линейного двигателя.

Определив все силы, подставив их в (1), получим:

$$m\ddot{x} = K_s \cdot U_s - mg\mu - CX - \lambda dx / dt. \quad (2)$$

Описанная логика работы силовой головки реализована блок-схемой моделирования в пакете “VisSim” приведена на рис.3. и позволяет решить задачу выбора важных конструктивных параметров привода.

Модель привода подачи объединена в “compound block” (составной блок) под названием solenoid, распечатка которого приведена на рис.4. В этом блоке, в свою очередь, находится блок “cutting forse” (рис.5) (сила резания), моделирующей осевую силу резания P_0 . Империческая формула расчета P_0 примет следующий вид:

$$P_0 = 10C_{p_0} D^{q_{p_0}} S^{y_{p_0}} K_p + K \cdot C_{p_0} D^{q_{p_0}} S^{y_{p_0}} K_p = 10C_{p_0} D^{q_{p_0}} S^{y_{p_0}} K_p(1 + K), \quad (3)$$

где K – коэффициент линейной зависимости P_0 от глубины сверления. Этот коэффициент определен экспериментально и хорошо описывается

следующим выражением:

$$K = \frac{X - h - L}{D \cdot 0,003}, \quad (4)$$

где $[X - (h + L)]$ - глубина сверления, м; D - диаметр сверла в мм.

Сила, развиваемая линейным двигателем, не должна превышать критическую силу $R_{кр}$. В момент врезания, когда сверло внедряется в обрабатываемый материал на высоту режущей части, осевая сила P_0 достигает максимального значения без учета трения стружки о канавки сверла. Этот момент является наиболее опасным с точки зрения прочности сверла из условия его устойчивости.

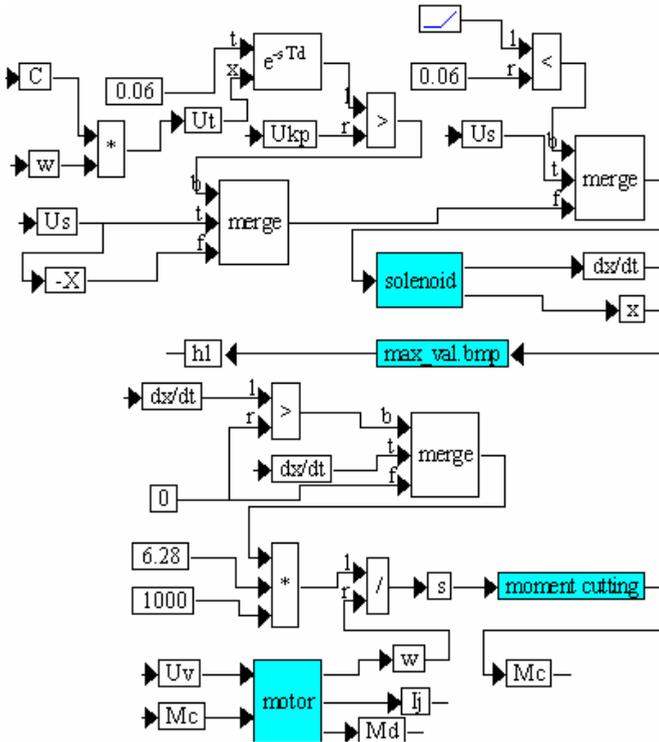


Рис. 3. Аналоговая модель работы силовой головки.

где E_{\min} - модуль упругости материала сверла; J – минимальный момент инерции сечения сверла.

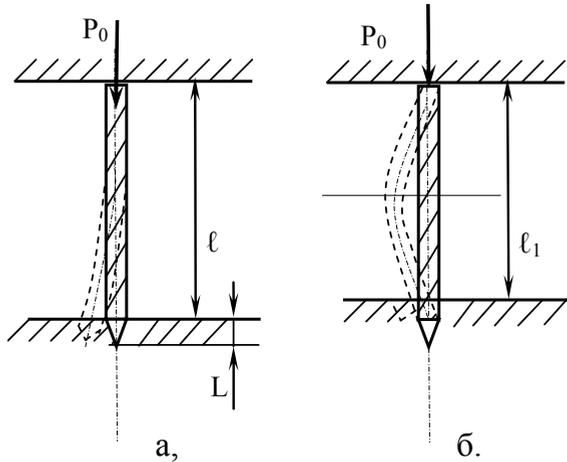


Рис. 6. Схемы нагружения сверла силой P_0 .

При заглаблении сверла в материал заготовки на глубину, больше L , вершина сверла становится как бы защемленной, и схема нагружения и деформации координально изменится, как показано на рис.6,а. Форма деформации сверла другая и в (5) величину l надо уменьшить в два раза. Кроме того, само расстояние торца патрона до торца детали также меньше, чем l (рис.6,а)

Таким образом, $R_{кр}$ для схемы нагружения согласно рис.6,б будет как минимум в четыре раза больше. В связи с этим можно с уверенностью считать, что условия врезания сверла создают наиболее опасное нагружение его осевой силой. Если сверло не сломается при врезании от P_0 , то оно не сломается и при дальнейшем сверлении. Поэтому выбор динамических параметров силовой головки из условия прочности сверла следует производить по первой фазе врезания.

Привод главного движения должен иметь бесступенчатое регулирование частоты вращения. Поэтому выбираем двигатель постоянного тока с регулируемой величиной напряжения, подаваемого на якорь. Двигатель должен обеспечивать необходимую частоту вращения и крутящий момент. Частоту вращения выбираем согласно рекомендуемых режимов резания:

$$n = 1000V / \Pi D, \quad (5)$$

$$V = C_V \cdot d^q \cdot K_V / T^m \cdot S^y, \quad (6)$$

V – скорость сверления, м/мин; d – диаметр сверла, мм; S – подача,

мм/об; T – стойкость сверла, мин.

Постоянные коэффициенты и показатели степеней выбираем согласно справочной литературы.

Мощность двигателя выбираем по предельно допустимому моменту $M_{кр}$, развиваемому двигателем, и угловой скорости ω .

Предельный крутящий момент $M_{кр}$, допускаемый прочностью сверла, рассчитываем по формуле:

$$\tau_{\max} = 1,73 \cdot M_{кр} / W, \quad (7)$$

где τ_{\max} – максимальные касательные напряжения в материале сверла, Н/мм²; W – момент сопротивления для спирального сверла; коэффициент 1,73 учитывает дополнительные напряжения в сверле от осевой нагрузки.

Известно, что

$$W = 0,02 \cdot d^3, \text{ мм}^3 \quad (8)$$

$$a \quad \tau_{\max} = \sigma_{\sigma} / K, \quad \text{Н/мм}^2, \quad (9)$$

где $\sigma_{\sigma} = 2100$ Н/мм² – предел прочности закаленной быстрорежущей стали; K = 2 – коэффициент запаса прочности.

Подставив (7) и (8) в (9), получаем $\frac{\sigma_{\sigma}}{K} = \frac{1,73 \cdot M_{кр}}{0,02 \cdot d^3}$, откуда

$$M_{кр} = \frac{\sigma_{\sigma} \cdot 0,02 \cdot d^3}{1,73 \cdot K} = \frac{2100 \cdot 0,02 \cdot 2^3}{1,73 \cdot 2} = 97 \text{ Н} \cdot \text{мм} \approx 0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Учитывая, что силовая головка может быть использована и для сверления отверстий диаметров до 5 мм. большую мощность выбирать не следует, так как регулирование циклом глубокого сверления предполагается по частоте вращения двигателя, которая будет зависеть от нагрузки его моментом резания.

Математические модели двигателей постоянного тока описаны в ряде источников и имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} L \cdot \frac{dI_{я}}{dt} + R \cdot I_{я} + E &= U; \\ I \cdot \frac{d\omega}{dt} &= M - M_c; \\ M &= C \cdot I_{я}; \\ E &= C \cdot \omega \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где $I_{я}$ – ток якорной цепи, А; E – противо-ЭДС, В; C – константа конструкции двигателя, Н·м/А; U – напряжение, подаваемое на якорь, В; M – момент, развиваемый двигателем, Н·м; M_c – момент сопротивления, приложенного к ротору двигателя (крутящий момент), Н·м; t – время, с.

$$\left. \begin{aligned} L \cdot \frac{dI_{я}}{dt} + R \cdot I_{я} + C\omega &= U; \\ I \cdot \frac{d\omega}{dt} &= C \cdot I_{я} - M_c. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Блок-схема аналоговой модели двигателя согласно (11) с выбранными исходными данными приведено на рис.7.

Напряжение U в блок-схеме обозначено U_v . В приведенной блок-схеме момент сопротивления M_c прикладывается к двигателю через 0,5 с, т.е. после разгона двигателя до холостых оборотов при $M_c = 0$. Внизу блок-схемы приведены графики изменения частоты вращения двигателя n и угловой скорости ω в зависимости от времени t , с. На этих графиках видно, что примерно за 0,15с двигатель разгоняется до оборотов холостого хода n_x , а после 0,5с, когда к двигателю прикладывается момент сопротивления M_c , n и ω уменьшаются. Значения n_x и ω_0 (угловая скорость холостого хода) с высокой точностью могут считываться с графиков обеспечивающего пакета “VisSim”.

Согласно функциональной схеме (рис. 2), угловая скорость ω двигателя главного движения измеряется тахогенератором (ТГ). Напряжение U_t на выходе (ТГ) прямопропорционально ω :

$$U_t = C \cdot \omega, \quad (12)$$

где C – константа, отражающая конструкцию двигателя; U_t – напряжение, характеризующее угловую скорость двигателя, которая сравнивается в устройстве управления (УУ) головки. Критическое напряжение определяется предельным падением угловой скорости двигателя в связи с возможным моментом сопротивления (моментом резания). Устройство (УУ) сравнивает U_t и $U_{кр}$ и, если $U_t > U_{кр}$, ЛЭМД включается на подачу. Из этого следует, что на двигатель подается напряжение U_s . Если $U_t < U_{кр}$ (команда на отвод), то на двигатель подачи подается напряжение U_s со знаком минус.

Потеря оборотов двигателя главного движения происходит с увеличением глубины сверления, что учтено в расчете момента резания

$$M_p = 10C_m \cdot D^q \cdot S^V \cdot K_p \cdot \left(1 + \frac{x - h_1}{3D}\right), \quad (13)$$

где x – перемещение сверла в направлении подачи; h_1 – максимальное значение x перед отводом сверла на каждом цикле (врезание – отвод).

Таким образом, $(x - h_1)$ – это величина холостого хода сверла (перемещение его после отвода до касания с обрабатываемым материалом).

Экспериментально установлено, что при углублении сверла на 3 диа

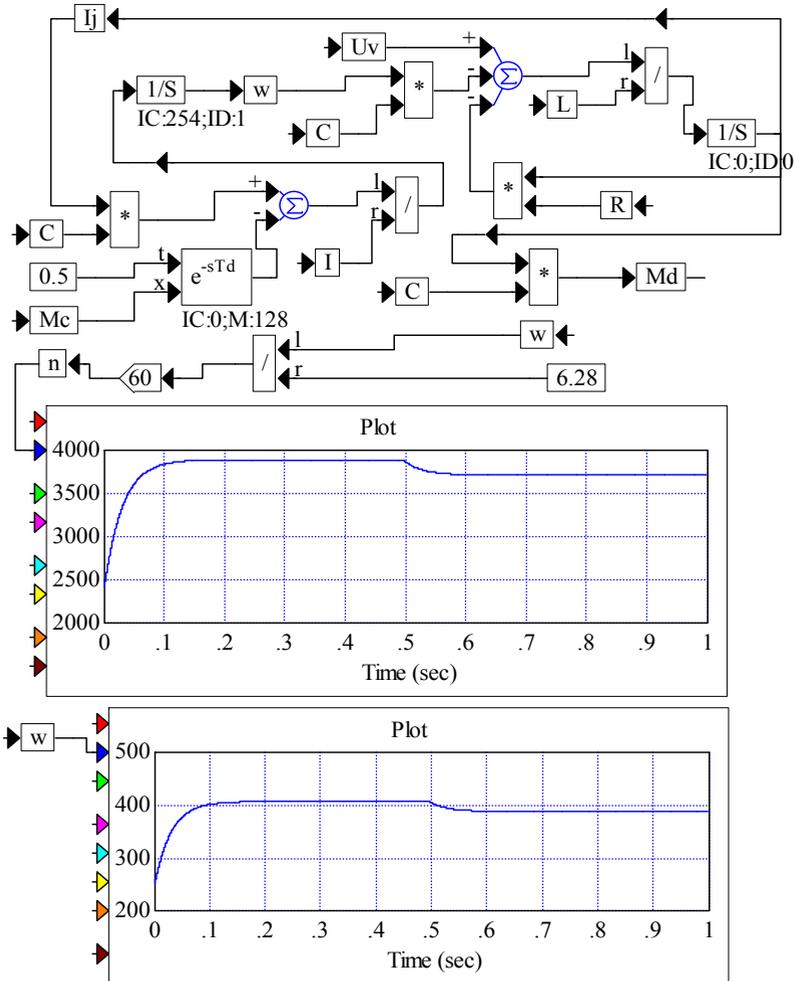


Рис. 7. Блок-схема аналоговой модели двигателя вращения.

метра, $M_{кр}$ увеличивается в два раза, что отражает (13). Постоянные коэффициенты и показатели степени в (13) выбираем из таблиц нормативов.

В (13), как и при расчете осевой силы P_0 , подача сверла на оборот

$$S = \frac{dx/dt \cdot 2\pi \cdot 1000}{\omega}, \quad (14)$$

где dx/dt – скорость подачи (м/с) – входная координата привода подачи; ω (рад/с) – угловая скорость двигателя главного движения. При отводе силовой головки $dx/dt < 0$ и $S = 0$.

Это значительно упрощает логику моделирования. Кроме этого, не учитывается холостой ход головки до первого касания сверла с обрабатываемым материалом. Это фаза цикла работы головки подробно исследована выше. Для упрощения общей модели сверления она не учитывается. Примем, что после разгона двигателя главного движения, т.е. после необходимого промежутка времени, принятого в модели равным 0,02с, включается двигатель подачи, и сразу имеет место касание сверла с обрабатываемым материалом. Модель двигателя главного движение собрана в “compound” блоке под названием “motor” и точно такая же, как и на рис.3.10. Только $U_v = 23В$, а момент сопротивления M_c вычисляется согласно (13) и выделен в отдельный “compound” блок под названием “moment cutting” (рис.8)

Кроме всех перечисленных блоков, модель логики работы силовой головки (рис.9) содержит специальный блок “max_val.bmp” для вычисления максимума входной координаты и её запоминание на «выходе». Важность

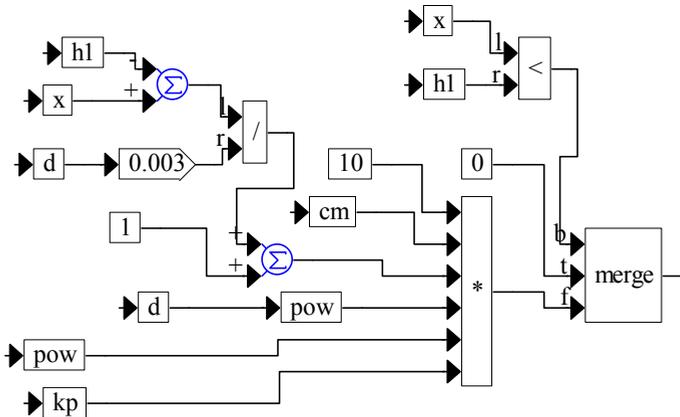


Рис. 8. Расчет момента сопротивления M_c - блок “moment cutting”

этого блока определена тем, что в каждом цикле (подвод→сверление→отвод) перед отводом сверла происходит запоминание максимального значения координаты X , которое необходимо для вычислений по (13) и определения момента от стадии холостого подвода до начала сверления.

В блоках “cutting forse” (рис.5) и “moment cutting” (рис.8) расчет P_0 и M_c производится только в случае, когда $x > h_1$, т.е. когда сверло после отвода при подводе до касания прошло путь $x > h_1$. Именно наличие блока “max_val.bmp” (рис.3) позволяет реализовать в модели многократный цикл (подвод → сверление → отвод) и при этом позволяет определить величину холостого хода (подвода).

Анализ результатов моделирования показал, что модель в том виде, как она описана выше, осуществляем с высокочастотным повторением циклов (подвод → сверление → отвод), что превращается почти в непрерывное движение подачи. При этом фактически не осуществляется вывод сверла из отверстия и не удаляется стружка.

Поиск возможных решений, позволяющий четко выделить во времени цикл, увеличить фазу отвода, а значит и всех остальных фаз цикла привел к необходимости задержки во времени сигнала U_t перед сравнением его с $U_{кр}$. Такая задержка может быть реализована различными методами, в частности, использованием реле, в котором задержка определяется временем его срабатывания. В модели задержка U_t во времени осуществляется блоком t^{STd} , где на выход t дается время задержки t_3 в секундах, на вход X сигналом U_t .

Установлено, что, изменяя время задержки t_3 , можно менять продолжительность цикла (подвод → сверление → отвод). На рис.9. приведена распечатка сигналов x и h_1 для условий сверления согласно рис.3.

Ступенчатая линия – это периодически изменяющиеся значения врезания h_1 перед отводом сверла. Вторая линия – это координата X , т.е. перемещение сверла вдоль оси.

Хорошо видна периодичность циклов сверления. В рассмотренном примере сверление отверстия диаметром 2мм в заготовке из стали длиной обработки 30мм “путь” сверления в каждом цикле равен примерно 1мм, а отвод - 3мм. Цикл (подвод → сверление → отвод) по времени составляет примерно 1,7 с.

Таким образом, продолжительность сверления отверстия длиной 30мм, и \varnothing 2мм в конструкционной углеродистой стали 45 составит около 30 циклов или 50 с.

Как показали многочисленные эксперименты с увеличением заглубления сверла в отверстие, а также по мере износа режущей части инструмента, частота повторения циклов увеличивается и напоминает эффект виброрезания, хотя и не является таковым, по сути.

Все это позволило создать новый метод обработки - ударно-прерывистое резание. Оно характеризуется по сравнению с обычным большим удельным весом динамических явлений в процессе

стружкообразования и обеспечения удовлетворительных условий работы для сверла.

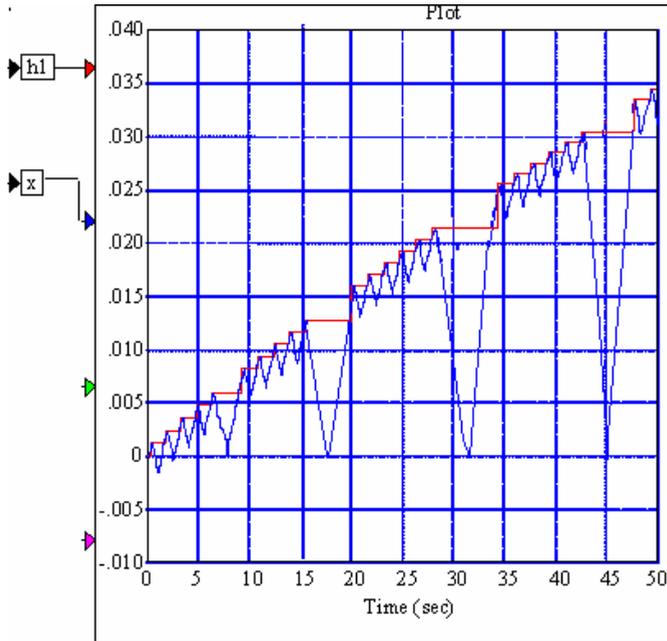


Рис. 9. Цикл работы динамической модели головки.

Выводы: В работе рассмотрены особенности оптимизации процесса сверления глубоких отверстий под управлением адаптивной системы, осуществляющей вывод инструмента из отверстия по достижению критической величины крутящего момента. Разработанная функциональная схема динамической системы сверлильной головки позволила выполнить математическое моделирование циклообразующих движений с учетом динамических процессов в приводах.

Список литературы: 1. Сизый Ю.А., Кондратюк О.Л., Чайка Э.Г. Выбор и расчет параметров привода подачи силовой головки для глубокого сверления //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ«ХПІ». – 2007. - №17.С. 25-34. 2. Мельниченко О.А., Кондратюк О.Л. Мехатронна силова головка для свердління глибоких отворів малого діаметра з адаптивною системою керування. //Вісник Національного аграрного університету. - Суми: СНАУ. - 2005. - №13. - С. 106-111. 3. Кондратюк О.Л. Об устойчивости процесса глубокого сверления на малых агрегатных станках. //Оборудование и инструмент для профессионалов. – Харьков – 2004. № 6(52). - С.22-23.

Поступила в редколлегию 20.09.2010

Н.К.РЕЗНИЧЕНКО, д.т.н., проф. УИПА, г.Харьков.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

У статті розглянуті основні напрямки створення енергозберігаючих індукційних нагрівачів. Викладено рекомендації зі створення технологічних систем для індукційного нагрівання, зборки й розбирання складальних одиниць у з'єднаннях з натягом.

Basic directions of creation of energy-saving induction heaters are considered in the article. Recommendations are expounded on creation of the technological systems for the induction heating, assembling and sorting out of frame-clamping units.

Создание конкурентоспособных технологий сборки и разборки изделий машиностроения для производства и ремонта требует разработки производительных, с высоким уровнем показателей качества, экологически чистых рабочих процессов и надежного, с малым энергопотреблением оборудования. Для изделий с соединениями с натягом это особенно актуально, так как в большинстве случаев они ответственного назначения, и выход их из строя приводит к авариям.

Технологии, использующие тепловое воздействие на детали перед их сборкой и разборкой широко распространены, в том числе и для соединений с натягом, однако не всегда они отвечают современному техническому уровню, поскольку нагрев ведется открытым пламенем или в промежуточной среде (масло, воздух). Имеющиеся разработки по применению индукционного нагрева и реализующего его оборудования в большинстве своем прикладные, так как разрабатываются с различных технологических позиций для процессов сборки и разборки. Это не позволяет создать высокоэффективные технологические процессы и оборудование. Недостаток теоретических и экспериментальных исследований, не носящих системного характера, приводит к тому, что режимы нагрева при сборке и разборке назначают без учета энергозатрат, с производительностью ниже возможной, а иногда и с качеством получаемого изделия ниже достижимого.

Создание эффективных технологий и оборудования возможно только на основе выполнения широкого диапазона требований, которые могут быть удовлетворены новыми теоретическими и техническими решениями. Поэтому решение научно-технической проблемы создания производительных, экономичных технологий сборки и разборки соединений с натягом состоит в совместном рассмотрении технических, технологических и экономических аспектов. Необходимо рассматривать организационно-технические и технологические концепции. Первая состоит в создании унифицированных технологий, и как следствие – типизированных индукционных нагревателей общего и специального назначения. Вторая заключается в повышении качества операции нагрева при минимизации

расходуемой тепловой энергии за счет распределения мощности по контуру детали и периодичности ее воздействия, а так же компенсации реактивной составляющей мощности. Следствием второй концепции является создание индукционно-нагревательного оборудования с управляемым в пространстве и времени электромагнитным полем с высоким электрическим КПД.

Разработка принципов, которые следуют из указанных концепций, и связанные с ними теоретические и экспериментальные исследования, позволят создать теоретические основы построения унифицированных высокоэффективных технологий сборки и разборки соединений с натягом.

Многолетние теоретические, экспериментальные, технологические и опытно-конструкторские разработки, проводимые в Украинской инженерно-педагогической академии по созданию оборудования для индукционного нагрева, сборки и разборки сборочных единиц с соединениями с натягом, позволят дать следующие рекомендации по созданию технологических систем такого назначения:

- универсализация по типам изделий за счет управления распределением мощности нагрева в пространстве;

- снижение энергопотребления путем уменьшения полей рассеивания электромагнитной энергии за счет оптимизации конструкции индуктора;

- повышение $\cos\varphi$ до 1 за счет использования управляемых компенсационных систем;

- информационное обеспечение технологии, что позволяет снизить уровень затрат тепловой энергии: сборка по действительному натягу - до 35% от нагрева под максимальный натяг; селективная сборка по натягу, близкому к минимальному - до 50% и сборка с приточкой деталей на минимальный натяг - до 60%;

- локальный индукционный нагрев зоны отверстия детали, конструктивно представляющей собой ступицу с диском или ступицу с диском и ободом, позволяет сэкономить тепловую энергию до 25% от полного нагрева детали. Наибольшие напряжения в материале детали с диском и ободом возникают при углах наклона диска 5-7 градусов.

- систематизация изделий с соединениями с натягом и нагреваемых деталей, и типизация индукционных нагревателей позволяет на общей основе унифицировать технологии для процессов сборки и разборки с использованием однотипного оборудования.

Разработанные физико-математические модели, описывающие неоднородные нестационарные тепловые процессы низкотемпературного - индукционного нагрева деталей и теплообмена в соединениях, позволяют определять: необходимую удельную мощность нагрева и ее распределение по поверхности осесимметричной детали в зависимости от требуемой формы расширения ее посадочной поверхности;

- время скрепления или раскрепления деталей в соединения с погрешностью до 10%, что необходимо для расчета циклов сборки или разборки;

- режим локального нагрева сложнопрофильной осесимметричной сборочной единицы типа обандаженное колесо железнодорожного транспорта, обеспечивающий качество по предельно-допустимой температуре и напряжениям в материале;

- режим локального нагрева неосесимметричных соединений с охватывающей деталью плоской конструкции типа балансир с торсионом гусеничной машины, обеспечивающий получение равномерного расширения посадочного отверстия с сохранением качества по допустимым температурам и напряжениям в материале.

Выполненная типизация индукционных нагревателей по областям применения - сборка, разборка или сборка и разборка, конструкциям деталей, а так же предложенное к использованию их управление по току, позволяет выполнять нагрев с высоким коэффициентом мощности ($\cos \varphi$ до 0,6 - 0,7), что уменьшает расход электрической энергии. Разработанная физико-статистическая модель надежности многовиткового индуктора, которая физически адекватна процессам, протекающим в нем при нагреве деталей, позволяет оценивать гамма-процентный ресурс при малом объеме контрольных испытаний ($n < 10$). Выполненные исследования позволили выдвинуть ряд новых научных положений: безразмерная оценка функционирования технологических систем во времени; оценка надежности индукторов, учитывающая как внезапные, так и постепенные отказы. Качество процессов сборки и разборки во времени можно оценивать по качеству реализующих их технологических систем, используя комплексный безразмерный параметр, являющийся совокупностью разнородных параметров, что дает возможность оценить любую гарантию величины наработки до отказа -технологической системы.

Результаты исследований, которые имеют прикладной характер, внедрены в производство на судноремонтных заводах, тепловозоремонтных заводах, заводах тяжелого машиностроения, предприятиях Кубы, Монголии, Вьетнама, Чехословакии (по контракту Энергомашэкспорта СССР). Это дало возможность уменьшить энергозатраты, в зависимости от конструкции и габаритов деталей и соединений от 10% до 25%. Качество функционирования технологических процессов во времени увеличивается на 15% - 20%.

Список литературы: 1. Андреев А.Г., Багацкая Г.Н., Галета В.О., Щепкин А.В. Исследование напряженно-деформированного состояния колеса тепловоза ТУ-7 при торможении // Отчет по х/т 21674, д.с. 986, N гос. регистрации 80052977, ВИНТИ N 0282.0062729, Харьков, 1982. - 149 с. 2. А.Г.Андреев, Н.К. Резниченко, О.В. Щепкин. Оптимизация нагрева при разборки деталей. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ».- Харків: НТУ «ХПІ». - 2006. - №32 - С. 3-8. 3. Андреев А.Г., Щепкин А.В. Оптимизация технологических нагревов бандажного колеса при сборке колесной пары тепловоза // Інформація по 2-й міжнародній науково-технічній конференції «Фізическіє і комп'ютерніє технології в народном хозяйствє» Вісник інженерної академії України, Київ, 2000. - С. 415-418. 4. Арпентьев Б.М., Зильбер А.Г. Типизация технологических процессов сборки с термовоздействием на основе технологического классификатора соединений // Стандарты и качество. - 1988. - № 11. - С. 33 - 34.

Поступила в редколлегию 20.09.2010

В.В. ФРОЛОВ канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ», г. Харьков

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ДИСКРЕТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Запропоновано способи формування математичної моделі технологічної системи для вибору її раціональних параметрів на основі нейронних мереж з розробкою програмних модулів. Розроблено інформаційну модель технологічної системи у вигляді штучної нейронної мережі, що складає з нейронів спеціального виду на базі мови XML.

Ways of forming of mathematical model of technological system for sampling its rational parameters on the basis of neural networks with development of programm modules are offered. The entity set model of technological system as the artificial neural network consisting of neurons of a special aspect on baseline of language XML is developed.

Задачи рационального подбора параметров структурных элементов технологической системы в условиях многономенклатурного производства представляет собой сложную комбинаторно–оптимизационную задачу[1–2]. При этом необходимо учитывать, что структура технологической системы, в этом случае, фиксированная, т.е. имеется фрейм технологической операции, где слотами являются структурные элементы технологической системы с конечными опорными множествами. Мощность опорных множеств слотов определяются возможностями производственных подразделений, т.е. наличием в этих подразделениях технологической оснастки и оборудования. Каждое технологическое решение, принятое технологом в таких условиях, представляет собой решение из множества декартового произведения опорных множеств слотов, причем связи между слотами, зафиксированные на уровне фрейма, определяют возможность реализации того или иного решения из этого множества. Задача рационального выбора, тогда решается методами дискретной оптимизации. Но для этого необходимо сформировать математическую модель технологической системы с ограничениями, что является не тривиальной задачей. Решение данной задачи можно упростить, если использовать типовую элементную базу формирования математической модели технологической системы. В связи с этим целью данной статьи является обеспечение снижения трудоемкости разработки математической модели технологической системы за счет выбора теоретической основы формирования элементной базы и разработки программного обеспечения для решения данной задачи.

В работе [2] было предложено описывать структуру технологической системы (ТС) в виде помеченного ориентированного упорядоченного дерева с корнем. В этом случае теоретической основой формирования модели ТС могут быть элементы, представленные на рисунке 1.

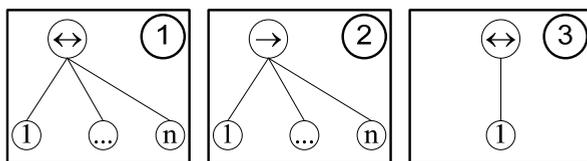


Рис. 1 Основные структурные элементы модели

Элементы 1 и 3 отражают свойство эквивалентности, а элемент 2 – свойство следования. Их структура позволяет использовать для оценки трудоемкости обработки детали по моделируемому технологическому процессу формальный нейрон специального вида.

Для элемента 2 на рис. 1 возможно использовать классическую схему формального нейрона, поскольку, для вычисления машинного времени при таком совмещении методов обработки необходимо простое суммирование. Функция активации в этом случае должна учитывать долю машинного времени в штучном, по сути, это линейная функция активации. Для элемента 1 необходимо, чтобы нейрон выдавал сигнал, соответствующий максимальному значению, подаваемому на рецепторы. Элемент 3 – это частный случай элемента 1. Можно разработать формальный нейрон, функционирующий в зависимости от ситуации, как два предыдущих. Схема этого нейрона приведена на рисунке 2.

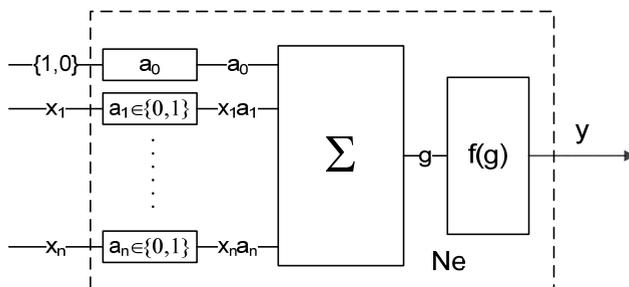


Рис. 2 Схема формального нейрона для оценки трудоемкости

Здесь синаптические коэффициенты a_i должны быть бинарными, а их веса принимаются в зависимости от начального состояния нейрона, если $a_0 = 1$, то все синаптические коэффициенты равны единице, в противном случае – равен единице синаптический коэффициент, соответствующий рецептору с максимальным значением сигнала. Математическая модель этого формального нейрона может быть записана в виде 1.

Поскольку полученный нейрон моделирует базовые элементы структурной модели ТП, вся структура технологического процесса может быть представлена ИНС, сформированной на базе этих нейронов.

Информационная модель ИНС реализуется в формате XML и представлена на рисунке 3. Здесь нейронная сеть (тег – net) состоит из слоев (тег – layer), а каждый слой включает в себя отдельные нейроны (тег – neurone).

$$\begin{aligned}
 y &= f(g) \\
 f(g) &= k \cdot g \\
 g &= \bar{a}^T \cdot \bar{x} \\
 \bar{a} &= \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} a_i = 1, \forall i \in \{1, n\} : \max_i \{x_i\} = x_i \\ a_i = 0, \forall i \in \{1, n\} : \max_i \{x_i\} \neq x_i \end{array} \right\} & \text{if } b = 0 \\ \sum_i a_i = 1 \\ \left\{ \begin{array}{l} a_i = 1, \forall i \in \{1, n\} : x_i = x_i \\ a_i = 0, \forall i \in \{1, n\} : x_i \neq x_i \end{array} \right\} & \text{if } b = 1 \end{cases} \quad (1)
 \end{aligned}$$

```

<?xml version="1.0" ?>
- <net>
- <layer num="1">
- <neurone layer="1" num="1" type="2"
  name="block">
- <transfer type="3">
  <K>2</K>
</transfer>
- <synapses swt="0">
- <axon num="1">
  <value />
  <synapse num="1" value="" />
  <synapse num="2" value="" />
  <synapse num="3" value="" />
</axon>
</synapses>
<initial_rec value="2.15" />
- <receptors>
- <receptor num="1" name="111" type="0">
  <value>0.5</value>
</receptor>
- <receptor num="2" name="" type="0">
  <value>0.85</value>
</receptor>
- <receptor num="3" name="222" type="0">
  <value>0.3</value>
</receptor>
</receptors>
</neurone>
+ <neurone layer="1" num="2" type="3"
  name="block1">
</layer>
+ <layer num="2">
</net>

```

Рис. 3 Информационная модель ИНС

Каждый нейрон имеет уникальный номер в слое (num) и может быть различного типа (type). Предусмотрено несколько типов нейронов: 0 –

простой сумматор; 1 – нейрон, выдающий максимальный сигнал; 2 – нейрон, выдающий минимальный сигнал; 3 – нейрон типа перцептрон. Нейрон состоит из рецепторов (тег – receptors) и аксонов (тег – axon), связанных через синаптические коэффициенты (тег – synapse). Данная информационная модель предполагает использование различных функций активации нейрона (тег – transfer): линейная функция активации; сигмоидная функция активации смещенная; сигмоидная функция активации симметричная; степенная; пороговая.

Моделирование работы данной сети выполняется специальной библиотекой – NetworkClass, реализованной в виде ActiveX динамической библиотеки, которую возможно подключать к любому приложению позволяющему использовать ActiveX технологию для расширения своих вычислительных возможностей. Данная библиотека предоставляет следующие методы обработки нейронной сети: обработка нейронной сети технологического проектирования; заполнение значениями рецепторов сети; преобразование информационной модели ТП в нейронную сеть.

Данная ИНС позволяет оценить трудоемкость обработки заданной детали при фиксированной структуре ТП. Что позволяет реализовать концепцию разработки структурной модели технологической системы из отдельных типовых блоков – нейронов специального вида.

Если использовать нейроны в качестве базовых элементов модели построения ТС, то появляется возможность разработать динамическую модель системы с использованием библиотеки Simulink. Библиотека имеет структуру, представленную на рисунке 4.

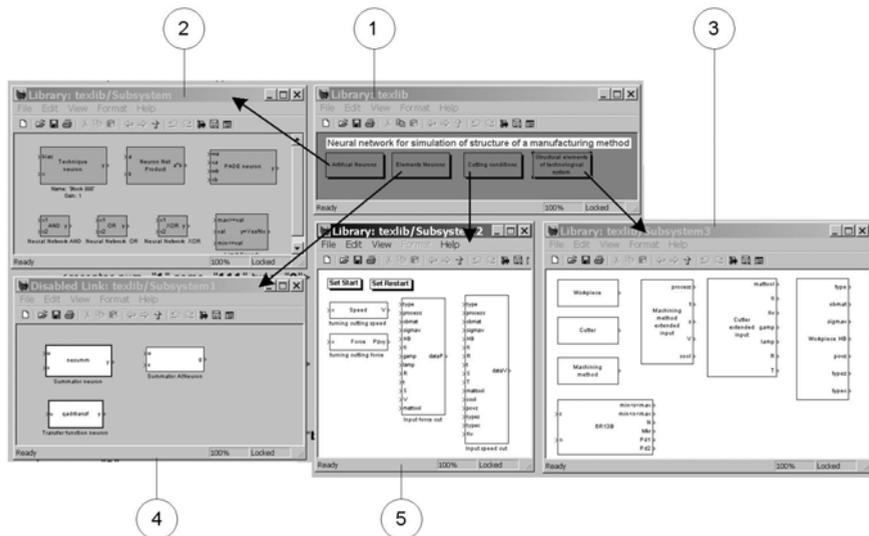


Рис. 4 Структура библиотеки моделирования технологической системы

Библиотека состоит из четырех разделов: 2 – искусственные нейроны специального вида; 4 – элементная база для формирования искусственных нейронов; 5 – условия обработки; 3 – структурные элементы технологической системы. Такой подход позволяет компоновать динамическую модель ТС из типовых элементов. Например, структурная модель технологической системы, представленная на рисунке 5, моделирует обработку на станке с двумя позициями (позиция 1 – Block 001; позиция 2 – Block 002), которые работают параллельно, а на каждой из позиций работает по два инструмента последовательно (Constant3, Constant4 и Constant5, Constant6). Таким образом, время обработки будет определено по лимитирующей позиции 2.

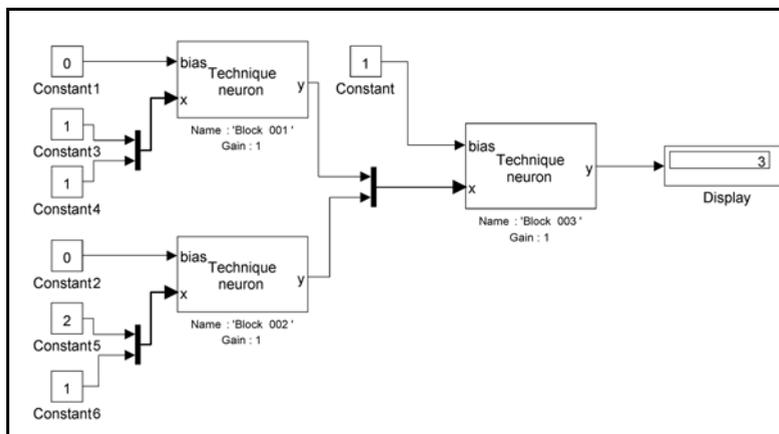


Рис. 5 Модель технологической системы

Выводы:

1. Элементная база для разработки структурной модели технологической системы наиболее эффективно реализуется на основе формальных нейронов специального вида. Это позволяет представлять технологическую систему в виде ИНС прямого распространения.

2. Информационная модель нейронной сети может быть реализована в формате XML, что обеспечивает возможность интеграции с различными системами САПР, поддерживающими ActiveX технологии, для расширения их возможностей.

Список литературы: 1. В.В. Фролов Реализация генетического алгоритма для двухуровневой оптимизации параметров технологической системы / В.В. Фролов // Восточно – Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №46. – С.33–36 2. В.В. Фролов Классификация технологических структур искусственными нейронными сетями / В.В. Фролов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – №25,– С.102–109.

Поступила в редколлегию 20.09.2010

А.Я.МОВШОВИЧ, д.т.н., проф. УИПА, г.Харьков;
Г.И.ИЩЕНКО, главный инженер ООО «Турбоатом», г.Харьков;
Н.К.РЕЗНИЧЕНКО, д.т.н., проф. УИПА, г.Харьков;
И.К.КИРИЧЕНКО, д.т.н., проф. УИПА, г.Харьков.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ.

У статті порушені питання вдосконалювання високих технологій, що вимагають розробки й дослідження на сучасному етапі розвитку машинобудування. Показано область їхнього раціонального застосування й шляхи реалізації в діючому виробництві.

The questions of perfection of high-tech are affected in the article, requiring developments and research on the modern stage of development of engineer. A their rational application and way of realization domain is shown in an operating production.

Введение

Обеспечение высоких показателей качества машин поставило перед наукой и производством ряд новых проблем, важнейшими из которых следует считать создание новых совершенных высоких технологий, отвечающих требованиям XXI века.

Современное передовое промышленное производство характеризуется как гибкое рыночно ориентированное. Формируется новое понимание производства будущего: целостное рассмотрение и оптимизация потоков материалов, исключение расточительных затрат ресурсов любого вида, непрерывная оптимизация производства, применение передовых технологий и ориентации на человека, минимизация расходов при эксплуатации готовой продукции.

В связи с этим все большее внимание специалистов привлекают нетрадиционные технологии, которые в отличие от традиционных называют «наукоемкими» (прецизионные, нанотехнологии и др.). Высокими следует считать такие технологии, которые обладают совокупностью основных признаков - наукоемкость, системность, физическое и математическое моделирование с целью структурно-параметрической оптимизации, высокоэффективный рабочий процесс размерной обработки, компьютерная технологическая среда, автоматизация всех этапов разработки и реализации при соответствующем технологическом (оснастка, оборудование, инструмент) и кадровом обеспечении, устойчивость, надежность, экологическая чистота.

Столь же очевидно, что необходимо создавать новые производства «высокой технологии» особенно по тем направлениям и видам продукции, где мы, образно говоря, пока занимаем передовые позиции. По этим

направлениям нам не надо покупать лицензии. А это экономит очень значительные средства, не говоря уже о престиже государства.

Вопросы требующие решения. Среди вопросов, требующих исследования, разработки и интенсивного решения опережающими темпами, первоочередными являются следующие: создание быстроперестраиваемых комплексов различного технологического назначения, оснащенных автоматизированной и механизированной технологической оснасткой второго поколения; широкое применение систем автоматизированного проектирования, технологической подготовки производства и интегральных систем управления производством; применение принципиально новых видов материалов, обладающих по сравнению с традиционными материалами высокими физико-механическими свойствами, устойчивостью к износу и изменению геометрической формы; создание и совершенствование промышленной технологии и оборудования для получения широкой номенклатуры высокопрочных, коррозионно-стойких, жаростойких композиционных покрытий на основе вакуумно-плазменного и детонационно-газового методов; широкое применение при конструировании и применении новых видов технологической оснастки композиционных материалов и пластических масс, способных заменить черные и цветные металлы и сплавы и существенно улучшить эксплуатационные свойства, качество и долговечность оснастки; разработка технологий и оборудования с применением высоких давлений и вакуума для формирования и калибровки изделий сложной формы, синтеза инструмента.

Результирующая задача - совершенствование и дальнейшее развитие автоматизированной системы технологической подготовки и контроля производства в области управления предприятием, экономного использования материалов и решения производственных заданий.

Основными компонентами данного комплекса является:

гибкие системы проектирования, изготовления и сборки, управляемые ЭВМ; высокоэффективные рабочие процессы; широкая кооперация и поставка деталей строго по графику; системы снабжения и обеспечения производственных процессов; компьютерные автоматизированные системы (CAD- проектирование; CAP -планирование; CAM - производство; CAO - обеспечение качества; САА - сборки).

Наиболее перспективным путем повышения производительности труда на стадии технологической подготовки производства является автоматизация на базе широкого использования средств вычислительной техники. При этом необходимо работать над разработкой единого математического и программного обеспечения, автоматизированных систем проектирования, технологической подготовки, планирования и организации производства. Говоря об экономической стороне автоматизации необходимо подчеркнуть, что только комплексная автоматизация дает возможность создания структуры промышленного предприятия, отвечающую требованиям эффективного использования прогрессивного оборудования. [2].

Изнашивание, усталость, пластическая деформация, коррозия и другие явления, возникающие в результате работы деталей машин, вызывают их остановку и требуют проведения ремонтных и регулировочных работ. Достаточно сказать, что только на ремонт металлорежущего оборудования ежегодно тратятся средства, сопоставимые с затратами на выпуск новых станков. В результате коррозии в ржавчину превращаются сотни тысяч тонн металла.

Надежность работы машин непосредственно связана с качеством поверхностного слоя деталей, которое характеризуется геометрическими и физико-механическими параметрами. От качества поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства сопротивление усталости, износостойкость, коррозионная и жаростойкость, сопротивление контактной усталости и др.

Оптимальная поверхность должна быть достаточно твердой, иметь остаточные сжимающие напряжения, мелкодисперсную структуру, сглаженную форму микронеровностей с большой площадью опорной поверхности. Физико-механические параметры поверхности достигаются нанесением на них соответствующих покрытий вакуумно-плазменным, детонационно-газовым, лазерным и др. методами.

В зависимости от назначения изделия, условий его работы, материала и теплостойкости должен быть решен комплекс задач по выбору состава и конструкции покрытия, оптимизации параметров его нанесения. Так при упрочнении режущего инструмента наибольшее распространение получили покрытия на основе соединений титана - нитрид титана (NiN), карбид титана (TiC), карбонитрид-титана (TiCN). Такие покрытия, хотя и повышают стойкость режущих инструментов, однако, позволяют решить задачу увеличения работоспособности лишь частично, так как эффективны при обработке легированных конструкционных сталей. При резании высокопрочных сталей и сплавов инструментом с покрытием на основе титана существенного увеличения стойкости не наблюдается.

Пластические деформации в зонах стружкообразования сильно зависят от сопротивления сдвига на участке пластического контакта. Именно на этом участке наиболее активно реализуются диффузионные процессы между инструментальными и обрабатываемыми материалами, которые и влияют на сопротивляемость срезанного слоя пластическому сдвигу.

В частности, при насыщении локальных объемов обрабатываемого материала в зоне пластического контакта легирующими элементами из инструментального материала сопротивление сдвига будет возрастать. Это обязательно приведет к росту коэффициента деформации и сил резания. Если покрытие, наряду с высокой теплостойкостью, химически инертно к обрабатываемому материалу, то оно выполняет роль активного барьера, сдерживающего диффузию атомов инструментального материала в обрабатываемый (сходящую стружку).

В этом случае сопротивление пластическому сдвигу на участке пластического контакта снижается. Это приводит к уменьшению коэффициентов деформации и сил резания.

В связи с этим, для эффективной обработки трудно обрабатываемых материалов разработан ряд покрытий для режущих инструментов применительно к определенным группам жаропрочных и высоколегированных сталей и сплавов. Эффективные покрытия: для жаропрочных деформируемых сплавов и высоколегированных сталей - композиционное покрытие нитридов титан-хром (Ti/CrN), состоящее из 30% хрома и 70% титана (по массе); для хромистых нержавеющей и хромоникелиевых сталей и сплавов - композиционное покрытие нитридов цирконий-гафний (Zr/Hf-N), состоящее из 80% циркония и 20% гафния (по массе); для титановых сплавов - нитрид циркония (ZrN).

Нанесение этих покрытий на рекомендуемый справочной литературой режущий инструмент позволяет увеличить его стойкость в 1,6-2 раза. Технологический процесс нанесения вакуумно-плазменных покрытий является многопараметрическим. Каждый из параметров или их сочетание оказывает влияние на фазовый состав, структуру и свойства покрытия. Изменение только одного параметра - давление в вакуумной камере - позволяет получить многослойную конструкцию покрытия с чередующимися по твердости слоями ($a.Me + a.Me \rightarrow y.Me + y.Me$). Режущий инструмент с 4-6 такими слоями обладает достаточной пластичностью и эффективен при работе с ударными нагрузками и при прерывистом резании. Получение покрытий с различными свойствами позволяет разрабатывать улучшенные конструкции деталей машин, при этом работоспособность узлов, в которые они входят, значительно повышается. Так, предложенная технология нанесения покрытия нитрида молибдена на кулак шарнира, а на сопрягаемый упор - нитрида титана, позволила снизить трение в 3 раза, увеличить чувствительность механизма в 3-4 раза и повысить общую долговечность работы механизма парораспределения турбины с 10 месяцев до 4 лет при работе в среде с температурой 260°C.

Вакуумная технология способна также решать задачи, которые не под силу другим процессам. Для производства головок наведения управляемых аппаратов требуется коэффициент отражения сферической поверхности магнита из сплава ЮНДК-24 не менее 0,9 при работе с термоударами от +60°C до -180°C. Разработанный технологический процесс нанесения многослойного покрытия Zr+ZrN общей толщиной 0,4 мкм обеспечивает стабильное получение коэффициента отражения 0,92.

Свойства бомбардировки ионами низких энергий (до 2 кэВ) очищать поверхность от окисных пленок, вскрывать структурные дефекты в поверхностном слое, а также осуществлять интенсивный нагрев поверхности могут быть использованы для создания экологически чистых технологий взамен химико-термических процессов (цианирование, азотирование) и нанесения гальванических покрытий, применяемых для улучшения

эксплуатационных характеристик деталей из низкоуглеродистых сталей типа 08КП, 10, 20. [3].

Все большее распространение получает использование вакуумно-плазменных технологий при нанесении защитно-декоративных покрытий на товары народного потребления из нержавеющей стали, нейзельбера, стекла, керамики, фосфора. Изделия при этом приобретают желаемую цветовую гамму, которая зависит как от состава реактивного газа, так и от толщины покрытия.

Повышение надежности и работоспособности наиболее ответственных и тяжело нагруженных деталей машин, работающих в условиях длительного трения, эрозионного воздействия, значительных механических и тепловых нагрузок, определяющих в связи с этим ресурс изделия, достигается методом детонационно-газового упрочнения путем нанесения на рабочие поверхности деталей упрочняющих и защитных покрытий импульсным высокоэнергетическим напылением порошкообразного материала с заданными технологическими характеристиками.

Такие установки в настоящее время разрабатываются и изготавливаются в Харьковском научно-исследовательском институте технологии машиностроения (ХНИИТМ) и в Национальном аэрокосмическом университете (ХАИ).

В настоящее время разработана КЩ и широко внедрена технология получения на рабочих поверхностях деталей эксплуатационного слоя с физико-механическими характеристиками, обеспечивающими оптимальные условия промышленной эксплуатации изделий. Основными преимуществами метода детонационно-газового напыления в сравнении с другими методами газо-термического высокотемпературного напыления (электродуговая металлизация, газопламенное и плазменное напыление) являются: возможность нанесения покрытий на холодную деталь (без необходимости предварительного, сопутствующего либо последующего ее нагрева); высокая прочность сцепления (когезия) покрытия с материалом детали (до 250 МПа);

- незначительный нагрев детали при напылении (до 200°С), что позволяет наносить покрытия на окончательно обработанные детали; возможность нанесения чрезвычайно широкого круга материалов (металлов и сплавов, различных видов керамики - оксидов, карбидов и т.д., металлокерамики, а также их смесей).

Эффективность применения детонационных покрытий связана, прежде всего, с повышением срока службы упрочненных деталей. Причем, увеличение затрат на их изготовление значительно ниже по сравнению с экономией от увеличения срока их службы. Кроме того, детонационное напыление в целом ряде случаев позволяет заменить дорогостоящие стали и цветные металлы на более дешевые недефицитные материалы за счет придания необходимых эксплуатационных свойств только рабочим поверхностям, непосредственно подверженным влиянию неблагоприятных факторов, вместо упрочнения детали в целом. Все вместе это обуславливает

получение значительной экономии материальных и энергетических ресурсов, а также улучшение экологической ситуации.

С помощью широко применяемых технологий окончательной обработки (шлифование, хонингование, доводка) создается необходимая форма поверхности с заданной точностью. Однако в ряде случаев традиционные технологии не обеспечивают оптимальное качество и точность рабочих поверхностей.

В этих случаях целесообразно использовать технологии поверхностного пластического деформирования (обкатывание и раскатывание шаровым и роликовым инструментом, алмазное выглаживание, ударная обработка специальным инструментом).

В результате упрочняется поверхностный слой, повышается износостойкость, работающих при переменных нагрузках в 1,5-2 раза.

Другим перспективным направлением при изготовлении и ремонте деталей является отделочно-зачистная обработка и одна из ее разновидностей виброобработка. Широкие технологические возможности этого метода в сочетании с высокой производительностью на очистных, доделочных, шлифовально-полировальных и упрочняющих операциях поставили его в число наиболее приемлемых и перспективных способов обработки деталей.

Работа виброустановок основана на принципе неуравновешенного момента, создаваемого при помощи грузов, закрепленных на концах вала вибратора. Механические колебания рабочей среды и обрабатываемых деталей при этом составляют 20-50 Гц с амплитудой от 1 до 10 мм.

В зависимости от назначения технологической операции, материала детали и способа ведения процесса, состав рабочей среды может быть: твердых абразивов, неабразивных материалов, жидких наполнителей в виде водных растворов с различного рода добавками (моющие, разделяющие, травящие, пассивирующие и др.). На виброустановках обрабатывается широкая номенклатура деталей (крепеж, корпуса, соединительная арматура, валики, лопатки и др.).

Особый интерес представляет дальнейшее развитие и широкое применение технологии быстрого изготовления заготовок деталей, получаемых точным литьем в оболочковые формы на базе систем быстрого прототипирования.

Система быстрого прототипирования позволяет получать физическую копию трехмерной компьютерной модели детали любой сложности, запроектированной с помощью различных систем САПР. В основе этой технологии лежит процесс выращивания физической копии компьютерной модели последовательно отверждением полимерной жидкости (метод стериолитографии) или из слоев ламинированной бумаги, фольги путем ее послойного раскроя лучом лазера с последующим термопрессованием слоев (метод тонких пленок). При использовании традиционной технологии нужны две металлические пресс-формы: модельная и стержневая, очень дорогостоящие и трудоемкие. Применение же систем быстрого

прототипирования позволяют сократить до 70% время и трудоемкость создания прототипа изделия; создается полная индивидуализация прототипа, а сам технологический процесс является экологически чистым и безотходным.

Технологическая ниша данных технологий - изготовление опытных образцов и первых комплектов деталей, отработка конструктивных вариантов изделий сложной формы.

Такие технологии в настоящее время нашли широкое применение на Запорожском предприятии «Мотор-Сич» и в Харьковском национальном техническом университете (ХПИ) на кафедре интегрированных технологий проф. Грабченко А.И. Размерная обработка является определяющей в цепочке технологических переделов, так как она в основном обеспечивает реализацию замысла конструктора по созданию деталей с заданными служебными свойствами. Кроме этого, совершенствование технологии размерной обработки, на долю которой приходится не менее 40% общей трудоемкости изготовления машин (около 80% их деталей подвергаются размерной обработке), определяет технический прогресс в машиностроении.

Основные направления развития технологии размерной обработки, учитывающие как организационные технические факторы, так и рабочие процессы размерной обработки:

- разработка новых принципов организации технологии, дающих возможность управлять ее параметрами и структурой в цикле проектирования и изготовления;
- интенсификация и повышение качества за счет новейших и синтеза существующих рабочих процессов;
- создание новых прогрессивных средств технологического оснащения (оборудование, оснастка, инструмент), в том числе гибких модулей, РКП.

Основные направления развития обработки резанием связаны с ее интенсификацией за счет новейших и синтеза существующих методов обработки. Основная тенденция - смещение технологических показателей в размерной обработке в направлении более высокой степени точности и качества в результате изменения соотношения отдельных видов обработки. Уменьшается объем токарной обработки за счет внедрения абразивной обработки, увеличивается доля прецизионного шлифования и, напротив, внедрение лезвийной обработки сверхтвердыми материалами может вытеснить абразивную обработку.

В то же время, лезвийная обработка будет использовать методы сверхскоростного резания, позволяющего повысить скорости и подачи в несколько раз по сравнению с существующими на сегодняшний день.

Соответственно, новый уровень финишной обработки, может быть достигнут на основе развития триботехнологии. Триботехнология финишной обработки обеспечивает создание практически безизносных пар трения за счет комбинированного воздействия алмазно-абразивного, деформирующего и антифрикционного инструмента, обеспечивающего управление как

геометрическими, так и физико-химическими параметрами поверхности. При этом обеспечивается повышение ресурса пар трения в 3-10 раз.

В области ЭХО, ЭФО и комбинированных методов обработки можно отметить следующие основные тенденции развития: более широкое использование комбинированных методов шлифования на основе использования традиционных методов, ЭЭ и ЭХ методов обработки, эрозионно-химической обработки, совмещение ультразвуковой и ЭЭ обработки; применение плазменно-механической обработки, обеспечивающей повышение производительности в 1,2-10 раз и стойкости режущего инструмента в 2-5 раз.

При обработке ювенильных (сверхгладких и сверхчистых) поверхностей деталей с субмикронной точностью применяются методы нанотехнологии, базирующейся на принципиально новых физико-химических процессах размерной обработки, обеспечивающих шероховатость в тысячных долях мкм.

В области технологической оснащенности перспективы технического совершенствования автоматизированных производств требуют создания гибких средств технологического оснащения. Материальной базой в данном случае является система переналаживаемой технологической оснастки (НТО)[1].

Рассматривая перспективы теории и практики размерной обработки следует считать, что их теоретическими основами являются последние достижения фундаментальных наук, которые дают возможность применять для изготовления машин все многообразие возможных физико-химических явлений; особо эффективны разработки по созданию комбинированных методов обработки, использующих последовательное или одновременное воздействие ряда механических, электрических, магнитных процессов.

В ряде изделий применяются сложнорельефные детали из высокопрочных и трудно деформируемых материалов и сплавов, изготавливаемые методами глубокой вытяжки и рельефной формовки в несколько переходов с последующим выполнением различных разделительных операций: вырубки, пробивки, обрезки по контуру и т.д. Изготовление комплектов крупногабаритных штампов для производства этих деталей связано с большими техническими трудностями, а в ряде случаев экономически нецелесообразно. Время их изготовления может составлять от 8 месяцев до 1 года, что совершенно не соответствует быстрой сменяемости объектов производства.

В настоящее время при производстве сложнопрофильных деталей все шире применяются высокоэнергетические методы штамповки, наиболее перспективным из которых является метод ударной импульсной штамповки, осуществляемый с энергией до 40 кДж. Отличительной особенностью метода является осуществление деформирования материала импульсом высокого давления. Дальнейшее развитие и широкое внедрение данного метода

сдерживается из-за отсутствия технологического оборудования большой мощности.

Наиболее перспективными направлениями в области технологии и оборудования для ударной импульсной штамповки являются: разработка гидроударного и пневмоударного оборудования с энергией импульса 75-100 кДж, работающего в автоматическом и полуавтоматическом режиме (габаритные размеры штампуемых деталей 750x1000 мм); разработка технологии получения сложно профильных деталей за один переход в одной матрице с доведением толщины штампуемого металла для трудно деформируемых малопластичных материалов до 3,0 мм, а легированных – до 6,0 мм; интенсификация процессов ударной импульсной штамповки за счет использования пластифицирующих покрытий; расширение номенклатуры деталей, штампуемых полиуретаном на ударном оборудовании.

Применение метода ударной импульсной штамповки позволит сократить сроки технологической подготовки производства за счет простоты и дешевизны штамповой оснастки в 2-3 раза, уменьшить стоимость и количество необходимых штампов в 3-5 раз, снизить их металлоемкость на 50-80%.

Путем реализации предложенных решений предусматривается радикально повысить технический и технологический уровень производства, существенно повысить надежность и долговечность деталей машин и оборудования, снизить металлоемкость и трудоемкость изготовления технологической оснастки, обеспечить экономию конструкционных, быстрорежущих и инструментальных сталей, сократить сроки технологической подготовки производства, создать технологические заделы для разработки техники нового поколения [2].

Выводы. Для реализации указанных выше направлений целесообразно создать на базе существующих промышленных предприятий и научно-исследовательских институтов бизнес-инновационные центры высоких технологий.

Они могут включать в себя «мозговые» центры научных подразделений, сеть совместных и малых предприятий по реализации научной и промышленной продукции, системы, обеспечивающей материально-техническое снабжение и финансирование проводимых мероприятий, выставочные комплексы. В дальнейшем эти структуры могут стать составной частью технопарков региона.

Список литературы: 1. Мовшович А.Я., Жолткевич Н.Д., Горбулин В.П., др. Обратимая технологическая оснастка для ГПС. К.: Техника, 1992.- 216 стр. 2. Мовшович А.Я., Жолткевич Н.Д. Основные тенденции развития высоких технологий в машиностроении. Вестник национального технического университета «ХПИ». Х.: НТУ «ХПИ», вып.11.- 2001, с.3-13. 3. Мовшович А.Я., Горелик Б.В. К вопросу влияния ионной бомбардировки на механические свойства стали. Вестник национального технического университета «ХПИ». Х.: НТУ «ХПИ», вып.27.- 2008, с.42-47.

Поступила в редколлегию 20.09.2010

Э. С. ГЕВОРКЯН, д.т.н., УГАЖТ, Харьков
Ю. Г. ГУЦАЛЕНКО, НТУ «ХПИ», Харьков
О.М. МЕЛЬНИК, аспирант., УГАЖТ, Харьков

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОПЛОТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НАНОПОРОШКОВ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ГОРЯЧИМ ПРЕССОВАНИЕМ

Досліджено проблему консолідації нанопорошків ZrO_2 . Наноконкомпозитний підхід відкриває деякі нові можливості для вдосконалення характеристик керамік на основі ZrO_2 . Застосування технології гарячого пресування зі стабілізуючою участю окису ітрію дозволяє реалізувати виробництво високощільної комерційно привабливої цирконієвої кераміки.

The problem of ZrO_2 nanopowder's consolidation is investigated. Nanocomposite approach opens up some new possibilities for performance of ZrO_2 ceramics. Application of technology of hot pressing with yttrium oxide stabilizing participation allows to realize manufacture high density commercially attractive zirconium ceramics.

Введение. В современных технологических процессах, использующих операции различного термомеханического воздействия, широкое распространение получили устройства с элементами из материалов оксидной керамики. Постоянно растущие и ужесточающиеся требования к условиям эксплуатации таких элементов инициируют работы по совершенствованию физико-механических свойств материалов изделий, повышению их прочности, ударной вязкости и термостойкости.

Наш интерес в связи с этим к совершенствованию тугоплавкой керамики на основе диоксида циркония, кроме известных его практических достоинств [1], определяется еще и тем, что по объему разрабатываемых и разведанных рудных месторождений циркония, извлекаемого из магматического силиката $Zr(SiO_4)$, Украина в XXI веке относится к мировым лидерам, наряду с США пропустив вперед лишь Австралию и ЮАР [2].

Согласно литературным данным, для преодоления большого межчастичного трения и разрушения агломератов при холодном прессовании керамических нанопорошков требуются давления от 1 до 9 ГПа [3]. При таких давлениях возможно изготовление кристаллических образцов с высокой плотностью и с наноразмерными зернами. Однако реализация таких давлений с технологической точки зрения вызывает определенные трудности. Известен опыт зарубежных специалистов, когда для получения образцов из нанопорошков ZrO_2 с высокими механическими характеристиками применяют трехступенчатый процесс: предварительное прессование порошков при комнатной атмосфере, далее приготовленные

компакты на протяжении от 2 до 6 часов спекают на воздухе при температурах от 1100°C до 1300°C и окончательно, в пределах от 2 до 3 часов, подвергают горячему изостатическому прессованию при температурах от 1150°C до 1350°C в атмосфере аргона [4]. В настоящее время многие исследователи работают над разработкой более простых и менее энергоемких технологических схем получения изделий из нанопорошков ZrO_2 .

Таблица 1 – Характеристики инженерии высокоплотного стабилизированного оксида циркония: по материалам сайта accugatus.com (сент. 2010 г.) американской керамикопроизводящей корпорации Аккуратус (штат Нью-Джерси, г.Филлипсбург)

Характеристики	Стабилизатор	
	Y_2O_3	MgO
1. Микроструктура		
1.1. Тетрагональной закалки: равномерно распределенные тетрагональные осадки в кубических кристаллах	–	+
1.2. Мелкозернистая поликристаллическая чисто тетрагональная	+	–
2. Механические		
2.1. Плотность, г/см ³	6,0	5,5
2.2. Пористость, %	0	0
2.3. Прочность на изгиб, МПа	900	400–620
2.4. Модуль продольной упругости, ГПа	200	200
2.5. Твердость HV 100, кг/мм ²	1300	1100
2.6. Трещиностойкость K_{IC} , МПа·м ^{1/2}	13	6-10
3. Тепловые		
3.1. Теплопроводность, Вт/м·°К	2	2
3.2. Термический коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ /°С	10,3	5–10
4. Электрическое удельное сопротивление, Ом·см	>10 ¹⁰	>10 ¹⁰
5. Предельно допустимая эксплуатационная температура (без нагрузки), °С	1500	400–980
6. Цвет	Слоновая кость	Загар

Выбор стабилизатора (Y_2O_3) в наших исследованиях среди других возможных вариантов, от диоксида редкоземельного церия SeO_2 до диоксида радиоактивного урана UO_2 , определен из соображений как доступности, так и широтой его апробированности другими практиками, а также исходя из

некоторых очевидных преимуществ перед использованием оксида магния – другого распространенного стабилизатора циркониевой керамики, табл. 1.

Экспериментальные исследования. Авторами проведены эксперименты по обработке технологии формования изделий из нанопорошка состава ZrO_2 -3 мас. % Y_2O_3 , полученного гетерофазным осаждением гидроксидов циркония и иттрия из концентрированных водных растворов солей этих металлов в растворе аммиака. В результате исследований с использованием электронной микроскопии было установлено, что используемый нами нанопорошок (ZrO_2 -3 мас. % Y_2O_3) состоит из частиц сферической формы, их средний размер составляет 21-28 нм.

В процессе холодного (при комнатной температуре) прессования нанопорошков и извлечения прессовок из пресс-формы наблюдалось явление высокого межчастичного и пристеночного трения, проявляющегося в близости усилий прессования и выталкивания. При этом максимальная плотность полученных прессовок не превышала 1,5...1,6 г/см³. Применение увлажнения нанопорошка ZrO_2 -3 мас. % Y_2O_3 привело к увеличению плотности прессовки до 2,0...2,1 г/см³. При этом, как правило, в образцах присутствовали трещины и при извлечении из пресс-формы они разрушались.

С целью снижения количества сорбированных поверхностью частиц нанопорошков газовых примесей проводили предварительное прессование в вакууме. Однако это не привело к увеличению плотности прессовок. Квазиизостатическое прессование нанодисперсных порошков ZrO_2 в полиуретановой форме позволило получить образцы с плотностью не выше 2,0 г/см³.

Таким образом, применение холодного формования не позволяет получить прессовки исследуемого рабочего состава ZrO_2 -3 мас. % Y_2O_3 с плотностью более 35% от теоретической или практически беспористой (см. табл. 1). Дальнейшее спекание таких прессовок в воздушной среде или в вакууме до теоретической плотности с целью получения максимальных механических характеристик керамики сопряжено с большими (свыше 40%) усадками и, соответственно, со значительными искажениями первоначальной формы.

С учетом вышеизложенного, для изготовления плотных спеченных продуктов мы применяли горячее прессование нанопорошков состава ZrO_2 -3 мас. % Y_2O_3 при повышенных температурах, в частности 1600°C, давлении 40 МПа и времени выдержки от 2 минут и более. По данным электронно-микроскопических исследований было установлено, что в результате горячего прессования на приведенном выше режиме формируются плотные и прочные образцы, имеющие структуру с зернами угловатой формы величиной 5...10 мкм, рис. 1.

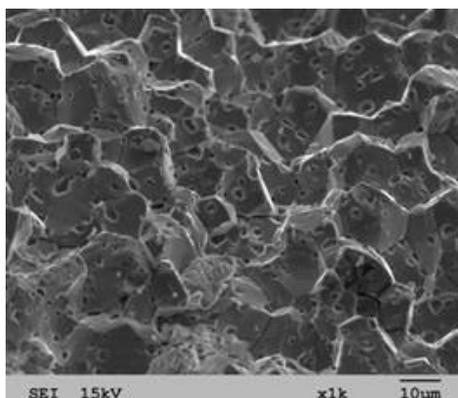


Рис. 1 – Микроструктура образцов, изготовленных горячим прессованием из нанопорошка ZrO_2 -3 мас. % Y_2O_3 при температуре 1600°C и давлении 40 МПа

Однако известно, что чем выше давление прессования и ниже температура спекания и время выдержки, тем интенсивней происходит уплотнение и тем меньшим будет окончательный размер зерен. Поэтому горячее прессование предварительно спрессованных образцов из порошка состава ZrO_2 -3 мас. % Y_2O_3 проводили далее при температурах 1270°C и 1050°C и при одном и том же давлении 45МПа в течении 2 мин. По данным электронно-микроскопических исследований было установлено, что горячее прессование при температуре 1270°C также приводит к значительному росту кристаллических зерен, к тому же зерна значительно различаются по размерам (рис. 2 а), что не способствует получению материала с оптимальными механическими свойствами.

Упрочнение материалов из частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСДЦ) основано на создании ультрадисперсной структуры в керамике с высоким содержанием тетрагональной фазы, способной претерпевать превращение в моноклинную под действием механических напряжений на острие трещины с увеличением ее объема. Это приводит к закрытию трещины. Для ее дальнейшего развития необходимо приложение дополнительных механических напряжений, что повышает прочность изделий. Такой механизм возможен только в случае, если в керамике после обжига сохраняется размер кристаллов менее 1 мкм, поскольку тетрагональный твердый раствор Y_2O_3 в ZrO_2 является метастабильным [5]. При превышении указанного размера кристаллов происходит резкое разупрочнение материала из-за перехода тетрагональной фазы в моноклинную, т.е. наблюдается полиморфный переход с увеличением объема.

Как видно из рис. 2 б, полученная при температуре 1050°C кристаллическая структура характеризуется требуемым равномерным

распределением величин зерен со значениями 250-300 нм и, очевидно, вязким характером разрушения.

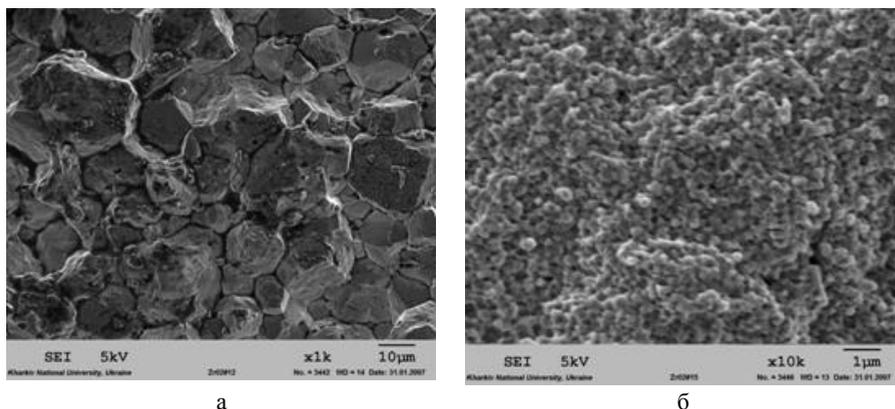


Рис. 2 – Структуры керамических материалов состава ZrO_2 -3 мас. % Y_2O_3 , изготовленных горячим прессованием при температурах 1270°C (а) и 1050°C (б), при давлении 45 МПа и времени выдержки 2 мин.

Закключение. Таким образом, проведенные нами исследования можно использовать как технологическую основу получения высокоплотной, высокофункциональной и конкурентоспособной керамики из частично стабилизированного диоксида циркония с величиной зерен в субмикронном диапазоне.

Список использованных источников: 1. Физико-химические свойства окислов: Справочник / Под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1969. – 456 с. 2. Архипова Н.А. Цирконий: состояние и перспектива развития мирового рынка // Экономика и управление. – 2002. – № 5. – С. 66-70. 3. Спекание ультрадисперсных порошков на основе диоксида циркония / Е.В. Дудник, В.А. Зайцев, А.В. Шевченко, Л.М. Лопато // Порошковая металлургия. – 1995. – № 5. – С. 43 – 52. 4. Hefetz M. Fabrication of dense nanocrystalline ZrO_2 -3% Y_2O_3 by hot-isostatic pressing // J. of Materials Research, 1998, v. 13, № 7, pp. 1875-1880. 5. Лукин Е.С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой. Ч.4. Технологические методы получения высокодисперсных порошков для многокомпонентной оксидной керамики // Огнеупоры и техническая керамика. – 1986. – № 9. – С. 2-10.

Поступила в редколлегию 15.09.2010

А.В.КУПРИЯНОВ, канд. техн. наук, УИПА
Н.Ю.ЛАМНАУЭР, канд. техн. наук, УИПА

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИИ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГОДНОСТИ РАЗМЕРОВ

Запропоновано систему контролю, що спрямована на отримання деталей з близькими до оптимального розмірами. Гідність розміру має числове значення, що зменшується від максимального - одиниці, у міру віддалення дійсного розміру від оптимального. Запропонований і перевірений математичний апарат для аналітичної побудови функції оптимальності розмірів. Показано, як розподіл оптимальності характеризує технологію виготовлення з точки зору якості.

The control system built on the receipt of details with sizes near to optimum is offered. The usability of dimension has the numerical value decreasing from maximal - unity, as far as actual dimension locate from optimum one. A mathematical definition for function of optimum of dimensions is offered and tested. It is shown, as distributing of optimum characterizes quality of technology.

1. Введение

В машиностроении традиционно используется допусковый контроль годности размеров. Он подразумевает, что размеры, находящиеся в определенных пределах, называемых допуском, считаются одинаково годными, и их качество не различается. Это плохо по двум причинам. Во-первых, это не соответствует условиям эксплуатации, при которых существует некоторое наилучшее значение размера, которое будем называть оптимальным размером. Во-вторых, это не стимулирует производителя изготавливать детали с возможно более узким диапазоном значений действительного размера. В существующей системе единственный путь улучшения качества – это уменьшить допуск размера. Такой кардинальный шаг не всегда оправдан, поскольку систематические и случайные погрешности изготовления не позволяют беспредельно уменьшать допуски.

Предлагается система контроля, в которой размеры имеют не дискретное: 0 или 1, а непрерывное значение годности, увеличивающееся по мере приближения к оптимальному размеру. При этом, в зависимости от диапазона значений размера, детали могут быть разделены на сорта, имеющие разное значение годности размеров и разное значение продажной цены. Оплата труда рабочих может быть также дифференцирована, в зависимости от доли изделий каждого сорта. Это позволит стимулировать производителя непрерывно улучшать качество, а также расширить сбыт продукции за счет дифференцированного подхода к покупателям с разными финансовыми возможностями.

Использование функции годности размеров и функции плотности распределения годности размеров в обобщенном виде предложено в [1]. Однако, функция плотности распределения годности была получена только для нормального распределения размеров деталей и только с применением численных методов.

Цель статьи состоит в теоретическом обосновании и проверке формул, позволяющих аналитически строить функцию плотности распределения размеров, применительно для широко используемых законов распределения размеров деталей и видов функции годности размеров.

2. Функция годности размеров

Форма функции цены отклонения действительного размера от оптимального значения может быть разной. Для количественной оценки цены отклонения действительного размера от оптимального предлагается использовать функцию годности размеров $K(x)$, требования к которой:

1. Равенство 1 в значениях оптимального размера - ko .
2. Равенство 0 в двух значениях предельно допустимых значений, меньшего ei и большего es соответственно (это могут быть границы стандартного поля допуска).
3. В пределах допустимых значений изменяется в диапазоне $[0, 1]$, так, что одному значению функции соответствует два значения аргумента находящихся по разные стороны от ko .
4. Отрицательность за пределами допустимых значений.

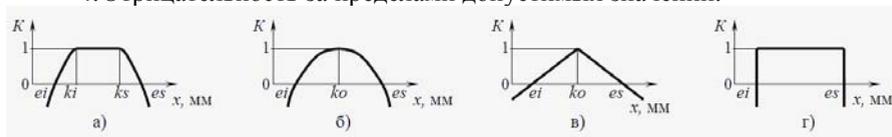


Рис. 1. Семейство функций годности размеров

На рисунке 1 изображены примеры функций годности размеров. По горизонтальной оси отложены размеры x в мм, по вертикальной оси безразмерные значения годности размеров $K(x)$. Форма функции годности устанавливается исходя из эксплуатационных условий работы детали. Форма в области оптимальных значений может быть различной: может быть (рис. 1а), а может и не быть (рис. 1б, в) неубывающего участка. Боковые участки функции могут быть выпуклы вверх (рис. 1а, б), линейны (рис. 1в), и даже выпуклы вниз. Форма функции годности определяет, насколько желательно получать близкие к оптимальной величине ko размеры. Чем больше ускорение ее, тем уже диапазон значения размера требуется обеспечить технологически. Функция годности может быть несимметрична, если значение оптимального размера смещено относительно центра допустимых значений. Несимметричная форма целесообразна, если требуется технологически обеспечить размеры, близкие к одному из допустимых значений.

Для классического допускового контроля можно представить функцию годности в виде, изображенном на рисунке 1г. В пределах допустимых значений $[ei, es]$ детали имеют годность, равную единице, за пределами $[ei, es]$ детали бракованные.

Один из видов предлагаемой функции годности показан на рисунке 1а. Данная функция характеризует использование технологического запаса точности, при котором диапазон размеров с годностью $K(x) = 1$ по сравнению с классическим допусковым контролем сужается от допустимых значений $[ei, es]$ до желательных $[ki, ks]$. При этом значения размеров за пределами $[ki, ks]$, но в пределах $[ei, es]$, нежелательны, но допустимы, и имеют $0 < K(x) < 1$. За пределами диапазона $[ei, es]$ функция годности $K(x) < 0$, это значит, что изготовление деталей с такими значениями размеров штрафуются. Более подробно построение функции годности в данном виде рассмотрено в [1].

Случай, когда диапазон желательных размеров $[ki, ks]$ уменьшается до единственного оптимального значения $ko = ki = ks$, изображен на рисунках 1б и 1в. При этом только для размера $x = ko$ значение годности $K(x) = 1$, для остальных оно меньше. Следует заметить, что значение оптимального размера должно находиться внутри диапазона гранично допустимых значений $ei < ko < es$, в противном случае требования к функции годности размеров $K(x)$ не будут соблюдены.

Задаваясь диапазоном значений годности, можно определять соответствующий ему диапазон действительных размеров. Таким образом, можно делить детали на сорта. Собирая изделие из деталей определенного сорта, можно говорить, что изделие соответствует этому сорту [2].

Использование обобщенного подхода к построению функции годности, изложенное в [1], не всегда оправдано. Часто можно использовать более простые виды функций.

Использование линейной функции годности (рис. 1в) значительно упрощает математическую задачу расчета значения годности действительного размера. В этом случае значение годности размера определяется по формуле:

$$K(x) = \begin{cases} (x - ei)/(ko - ei), & x \leq ko, \\ (x - es)/(ko - es), & x \geq ko. \end{cases} \quad (1)$$

При заданном значении годности K можно определить соответствующие ему значения размеров:

$$x(K) = \begin{cases} ei + K(ko - ei), & x \leq ko, \\ es + K(ko - es), & x \geq ko. \end{cases} \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) $ko \neq ei \neq es$.

Использование параболы в качестве функции годности дает кривую (рис. 1б), по внешнему виду похожую на нормированную кривую стоимости получения деталей с определенным диапазоном размеров. По этой причине, а также из-за математической простоты, парабола в качестве функции годности найдет широкое применение. Парабола симметрична, поэтому недостатком использования ее в качестве функции годности будет невозможность смещать значениями оптимального размера относительно центра допустимых размеров, т.е. всегда $ko = (ei + es) / 2$. Значение годности

действительного размера, по причине симметричности решения для левой и правой половин, можно записать одним уравнением:

$$K(x) = 1 - \left(\frac{2x - es - ei}{es - ei} \right)^2. \quad (3)$$

Значение двух размеров, соответствующие заданной годности K определяется по формуле:

$$x(K) = ko \pm \frac{es - ei}{2} \sqrt{1 - K}. \quad (4)$$

3. Функция плотности распределения годности размеров

Функции плотности распределения размеров $f(x)$ деталей достаточно хорошо изучены [3]. В машиностроении размеры могут соответствовать закону нормального распределения, равной вероятности, равнобедренного треугольника, эксцентриситета, а также их композиция.

Если спроектировать функцию плотности распределения размеров $f(x)$ на функцию годности размеров $y = K(x)$, то получим функцию, которая характеризует плотность распределения вероятности получения размера с определенным значением годности. Будем именовать ее функцией плотности распределения годности размеров. Каждое из сочетаний функции годности размеров и функция плотности распределения размеров дает свой вид-функция плотности распределения годности размеров.

Эта функция может быть построена методом статистического моделирования [1]. Для практики имеет большое значение получение ее в аналитическом виде. В общем случае эта функция плотности получается как сумма произведений [4]:

$$g(y) = \sum_{i=1}^n f(\Psi_i(K)) \left| \Psi_i'(K) \right|, \quad (5)$$

где $\Psi_i(K)$ - обратные функции для данного y со столькими слагаемыми n , сколько значений (при данном y) имеет обратная функция.

Получим функцию плотности распределения годности размеров для случая, когда плотность распределения размеров подчиняется нормальному закону с среднеарифметическим значением размеров a и среднеквадратическим отклонением σ . В этом случае функция плотности имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}. \quad (6)$$

Замечательно, что для случая, когда функция плотности распределения размеров нормальна, а функция годности линейна (1), функция плотности распределения годности размеров также подчиняется закону нормального распределения:

$$g(y) = \frac{1}{\sigma_G \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-a_G)^2}{2\sigma_G^2}}, \quad (7)$$

где

$$a_G = \begin{cases} (a - ei)/(ko - ei), & x \leq ko, \\ (a - es)/(ko - es), & x \geq ko. \end{cases} \quad (8)$$

$$\sigma_G = \begin{cases} \sigma/(ko - ei), & x \leq ko, \\ \sigma/(ko - es), & x \geq ko. \end{cases} \quad (9)$$

Таким образом, среднеарифметическое значение размеров a_G функции плотности распределения годности размеров равно значению годности в точке a (из сравнения (1) и (8)). Среднеквадратическое отклонение размеров σ_G функции плотности распределения годности размеров отличается от σ только на множитель (см. (9)).

Функция плотности распределения годности размеров для случая, когда функция плотности распределения размеров нормальна, а функция годности парабола (3), имеет вид:

$$g(y) = \frac{(es - ko)}{2\sigma\sqrt{2\pi}(1-y)} \left(e^{-\frac{(ko-(es-ko)\sqrt{1-y}-a)^2}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{(ko+(es-ko)\sqrt{1-y}-a)^2}{2\sigma^2}} \right), \quad (10)$$

при $(-\infty < y \leq 1)$.

Если размеры деталей распределены равномерно в интервале (c, b) , и функция плотности распределения имеет вид:

$$f(x) = 1/(b - c), \quad (11)$$

а функция годности парабола (3), то функция плотности распределения годности размеров имеет вид:

$$g(y) = \begin{cases} \frac{es - ko}{2\sqrt{1-y}(b-c)}, & m_2 \leq y \leq m_1, \\ \frac{es - ko}{\sqrt{1-y}(b-c)}, & m_1 \leq y \leq 1, \end{cases} \quad (12)$$

где $m_1 = 1 - \left(\frac{ko - a}{es - ko}\right)^2$, $m_2 = 1 - \left(\frac{b - ko}{es - ko}\right)^2$. Формула (12) выведена при

допущении, что $ei > c$ и $es < b$.

Если $ei = c$ и $es = b$, то $m_1 = m_2 = 0$ и функция плотности распределения годности (12) упрощается и имеет вид:

$$g(y) = \frac{1}{2\sqrt{1-y}}, \quad 0 \leq y \leq 1. \quad (13)$$

В случае, когда размеры деталей распределены по закону равнобедренного треугольника, параметры которого совпадают с верхним и

нижним допустимыми значениями $c = ei$, $b = es$, т. е. функция плотности распределения имеет вид:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq c, \\ 4(x-c)/(b-c)^2, & c < x \leq (c+b)/2, \\ 4(b-x)/(b-c)^2, & (c+b)/2 < x < b, \\ 0, & x \geq b, \end{cases} \quad (14)$$

а функция годности парабола (3), то функция плотности распределения годности размеров имеет вид:

$$g(y) = \frac{1}{\sqrt{1-y}} - 1, \quad 0 \leq y < 1. \quad (15)$$

4. Примеры функции плотности распределения годности размеров

Проиллюстрируем функцию плотности распределение годности g на примере размера $\varnothing 90F8_{+0,036}^{+0,09}$. Пусть значение оптимального размера совпадает с серединой поля допуска и равно 90,063 мм. В качестве функции годности размеров выбрана парабола (рис. 1 б), пересекающей ось абсцисс в границах поля допуска. Распределение размеров принято нормальным со среднеарифметическим значением a и среднеквадратическим отклонением σ . По оси абсцисс откладываются значения годности, по оси ординат – плотность распределения годности размеров.

Рис. 2 а) иллюстрирует плотность распределения годности размеров для классического случая, когда центр кривой нормального распределения совпадает с оптимальным размером $a = 90,063$ мм, разброс размеров в пределах 6σ равен полю допуска, при этом среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,009$ мм. Количество деталей с размерами близкими к оптимальному максимально, по мере уменьшения годности количество деталей уменьшается, достигая нулевых значений на границах поля допуска. За пределами положительной годности деталей практически нет.

Рис. 2 б) иллюстрирует распределение годности для случая изготовления со значительным технологическим запасом точности. Исходные данные: центр кривой распределения размеров такой, как и для рисунка 3 а), среднеквадратическое отклонение уменьшено до $\sigma = 0,005$ мм. Таким образом, получаемые размеры сгруппированы около оптимального, а деталей с размерами, близкими к границам поля допуска, нет. Функция плотности распределения годности достигает нулевых значений при значениях годности 0,7.

Рисунки 2 в) и 2 г) построены для исходных данных, характеризующих технологию, при которой имеются детали с отрицательной годностью, т.е. бракованные. На рисунке 2 в) центр кривой распределение размеров смещен относительно оптимального и равен $a = 90,083$ мм, при этом среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,005$ мм. Подобные параметры

распределения размеров деталей характерны для случая неправильной настройки станка, а точность изготовления достаточна. Основная часть деталей имеют значения годности 0-0,8. Деталей с оптимальным размером практически нет, а в то же время значительная часть деталей имеет отрицательные значения годности, что свидетельствует о браке.

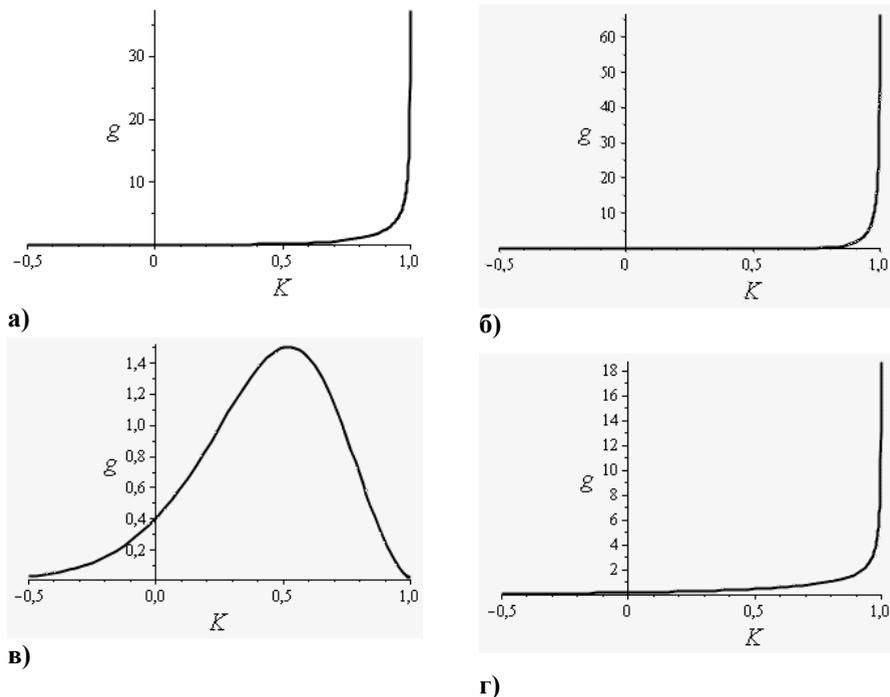


Рис. 2. Примеры графиков плотности распределения годности размеров

На рисунке 2 г) центр кривой распределение размеров совпадает с оптимальным, но разброс размеров слишком велик, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,012$ мм. Подобные параметры распределения размеров деталей характерны для случая недостаточной точности изготовления, при правильной настройке станка. Функция плотности распределения годности имеет максимум в области значений $g = 1$, но часть деталей имеют отрицательную годность.

Значение функции распределение годности размеров g в точке максимума отличается от полученных с помощью моделирования [1], причиной этому есть ограниченное число моделирующих значений, поэтому точка экстремума графика распределения годности меньше или больше.

Более точные аналитические методы, которые и рассмотрены в данной статье.

Выводы:

1. Предлагается система контроля, в которой действительные размеры имеют значение годности, непрерывно улучшающееся от $-\infty$ до 1 по мере приближения к оптимальному размеру.
2. Система контроля более общая, чем существующая стандартная система допусков, и включает ее в виде частного случая.
3. Для количественной оценки годности предложено семейство функций годности, подробно рассмотрены линейная и параболическая.
4. Задаваясь диапазоном значений годности, возможно разделять детали на сорта по критерию точности размеров.
5. Для оценки технологического процесса с точки зрения точности размеров предлагается функция плотности распределения годности размеров, которая представляет собой проекцию плотности распределения размера на функцию годности.
6. Выбран и проверен математический аппарат, позволяющий строить функцию плотности распределения годности размеров для случаев, когда функция годности представляет собой линейную или параболическую, а плотность распределения подчиняется одному из законов: нормальному, равномерному, равнобедренного треугольника.
7. Предложенные аналитические зависимости проиллюстрированы практическими примерами.

Список литературы: 1. *Куприянов А.В.* Контроль оптимальности размеров / *А.В.Куприянов* // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХП». – 2010. – №24. – С. 9-15. 2. *Куприянов А.В.* Расчет размерных цепей с гарантированным значением годности замыкающего звена / *А.В.Куприянов* // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХП». – 2010. – №25. – С. 110-114. 3. *Маталин А.А.* Технология машиностроения. Учебник для машиностроительных ВУЗов / *А.А.Маталин* – Л: Машиностроение, 1985. – 496 с. 4. *Пугачев В.С.* Теория вероятностей и математическая статистика / *В.С. Пугачев* – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. - 496с.

Поступила в редколлегию 24.09.10

Н.К.РЕЗНИЧЕНКО, д.т.н., проф. УИПА, г.Харьков;

О.М.ДУБОВЕЦЬ, канд. техн. наук, доц. УИПА, г.Харьков.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПРИНЦИПА ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ПЕРВИЧНЫХ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

У статті розглядається використання диференціального принципу при конструюванні первинних перетворювачів різних технологічних параметрів.

In the article, using of differential principle is examined for constructing of primary transformers of different technological parameters.

Известно, что дифференциальные преобразователи обладают рядом достоинств, которые обеспечивают их широкое использование в средствах и схемах автоматизации:

- высокая чувствительность к изменению входного сигнала;
- наличие нулевого значения выходного сигнала в равновесном состоянии и «фазочувствительности» при противоположном нарушении равновесного состояния;
- возможность исключения задатчика из систем регулирования и т.д.[1],[2].

Однако указанные преимущества дифференциальных преобразователей превращаются в «недостатки», если входной сигнал средства измерения зависит одновременно от нескольких параметров (как, например, перемещение поплавка уровнемера зависит одновременно от изменения уровня и плотности контролируемой среды).

Авторы исследовали вопрос возможности использования дифференциального принципа при конструировании первичных преобразователей различных технологических параметров (уровня, расхода, плотности и др.) с целью исключения влияния на их выходной сигнал сопутствующих свойств и параметров контролируемой среды, которые чаще всего проявляются в виде методических погрешностей.

Дифференциальные преобразователи содержат два идентичных чувствительных элемента, включенных встречно, что обеспечивает и наличие нулевого выходного сигнала при «заданном» значении свойства (параметра) контролируемой среды, и их «фазочувствительность» при отклонении параметра от заданного значения. Вследствие этого при разработке дифференциальных первичных преобразователей свойств и технологических параметров контролируемых сред предполагалось, что их конструкции должны также содержать два чувствительных идентичных элемента, схема включения которых должна обеспечивать и наличие нуля и

фазочувствительность, и независимость выходного сигнала от изменения конкретного сопутствующего свойства или параметра исследуемой среды.

При этом рассматривались и анализировались все возможные комбинации выходных сигналов двух чувствительных элементов, образующих совместно первичный преобразователь, обеспечивающие предположительно независимость их общего выходного сигнала от изменения сопутствующего свойства (параметра) контролируемой среды.

В процессе исследования (математического и графического моделирования) были определены варианты соединения и преобразования выходных сигналов физически аналогичных чувствительных элементов первичных преобразователей различных средств измерения, при которых их выходные сигналы не зависят от изменения сопутствующего свойства среды – ее плотности. Обоснование возможности использования указанных вариантов приведено ниже.

Известно, что при измерении уровня жидких сред поплавковыми уровнемерами, реализуется закон

$$P = HS \rho g, \quad (1)$$

где P – выталкивающая сила, действующая на поплавок; H – глубина погружения поплавка в жидкую среду; ρ – плотность контролируемой среды; g – ускорение силы тяжести.

Из (1) следует, что на результаты измерения уровня жидкой среды в объекте значительное влияние оказывает ее плотность, при этом погрешность измерения (методическая) прямо пропорциональна изменению плотности среды. Предполагалось, что можно устранить зависимость результатов измерения уровня от плотности среды путем введения корректирующего сигнала, который должен формироваться вторым чувствительным элементом.

Очевидно, что при использовании корректирующего элемента необходимо непрерывно измерять плотность контролируемой среды и вводить коррекцию в результаты измерения уровня, при этом введение коррекции не должно нарушать метода, на основе которого уровень среды определяется. Это возможно только в том случае, когда корректирующая поправка не будет изменять вид формулы (1), независимо от значения ρ – плотности контролируемой жидкой среды. Математическое моделирование показало, что условие выполнимо в том случае, если вводить коррекцию в выходной сигнала чувствительного элемента, измеряющего уровень, относительно показаний уровнемера при минимальной плотности среды, при которой осуществлялась градуировка шкалы уровнемера.

Действительно, если шкала уровнемера проградуирована на жидкой среде с минимально возможной плотностью, то (1) можно записать в виде $P = HS \rho_{\min} g$. Если в процессе измерения уровня плотность среды увеличится и

станет, например, равной ρ_{mak} , а в выходной сигнал поплавкового уровнемера будет введена корректирующая поправка вида $\rho_{\text{min}}/\rho_{\text{mak}}$, то результат измерения уровня будет равен

$$P = HS \rho_{\text{mak}} g \frac{\rho_{\text{min}}}{\rho_{\text{mak}}} = HS \rho_{\text{min}} g = H \cdot k, \text{ где } k = S \rho_{\text{min}} g = \text{const},$$

т.е. при любой плотности контролируемой среды показания поплавкового уровнемера с корректирующим устройством будут пропорциональны только ее уровню – не будут зависеть от плотности среды.

Естественно, что рационально создавать первичный преобразователь уровня, состоящий из двух однотипных элементов, выходные сигналы которых преобразованы так, чтобы их совместный выходной сигнал был пропорционален только уровню контролируемой жидкой среды. Поэтому в процессе дальнейших исследований математически моделировались два выходных сигнала однотипных элементов, при использовании которых плотность среды исключалась полностью. Очевиден вариант исключения плотности среды из результатов измерения поплавкового уровнемера, первичный преобразователь которого выполнен из двух поплавков, выходные сигналы которых представлены в виде отношения

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{H_1 S_1 \rho g}{H_2 S_2 \rho g} = \frac{H_1 S_1}{H_2 S_2}$$

(2)

Из (2) следует, что если при изменении уровня жидкой среды будет изменяться значение соотношения P_1/P_2 , то его значение будет однозначно характеризовать текущее значение уровня. Данное утверждение вытекает из формулы (3)

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{HS\rho g}{(H - \Delta H)S\rho g} = \frac{H}{H - \Delta H} = K_H \quad (3)$$

из которой следует, что чем больше H , тем меньше K_H и наоборот.

Следовательно, первичный преобразователь поплавкового уровнемера должен состоять из двух поплавков разной высоты, одинаковой площади поперечного сечения, погруженных на разную глубину, вследствие чего отношение выходных сигналов будет зависеть только от уровня контролируемой среды. Необходимо при этом отметить, что при наличии такого первичного преобразователя уровнемер, имеет два стационарных чувствительных элемента, и может измерять уровень в широком диапазоне его изменения [4].

Третий вариант исключения методической погрешности, когда первичный преобразователь состоит из двух физически подобных чувствительных элементов, с позиций теории реализуем в том случае, когда

чувствительные элементы полностью реализуют дифференциальный принцип. Когда первичный преобразователь средства измерения при заданном значении измеряемого параметра контролируемой среды имеет нулевой выходной сигнал в результате равенства выходных сигналов чувствительных элементов, включенных встречно, но противоположные по фазе сигналы при отклонении значения параметра среды в противоположных направлениях от заданного значения.

Если чувствительными элементами первичного преобразователя являются, например, плавающие поплавки, то их противодействие проще всего осуществить посредством размещения на противоположных плечах рычага, установленного на оси. Указанному состоянию будет соответствовать равенство

$$(P_1 = H_1 D_1^2 \rho g) = (P_2 = H_2 D_2^2 \rho g), \quad (4)$$

где D_1 и D_2 диаметры первого и второго цилиндрических поплавков, при этом из (4) следует, что равенство определяется конструктивными параметрами и положениями чувствительных элементов в жидкой среде, когда $H_1 D_1^2 = H_2 D_2^2$, т.е. когда поплавки имеют разные высоты и разные диаметры и погружены в жидкую среду так, что при каком-то уровне обеспечивается условие (4). Очевидно при этом, что в данном случае поплавковый уровнемер должен непрерывно отслеживать равновесное состояние своего первичного преобразователя, но в случае создания следящей системы полностью исключается зависимость результатов измерения от плотности контролируемой среды в любом диапазоне измерения[3].

Четвертый вариант предполагает создание первичного преобразователя поплавкового уровнемера, основанного на результатах математического моделирования выходных сигналов его чувствительных элементов, когда указанные элементы, находящиеся в статическом состоянии, позволяют измерять уровень жидкой среды во всем диапазоне его изменения, полностью исключая зависимость результатов измерения от изменения плотности контролируемой среды. По существу в данном случае определялся вариант усовершенствования конструкции поплавкового уровнемера, основанного на зависимости (3), так как указанный вариант исключал из зоны контроля уровень среды ΔH .

В результате моделирования было определено условие

$$(P_1 = HS_1 \rho g) = (P_2 = HS_2 \rho g), \quad (5)$$

из которого следует, что при равенстве глубины погружения H отношение P_1 / P_2 однозначно определяется отношением S_1 / S_2 , вследствие чего выполнение формы поплавков с разной формой позволяет измерять

уровень жидкой среды по значению P_1/P_2 при любом изменении ее плотности и любом диапазоне изменения уровня [5],[6].

Из вариантов, которые были рассмотрены выше, следует, что наличие двух однотипных чувствительных элементов необходимо для того, чтобы в процессе измерения найти способ «уничтожения» влияния сопутствующего параметра (свойства) на результат измерения, что можно первично осуществить посредством использования математического моделирования. В связи с этим возникает вопрос о возможности разработки первичного преобразователя, который обладает способностью самонастройки на измеряемый параметр, исключая в процессе самонастройки зависимость выходного сигнала от значения сопутствующего параметра (свойства).

Если первичным преобразователем является плавающий поплавок, то он в соответствии с законом Архимеда должен копировать уровень жидкой среды при постоянном в нее погружении, которое описывается формулой $H_{\text{пл}} = (P = G) / S \rho g$, где G – вес поплавка, а $H_{\text{пл}}$ - глубина погружения поплавка в жидкую среду. В данном случае уровень жидкой среды в объекте определяется по выбранной на поплавке координате, положение которой зависит, как следует из формулы, от плотности контролируемой среды. Указанную зависимость можно устранить в том случае, если создать поплавок «самонастраивающийся» только на уровень контролируемой среды. Учитывая, что при увеличении плотности среды поплавок всплывает (глубина его погружения в жидкость уменьшается), а при уменьшении плотности глубина его погружения в жидкость увеличивается, то очевидно, что контролируемая координата поплавка при увеличении плотности должна перемещаться вниз, а при уменьшении плотности - подниматься вверх. По существу данный поплавок должен иметь две «степени» свободы, первая из которых однозначно привязана к уровню контролируемой среды, вторая – обеспечивает изменение положения контролируемой координаты поплавка при изменении плотности среды. Такими свойствами обладает поплавок со смещенным центром тяжести, что обеспечивает ему наклон относительно вертикали. Данный поплавок при увеличении плотности жидкой среды «всплывает» и одновременно изменяет угол наклона к горизонту. Указанное позволяет выбрать такие конструктивные параметры поплавка, которые обеспечивают при любом изменении плотности контролируемой среды неизменность расстояния контролируемой координаты поплавка относительно уровня жидкой среды – независимость выходного сигнала поплавка от изменения плотности среды.

В данной работе все иллюстрации математических представлений выходных сигналов привязаны к поплавковым уровнемерам, вернее к первичным преобразователям поплавковых уровнемеров (сигнализаторов и регуляторов). Однако приведенные принципы устранения зависимости результатов измерения от сопутствующих свойств и параметров контролируемых сред (методических их погрешностей) могут быть

использованы при разработке первичных преобразователей любых средств измерения [7].

Авторы использовали полученные результаты при разработке плотномеров, уровнемеров и расходомеров, основанных на различных методах измерения, математические выражения которых «автоматически» вносили методическую погрешность в результаты измерения при изменении конкретного сопутствующего параметра (свойства). Указанные погрешности на первых этапах устранялись путем преобразования математических выражений к виду, когда методическая погрешность исключалась. Затем выбирались средства, позволяющие реализовать модернизированный выходной сигнал первичного преобразователя, что приводило к созданию средства измерения, выходной сигнал которого был связан только с изменением контролируемого параметра.

Выводы.

1. В настоящее время выходной сигнал многих средств измерения (плотномеров, вискозиметров, расходомеров и др.) содержит методическую погрешность, вызываемую зависимостью указанного сигнала от свойства или параметра контролируемой среды функционально связанного с измеряемым свойством или параметром.

2. Методические погрешности могут быть устранены путем конструирования первичных преобразователей средств измерения «дифференциального принципа» - из двух физически однотипных элементов, выходные сигналы которых соединены и преобразованы так, что исключают методическую погрешность из результатов измерения.

3. Выбор способов соединения и последующего преобразования выходных сигналов чувствительных элементов «дифференциальных» преобразователей средств измерения рационально определять методом математического моделирования, используя в качестве исходного материала формулы методов, на основе которых созданы чувствительные элементы.

Список литературы: 1. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств: Учебник для вузов. - 3.- изд. – М.: Машиностроение, 1983. – 427с. 2. Гинзбург И.Б. Автоматическое регулирование и регуляторы в промышленности строительных материалов. Учебник. Изд. 3-е. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1985, 256с. 3. А.с. СССР № 620824 «Чувствительный элемент датчика уровня жидких сред» G01F 23/06, G05D 9/00. Бюл. № 31. 25.08.78. 4. А.с. СССР № 66919 «Уровеньмер» G01 f 23/08. Бюл. № 23. 26.06.79. 5. Патент України на корисну модель № 25364 «Рівнемір для рідини». МПК (2006). G01F 23/14. Бюл № 12, 10.08.2007. 6. Патент України № 18869 «Регулятор рівня рідких середовищ». МПК (2006). G01F 23/14. Бюл. № 11. 15.11.2006. 7. Патент України № 44423 Пристрій для сигналізації швидкості розшарування рідкої і твердої фаз дисперсних середовищ». МПК (2009). G01F 23/00. Бюл.№ 19. 12.10.2009

Поступила в редколлегию 20.09.2010

***Е.В.МИРОНЕНКО**, д-р техн. наук, профессор ДГМА, Краматорск;
В.С.ГУЗЕНКО, канд. техн. наук, доцент ДГМА, Краматорск;
Л.В.ВАСИЛЬЕВА, ст.преподаватель ДГМА, Краматорск;
О.Е.МИРОНЕНКО, нач. бюро инстр. отдела ОАО «НКМЗ».*

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ НА ТЯЖЕЛЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С УЧЕТОМ ЭНЕРГОЗАТРАТ

Results of research of influencing the modes of cutting on the expenditures of energy. Choice of the modes of cutting from point of minimization of expenditures.

У статті наведені результати дослідження впливу режимів різання токарної обробки на енерговитрати і їх вибір з точки зору мінімізації цих витрат.

Достижение экономически оправданной эффективности использования энергетических ресурсов при существующем уровне развития техники и технологий и соблюдения требований к охране окружающей среды в настоящее время рассматривается как долгосрочная программа действий [1]. Использование перспективных принципиально новых технологий позволяет достичь существенного эффекта снижения энергоёмкости технологических процессов, но требует значительных капитальных вложений и не приводит к быстрой окупаемости. Анализ показывает, что значительное снижение удельного расхода электроэнергии наблюдается при создании энергосберегающих технологий путём установления такого уровня некоторых параметров технологического процесса, связанных с режимом электропотребления, которые обеспечивают минимум электроэнергии при сохранении объёма выпускаемой продукции.

Вопросы энергосбережения по-разному рассматриваются в современных исследованиях. В [2] приводятся причины существующей проблемы, заключающиеся в большой степени в наследственной базе машиностроения, а в [3] предлагается разработанный ряд программ и предложений по энергосбережению. Проблема увеличения удельного расхода энергии при переходе от черновой токарной обработки к чистовым операциям рассматривается в работе [4]. В качестве решения предлагается создание процессов резания инструментами, которые были бы альтернативой процессу шлифования. Проблемы потребления электроэнергии в машиностроительной отрасли анализируются в [5]. В этой монографии рассматривается вопрос диверсификации использования источников энергии в масштабах одного предприятия и производственной группы. Отдельно исследуется потребление энергии отдельным процессом в смысле как объема, так и потребляемой мощности с распределением по стадиям технологического процесса.

В указанных работах рассматриваются общие вопросы энергосбережения без анализа энергопотребления единичного

технологического процесса, в основном включающего в себя потребление оборудования, оснастки и инструмента.

Целью данной статьи является исследование влияния режимов токарной обработки на энергозатраты и их оптимальный выбор с точки зрения минимизации этих затрат.

Для оптимизации сложных технических систем необходимо решать задачи многокритериальной оптимизации, которые характеризуются такими особенностями, как: высокая размерность вектора альтернатив и сложная структура множества допустимых альтернатив; большое количество и нелинейность функций-ограничений; большая размерность критериальной вектор-функции и сложная топология критериев оптимальности, ее составляющих; большой объем вычислений. Все это требует использования специальных программных комплексов. В настоящее время выбор таких программ достаточно разнообразен.

Система принятия многокритериальных решений Web-HIPRE [6], основанная на методах Multiattribute Value Theory и Analytic Hierarchical Processes, является доступной для использования в глобальной сети. Система NIMBUS [7] учитывает в своей работе выбор лица, принимающего решения, а система Easy-Opt [8] представляет собой интерактивную программу, использующую метод скалярной свертки критериев оптимальности. Разработанная в МГТУ им. Н.Баумана система МКО Парето [9] ориентирована на использование как в последовательном, так и параллельном вариантах.

В данной работе использовалась интеллектуальная оптимизационная система «МКО-ТСЧ» [10], предназначенная для решения многокритериальных нелинейных оптимизационных задач вида

$$\begin{aligned} \min f(x), \\ g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \\ a \leq x \leq b \end{aligned} \quad (1)$$

где f, g, h - непрерывные (f и g - выпуклые) вектор-функции, $x \in R^n$, а и b ($a < b$) – фиксированные вектора из R^n .

Метод многокритериальной оптимизации сводит задачу (1) к последовательности более простых задач нелинейного программирования с одной целевой функцией ψ :

$$\begin{aligned} \min \psi_p (f^0(x), f^1(x), \dots, f^m(x)), p = 1, 2, \dots \\ g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \\ a \leq x \leq b \end{aligned} \quad (2)$$

В свою очередь, метод нелинейного программирования сводит задачу (2) к последовательности задач безусловной минимизации без функциональных ограничений:

$$\begin{aligned} \min M_k (f(x), g(x), h(x)), k = 1, 2, \dots \\ a \leq x \leq b \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, система «МКО-ТСЧ» является иерархической структурой и состоит из трех слоев:

- набора методов многокритериальной оптимизации;
- набора методов нелинейного программирования;
- набора методов безусловной минимизации.

Эта система позволяет работать с достаточно большим набором нелинейных функций с нелинейными ограничениями и была многократно проверена при расчетах оптимальных режимов работы процессов механообработки [11].

В работе исследовалось влияние режимов резания на энергозатраты в случае чернового наружного точения конструкционной стали резцами с пластиной твердого сплава на станке с $D_c = 1000$ мм (задаваемые глубины резания $t=4-8$ мм; диапазон подач $s=0,75 - 1,3$ мм/об, диапазон скоростей резания $v=50-150$ м/мин), а также процесс черновой обработки на тяжелых станках резцами оснащенными специальными твердосплавными пластинами с износостойким покрытием GC 4025.

Для реализации поставленных задач предлагаются следующие этапы:

- исследование технологических параметров, определяющих режим электропотребления и допускающих изменение в заданных пределах;
- построение математических оптимизационных моделей исследуемого объекта;
- нахождение оптимальных значений при ограничениях, накладываемых на технологические параметры.

Такой подход к указанной проблеме не требует значительных капиталовложений и его можно использовать как эффективный способ совершенствования технологии с точки зрения энергосбережения.

Выявить влияние параметров технологического процесса на электропотребление возможно с помощью построения системы критериев оптимальности. При этом в первую очередь выбирают наиболее существенные управляемые факторы, формирующие многокритериальную математическую модель. Она должна иметь реальный смысл, наиболее полно отражать некоторую математическую конструкцию, адекватную исследуемому объекту по принятым критериям, быть ориентированной на использование определенных математических методов, быть удобным инструментом для управления процессом. Такая модель будет моделью принятия эффективных решений.

При изучении вопроса выбора оптимальных режимов резания при токарной обработке на тяжелых токарных станках учитывалось, что функция

мощности резания (N , кВт) не может быть единственным критерием оптимальности с точки зрения экономии энергоресурсов. Обязательно необходимо учесть значения основного (t_o , мин) и вспомогательного (t_b , мин) времени, так как на тяжелых станках во время смены инструмента станок продолжает потреблять энергию. Эти две функции, в зависимости от цели оптимизационного расчета, могут выступать в качестве как целевых функций, так и функциональных нелинейных ограничений. Важными критериями оптимизации в рассматриваемом случае являются функция расхода инструмента (R_u , шт) и функция затрат (A , д.е.), а также производительность труда ($t_{шт}$) и расход твердого сплава (R_c) [12]. Анализ показывает целесообразность включения в математические модели следующего набора управляемых в определенном диапазоне факторов: скорость резания (v , м/мин), подача (s , мм/об), глубина резания (t , мм), размеры твердосплавной пластины (h, l , мм). Необходимые целевые функции, оптимизируемые при определенных ограничениях, накладываемых на управляемые переменные, строятся с использованием статистических данных. Пределы, в которых изменяются принятые переменные, представляют собой ограничения и определяются на основе статистических данных за рассматриваемый период.

Вначале анализировалась функция мощности резания (N , кВт). Так как модель $N = N(t, s, v)$ является нелинейной функцией нескольких переменных, то для предварительного предположения о наличии точки экстремума можно рассмотреть линии уровня – проекции сечения исследуемой поверхности плоскостями $N = \text{const}$ (рис.1).

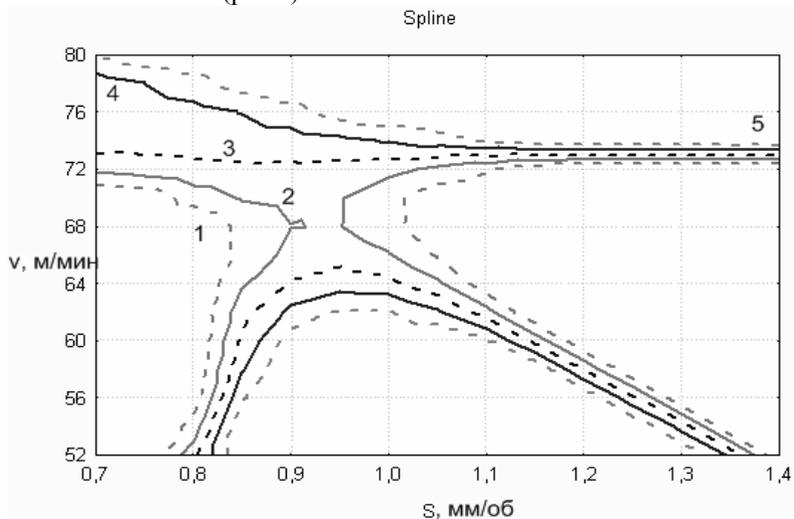


Рис. 1 – Линии уровня функции мощности резания для переменных: скорость резания (v , м/мин) и подача (s , мм/об):

1 - N=8,3 кВт, 2 - N=10,7 кВт, 3 - N=13,0 кВт, 4 - N=15,3 кВт, 5 - N=17,7 кВт

Анализ приведенных графиков показывает, что в рассматриваемом диапазоне значений переменных возможно нахождение локальных минимумов. Указанные графики можно использовать как номограммы для назначения режимов резания при заданном значении мощности резания.

Известно, что значения целевых функций и управляемых переменных в многокритериальных задачах оптимизации при различных безусловных минимумах могут значительно различаться. Особенно это заметно при сравнении «противоречивых» критериев, для которых отношения значения первого при минимуме второго к абсолютному минимуму первого будет максимальным.

В данной работе в качестве таких критериев рассматривались следующие целевые функции: штучное время (как величина, обратная производительности труда) и мощность резания. Так как обе рассматриваемые целевые функции нелинейны, то для нахождения оптимального плана задачи использовался квазиньютоновский метод оптимизации с использованием квадратичной экстраполяции вдоль касательного вектора в каждом одномерном поиске, задаваемая относительная погрешность – 0,000001. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения показателей частных минимумов целевых функций

№ точки	s, мм/об	v, м/мин	N, кВт	t _{шт} , мин	$\frac{N(t_{шт}, \text{мин})}{N \text{ min}}$	$\frac{t_{шт}(N \text{ min})}{t_{шт} \text{ min}}$	s, %	v, %
Глубина резания t=4 мм								
1	0,9	135	11,4	64,6	2,6%	3,31%	5,3%	2,1%
	0,95	132,2	11,7	62,53				
2	0,75	145	10,6	72,1	10,4%	15,30%	21,1%	9,7%
	0,95	132,2	11,7	62,53				
3	1,00	129,5	11,9	60,6	8,4%	11,40%	16,7%	7,6%
	1,2	120,4	12,9	54,4				
4	1,1	124,6	12,4	57,3	7,3%	10,62%	15,4%	6,9%
	1,3	116,6	13,3	51,8				
Глубина резания t=8 мм								
1	0,75	130,4	19,8	80,2	5,6%	7,8%	11,8%	5,1%
	0,85	124,1	20,9	74,4				
2	0,9	121,3	21,4	71,9	1,9%	3,3%	5,3%	2,2%
	0,95	118,7	21,8	69,6				
3	1,00	116,3	22,3	67,5	7,6%	11,6%	16,7%	7,6%

	1,2	108,1	24,0	60,5				
4	1,1	111,9	23,2	63,8	6,9%	10,6%	15,4%	6,9%

Было рассмотрено, как меняются переменные и критерии при переходе от минимума одного критерия к минимуму другого. Критерии рассматривались в порядке снижения производительности труда, а для графического представления материала в качестве аргумента был выбран критерий мощности резания (N , кВт). Можно видеть (табл.1), что увеличение значения штучного времени на 3..15% приводит к уменьшению мощности резания на 3..10%. Из рассматриваемых переменных наиболее сильно влияет на значение целевых функций подача, которая при указанном уменьшении мощности может уменьшаться до 21%. Изменение скорости резания также является однонаправленным и лежит в пределах 2..10%. Одновременное увеличение обоих параметров положительно влияет на величину штучного времени, уменьшая его, и отрицательно – на величину мощности резания.

Нанеся на кривую Парето точки безусловных минимумов критериев $t_{шт}$ и N (рис.2), получаем возможность, двигаясь вдоль этой кривой, выбрать режим резания, более точно соответствующий текущим требованиям производства.

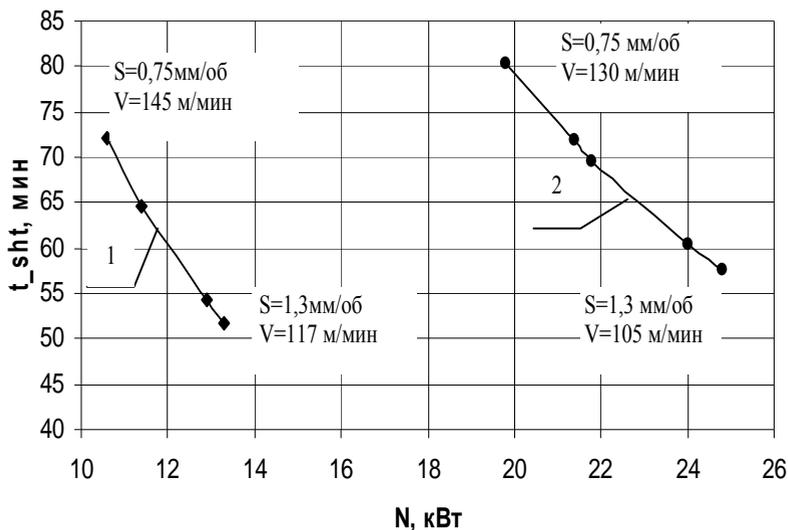


Рис. 2 – Кривая Парето для функций штучного времени $t_{шт}$ и мощности резания N : 1 - $t=4$ мм, 2 - $t=8$ мм

Можно видеть, что при повышении производительности труда значение подачи возрастает в рассматриваемом диапазоне от наименьшего к наибольшему для различных глубин резания ($t=4$ мм и $t=8$ мм). При уменьшении значения мощности резания, очевидно, возрастает скорость резания: от 117 м/мин до 145 м/мин при $t=4$ мм и 105-130 м/мин при $t=8$ мм.

Следующим этапом работы был анализ процесса черновой обработки на тяжелых токарных станках, при котором режущая часть инструмента подвергается сложным воздействиям механических и тепловых нагрузок. Традиционно считалось, что при снятии больших сечений среза необходимо повышать подачу при одновременном уменьшении скорости резания.

Анализировались статистические данные наблюдений за процессом обработки при черновом точении на тяжелых токарных станках резцами со специальными твердосплавными пластинами, на которые нанесено износостойкое покрытие GC 4025, состоящее из слоя Al_2O_3 , $Ni(CN)$, и износостойкого слоя TiN . Общая толщина покрытия составляет 12 мкм. Основа сплава имеет высокую твердость с повышенным содержанием кобальта, что увеличивает нагрузочную прочность режущей кромки. При обработке конструкционных сталей глубина резания составляла $t=15-35$ мм, а подача $s=0,7-1,8$ мм/об.

Анализ показал, что в определенной области подач и скоростей резания зависимости $N(s,v)$ имеют изгибы (рис.3), что указывает на нелинейное влияние значений режимов на мощность резания.

Проведенный на основании этих данных расчет рекомендуемых режимов резания с точки зрения минимума энергозатрат (табл.2) подтвердил эффективность применения многогранных пластин с многослойными покрытиями при черновой обработке на тяжелых станках за счет увеличения скорости резания и незначительном уменьшении подачи.

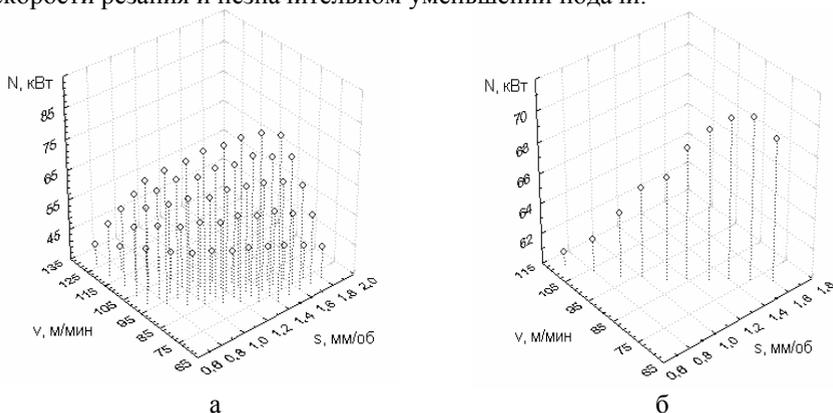


Рис. 3 – Зависимость значения мощности резания от подачи (s , мм/об) и скорости резания (v , м/мин)

а – глубина резания $t=15-35$ мм; б – глубина резания $t=25$ мм

Таблица 2

Выбор режимов резания для черногого точения валковых сталей на тяжелых токарных станках (глубина резания $t=25$ мм)

Подача (s , мм/об)	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Скорость резания (v , м/мин)	111	104	98	94	89	86	82	79	75	71
Мощность резания (N , кВт)	60,8	62,1	64,2	65,9	66,8	68,6	69,8	70,5	70,6	69,3

Представляет интерес вопрос возможного варьирования значений указанных режимов резания при условии неизменности значения мощности резания. Для этого для функции $N(t,s,v)$ использовался расчет норм замещения факторов:

$$h_{ij} = -\frac{a_j}{a_i} \frac{\bar{X}_i}{X_j} \quad (i, j = 1, 2, 3).$$

Для рассматриваемого частного случая ($N = 0,02ts^{0,7}v^{1,04}$ при $t=25$ мм) эти нормы составляют:

$$\begin{aligned} h_{ts} &= -15,2, \quad h_{st} = -0,07, \\ h_{tv} &= -0,29, \quad h_{vt} = -3,42, \\ h_{sv} &= -0,02, \quad h_{vs} = -52,03. \end{aligned}$$

Вычисленные нормы замещения показывают что варьирование значений режимов возможно в паре $t-v$: при увеличении глубины резания на 1 мм скорость можно уменьшить на 0,29 м/мин для сохранения значения мощности.

Выводы. Для формирования энергосберегающих технологий на предприятиях первоначально необходимо исследование технологических факторов, которые определяют электропотребление, и, на этой основе, построение оптимизационных моделей энергоэффективности объекта управления. Реализация такого подхода требует не одного, а нескольких критериев, влияющих на эффективность работы. Выделены наиболее существенные из них – приведенные затраты (A), производительность труда ($t_{шт}$), расход твердого сплава (R_c), мощность резания (N).

Включение в систему целевых функций для МКО функции мощности резания позволяет выявить оптимальные режимы процесса механообработки, минимизирующие в определенных пределах энергозатраты. Показано, что при глубине резания $t=4$ мм, для уменьшения мощности резания на 10% подача должна быть уменьшена на 21%, а скорость резания увеличена на

10% (при $t=8$ мм соответствующие значения составят 7,6%; 16,7%; 7,6%). Это указывает на целесообразность использования твердосплавных пластин с покрытиями, которые позволяют работать с меньшей подачей и большей скорости резания.

Построены кривые Парето, которые позволяют выбрать «компромиссные» режимы резания, отличные от режимов при абсолютных минимумах рассматриваемых критериев.

Проведенные исследования показали эффективность применения многогранных пластин с многослойными покрытиями при черновой обработке на тяжелых станках за счет увеличения скорости резания и незначительном уменьшении подачи. Применение специальных пластин из сплава GC 4025 позволяет увеличить скорость резания в 1,5 раза при стойкости 60...120 мин.

Список литературы: 1. *Ковалко М. П.* Энергобережения – досвід, проблеми, перспективи – К.: Ін-т електродинаміки НАНУ, 1997. – 152 с. 2. *Соловцев С. С.* Приоритетные направления совершенствования производства точных коротких заготовок из сортового проката// Кузнечно-штамповочное производство. – М.: Машиностроение, 1990. -№7. –С.8-11. 3. *Бойко Ю. В.* На Украине возможен экономический прорыв// Киевский телеграф. 2006. -№5(299) –С.3. 4. *Мрочек Ж. А., Шатуров Г. Ф.* и др. Снижение энергоемкости процессов металлообработки при использовании ресурсосберегающих технологий. // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии. Тез. докл. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Под ред. А. И. Свириденка, В. А. Бородули. – Гродно: ГрГУ, 2005. С.20-21. 5. Энергосбережение в металлообработке: монография/ *В. С. Гузенко, А. В. Маковецкий* и др. – Краматорск: ДГМА, 2007. - 264с. 6. <http://www.hipre.hut.fi/> 7. <http://nimbus.mit.jyu.fi/> 8. *Schittkowski K.* EASY-OPT: An interactive optimization system with automatic differentiation - User's guide, Report, Department of Mathematics, University of Bayreuth, D-95440Bayreuth. 9. *Карпенко А. П., Мухлисуллина Д. Т.* Информационная модель и основные функции программной системы многокритериальной оптимизации «Парето»// <http://technomag.edu.ru/doc/90282.html> 10. *Краснокутская Л. В., Хаेत Г. Л.* Принятие решений при многокритериальной оптимизации// Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем. Сб. статей. Вып.6.-Краматорск:ДГМА, 1996.-С.92-109. 11. Теория проектирования инструмента и его информационное обеспечение: маркетинг, квалиметрия, надежность и оптимизация// *Г. Л. Хаेत, В. С. Гузенко* и др.: Под общ. ред. Г.Л.Хаета. -Краматорск:ДГМА, 1994. - 370 с. 12. *Мироненко Е. В., Васильева Л. В.* К определению весомости критериев при оптимизации выбора режущего инструмента и режимов резания// Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. –Краматорськ: ДДМА, вип. 16, 2004. – с.159-165.

Поступила в редколлегию 08.09.10г.

О.О.ВОЛКОВ асп., НТУ«ХП»;
Г.Г.КУЛИК, канд. техн. наук, доц. НТУ«ХП»;
М.А.ПОГРІБНИЙ, канд. техн. наук, проф., НТУ«ХП»;
Ю.А.СИЗИЙ, д-р. техн. наук, проф., НТУ«ХП», Харків

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЛІ ТЕПЛОВИХ ЯВИЩ У ФОРМУВАННІ СТРУКТУР ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ РІЗНИХ МАРОК ПРИ ЗМІЦНЕННІ МЕТОДОМ ТФО

В статті описані методика та результати досліджень впливу тепла при термофрикційній обробці (ТФО) на структуру та властивості сталей різних марок після загартування. Представлено графіки розподілу мікротвердості по перерізу зразків, фотографії мікроструктур після ТФО. Показано графіки температурних полів на ділянці поверхні, яка є прилеглою до кромки. Зроблені висновки.

The article deals with investigations methods and results of thermofriction process (TFP) heat influence on structure and properties of different steels after preliminary hardening. The sample cross-section hardness distribution graphics and microstructural photos after TFP are presented. The graphics of temperature fields description on the section nearby of the edge in the strengthening are shown. The conclusions are made.

Однією з найважливіших задач для сучасного машинобудування є введення прогресивних методів обробки, які дозволяють створювати в матеріалах підвищені характеристики міцності.

Метод термофрикційної обробки (ТФО), який може використовуватися в якості методу зміцнення є достатньо ефективним засобом підвищення поверхневої твердості та зносостійкості деталей із вуглецевих, легованих, конструкційних, інструментальних та інших сталей, чавунів а також інших сплавів. Зміцнення тонкого поверхневого шару є прогресивним напрямом в машинобудуванні та інструментальному виробництві, оскільки дозволяє заощаджувати дорогі леговані сталі, підвищує ресурс і надійність механізмів, знижує енерговитрати виробництва.

На даний момент, чітко не обґрунтовано механізм та особливості формування поверхневого шару металу в умовах ТФО, його головних характеристик, що і обумовлює актуальність їх дослідження, пояснення та розробки технологічних основ керування зміцненням поверхні.

Процес підвищення якості поверхні обертаючим диском досліджували багато вчених. Використання тертя до зміцнення поверхонь описував І. В. Крагельський. Н. В. Монін запропонував виготовити обертаючий диск з твердого сплаву. При обертанні диска утворювалась теплота, котра розплавляла поверхню та забезпечувала високу чистоту [1].

В.В. Міхєєву та Н.Н. Сухаріної видано авторське свідоцтво на спосіб поверхневого зміцнення металевих виробів, при якому використовується тертя між пружною поверхнею та колодками. Оброблений шар характеризується великою твердістю при малій глибині [2].

А. І. Ісаєву видано авторське свідоцтво на спосіб поверхневої термічної обробки сталі, у якому зміцнення відбувається за рахунок тертя при механічній обробці різцями з низьким коефіцієнтом теплопровідності [3].

У основі поверхневої міцності лежить універсальне явище структурного пристосування матеріалів при терті, котре відбувається шляхом максимального зміцнення. В дослідженнях, проведених на звичайних швидкостях ковзання, показано, що швидкість ковзання та навантаження при ковзанні чинять на температурний режим тертя значний вплив. При цьому мікротвердість поверхневих шарів значно зростає з ростом тиску та швидкості. Механізм збільшення твердості пояснюється характером деформаційних змін кристалічної решітки.

Гурей І.В з співавторами, вивчаючи структуру слою, прилягаючої до поверхні тертя, відмічає належність мартенситу, залишкового аустеніту та легованого цементиту. Значне підвищення мікротвердості пояснюється тим, що у поверхневому шарі у процесі тертя появляється насичення вуглецем за рахунок цементиту внутрішніх шарів зразка та дифузії вуглецю з контртіла. Розвиваюча температура та пластична деформація сприяє утворенню аустеніту, котрий при швидкому охолодженні переходить у мартенсит. [4]

Ю. І. Бабей спостерігав зміни хімічного складу поверхневих шарів при фрикційно-зміцнюючій обробці та відмітив, що у білому шарі збільшується вміст вуглецю за рахунок переміщення його із деталей до поверхні. Автор відмічає, що зважаючи на особливі умови, що впливають на поверхню елементів, це явище не можна пояснити звичайними дифузійними процесами у зв'язку з тим, що час впливу високих температур та тиску на ділянку поверхні дуже малий. При фрикційно-зміцнюючій обробці він перевищує $6 \cdot 10^{-3} / 10^{-2}$ с. На ряду зі збільшенням вмісту у поверхневому шарі вуглецю збільшується і вміст таких елементів, як: Cr, Mn, Cu, Si. Без змін залишаються W, Mo, V, а кількість Ni зменшується.

На думку Б. А. Костецького, основним вмістом зовнішнього тертя є пружно-пластична деформація, яка обумовлює у повній мірі формування основних характеристик взаємодії поверхні та появу ряду вторинних явлень у зоні контакту, що розкрито недостатньо. [5]

За даними Ю. І. Бабєя при термозміцнюючій обробці, коли механічна енергія перетворюється у теплову, спостерігаються високі швидкості нагрівання та охолодження за рахунок відводу теплоти у метал і зовнішнє середовище, які вищі ніж при термічній обробці.

Товщина білого шару залежить від швидкості переміщення столу V_{cm} . При невеликих швидкостях переміщення ($V_{cm} < 2$ м/хв) відбувається нагрівання поверхневих шарів металу в зоні їх контакту до температури плавлення, що приводить до зменшення границі твердості матеріалу, а отже, частина зміцненого шару знімається і його товщина зменшується.

Таким чином проведений аналіз літератури показав, що фрикційне зміцнення є ефективним методом підвищення довговічності деталей машин, елементів конструкцій та інструменту. В той же час питання, пов'язані з

природою та особливостями зміцнення поверхні та формування зміцнених поверхневих білих шарів залишаються до кінця не вивченими, тому метою проведеної роботи було дослідження теплового впливу при ТФО на структури та властивості сталей, тобто встановлення зв'язку між температурою нагрівання, швидкістю охолодження, деформацією, структуроутворенням та властивостями при одночасному комплексному дослідженні цих факторів. Для цього вирішувалися такі задачі:

1. Проведення оцінки глибини розповсюдження тепла в зразки із сталей з різним хімічним складом та вмістом вуглецю за допомогою аналізу ізотерми на олов'яному покритті кожного зразка, яка виникає при ТФО;

2. Проведення розрахунку та побудування графіків температурних полів, які виникають в зразках при ТФО;

3. Проведення розрахунку швидкості охолодження поверхні після нагрівання при ТФО;

4. Проведення порівняння мікроструктури та мікротвердості зміцненого білого шару та його глибини після ТФО в усіх зразках;

5. Проведення сумісного аналізу температурних явищ та змін мікроструктури та мікротвердості по перерізу зразків під впливом ТФО;

6. Проведення порівняння ефективності термічного зміцнення сталей та термофрикційного зміцнення сталей.

Узагальнена оцінка результатів досліджень.

Як відомо, згідно з попередніми дослідженнями [6] в процесі контакту інструмента та заготовки має місце розігрівання поверхневого шару заготовки, внаслідок чого відбуваються фазові та структурні перетворення. Розігрівання поверхні залежить від інтенсивності теплового потоку в заготовку, який ініціюється силами тертя, що виникають між інструментом та заготовкою при ТФО. Окрім того при ТФО металу можуть мати місце два механізми розподілення теплового потоку [7,8]:

- 1) з рівномірною розподіленою інтенсивністю теплового потоку по поверхні зразка;

- 2) з розподіленням інтенсивності теплового потоку по трикутнику.

Однак, ми вважаємо, з посиланням на літературу [7, 8] що в умовах даного експерименту інтенсивність теплового потоку в зразок має розподілення по поверхні напівпросторі з рівномірною інтенсивністю теплового потоку. Для аналізу розподілення температури від поверхні вглиб зразків із сталей з різним ступенем легованості та різним вмістом вуглецю при ТФО вирішувалася задача теплопровідності. Так для зразків із сталей марок 15X11MФ, 65Г, У8А, Х12М при вирішенні задач теплопровідності були отримані температурні поля (рис. 1). Температурне поле представлено у вигляді ізоTERM в координатах $y(x)$ де координата y направлена перпендикулярно до поверхні, що оброблюється, а координата x є паралельною до напрямку подачі. Таким чином, температурні поля показані в граничній площині перерізу пластини зразка. Оскільки задача теплопровідності вирішена в системі координат, яка рухається разом з

тепловим джерелом, тобто з поверхнею контакту, координата x являє собою відстань від переднього фронту джерела тепла. Таким чином, якщо величину координати x поділити на швидкість подачі S ($\tau = \frac{x}{S}$), то результатом буде

час, за який пройшло поле над точкою поверхні переднього фронту джерела тепла. Окрім того отримані температурні поля дозволили визначити максимальну температуру нагрівання зразків на відстані y від поверхні. При цьому значення величини y може варіюватися від 0 до будь-якої глибини в межах температурного поля та з будь-яким шагом вимірювання за наявності даних про температуру нагрівання поверхневого шару на різній глибині та про час за який було реалізовано нагрівання та охолодження точки поверхневого шару і відповідно його ділянки можна визначити природу зміцнення, а саме чи є вона термічною. А з урахуванням того, що остання ізотерма згідно з умовами даного експерименту відповідає 100°C , що для сталей є нижчим за температури перетворень можна достатньо чітко визначити можливість та границю того чи іншого перетворення в сталях та глибину її розповсюдження в процесі ТФО.

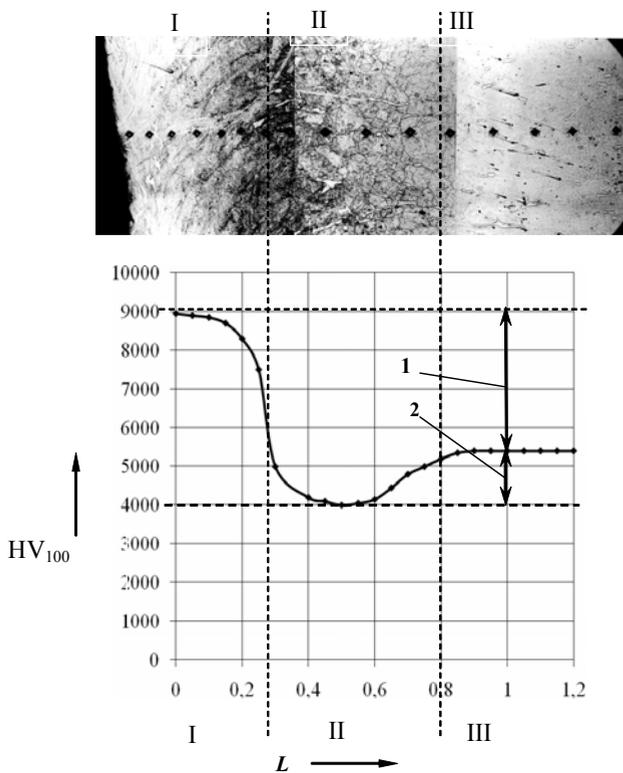
Розглянемо зразки. Як видно з рис. 1, в зразку із сталі 15X11МФ в попередньому стані після загартування та низькотемпературного відпуску при зміцненні ТФО, наприклад, на глибині $y = 0.35$ мм максимальна температура дорівнює 900°C . Це ізотерма, екстремуму якої дотикає горизонтальна лінія, яка проведена на глибині $y = 0.35$ мм.

Критична точка A_{C3} для сталі 15X11МФ дорівнює 880°C . Таким чином усі шари металу які в процесі ТФО будуть нагріватися до цієї температури та вище, тобто гарантовано до глибини $0,35$ мм від поверхні при наступному охолодженні зі швидкістю більш критичної будуть зазнавати загартування.

З використанням даних з графіків температурного поля сталі, що досліджується (див. рис. 1) можна визначити температуру нагрівання поверхні в процесі ТФО а для оцінки та аналізу термічного циклу нагрівання – охолодження побудувати графік нагрівання – охолодження при ТФО сталі що досліджуються. Даний графік наведений на рис. 2.

За допомогою даних з цього графіка (рис. 1) стає можливим розрахунок реальної швидкості охолодження в поверхневому шарі зразку після ТФО, знання яких потрібно для того, щоб порівняти їх з критичною швидкістю загартування для кожної сталі з тих що досліджуються. Час початку охолодження металу на максимальній глибині проходження критичної температури в момент спостереження за температурним полем від початку дії джерела тепла розраховується по формулі:

$$\tau = \frac{x}{S} \cdot \quad (1)$$



1 – інтенсивність зміцнення; 2 – інтенсивність знеміцнення;
 I – зона зміцнення; II – перехідна зона; III – зона основного металу

Рис. 1 – Графік температурного поля, мікроструктура та мікротвердість зразка із сталі 15X11МФ після ТФО

Час початку охолодження металу на деякій глибині від температури 150°C (температура рекристалізації олова) в момент спостереження за

температурним полем від початку дії джерела тепла розраховується аналогічним образом.

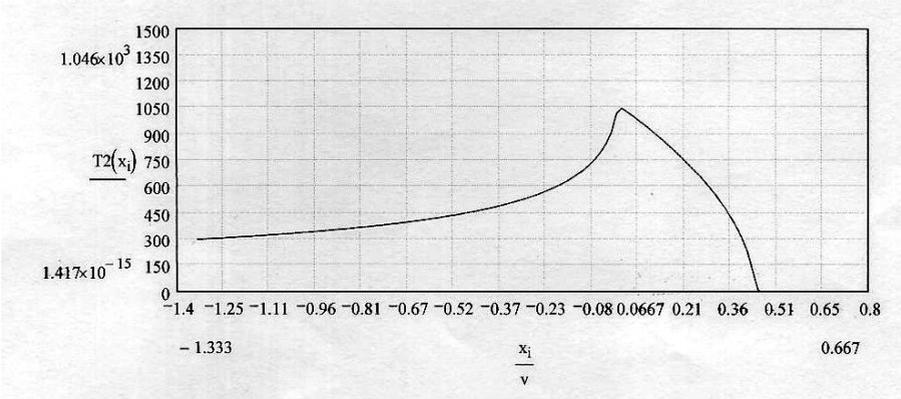


Рис. 2 – Графік нагрівання – охолодження зразка із сталі 15X11МФу вихідному стані після загартуваннята низького відпускупісля ТФО по режиму S = 30 мм/с і t = 0,7 мм

З використанням даних по часу охолодження розігрітого в процесі ТФО металу можна розрахувати швидкість охолодження металу:

$$V_{охол} = \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \tag{2}$$

Розраховані таким чином температури нагрівання поверхні та швидкості охолодження металу в поверхневих шарах усіх зразків представлені в табл. 1.

При візуальному аналізі мікроструктур даних сталей на предмет ефективності зміцнення при ТФО видно, що максимуму вона досягає в сталях 65Г та У8А, де зміцнений шар має максимальні показники твердості близько 8 000 МПа та 16 000 МПа відповідно та глибини зміцненого шару до 0,7 мм. При цьому рівень нагрівання поверхневого шару в процесі ТФО здійснювався до температури, яка нижча ніж Ас1. Для даних сталей вона дорівнює близько 560°С і 650°С відповідно. Температура поверхневого розігрівання сталі Х12М дещо вища – 670°С. Щодо сталі 15Х11МФ то розігрівання її поверхні при зміцненні ТФО досягає 1050°С у співвідношенні з мінімальною ефективністю зміцнення. Таким чином максимальна інтенсивність зміцнення досягається в сталях 65Г та У8А що дорівнює до 200 та 150%. В сталі Х12М вона складає до 100%, а найменшою є в сталі 15Х11МФ близько 80 %.

Таблиця 1 – Температури на поверхні зразків при зміцненні ТФО та швидкості охолодження для сталей 15X11МФ, 65Г, У8А, Х12М

Марка сталі	Режим ТФО		Температура на поверхні зразків, °С	Реальна $V_{\text{охол}}$ металу зразків після ТФО, град/сек
	S , мм/с	t , мм		
15X11МФ	30	0,7	1050	260
65Г			560	680
У8А			650	690
Х12М			670	720

Так, сумісний аналіз усіх отриманих у перебігу дослідження результатів показав, що максимальний рівень зміцнення та глибина зміцненого шару отриманий в сталі 65Г, де температура нагрівання при ТФО є мінімальною з трьох розглянутих випадків та дорівнює 560 і 650 °С відповідно. Мінімальний рівень зміцнення та глибина зміцненого шару досягнуті в сталі 15X11МФ де спостерігалось максимальне розігрівання поверхні до 1050 °С. Сталь Х12М по аналогічним показникам знаходиться на рівні між останніми сталями. Щодо швидкостей охолодження поверхневих шарів після нагрівання при ТФО, то вони достатньо високі та є вищі за критичні для кожної сталі з тих які досліджувалися. Тому можна припустити, що максимальна ефективність зміцнення досягається в сталях за умови виконання таких факторів:

1. Достатній вміст вуглецю в сталі, що зміцнюється;
2. Розігрівання попередньо загартованої сталі при ТФО до температур близьких до A_{c1} , але не перевищуючих її;
3. При розігріванні до температур вище критичних охолодження зі швидкістю більше критичних.

Тому достатньо ефективне зміцнення сталей 65Г може бути пояснено тим, що при даних умовах розігрівання при ТФО мартенсит відпуску, який отриманий попередньо термічною обробкою (загартування та низькотемпературний відпуск) не переходить у аустенітний стан та не розпадається з утворенням структури сорбіту відпуску, в силу швидкості проходження процесу ТФО. Однак в короткочасно-розігрітому стані має місце деформування даної структури, що може дещо змінювати форму та розміри мартенситного зерна, і як результат властивості структури.

Окрім того максимальна інтенсивність зміцнення сталі 65Г пояснюється ще й максимальною реалізацією термічної складової зміцнення, оскільки при вмісті вуглецю 0,6-0,65 % формується структура мартенситу з найбільшою твердістю. Подальше збільшення його вмісту знижує твердість за рахунок появи структури залишкового аустеніту. Так якщо вміст вуглецю невеликий,

то структура мартенситу не набуває максимальної твердості як у випадку із сталлю 15X11МФ, в той час як при високому вмісті вуглецю більш ніж 0,6 %, що характерно для сталі Х12М, твердість знижується, у зв'язку з появою структури залишкового аустеніту та зміцнення більшою мірою викликане деформаційною складовою. Щодо сталей У8А а особливо 65Г де вміст вуглецю наближений до позначки 0,6-0,65 % більшою мірою реалізується термічна складова зміцнення, тобто мартенситна структура набуває максимальної твердості, а це у співвідношенні з деформаційною складовою зміцнення і пояснює найбільшу ефективність зміцнення в даних сталях. Щодо достатнього вмісту вуглецю в сталі ми вважаємо, на основі проведених експериментальних досліджень, що для ефективного зміцнення за допомогою термічної складової його кількість повинна бути не менше ніж 0,2 % для вуглецевих, та 0,15 % для легованих сталей при зміцненні шляхом ТФО.

Список літератури: 1. *Крагельський І. В., Моні Н. В.* Вплив технологічних середовищ та матеріалу інструменту на параметри фрикційного зміцнення // *Машиновидавництво*. – 1998. – № 11. – С. 30–34. 2. *Міхєєв В. В., Сухаріна Н. Н.* Вплив імпульсного зміцнення на зносостійкість сталей при різних видах тертя // 4-й міжнародний симпозиум українських механіків у Львові. Тези доповідей. – Львів. – 1999. – С. 136–137. 3. *Ісаєв А. І.* Вплив фрикційного зміцнення на зносостійкість сталі 40Х у потоці абразивних частинок // *Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”*. *Машинобудування*. – 1999. – Вип. 37. – С. 113–117. 4. *Гурей Й. В., Гурей Т. А., Пашечко М. І.* Вплив фрикційного зміцнення на величину залишкових напружень // *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. – 2000. – Вип. 29. – С. 24–29. 5. *Костецький Б. А.* Облік пластичної деформації при високошвидкісній механічній обробці поверхонь заготівель. “Київський політехнічний інститут”. *Машинобудування*. – 1999. – Вип. 37. – С. 113–117. 6. *Сизій Ю.А., Погрібний М.А., Волков О.О.* Температурне поле на кромці поверхні яка зміцнюється тертям // *Вісник ХДТУ Сільського господарства*. – Харків: – 2002. 7. *Сизій Ю.А.* Теоретические основы управления структурой и параметрами технологической системы фрикционной разрезки. Дис. докт. техн. наук: Харьков, 1996. – 352 с. 8. *Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения*. В 10 т. – Т. 2. *Теплофизика резания материалов*. Под общ. ред. *Ф. В. Новикова, А. В. Якимова*. – Харьков: Курсор, – 627 с.

Поступила в редколлегию 4.09.2010

А. В. ГАЙДАКА, канд. техн. наук, проф.; НТУ «ХПИ»;
В. Ю. АЛЕФИРЕНКО, асп., НТУ «ХПИ»;
М. В. ПАВЛЮЧЕНКОВ, асп., УкрДАЗТ, Харків, Україна

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ МАСЛОУДЕРЖИВАЮЩЕЙ КАНАВКИ В ГНЕЗДАХ СЕПАРАТОРА СО СТОРОНЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ КОЛЕЦ НА НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЕГО КОНСТРУКЦИИ

В статье выбраны размеры маслоудерживающей канавки в гнездах полимерного сепаратора со стороны опорных поверхностей колец. Показано, что геометрическая форма профиля маслоудерживающих канавок существенно не влияет на напряженно – деформированное состояние сепаратора.

In the article the sizes of oilaccumulation ditch are chosen in the nests of polymeric separator from the side of supporting surfaces of rings. It is shown that the geometrical form of type of oilaccumulation ditches substantially does not influence on tensely is the deformed state of separator.

Вступление. Эффективным способом повышения износостойкости деталей машин, является образование на их поверхностях трения маслоудерживающего профиля [1]. Для полимерных сепараторов подшипников качения маслоудерживающий профиль на поверхностях трения колец технологически проще изготовить в виде канавок различного сечения, параллельных их образующим. При этом остается нерешенным вопрос о степени влияния геометрии маслоудерживающей канавки и ее расположения на напряженно-деформированное состояние конструкции сепаратора.

Анализ публикации. Исследование напряженно-деформированного состояния сепаратора крупногабаритных роликовых подшипников проводилось методом фотоупругости [2] и методом конечных элементов [3–5]. Однако влияние геометрии маслоудерживающих канавок на кольцах и перемычках сепаратора не изучалось.

Целью исследования является изучение влияния профиля маслоудерживающей канавки в гнездах сепаратора со стороны поверхности трения колец, а также ее расположения относительно углов гнезд сепаратора на напряженное и деформированное состояние конструкции.

Основной материал. Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) сепаратора с маслоудерживающими канавками производилось на примере полиамидных сепараторов серийных роликоподшипников 30–42726Е2М и 30–232726Е2М буксовых узлов колесных пар вагонов.

Схема расположения в гнезде сепаратора со стороны поверхности трения кольца маслоудерживающей канавки и варианты ее геометрии показана на рис. 1.

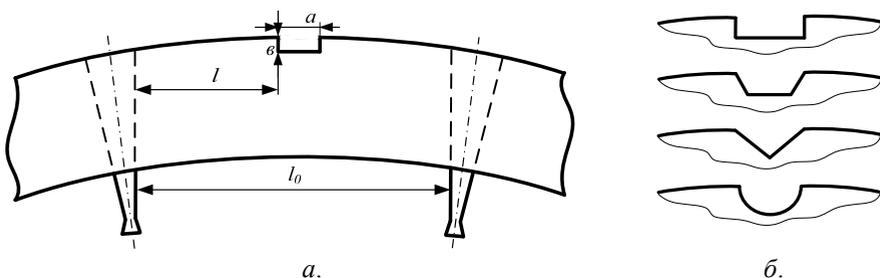


Рис. 1. Фрагмент полимерного сепаратора с маслоудерживающей канавкой:
a. – схема конструкции; *б.* – варианты геометрии канавки

Любой профиль маслоудерживающей канавки (рис.1,б) характеризуется двумя параметрами – ширина a и высота b . Согласно [1], для достижения эффекта улучшения смазки поверхности трения деталей машин величины этих параметров не превышают нескольких десятков микрон. Подобные величины размеров указанных профилей (рис.1,б) в литьевой форме для изготовления полимерных сепараторов, например роликоподшипников типа 2726 [2], получить невозможно из-за трудностей изготовления соответствующей формирующей поверхности. Технологически возможно на цилиндрической формирующей поверхности закрепить вставки соответствующего профиля. Рекомендуется выбирать минимально допустимые размеры профиля вставок в пределах: $a = 2 \dots 3 \text{ мм}$; $b = 0,2 \dots 0,4 \text{ мм}$ по условию возможности их изготовления и надежной фиксации в литьевой форме.

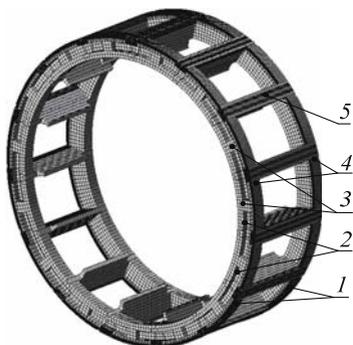


Рис. 2. Модель МКЭ полимерного сепаратора с маслоудерживающими канавками

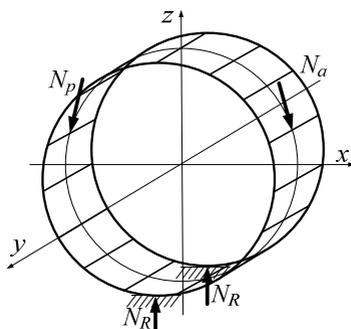


Рис. 3. Схема нагружения полимерного сепаратора ($N_p = N_a = 120 \text{ Н}$)

Таким образом, в работе исследуется влияние геометрической формы профиля маслоудерживающей канавки и ее месторасположение на опорной поверхности кольца относительно угла гнезда сепаратора на напряженное и деформированное состояние сепаратора в условии отсутствия теоретических

(аналитических) исследований этого вопроса. С учетом изложенного наиболее приемлемым является численный метод исследования НДС на основе конечных элементов (МКЭ) с использованием отечественного программного комплекса “Лира” [6–8].

Объемная модель сепаратора с использованием шестиузловых и восьмиузловых конечных элементов, содержащих 123022 элементов и 131025 узлов представлена на рис. 2. Схема нагружения усовершенствованной конструкции полимерного сепаратора показана на рис.3.

В модели учтены основные элементы конструкции: кольца (1) с полостями (2) и ребрами (3) с внешней торцевой стороны, маслоудерживающие канавки (4) на поверхности трения с базирующим кольцом, перемычки (5).

На рис. 4. в качестве примера дано распределение интенсивности напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа) в окрестности маслоудерживающей канавки прямоугольного профиля гнезда сепаратора для наиболее неблагоприятного ее расположения.

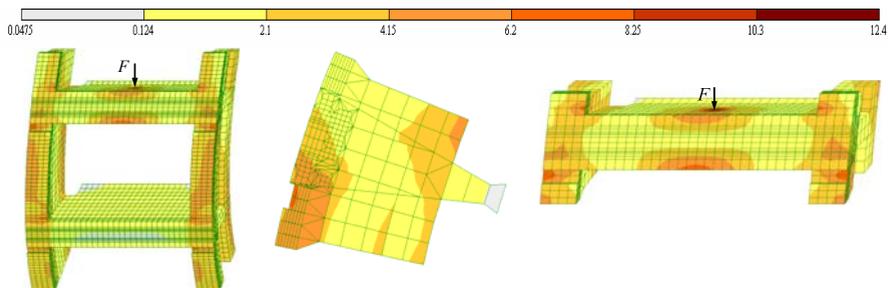


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа) в окрестности маслоудерживающей канавки прямоугольной формы гнезда сепаратора со стороны поверхности трения колец

Результаты исследования напряжений в окрестности маслоудерживающей канавки в гнездах сепаратора со стороны поверхностей трения колец представлены на рис.5.

Таким образом, установлено, что характер изменения напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ для разных профилей маслоудерживающих канавок одинаков. В угловой зоне гнезда сепаратора, например с канавкой прямоугольного профиля, $\sigma_{\text{экв}} = 5,9$ МПа, а по середине гнезда уменьшение напряжения – $\sigma_{\text{экв}}$ составило 15%. Влияние канавки практически не ощутимо, начиная с величины $l = 3$ мм (рис.5). Поэтому наиболее благоприятным месторасположением маслоудерживающей канавки можно считать $l \geq 3$ мм.

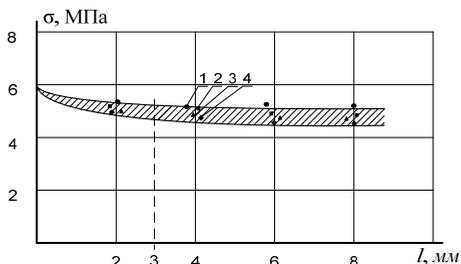


Рис. 5. Изменение напряжений в углах гнезд сепаратора с маслоудерживающей канавкой: 1 – прямоугольной; 2 – трапециевидной; 3 – треугольной; 4 – сегментовидной

Деформация сепаратора не зависит от месторасположения канавки и для различных ее профилей остается одинаковой. Увеличение деформации сепаратора с маслоудерживающими канавками по сравнению с типовой конструкцией сепаратора не превышает 2 %.

Выводы:

1. С учетом конструктивных и технологических особенностей изготовления литейной формы, а также напряженно-деформированного состояния полиамидного сепаратора роликоподшипников типа 2726 выбраны геометрические параметры маслоудерживающей канавки на поверхностях трения колец сепаратора.

2. Показано, что геометрическая форма маслоудерживающей канавки существенно не влияет на напряженно-деформированное состояние сепаратора. Выбрано наиболее благоприятное месторасположение канавки относительно угла гнезда сепаратора.

3. Проведенное численное исследование является основой для экспериментального исследования работоспособности полимерного сепаратора повышенной износостойкости роликоподшипников типа 2726.

Список литературы: 1. Шнейдер Ю.Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. – Л.: Машиностроение. – 1972. -210 с. 2. Гайдамака А.В., Борзилов И.Д., Дунай Л.М. Исследование напряженного состояния конструкции сепаратора крупногабаритных роликовых подшипников // Вестник ХГПУ. – 1997. – Вып. 7 – с. 5-7. 3. Егорова И.Н. Напряженно – деформированное состояние сепаратора из стеклополиамида для буксового вагонного роликоподшипника // Зб. наук праць ХарДАЗТ. – 2000. – Вып. 42 – с. 81-85. 4. Курже Г., Ляна Б., Мартинетти М. Полимеры улучшают буксовые подшипники // Evolution. 1998. - № 4. – с. 27-31. 5. Аверин Н.А., Русанов О.А., Иванов С.Г. Исследования нагруженности полиамидных сепараторов для буксовых подшипников методом конечных элементов // Вестник ВНИИЖТ. – 2007. - № 3. – с. 24-29. 6. Городецкий А.С., Шмуклер В.С., Бондарев А.В. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций. Учебное пособие. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 889 с. 7. ЛИРА 9.4 Руководство пользователя. Основы. Учебное пособие. Е.Б. Стрелец-Стрелецкий, В.Е. Богоус, и др.. Под ред. акад. РААСН, докт. техн. наук, проф. Городецкого. – К.: Издательство «ФАКТ» 2008. – 164 с. 8. ЛИРА 9.4. Примеры расчета и проектирования. Учебное пособие. Боговис В.Е., Гензерский Ю.В., и др..

Поступила в редколлегию 4.09.2010

А.В. ГАЙДАКА, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», Харків;
В.В. НЕМЧИК, асп., НТУ «ХПИ», Харків, Україна

О ПОВЫШЕНИИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТОРЦЕВОГО КОНТАКТА РОЛИКОПОДШИПНИКОВ

В статье предложено повышение износостойкости торцевого контакта цилиндрических роликоподшипников с осевой нагрузкой осуществлять за счет улучшения свойств смазки и совершенствования конструкции бортов. Изложена методика оценки работоспособности торцевого контакта роликоподшипников по критерию толщины смазочной пленки.

In article is offered increasing to wear capability butt end contact cylindrical bearing with axial load to realize to account of the improvement characteristic lubricant and improvements to designs of the board. The Stated methods of the estimation to capacity to work butt end contact bearing on criterion of the thickness of the lubricating film.

Введение. Повышение износостойкости торцевого контакта рассматривается на примере цилиндрических роликоподшипников с осевой нагрузкой. Известно, что некоторые типы цилиндрических роликоподшипников (12000, 42000, 52000, 62000, 92000) могут воспринимать умеренные ($F_a / F_r \leq 0.4$) односторонние и двусторонние осевые силы при постоянно действующей радиальной силе F_r [1]. Как показывает опыт эксплуатации одного из наиболее массовых цилиндрических роликоподшипников букс вагонов, в результате восприятия осевых сил происходит изнашивание соответствующих торцевых поверхностей роликов и бортов колец. Часто изнашивание торцевого контакта буксовых цилиндрических роликоподшипников сопровождается схватыванием, задирами на торцах роликов (рис.1) и бортах колец (рис.2).

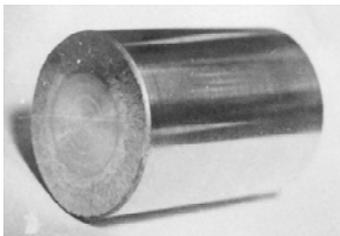


Рис.1. Изношенный торец цилиндрического ролика подшипника типа 2726



Рис. 2. Изношенный торец борта с трещинами наружного кольца подшипника типа 2726

Задиры поверхностей деталей в торцевом контакте могут приводить к отпуску металла, появлению в них трещин (рис.2) с последующим разрушением подшипника, угрожая безопасности движения на железнодорожном транспорте. По данным «Укрзалізниця» задиры на торцах

ролика и бортах колец являются наиболее часто встречающимся видом повреждения цилиндрических роликоподшипников типа 2726 с устойчивой ежегодной частотой их выбраковки (рис.3).

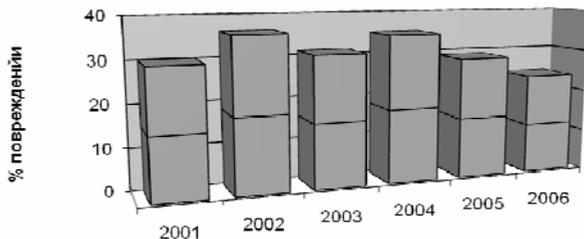


Рис. 3. Гистограмма выхода из строя роликоподшипников типа 2726 вследствие появления задиrow на торцах роликов и бортах колец

Анализ публикаций. В большинстве исследований по работоспособности торцевого контакта цилиндрических роликоподшипников повышение его износостойкости связывается с оптимизацией геометрии поверхностей трения, что отражено в теоретических [2-7] и экспериментальных [8-12] работах. Показано, что оптимальные параметры геометрической формы поверхностей деталей торцевого контакта зависят от условий эксплуатации конструкции подшипника, а также времени его наработки. Оптимальные расчетные геометрические параметры торцевого контакта нагруженного подшипника могут стать неоптимальными после изготовления подшипника и его монтажа в узел из-за деформации деталей. Поэтому для цилиндрических роликоподшипников букс колесных пар вагонов, по мнению автора работы [2], оптимальные геометрические параметры торцевого контакта следует устанавливать не подбором сопряжения деталей с различной геометрией их контактирующих поверхностей, а по результатам анализа износа подшипников, изъятых из эксплуатации. На основании изложенного, повышение износостойкости торцевого контакта цилиндрических роликоподшипников за счет численной оптимизации геометрии поверхностей трения сопряжения «торец ролика - борт кольца» следует признать недостаточно эффективным из-за невозможности учета деформации деталей в эксплуатации.

Из анализа уравнений для толщины смазочной пленки в упругогидродинамическом расчете тяжело нагруженных контактов деталей при давлении ≥ 300 МПа [13] следует, что увеличить ее толщину (а значит уменьшить износ) можно, например, повышением вязкости смазки, за счет введения различных добавок и присадок, а также уменьшением контактного давления. В настоящей работе сделана попытка обоснования возможности увеличения толщины смазочной пленки между бортом кольца и торцом ролика за счет улучшения эксплуатационных свойств смазки и снижения контактного давления, что поможет хотя бы частично адаптировать торцевой контакт к постоянно меняющимся условиям эксплуатации.

Цель работы. Обосновать возможность повышения износостойкости торцевого контакта цилиндрических роликоподшипников с осевыми силами за счет улучшения антифрикционных и противозадирных свойств смазки при введении в смазку геомодификатора трения и за счет снижения контактного давления при усовершенствовании конструкции бортов колец.

Основной материал. Обоснование возможности повышения износостойкости торцевого контакта цилиндрических роликоподшипников в этой работе проводится на примере геометрического сопряжения конусного торца ролика с конусным торцом направляющего борта кольца. В таком сопряжении реализуется линейный контакт конусных поверхностей и при определенных допущениях достижение поставленной цели работы может быть значительно упрощено. В качестве критерия работоспособности торцевого контакта в роликоподшипнике в первом приближении может быть толщина смазочной пленки [13].

Основные допущения и предположения при определении толщины смазочной пленки в торцевом контакте:

- радиальная нагрузка вдоль линии контакта и осевая нагрузка по торцам ролика распределены равномерно;
 - толщина смазочного слоя вдоль линии торцевого контакта одинакова;
 - торцевое истечение смазки по высоте борта не зависит от жесткости борта и в расчет не принимается;
 - проскальзывание в контактах ролика с бортами вращающегося внутреннего и неподвижного наружного колец не учитывается;
- перемещение роликов в подшипнике осуществляются соосно кольцам.

Введенные допущения дают возможность в качестве первого приближения использовать решение плоской изотермической контактно-гидродинамической задачи для схемы торцевого контакта цилиндрического роликоподшипника, показанной на рис.4.

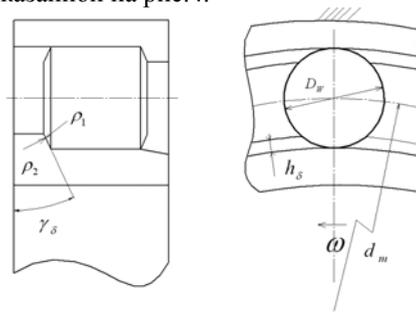


Рис. 4. Схема торцевого контакта в цилиндрическом роликоподшипнике

Толщину смазочной пленки в торцевом контакте роликоподшипника предлагается оценивать приближенной формулой, применяемой для расчетов зубчатых передач и подшипников качения [5]

$$h_o = 3,17(\mu_o \cdot V_\Sigma)^{0,75} \cdot \alpha^{0,6} \cdot \rho_{np}^{0,4} \cdot q_H^{-0,15}, \quad (1)$$

где μ_o – вязкость смазки при давлении, соответствующем нормальным условиям; α – пьезокоэффициент вязкости масла; V_Σ – суммарная скорость в контакте; ρ_{np} – приведенный радиус кривизны; q_H – нагрузка на единицу длины торцевого контакта (удельная торцевая нагрузка);

Обозначая $\gamma = D_W / d_m$; $\gamma' = (D_W - h_\delta) / d_m$, получим выражение для радиусов кривизны торца ролика ρ_1 и борта кольца ρ_2 , а также приведенного радиуса ρ_{np} кривизны:

$$\rho_1 = \frac{d_m \gamma}{2 \sin \gamma_\delta}; \quad \rho_2 = \frac{d_m (1 \mp \gamma)}{2 \sin \gamma_\delta}; \quad \rho_{np} = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 \pm \rho_2}. \quad (2)$$

Скорости в контакте, принадлежащем торцу ролика и бортам колец:

$$V_1 = \frac{d_m \omega}{4} (1 \pm \gamma)(1 \mp \gamma'); \quad V_2 = \frac{d_m \omega}{4} (1 - \gamma^2) \frac{\gamma'}{\gamma}, \quad (3)$$

а также суммарная скорость:

$$V_\Sigma = 0,25 d_m \omega \left[(1 \mp \gamma')(1 \pm \gamma) + (1 - \gamma^2) \frac{\gamma'}{\gamma} \right]. \quad (4)$$

В приведенных формулах (2...4) верхний знак относится к контакту ролика с бортом внутреннего кольца, нижний – наружного.

Распределенная нагрузка на единицу длины торцевого контакта

$$q_H = k_F F_a / Z l_p, \quad (5)$$

где Z – число роликов в подшипнике; l_p – длина линии торцевого контакта ролика; k_F – коэффициент, учитывающий динамический характер осевой нагрузки на ролик ($k_F = F_0 / F_i$, где F_0 – сила в торцевом контакте подшипника с чертежным размером борта; F_i – сила в торцевом контакте с измененным размером борта).

Для расчета толщины смазочной пленки в торцевом контакте роликоподшипника необходимо выяснить зависимость вязкости от концентрации геомодификатора в смазке и установить влияние жесткости борта кольца на силовое взаимодействие в торцевом контакте.

Зависимость вязкости от концентрации геомодификатора трения в смазке устанавливается путем исследования смазочной композиции на вискозиметре типа Реотест 2.1 согласно ГОСТ 1929-87, результаты которого представлены на рис. 5.

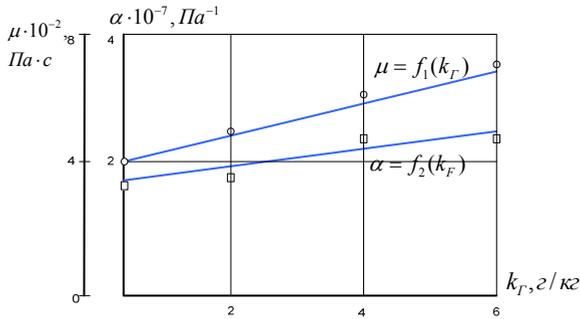


Рис. 5. Зависимость кинематической вязкости и пьезокоэффициента вязкости масла ИС-50 от концентрации геомодификатора

Влияние жесткости борта кольца на силовое взаимодействие в торцевом контакте получено методом, который хотя и не дает высокой точности, но позволит оценить силу взаимодействия ролика с бортом в торцевом контакте. Эта сила, деформирующая борт кольца, определяется из условия энергетического баланса – равенства кинетической энергии T движущего груза (колесной пары) и потенциальной энергии U_δ деформации борта кольца подшипника.

При этом необходимо ввести следующие допущения для определения силы в торцевом контакте:

- борт кольца – набор консольных балок, число которых равно числу роликов и связанных упругими кольцевыми нитями;
- рассматривается элемент борта в виде консольной балки с одной степенью свободы, на которую действует сила со стороны одного ролика;
- удар торца ролика о борт кольца абсолютно неупругий: взаимодействующие тела после удара не отделяются друг от друга;
- скорость удара не зависит от состояния пути, конструкции и состояния ходовой части вагона, скорости и нагрузки вагона;
- нагрузка от торца ролика передается на верхний угол борта кольца, что соответствует наиболее неблагоприятным условиям эксплуатации подшипника;
- масса изгибаемой консольной балки в расчет не принимается;
- рассеяние энергии при ударе не учитывается.

С учетом принятых допущений

$$T = U_\delta \quad \text{или} \quad \frac{mV^2}{2} = \frac{F^2 l^3}{6EI}, \quad (6)$$

где m – 1/15 часть массы колесной пары; V – скорость осевого смещения колесной пары (определена по результатам экспериментальных исследований пассажирского вагона [14]); F – сила взаимодействия торца ролика с бортом кольца; l – длина консольной балки (высота борта кольца); E – модуль упругости материала кольца; I – момент инерции прямоугольного сечения консольной балки, $I = bh^3 / 12$ (b – ширина, h – высота сечения балки).

Из соотношения (6) выражение для F имеет вид:

$$F = \frac{V}{l} \sqrt{3EIm/l} . \quad (7)$$

При $V=0,02\text{м/с}$; $l=0,007\text{м}$; $m=80\text{кг}$; $E=2 \cdot 10^{11}\text{Н/м}^2$; $b=0,03\text{м}$; $h_1=0,0135\text{м}$; $h_2=0,0115\text{м}$; $h_3=0,0095\text{м}$; $h_4=0,0075\text{м}$; $h_5=0,007\text{м}$ (h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 – варианты изменений высоты сечения консольной балки – борта), $F_a=5\text{кН}$, $Z=15$, $l_p=0,007\text{м}$, можно получить зависимость $q_H = f_3(k_F)$, которая представлена на рис.6

На основе полученных зависимостей

$$\mu = f_1(k_T), \quad \alpha = f_2(k_T), \quad q_H = f_3(k_F)$$

(рис.5 и рис.6) можно построить согласно (1) зависимости $h_0 = \varphi_1(k_T)$ и $h_0 = \varphi_2(k_F)$ (рис.7).

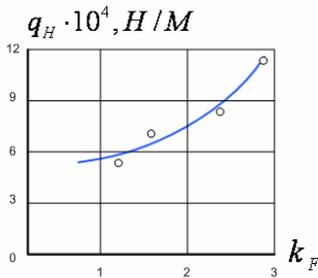


Рис. 6. Зависимость удельной торцевой нагрузки ролика на борт кольца от коэффициента динамической осевой нагрузки

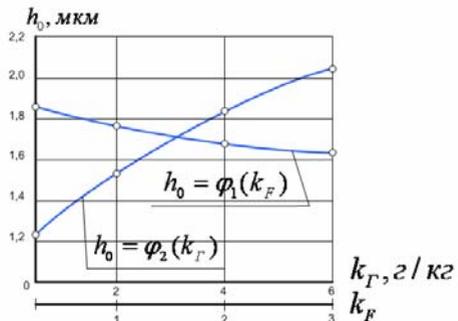


Рис. 7. Зависимости изменения толщины масляной пленки в торцевом контакте роликоподшипника от концентрации геомодификатора в смазке и жесткости борта кольца

Выводы

1. Повышение износостойкости торцевого контакта цилиндрических роликоподшипников на основе численной оптимизации геометрии поверхностей трения торца ролика и борта кольца не учитывает монтажные и эксплуатационные деформации деталей подшипников, а также их износ. Такой путь повышения износостойкости торцевого контакта

роликотподшипников следует считать недостаточно эффективным и исчерпавшим свои возможности.

2. Под постоянно меняющиеся условия работы торцевого контакта роликотподшипников, воспринимающих перемещение осевые нагрузки, предлагается адаптироваться обеспечением требуемых эксплуатационных свойств смазки и уменьшением контактных давлений. Первое достигается за счет улучшения антифрикционных и противозадирных свойств смазки введением геомодификаторов трения, второе – снижением жесткости деталей торцевого контакта, например бортов колец подшипников.

3. Разработанная методика оценки работоспособности торцевого контакта роликотподшипников с осевой нагрузкой по критерию толщины смазочной пленки позволяет в первом приближении эффективность предложенных способов повышения износостойкости торцов роликов и бортов колец.

Список литературы: 1. *Перель Л.Я.* Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник. – М.: Машиностроение, 1983.– 543с. 2. *Шавишвили А.Д.* Работа цилиндрических роликовых подшипников в контакте торец ролика – борт кольца // Труды ВНИИЖТ. – 1982. – вып.654. – с.90-97. 3. *Галахов М.А.* Исследование контакта сферического торца ролика с наклонным бортом кольца и метод выбора радиуса торца // Труды ВНИИП. – 19....– Вып. 5(81). – с.81-86. 4. *Галахов М.А., Бурмистров А.Н.* Расчет подшипниковых узлов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с. 5. *Коднир Д.С., Жильников Е.П., Байбородов Ю.И.* Эластрогидродинамический расчет деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 160 с. 6. *Жильников Е.П.* Эластрогидродинамический расчет контакта торца ролика с бортиком кольца роликотподшипника // Трение и износ, – 1990. - №2. – с.240-245. 7. *Krzeminski – Freda H., Warda B.* The effect of roller end flange contact shape upon frictional losses and axial load of the radial cylindrical roller bearing // Tribol. Des. Mach. Elem.: Proc.15th Deeds – Lyon Symp. Tribol., 6th -9th Sept., 1988. – Amsterdam, 1989. – с.287-295. 8. *Соколов Ю.Г., Данильченко А.И., Лутвинов А.М.* Некоторые конструктивные особенности радиального роликового подшипника и их влияние на относительное проскальзывание //Контактно-гидродинамическая теория смазки и ее практическое применение в технике: Материалы II Всесоюз. Научн.-техн. конф. Куйбышев, 1978.– Вып.2 – с.107-113. 9. *Акбаев Б.З., Галахов М.А.* Определение момента трения в подшипниках качения от действия осевых сил // Труды ВНИИЖТ. – 1975. – Вып. 540. – с.24-27. 10. *Цюренко В.Н., Шавишвили А.Д.* Определение оптимальной формы очертания торцов роликов цилиндрических роликотподшипников // Труды ВНИИЖТ. - 1978. – Вып. 583. – с.41-48. 11. *Петров В.А., Филатова Е.М., Мартынов В.С., Галахов М.А.* Влияние внутренних параметров цилиндрического роликового подшипника на некоторые критерии его работоспособности // Труды ВЗИИТ. – 1976. – Вып. 82. – с.37-56. 12. *Li M., Wen S.* The study of roller end quiding shoulder construction of roller bearings // Tribol. Des. Mach. Elem./ Prol. 15th Leeds – Lyon Symp., Tribol., 6th-9th Sept., 1988. – Amsterdam, 1989. – с.307-311. 13. *Галахов М.А.* Упругогидродинамическая теория смазки / Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2х кн. Кн.2/ Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Анисина. – М.: Машиностроение, 1979. – с.49-56. 14. *Гайдамака А.В.* Повышение износостойкости и снижение сопротивления вращению тяжело нагруженных роликотподшипников за счет изменения конструкции и материала сепаратора: Дис... канд. техн. наук. – Харьков, 1988. – 209с.

Поступила в редколлегию 4.09.2010

И.Э. ЯКОВЕНКО канд. техн. наук, НТУ ХПИ,
Е.И. ЯКОВЕНКО, асп., НТУ ХПИ

СИНТЕЗ СТРУКТУР МНОГОИНСТРУМЕНТНЫХ БЛОКОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ КОНЦЕВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ.

Дана стаття присвячена розгляду варіантів створення різних інструментальних блоків виходячи з обмежень сумісності інструментів і обмежень по точності оброблюваних поверхонь

This article deals with the design of a different instrument units based on the limited compatibility of tools and limitations on the accuracy of machined surfaces

Концентрация операций является одним из основных методов повышения производительности в машиностроении. Особенно это характерно для обработки различных деталей, чаще всего корпусных, имеющих несколько сторон обработки, каждая из которых содержит конечное число одинаковых или различных соосных поверхностей, которые могут быть обработаны концевым режущим инструментом. В этом случае очень важно сформировать инструментальные блоки таким образом, чтобы они обеспечивали необходимое качество обработки при минимальных затратах связанных с выпуском изделия. Это касается как структуры, так и параметров инструментальных блоков. Вопросам оптимизации параметров инструментальных наладок уделялось достаточно много внимания при организации массового производства, обработки на токарных станках автоматах и автоматических линиях [1,2].

В современных условиях сокращения жизненного цикла выпускаемых изделий, наличия большого числа разнообразных силовых модулей, как новых, так и требующих реинжиниринга агрегатных станков, данная проблема требует учета большего числа факторов, определяющих производительность оборудования и себестоимость выпускаемого изделия. С другой стороны, развитие автоматизации проектно-конструкторских работ позволяет эффективно реализовать модель синтеза структур многоинструментной обработки с достаточно большим числом рассматриваемых параметров.

Задачу синтеза возможных (технически реализуемых) вариантов инструментальных блоков можно сформулировать следующим образом: На основании множества J режущих инструментов, характеризующихся множеством векторов проектных параметров \vec{V} , сформировать множество технически реализуемых вариантов инструментальных блоков K отраженных векторами проектных параметров \vec{Z} , таким образом, чтобы выполнялось множество элементарных технологических переходов, отраженное векторами

проектных параметров \vec{X} , направленных на получение параметров объекта обработки \vec{P} .

В формальной постановке задача записывается в виде:

$$\vec{Z}^* = \{ \vec{z}_k^* \mid \vec{z}_k^* = f(\vec{P}, \vec{y}_{jk}); \vec{y}_{jk} \in \bar{Y}; F_j(Y, P, U) = \emptyset; \forall k \in K; j \in J \},$$

где \vec{Z}^* - множество проектных параметров шпинделей с установленными режущими инструментами; \vec{P} - множество векторов параметров объекта обработки (поверхностей), имеющих общую сторону обработки; $F_j(Y, P, U) = \emptyset$ - система ограничений, направленная на формирование множества инструментальных блоков.

Очевидно, что для случая одношпиндельной обработки вектор проектных параметров \vec{z}_k^* тождественен вектору проектных параметров \vec{y}_{jk} . Условием того, что режущие инструменты могут входить в один и тот же инструментальный блок является принадлежность соосных поверхностей, получаемых при обработке каждым инструментом (в том числе и комбинированным), одной обобщенной стороне обработки. При этом обязательно соблюдение условия непересечения выполняемых элементарных переходов каждым из рассматриваемых инструментов блока (классическая задача о наименьшем разбиении).

Объединение нескольких инструментов в инструментальный блок возможно только в случае выполнения системы ограничений, которые можно разделить на две основные группы: геометрические и технологические. Организационные ограничения в данном случае не рассматриваются.

Технологические ограничения рассматриваются в комплексе. Как уже отмечалось выше, синтез многошпиндельной обработки рассматривается только для концевой мерного режущего инструмента. При этом возможна как параллельная, так и последовательная и параллельно-последовательная обработки. Основным ограничением, включающим в себя как точностные характеристики поверхностей, получаемых в результате обработки инструментом, так и возможные искажения точности поверхностей за счет неравномерности нагрузок и деформаций, возникающих на jk -ом шпинделе, является совместимость режущих инструментов по типам при объединении их в инструментальные блоки. Разделение совместимости инструментов в зависимости от последовательности обработки связано с тем, что в процессе последовательной или параллельно-последовательной обработок действия инструментов, а, следовательно, нагрузки и точки приложения их равнодействующей разделены во времени и представляют собой аналог двух отдельных инструментальных блоков, действующих последовательно, что значительно упрощает требования к совместимости инструментов. Частично эти факторы учитываются при рассмотрении объединения инструментов различных типов, а частично в дальнейшем, при анализе геометрических ограничений.

Таблицы совместимости инструментов при объединении в блок составлены на основании анализа эксплуатации многошпиндельных насадок

и коробок агрегатных станков и сложившегося опыта проектирования многошпиндельных инструментальных блоков. В таблице 1 рассмотрена возможность объединения для некоторых однотипных и разнотипных инструментов в блок при выполнении условия

$$\Psi(\vec{J}_{jk}, \vec{J}_{j'}) = 1, \quad \forall (\vec{J}_{jk} \in \vec{J}_{jk}, \vec{J}_{j'} \in \vec{J}_{j'}, j' = j_k + 1; j' \in J_k),$$

Таблица 1.

Совместимость концевых режущих инструментов при объединении их в инструментальные блоки

№пп	Тип инструмента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Сверло спиральное	1	1	1	1	1*	1	1*	0	0	0
2	Сверло ступенчатое	1	1	1	1	1*	1	1*	0	0	0
3	Зенкер цилиндрический	1	1	1	1	1	1	1*	0	0	0
4	Зенковка	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
5	Цековка	1*	1*	1	1	1	1	0	0	0	0
6	Зенкер перовой	1	1	1	1	1	1	1*	0	0	0
7	Развертка цилиндрическая	1*	1*	1*	0	0	1*	1	1	0	0
8	Развертка ступенчатая	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
9	Метчик	0	0	0	0	0	0	0	0	1^	1^
10	Плашка	0	0	0	0	0	0	0	0	1^	1^

Примечание: * - допускается совмещение в случае последовательной обработки; ^ - допускается при совпадении шага резьбы или требует дополнительного анализа. Дополнительными рассматриваемыми технологическими параметрами являются ограничения по точности получаемых поверхностей. Значения максимальной и минимальной точности (квалитетов) поверхностей, обрабатываемых k -ым инструментальным блоком, не должны отличаться более, чем на два при параллельной обработке. При последовательной или параллельно-последовательной обработке для поверхностей, получаемых последовательно, допускаются различия на три квалитета:

$$\frac{\max(\overline{IT}_{jk})}{\min(\overline{IT}_{j'})} \leq [IT]_k, \quad \forall (j_k \in J_k), \text{ где } \overline{IT}_{jk} - \text{квалитет поверхности,}$$

получаемый в результате обработки jk -ым инструментом.

Основными геометрическими ограничениями формирования инструментального блока являются: - минимально допустимое межцентровое расстояние между шпинделями;- ограничение по разбросу «вылета инструмента»;- ограничение на разброс диаметров инструментов.

Минимально допустимое межцентровое расстояние между шпинделями объясняется требованием обеспечения нормальной установки подшипников шпинделя и зависит от типа, конструкции и размеров многошпиндельного блока.

$$\min \{L_{jk}, j'\} \geq [L_n]_k \quad \forall (j_k \in J_k; j' = j_k + 1; j' \in J_k) \quad \text{где } L_{jk}, j' -$$

межосевое расстояние между соседними инструментами k -го инструментального блока, мм; $[L_n]_k$ - допустимое межосевое расстояние между шпинделями для k -го инструментального блока, мм.

Ограничение по вылету инструмента обусловлено необходимостью регулировки длины вылета шпинделя, патрона и инструмента в определенном диапазоне, а также необходимостью обеспечения жесткости инструментов блока в процессе обработки.

$$[\max \{L_{sjk} + L_{jk}\} - \min \{L_{sjk} + L_{jk}\}] > [L_p]_k, \quad \forall (j_k \in J_k),$$

где L_{sjk} - расстояние от элемента на детали, мешающего перемещению инструментального блока в осевом направлении до точки начала процесса резания, мм; L_{jk} - длина рабочего хода jk -го инструмента, мм;

$[L_p]_k$ - допустимый перепад длин вылета инструмента для k -го инструментального блока, мм. Разброс диаметров инструментов, входящих в инструментальный блок, не должен превышать допустимого значения:

$$\frac{\max \{D_{jk}\}}{\min \{D_{jk}\}} \leq [\Delta d]_k, \quad \forall (j_k \in J_k), \quad \text{где } [\Delta d]_k - \text{допустимое значение перепада}$$

диаметров инструментов блока; $\max \{D_{jk}\}$ - максимальный диаметр обработки jk -го инструмента, входящего k -ый инструментальный блок, мм; $\min \{D_{jk}\}$ - минимальный диаметр jk -го инструмента, мм.

Очевидно, что $[L_p]_k$ и $[\Delta d]_k$ зависят от типа инструмента, его размеров и характера объединения в блок (одноименные инструменты или нет). Таким образом, в результате синтеза на основании рассмотренных выше ограничений может быть сформировано множество технически реализуемых вариантов инструментальных блоков, работающих с различными циклограммами движения. В тех случаях, когда возможно назначение двух или более различных типов циклограмм движения, каждый состав инструментов с вариантом циклограммы их совместного движения рассматривается, как отдельный инструментальный блок. При назначении возможных вариантов циклограммы движения инструментального блока необходимо учитывать то, что для некоторых видов обработки допускается назначение только одного конкретного типа циклограммы независимо от всех остальных видов обработки, выполняемых данным инструментальным блоком.

Список литературы: 1. Гильман А.М., Егоров Г.В., Егоров Ю.Б., Ясаков Ю.В. Автоматизированное проектирование оптимальных наладок металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1984. – 168с. ил. 2. Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках/ Гильман А.М. и др. – М.: Машиностроение, 1972. – 188 с.

Поступила в редколлегию 4.09.2010

Ю.А. СИЗЫЙ, д-р. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»
А.В. ФЕСЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»
Ю.Н. ЛЮБИМЫЙ, асп., НТУ «ХПИ»

ТЕПЛОАПРЯЖЕННОСТЬ ПРОЦЕССА КРУГЛОГО ПРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ С ОХЛАЖДЕНИЕМ

Анотація. У статті отримано рішення задачі розрахунку температурного поля у заготовці при шліфуванні з різною інтенсивністю її охолодження в зоні контакту і поза ним. Проаналізовано вплив охолоджуючої дії мастильно-охолоджувальної рідини на температуру поверхні, що обробляється.

Abstract. In the article the task of calculation temperature field in a blank in the process of grinding by wheel with interrupted surface with different intensify cooling in the cutting zone and out of zone contact of wheel with blank are solved. The influence of cooling action of coolant on temperature in grinding surface are analyzed.

Известно, что процесс прерывистого шлифования в сравнении со сплошным обеспечивает снижение максимальной температуры примерно на 30-40%, что подтверждается теоретическими расчетами, выполненными достаточно глубоко и обширно, охватывая разнообразные виды шлифования и объекты обработки [1, 2, 3].

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 обеспечивается 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 заметно меньшее влияние на общее охлаждение поверхности в фазу отсутствия контакта круга с деталью. Это объясняется не только известной 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, вращающимся 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 [4]. Кроме этого, возможна и подача СОЖ непосредственно в зону контакта выступа круга с деталью через поры круга.

Для внедрения указанных методов интенсификации охлаждения желательно иметь возможность теоретического анализа и прогнозирования предполагаемых результатов.

Теоретическое описание тепловых процессов при плоском шлифовании с охлаждением выполнено в работе Сипайлова В.А. [2], в которой им получены приближенное и точное решения. В приближенном решении не учитывается различие в теплоотдаче при контакте круга с обрабатываемой поверхностью и его отсутствием. Принимается, что теплоотдача конвективным теплообменом имеет место в течение всего времени прохождения круга над точкой поверхности как в момент контакта, так и в момент его отсутствия.

Точное решение устраняет этот недостаток, в нем учитывается, что в момент контакта конвективный теплоотвод отсутствует. Однако, пользоваться точным решением затруднительно, и точный анализ нагрева и охлаждения при прерывистом шлифовании как у Сипайлова В.А. [2], так и у Якимова А.В. [3] основан на приближенном решении Сипайлова В.А. [2].

Таким образом, их решения обладают общим недостатком – не учитывают отсутствие теплообмена с окружающей средой в момент контакта круга с обрабатываемой поверхностью или его наличие за счет СОЖ, поступающей в зону контакта через поры круга. Эти решения представлены в безразмерных величинах, что позволяет, как широко принято в теории теплопроводности, выполнять значительно более обобщенный анализ.

Однако это преимущество в некоторой степени завуалирует удобные, привычные параметры круга, режимы шлифования и теплофизические константы, что создает определенные неудобства для специалиста производства, анализирующего и внедряющего прерывистое шлифование.

На основании изложенного, в статье решается задача описания температурного поля в детали при прерывистом круглом наружном шлифовании, учитывающего различную интенсивность охлаждения при контакте круга и его отсутствии с обрабатываемой поверхностью в виде удобном для практического специалиста, владеющего широко применяемыми математическими пакетами программ для ЭВМ, например, MathCad.

В статье [5] решена задача теплопроводности с теплообменом для круглого наружного шлифования при быстродвижущемся ограниченном по ширине источнике тепла. Показано, что для типичных условий круглого наружного шлифования тепловой источник (поверхность контакта круга с заготовкой) можно принять быстродвижущимся согласно условию [6]:

$$Pe = \frac{V_o \cdot L}{\alpha} \leq 10, \quad (1)$$

где V_o – скорость перемещения заготовки; L – размер источника тепла в направлении вектора \vec{V}_o ; α – коэффициент теплопроводности.

Кроме этого, в [5] проведено сравнение решений при движущемся и быстродвижущемся источниках тепла и показана их близость (отличие 1,5%). Описание температурного поля в заготовке при круглом наружном шлифовании [5] выполнено из условия, что этот вид шлифования подобен плоскому.

Если наружную поверхность цилиндрической заготовки развернуть в плоскость, то задача теплопроводности для круглого шлифования можно решить как для плоского, т.е. в прямоугольной системе координат. Привяжем источник тепла – плоскость контакта круга с деталью, к прямоугольной системе координат XYZ с центром в середине источника. Согласно рисунку 1 в [5] получено

$$T(x,y) = \frac{q \cdot \sqrt{\alpha}}{\lambda \cdot 2 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{\tau} \frac{dt}{\sqrt{\tau-t}} \cdot \exp\left[-\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot (\tau-t)}\right] \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot (\tau-t)} \cdot \operatorname{erfc}(u)\right] \times \\ \times \exp(u^2) \times \left[\operatorname{erf}\left[\frac{y+h}{2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot (\tau-t)}}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{y-h}{2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot (\tau-t)}}\right] \right], \quad (2)$$

где $u = \frac{x}{\sqrt{4 \cdot \alpha \cdot (\tau-t)}} + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{\alpha \cdot (\tau-t)}$; а – коэффициент температуропроводности, $\text{мм}^2/\text{с}$; λ – коэффициент теплопроводности материала заготовки, $\frac{\text{Дж}}{\text{мм} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}}$; q – плотность теплового потока, $\frac{\text{Дж}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с}}$; α – коэффициент теплоотдачи, $\frac{\text{Дж}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}}$; $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$.

Решение (2) достаточно просто трансформируется под условия прерывистого шлифования. Прерывистое шлифование – это несколько циклов нагрева-охлаждения продолжительностью t_c , имеющих место за время прохождения точки поверхности детали через дугу контакта L , которая рассчитывается по известной формуле:

$$L = \sqrt{2 \cdot R_s \cdot l}, \quad (3)$$

где $R_s = \frac{R}{1 + \frac{R}{r}}$ – эквивалентный радиус круга;

R – радиус круга; r – радиус заготовки; l – глубина шлифования.

Время t_n прохождения точки поверхности заготовки пути равному L находим делением L на V_d .

$$t_n = \frac{L}{V_\delta}, \quad (4)$$

где V_δ – окружная скорость вращения заготовки.

Время цикла t_c нагрева-охлаждения заготовки

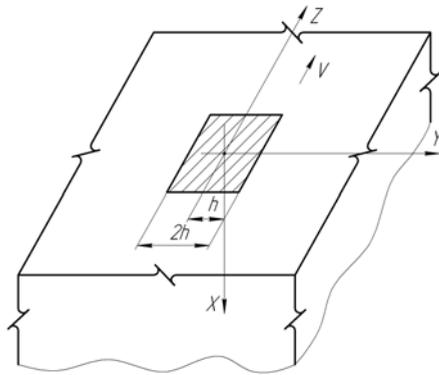
$$t_c = \frac{\delta + \delta_1}{V_k}, \quad (5)$$

где δ, δ_1 – величины дуги выступа и впадины соответственно круга по наружной его окружности; V_k – окружная скорость круга.

циклов
охлаждения

$$n = \frac{t_n}{t_c}.$$

Количество
нагрева-



(6)

Рис. 1 – Развертка цилиндрической поверхности заготовки с источником тепла

Время контакта t_k , т.е. резания выступом круга

$$t_k = \frac{\delta}{V_k}, \quad (7)$$

Полная картина нагрева и охлаждения поверхности заготовки представляет собой последовательное суммирование температурных полей от каждого цикла. При этом пределы интегрирования по времени t должны программироваться так, чтобы источник тепла действовал только во время контакта круга с заготовкой и прекращал свое действие при отсутствии его до следующего контакта. Аналогичным образом должен программироваться коэффициент теплоотдачи. Во время контакта круга с заготовкой он равняется α_1 , а в отсутствие контакта – α .

При записи уравнения (2) с вышеизложенным принимаем координату $y=0$ и, поэтому, последний сомножитель в квадратных скобках уравнения (2) заменяем выражением:

$$2 \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{h}{\sqrt{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}} \right).$$

Окончательно уравнение, описывающее температурное поле в заготовке при прерывистом шлифовании приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned}
 T(x, \tau) = & \frac{q \cdot \alpha}{2 \cdot \lambda} \cdot \sum_{k=0}^n \int_{\substack{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k, 0, \text{if}(\tau \leq t_c \cdot k + t_k, \tau, t_c \cdot k + t_k)) \\ \text{if}(\tau \leq t_c \cdot k, 0, t_c \cdot k)}} \frac{2 \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{h}{\sqrt{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}} \right)}{\sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}} \times \\
 & \times \exp \left(-\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot (\tau - t)} \right) \cdot \left[1 - \frac{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k + t_k, \alpha_1, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot (\tau - t)} \times \right. \\
 & \times \left. \left[1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}} + \frac{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k + t_k, \alpha_1, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{\alpha \cdot (\tau - t)} \right] \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times \exp \left[\frac{x}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}} + \frac{\text{if}(\tau \leq t_c \cdot k + t_k, \alpha_1, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{\alpha \cdot (\tau - t)} \right]^2 \right] \right] dt, \quad (8)
 \end{aligned}$$

где k – номер цикла нагрева-охлаждения.

При вычислении $T(x, \tau)$ желательно одновременно на графике $T(x, \tau)$ показать кривую нагрева $T1(\tau)$ поверхности заготовки для $x=0$, получаемую при шлифовании сплошным кругом. В этом случае уравнение (8) преобразуется в:

$$\begin{aligned}
 T1(\tau) = & \frac{q \cdot \alpha}{2 \cdot \lambda} \cdot \int_0^{\tau} \frac{2 \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{h}{\sqrt{4 \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}} \right)}{\sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot (\tau - t)}} \cdot \left[1 - \frac{\alpha_1}{\lambda} \cdot \sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot (\tau - t)} \times \right. \\
 & \times \left. \left[1 - \operatorname{erf} \left[\frac{\alpha_1}{\lambda} \cdot \sqrt{\alpha \cdot (\tau - t)} \right] \cdot \exp \left[\frac{\alpha_1}{\lambda} \cdot \sqrt{\alpha \cdot (\tau - t)} \right]^2 \right] \right] dt \quad . \quad (9)
 \end{aligned}$$

Пример расчета по (8) и (9) для $x=0$ и $x=0,05$ мм с исходными данными приведен на распечатке (рис. 2).

На графиках видны три линии: верхняя – шлифование сплошным кругом $T1(\tau_j)$, средняя – прерывистое шлифование при $x=0$, нижний график – температура при прерывистом шлифовании на глубине $x=0,05$ мм. Из этих графиков очевидно преимущество прерывистого шлифования над сплошным и оно тем больше, чем больше циклов нагрева-охлаждения произойдет за время t_n – время перемещения точки поверхности заготовки на длину дуги контакта. Так, за два цикла нагрева-охлаждения максимальная температура при прерывистом шлифовании меньше в сравнении со сплошным примерно на 20%, а после 3^x циклов – на 30%.

Для оценки возможности более значительного снижения температуры шлифуемой поверхности за счет интенсификации охлаждения поверхности заготовки в фазы отсутствия контакта с кругом выполнен расчет температур для исходных данных, приведенных на рисунке 3, где $\alpha = 0,0018 \frac{Дж}{мм^2 \cdot с \cdot ^\circ C}$,

и $\alpha = 0,045 \frac{Дж}{мм^2 \cdot с \cdot ^\circ C}$, которые соответствуют охлаждению сухим воздухом и напорной струей жидкости на водной основе [6].

Из рисунка 3 видно, что на третьем цикле нагрева максимальная температура на $105^\circ C$ ниже при охлаждении напорной струей жидкости в сравнении с охлаждением воздухом, а на втором цикле – на $50^\circ C$. Таким образом, максимальная интенсификация охлаждения поверхности заготовки вне зоны контакта позволяет уменьшить максимальную температуру на втором цикле менее чем на 10% от максимальной при охлаждении воздухом, и на 13% на третьем цикле нагрева-охлаждения.

Длина дуги режущей части абразивного сегмента: $\delta_0 = 2,5$	Длина дуги между сегментами: $\delta_1 = 2,5$
Значение, равное половине высоты шлифовального круга: $h_1 = 30$	Коэффициенты теплоотдачи: $\alpha_1 = 0,0018$ $\alpha_2 = 0$
Скорость вращения шлифовального круга: $v_k = 50000$	Коэффициент теплопроводности: $a = 3$
Коэффициент теплопроводности материала заготовки: $\lambda = 0,023$	Плотность теплового потока: $q = 209,3$
Глубина измерения температуры слоя: $x = 0$ $n = 3$	$t_c := \frac{\delta + \delta_1}{v_k} = 1 \times 10^{-3}$ $t_k := \frac{\delta}{v_k} = 5 \times 10^{-4}$
$N_{max} = 2,6 \cdot 10^3$ $\Delta\tau = 0,000001$ $j = 0..N$ $\tau_j := 0 + \Delta\tau \cdot j$	

$$T(x, \tau) = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \lambda} \cdot \sum_{k=0}^n \int_{\text{if}(\tau \leq tc, 0, \text{tc})}^{\text{if}(\tau \leq tc, k, 0, \text{if}(\tau \leq tc, k+tk, \tau, tc, k+tk))} \frac{2 \cdot \text{erf}\left[\frac{h}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}}\right]}{\sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4a(\tau-t)}} \cdot \left[1 - \frac{\text{if}(\tau \leq tc \cdot k + tk, \alpha, \alpha)}{\lambda} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)} \cdot \left[1 - \text{erf}\left[\frac{x}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}}\right] + \frac{\text{if}(\tau \leq tc \cdot k + tk, \alpha, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau - t)}\right] \cdot e^{-\frac{x}{\sqrt{4a(\tau-t)} + \frac{\text{if}(\tau \leq tc, k+tk, \alpha, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{a(\tau-t)}}^2} \right] dt$$

$$T1(\tau) = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \lambda} \cdot \int_0^{\tau} \frac{2 \cdot \text{erf}\left[\frac{h}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}}\right]}{\sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)}} \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)} \cdot \left[1 - \text{erf}\left[\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau - t)}\right]\right] \cdot e^{-\left[\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a(\tau-t)}\right]^2} \right] dt$$

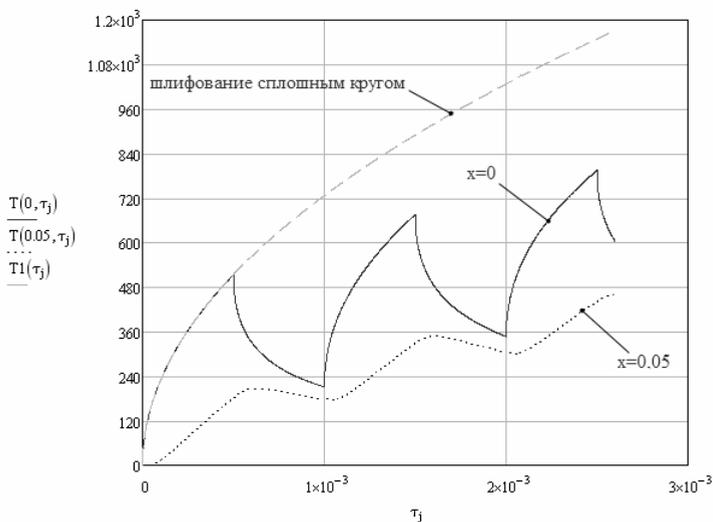


Рис. 2 – Сравнение температуры нагрева поверхности при шлифовании сплошным кругом с температурой, измеренной на различных глубинах x от поверхности заготовки, при шлифовании прерывистым кругом

Проанализируем возможности снижения нагрева интенсификацией охлаждающего действия СОЖ, поступающей в зону контакта. Для этого сравниваем расчеты $T(x, \tau)$ для $\alpha = 0,045 \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{°C}}$ при различных значениях коэффициента теплоотдачи в зоне контакта α_1 . На рисунке 4 приведены кривые нагрева-охлаждения при $\alpha_1 = 0 \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{°C}}$ и

$\alpha_1 = 0,045 \frac{Дж}{мм^2 \cdot с \cdot ^\circ C}$ при прочих равных условиях. Из этих графиков

видно, что интенсивное охлаждение поверхности заготовки в фазу контакта круга с заготовкой позволяет уменьшить максимальную температуру поверхности заготовки на третьем цикле нагрева-охлаждения приблизительно $50^\circ C$, а на втором – на $20^\circ C$.

Таким образом, обеспечив интенсивное охлаждение шлифуемой поверхности при прерывистом шлифовании в фазу контакта круга с заготовкой и вне его, можно снизить максимальную температуру за счет охлаждения после трех циклов нагрева-охлаждения приблизительно на 20%, а после двух циклов – на 10%.

Внимание, которое уделено в вышеприведенных сравнениях числу циклов нагрева-охлаждения, объясняется тем, что при круглом наружном шлифовании длина дуги контакта L значительно меньше ее значения в сравнении с плоским шлифованием, и скорости вращения заготовки при круглом шлифовании обычно значительно больше скорости подачи при плоском. Поэтому обеспечить большое значение циклов нагрева-охлаждения трудно, тем более, если учитывать конструктивные особенности сборного шлифовального круга с сегментами, что ограничивает желательное уменьшение длин дуг окружностей круга на выступах и впадинах. Следовательно, если ориентироваться на возможность обеспечения не более двух циклов нагрева-охлаждения, то эффект от интенсификации охлаждающего действия СОЖ невелик (не более 10%).

Однако если обратиться к [8], то видно, что интенсификация подачи СОЖ в зону контакта круга с заготовкой обеспечивает значительное снижение нагрева заготовки не за счет охлаждающего действия СОЖ, а за счет сложного суммарного физико-химического воздействия на поверхность заготовки, что приводит к снижению силы резания примерно на 20%, а значит и к снижению плотности теплового потока.

Длина дуги режущей части абразивного сегмента: $\delta_0 = 23$

Длина дуги между сегментами: $\delta_1 = 23$

Значение, равное половине высоты шлифовального круга: $h_0 = 30$

Коэффициенты теплоотдачи: $\alpha_0 = 0.0018$ $\alpha_1 = 0$

Скорость вращения шлифовального круга: $v_k = 50000$

Коэффициент температуропроводности: $a = 3$

Коэффициент теплопроводности материала заготовки: $\lambda = 0.023$

Плотность теплового потока: $q = 209.3$

Глубина измерения температуры слоя: $x = 0$ $n = 3$

$t_c := \frac{\delta + \delta_1}{v_k} = 1 \times 10^{-3}$ $t_k := \frac{\delta}{v_k} = 5 \times 10^{-4}$

$N_{\text{max}} := 2.6 \cdot 10^3$ $\Delta\tau := 0.000001$ $j = 0..N$ $\tau_j := 0 + \Delta\tau \cdot j$

$$T(x, \tau) = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \lambda} \sum_{k=0}^n \left[\begin{array}{l} \text{if}(\tau \leq tc, 0, \text{if}(\tau \leq tc \cdot k + tk, \tau, tc \cdot k + tk)) \\ \text{if}(\tau \leq tc, 0, tc, k) \end{array} \right] \frac{2 \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{h}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}} \right]}{\sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4a(\tau-t)}} \cdot \left[1 - \frac{\text{if}(\tau \leq tc \cdot k + tk, \alpha 1, \alpha)}{\lambda} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}} \right] + \frac{\text{if}(\tau \leq tc \cdot k + tk, \alpha 1, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau - t)} \right]^2 \right] dt$$

$$T1(\tau) = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \lambda} \cdot \int_0^{\tau} \left[\frac{2 \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{h}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}} \right]}{\sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)}} \cdot \left[1 - \frac{\alpha 1}{\lambda} \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left[\frac{\alpha 1}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau - t)} \right] \right]^2 \right] dt \right]$$

$\alpha_1 = 0.045$

$$T2(x, \tau) = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \lambda} \sum_{k=0}^n \left[\begin{array}{l} \text{if}(\tau \leq tc, 0, \text{if}(\tau \leq tc \cdot k + tk, \tau, tc \cdot k + tk)) \\ \text{if}(\tau \leq tc, 0, tc, k) \end{array} \right] \frac{2 \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{h}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}} \right]}{\sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4a(\tau-t)}} \cdot \left[1 - \frac{\text{if}(\tau \leq tc \cdot k + tk, \alpha 1, \alpha)}{\lambda} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{\pi \cdot a \cdot (\tau - t)} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}} \right] + \frac{\text{if}(\tau \leq tc \cdot k + tk, \alpha 1, \alpha)}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau - t)} \right]^2 \right] dt$$

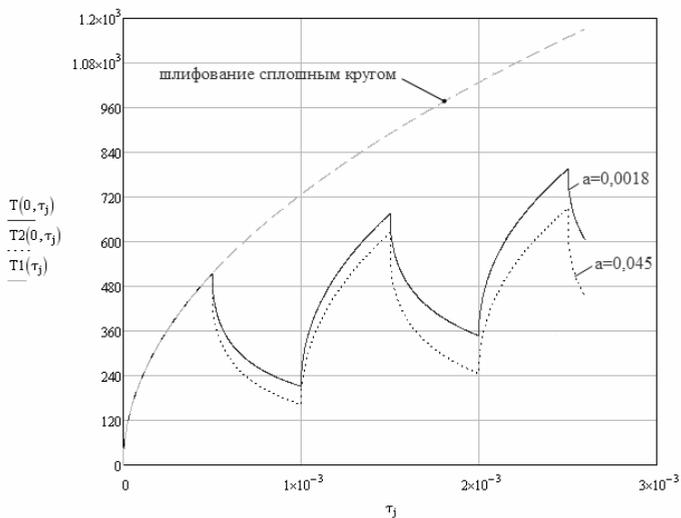


Рис. 3 – Сравнение температуры нагрева поверхности заготовки ($x=0$) при различных значениях коэффициента теплоотдачи α вне зоны контакта круга с заготовкой

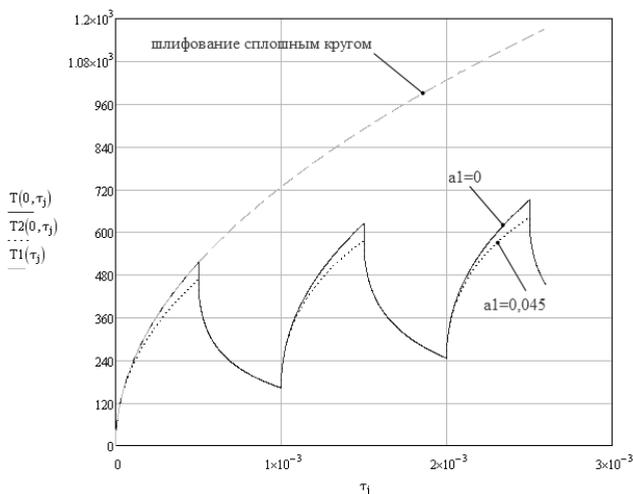


Рис. 4 – Сравнение температуры нагрева поверхности заготовки ($x=0$) при различных значениях коэффициента теплоотдачи α_1 в зоне резания

Выводы

1. Разработанная модель позволяет выполнить расчет температурного поля поверхности заготовки, обрабатываемой шлифованием, прерывистым кругом при быстродвижущемся источнике тепла с возможностью варьирования коэффициентами теплоотдачи в зоне контакта и вне его.

2. Охлаждающее действие СОЖ позволяет незначительно (примерно до 10%) уменьшить максимальную температуру при прерывистом круглом наружном шлифовании.

3. Интенсифицируя подачу СОЖ в зону контакта и вне ее при прерывистом шлифовании 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.

Список литературы: 1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с. 2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с. 3. Якимов А.В. Прерывистое шлифование. – Киев; Одесса: Вища шк., 1986. – 174 с. 4. Ефимов В.В. Научные основы техники подачи СОЖ при шлифовании. – Саратов: СГУ, 1985. – 140 с. 5. Сизый Ю.А., Степанов М.С. Математическое моделирование температурного поля в шлифуемой заготовке периферией круга // Восточноевропейский журнал передовых технологий. – № 2 (8). – 2004. – С. 52-63. 6. Резников А.Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с. 7. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. – 144 с. 8. Сизый Ю.А., Степанов М.С. Влияние давления подачи СОЖ на нагрев заготовки при врезном шлифовании // Вісник національного технічного університету «ХПІ» – Х.: НТУ «ХПІ». – 2005. – С. 210-214.

Поступила в редакцию 23.09.2010

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

ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО МЕТОДА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ.

У статті розглядається технологічний процес механічної обробки прокатних валків. Виконано аналіз продуктивності токарної обробки та обдирного шліфування на верстатах різної потужності або стрічкового личкування дефектного шару з послідуочим точінням. Визначено найбільш доцільний метод чорнової механічної обробки.

In this article concerned technological process of mill roll machining. Analysis of productivity is performed. Rough turning and snag grinding on the machines of different power; strap grinding of scale layer with turning are compared. On the basis of analysis most effective method of mill roll rough machining is specified.

Технологический процесс механической обработки прокатных валков включает такие основные этапы – обдирочное точение под предварительную термообработку, ленточную отрезку прибылей, растачивание и фрезерование мест для захватов, трещин, окончательное точение под термообработку и шлифование. Наиболее трудоемким этапом механообработки является обдирочное точение, на эту операцию затрачивается до 40% времени всей механической обработки [1].

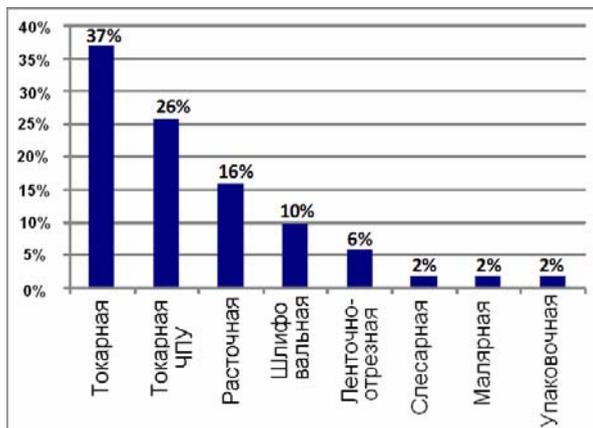


Рис. 1 – Распределение трудоемкости механической обработки прокатного валка по технологическим операциям.

На первой операции черного течения удаляется припуск величиной до 35мм на сторону, обработка ведется в очень тяжелых условиях – удаляются

окалина, дефекты, по причине большого биения и эксцентриситета бочки относительно шеек глубина резания в процессе точения может изменяться более чем в 2 раза, работа ведется на удар. Для удаления окалины вершина резца должна находиться в металле, а с учетом биения глубина резания может достигать 25 мм за один проход. Скорость удаления материала при обдирке точением составляет до 1000 кг/час, в зоне резания возникают высокие температуры и усилия резания до 60000 Н [2,3]. Данные условия работы определяют высокий расход режущего инструмента и большие затраты электроэнергии. После выполнения обдирки выполняется первая проверка качества поковки, определяется ее пригодность к дальнейшей обработке. В случае неудовлетворительных результатов контроля дальнейшая обработка может быть невозможной. Для устранения дополнительных затрат времени, режущего инструмента и электроэнергии, обеспечения возможности контроля без необходимости снятия большого припуска достаточно удалить дефектный поверхностный слой. Удаление с поверхности заготовки валка окалины также позволяет выполнить последующую токарную обработку на более высоких режимах и обеспечить повышение стойкости инструмента. Скорость резания и подача при черновой лезвийной обработке поверхности без дефектного слоя могут быть увеличены на 20-30%.

Величина окалины на поверхности заготовок валков составляет 2 – 2,5 мм на сторону. Дефектный поверхностный слой может удаляться методами абразивной обработки [4,5] – обдирочным шлифованием или ленточным шлифованием с использованием крупнозернистых абразивных лент. Для определения наиболее эффективного метода предварительной механообработки прокатных валков выполним сравнительный анализ трудоемкости и затрат на электроэнергию при обдирке методом точения или точения в сочетании с абразивной обработкой. Обдирочное шлифование может выполняться на станках различной мощности (таблица 1)

Таблица 1 – Характеристики обдирочно-шлифовальных станков.

Модель станка	WS I CP 75.000x9.500	мод. 3307E-60.
Мощность главного привода	490 кВт	160 кВт
Норма съема металла	660 кг/час	200 кг/час

Станок мод. 3307E-60 – существующее на предприятии оборудование, станок «Waldrich Siegen» мод. WS I CP 75.000x9.500 перспективное оборудование, применяемое на заводах «Hitachi Metals» (Япония), «Riva Sello» (Италия), «Schwabische Huttenwerke» (Германия) и пр.

Проведем анализ четырех технологических методов: 1. точение; 2. обдирочное шлифование на станке мод. 3307E-60 и точение; 3. обдирочное шлифование на станке WS I CP 75.000x9.500 и точение; 4. ленточное шлифование и точение. В качестве примера рассмотрим процесс

предварительной механообработки опорного вала ОСТ 24.013.04-90.4954ТУ по трем поверхностям – бочке, рис. 1, поверхность 1 и двум прилегающим к бочке шейкам, рис. 1, поверхности 2.

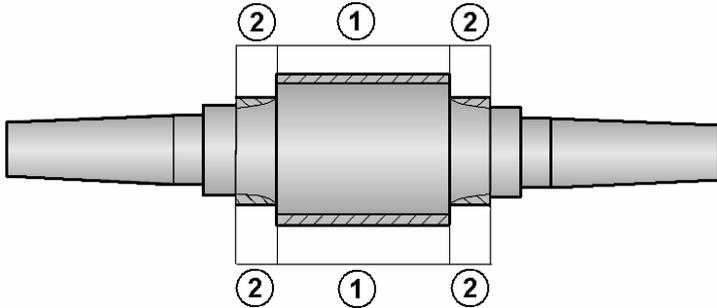


Рис. 2 – Схема удаления припуска с заготовки прокатного вала.

Под предварительную термическую обработку выполняются размеры – диаметр бочки $D_b=1545\pm 1,5$ мм (поверхность 1, рис. 2), диаметры шеек $D_{ш}=1010\pm 1,3$ мм (поверхности 2, рис. 2).

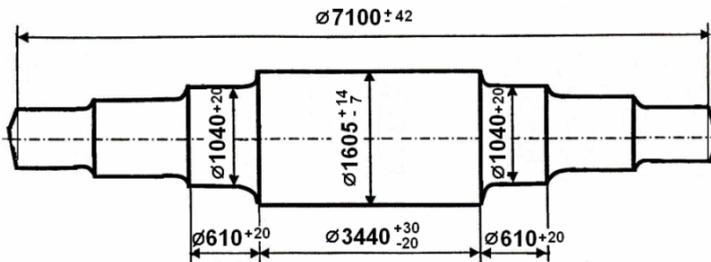


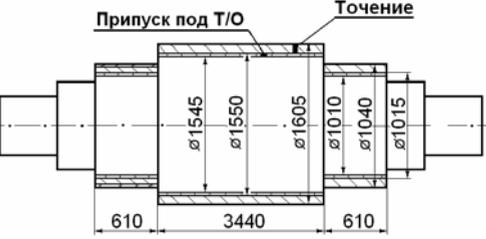
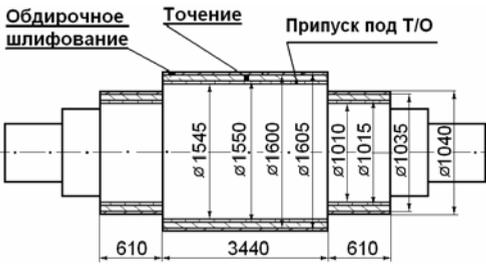
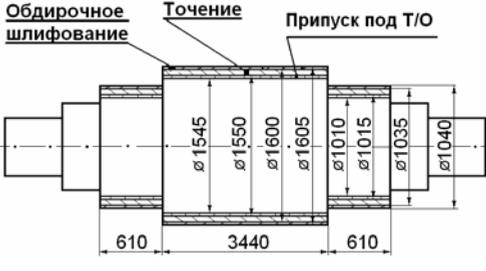
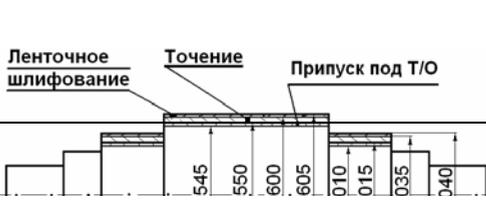
Рис. 3 – Эскиз заготовки прокатного вала.

Токарная обработка выполняется на тяжелом токарном станке с высотой центров 1700 мм, модели 1А680.34, с мощностью главного привода – 160 кВт. Ленточное шлифование выполняется с использованием приспособления для токарного станка ОНТ-120, с использованием абразивной ленты зернистостью 80 мкм.

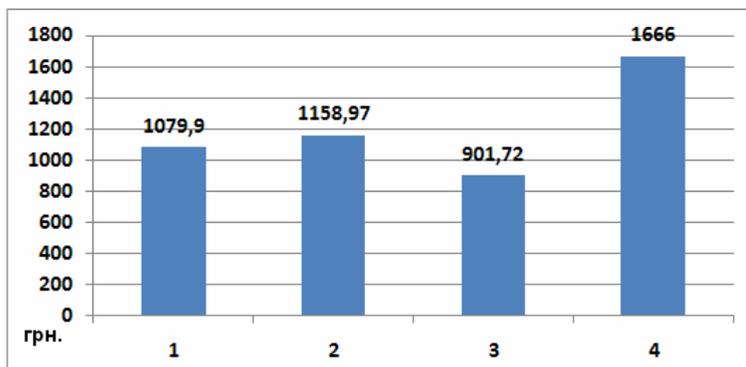
При удалении припуска на указанных в таблице 2 режимах резания трудоемкость обдирочного точения на станке мод. 1А680.34 составит 5,45 ст.н. часа. Обдирочное шлифование на станке модели 3307Е-60 – 2,09 ст.н. часа; на станке мод. WS I CP 75.000x9.500 – 0,56 ст.н. часа. Ленточное шлифование с использованием приспособления ОНТ-120 – 6,02 ст.н. часа. Трудоемкость токарной обработки при отсутствии на поверхности бочки и шеек окалины (варианты II, III, IV, таблица 2) составит 3,76 ст.н. часа. При средней стоимости ст.н. часа 150 грн. и цене 1 кВт-часа электроэнергии 0,42964 грн. минимальные затраты на предварительную механическую

обработку составят 901,72грн., при использовании обдирочного шлифования на станке «Waldrich Siegen» и черногого точения – вариант III., таблица 2.

Таблица 2 – Сравнение техпроцессов предварительной обработки.

Метод	Эскиз	Режимы резания.
<p>I. Токарная обработка.</p>		<p>Режимы токарной обработки: Весь припуск удаляется точением – 27,5 мм на сторону. $V_d=47$ м/мин; $S=1,25$ мм/об. $t=27,5$ мм; $Q=747$ кг/час</p>
<p>II. Обдирочное шлифование (станок мод. 3307E-60) и точение.</p>		<p>Режимы обдирочного шлифования: Удаляется 10% припуска – 2,5 мм на сторону. $V_d=50$ м/мин; $S=55$ мм/об; $t=0,15$ мм; $Q=200$ кг/час.</p> <p>Режимы токарной обработки: Удаляется 90% припуска – 25 мм на сторону. $V_d=55$ м/мин; $S=1,5$ мм/об; $t=25$ мм; $Q=970$ кг/час.</p>
<p>III. Обдирочное шлифование (станок «Waldrich siegen») и точение.</p>		<p>Режимы обдирочного шлифования: 10% припуска – 2,5 мм на сторону. $V_d=80$ м/мин; $S=60$ мм/об; $t=0,3$ мм; $Q=678$ кг/час.</p> <p>Режимы токарной обработки: 90% припуска – 25 мм на сторону. $V_d=55$ м/мин; $S=1,5$ мм/об; $t=25$ мм; $Q=970$ кг/час.</p>
<p>IV. Ленточное шлифование и точение.</p>		<p>Режимы ленточного шлифования: 10% припуска – 2,5 мм на сторону. $V_d=55$ м/мин; $S=35$ мм/об; $t=0,07$ мм. $Q=63$ кг/час.</p>

		Режимы токарной обработки: 90% припуска – 25 мм на сторону. $V_d=55$ м/мин; $S=1,5$ мм/об; $t=25$ мм. $Q=970$ кг/час.
--	--	---



1. – точение; 2. – обдирочное шлифование (станок 3307E-60) и точение;
3. – обдирочное шлифование (станок WS I CP 75.000x9.500 и точение);
4. – ленточное шлифование и точение.

Рис. 4 – Затраты на механическую обработку.

Проведенный сравнительный анализ технологических процессов предварительной механической обработки прокатных валков позволяет сделать вывод о целесообразности обдирки заготовок на вальцешлифовальном станке с мощностью главного привода 490 кВт с последующей токарной обработкой. Удаление окалины и дефектного поверхностного слоя методом шлифования позволит своевременно определять годность поковки, сократить затраты на режущий инструмент и повысить производительность механической обработки.

Список литературы: 1. В.А. Писанко. Механическая обработка прокатных валков. – М. Metallurgizdat, 1974. – 155с. 2. Тяжелая токарная обработка – Sandvik Coromant 2008. – 64с 3. Turning – heavy roughing – Pramet 2008. – 78с. 4. Б.Т. Гориков, Обдирочное шлифование проката – М. Metallurgia, 1991. – 176 с. 5. Каталог-справочник «Абразивные материалы и инструменты» ВНИИАШ – М. НИИ информации по машиностроению 1976 – 385с.

Поступила в редколлегию 20.09.2010

Ю.В. ТИМОФЕЕВ, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ», г. Харьков;
А.А. КЛОЧКО, канд. техн. наук, доцент ДГМА, г.Краматорск;
Е.В. МИРОНЕНКО, д-р. техн. наук, профессор ДГМА, г.Краматорск;
В.Ф. ШАПОВАЛОВ, канд. техн. наук, г.Краматорск.

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗАКАЛЕННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ТВЕРДОСПЛАВНЫМИ ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ.

Розроблена технологія видалення основного припуску загартованих крупномодульних зубчастих коліс під зубошлифування червячними твердосплавними фрезами, що чергуються конічними зубчастими рейками. Застосування технології зубофрезерування твердосплавними червячними фрезами дозволяє підвищити продуктивність чистового зубофрезерування великогабаритних вінців діаметром до 12000мм, у порівнянні зі швидкокорізальними стандартними фрезами, в 1,5 рази при одночасній підвищенні точності виготовлення зубчастих коліс..

Technology of moving away of basic припуску of hard-tempered large module gear-wheels is worked out under the gear grinding by worm hard-alloy milling cutters with alternating conical rack-rails. Application of technology of the gear milling allows to promote the productivity of the clean gear milling of крупногабаритних crowns hard-alloy worm milling cutters by a diameter to 12000мм, as compared to быстроорезущими standard milling cutters, in 1,5 time at the simultaneous increase of exactness of making.

Весьма проблематичным является технология удаления основного припуска закаленных крупномодульных зубчатых колес под зубошлифование. С целью решения технологических возможностей снятия основного припуска под зубошлифование разработана технология формообразования и конструкция червячных твердосплавных фрез $m=10$ мм с чередующимися коническими зубчатыми рейками [1]. Фрезы (рис. 1) используются для предварительной под зубошлифование лезвийной обработки закаленных венцов тепловозов характеристикой $m=10$; $z_k=65$; $\beta_d=0^\circ$; сталь 20Х2Н4А; HRC 50-55.

После химико-термической обработки зубчатые колеса подвергаются значительной деформации, что требует назначения на зубья припуска под последующее зубошлифование в пределах 0,7-1 мм.

Такой припуск существенно увеличивает машинное время зубошлифования, составляющее в среднем 4-6 часов. Кроме того, съем большого припуска абразивным кругом вызывает большие внутренние напряжения растяжения в поверхностном слое зубьев, что, в свою очередь, приводит к образованию микротрещин и других дефектов.

Обработка колес производилась на вертикально-зубофрезерных станках моделей 53Н11 и 5К32 встречным фрезерованием, без применения смазывающе-охлаждающей жидкости. Режимы резания следующие: глубина

резания $t=0,3-0,5$ мм; подача фрезы $S=2$ мм/об; частота вращения фрезы $n=1,3-1,6$ сек⁻¹.

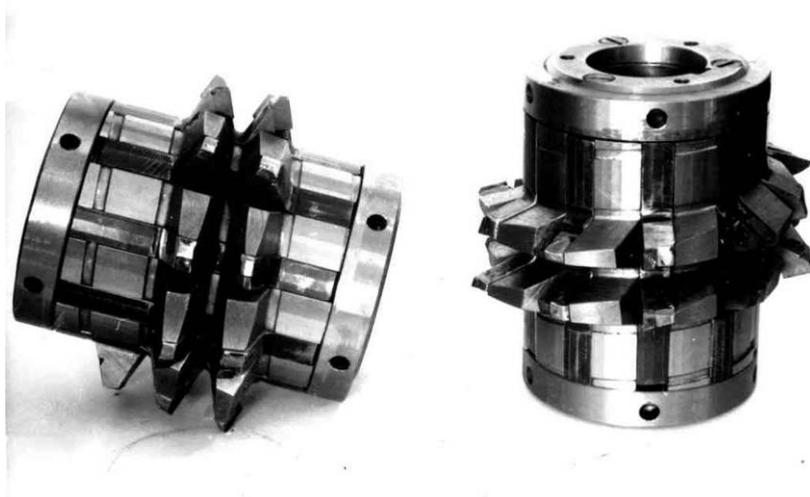


Рис. 1. Универсальные однокорпусные фрезы $m=10$ мм с регулируемыми коническими зубчатыми рейками.

Машинное время обработки одного венца составляет 1,5 часа. Применение предварительной лезвийной обработки позволило снизить трудоемкость последующего зубошлифования венцов в 1,8 раза при высоком качестве обработанной поверхности зубьев.

Заточка фрез выполнялась (рис. 2) в специальном устройстве к универсально-заточному станку, и на специальном заточном станке мод. ВЗ-253Ф2.

Для приводных шестерен уникальной рудоразмольной мельницы мод. ММС 105-24 разработан технологический процесс зубофрезерования закаленных зубьев двухкорпусными универсальными твердосплавными фрезами $m=28$ мм, используемые для предварительной под зубошлифование обработки со следующей характеристикой: $m=28$ мм; $z=41$; $b=1030$ мм; $\beta_d=6^\circ 25'$; сталь 34ХНЗМА; 50...55HRC_с.

Погрешность направления зубьев после закалки ТВЧ на длине 1030 мм составила 0,6–0,9 мм. Поэтому перед зубошлифованием производится предварительная лезвийная обработка зубьев червячными твердосплавными фрезами.

Обработка производится (рис. 3) на вертикально-зубофрезерном станке мод. 5343, встречным фрезерованием за один проход при следующих режимах резания: $t=0.4$ мм; $S=2$ мм/об; $V=0.3$ м/сек.

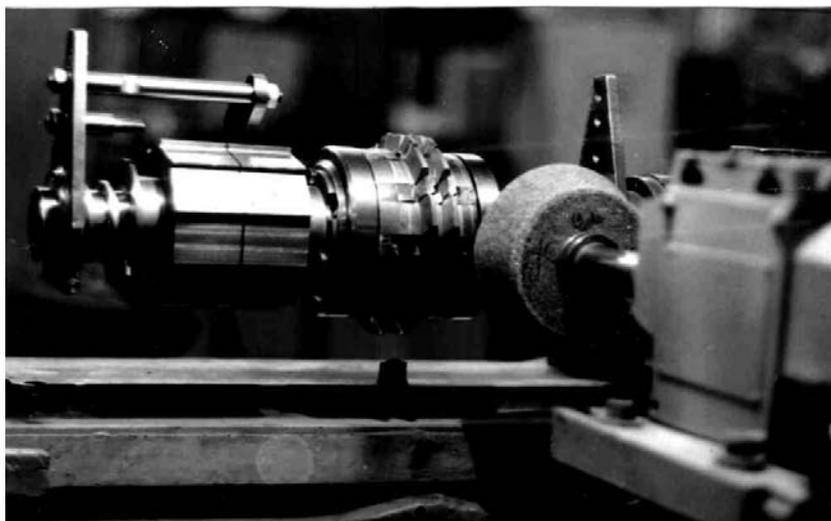


Рис. 2. Заточка твердосплавной фрезы на специальном устройстве к универсально-заточному станку.

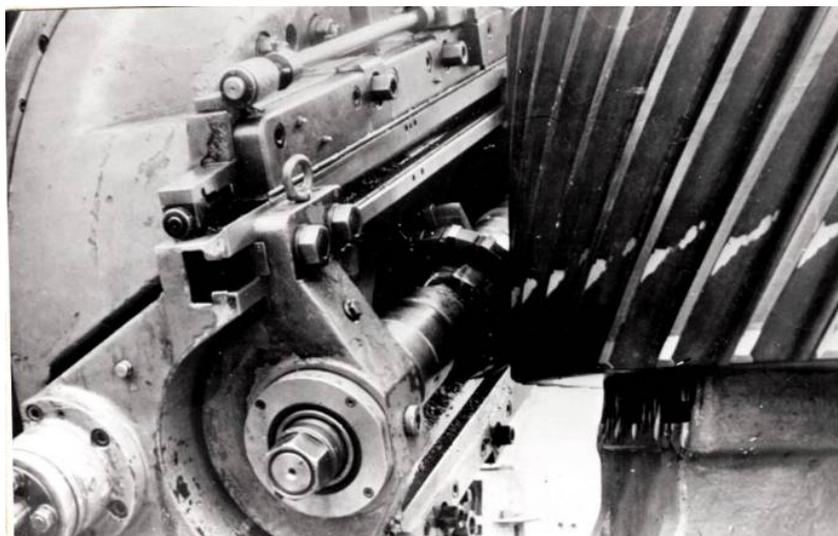


Рис. 3. Лезвийная обработка закаленной приводной шестерни мельницы ММС 105-54.

Машинное время обработки составило 40 часов. Износ зубьев фрезы по задним граням после указанного выше времени работа составил 0,4-0,5 мм,

что подтверждает достаточную для предварительной обработки стойкость инструмента.

Под зубошлифование был оставлен припуск 0,3 мм на сторону зуба.

Применение предварительной лезвийной обработки позволило в 4 раза сократить трудоемкость малопроизводительных зубошлифовальных операций.

Освоена технология чистовой обработки зубьев уникального зубчатого венца рудоразмольной мельницы ММС105-54 специальными твердосплавными фрезами (рис. 4) $m=28$ мм. Характеристика венца следующая: $m=28$ мм; $z_k=284$; $\beta_d=6^\circ 25'$; $b=1000$ мм; сталь 35ХМЛ; НВ 220-260.

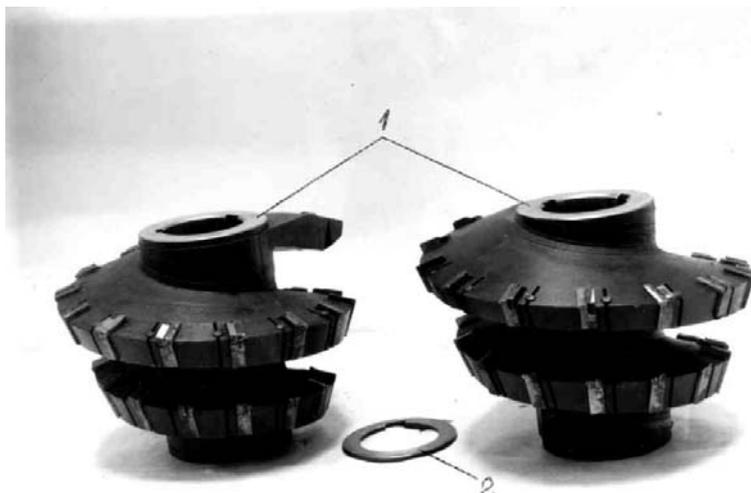


Рис. 4 Специальная червячная двухкорпусная фреза двухстороннего резания $\alpha_k=19^\circ 20'$.

- 1 – корпуса фрезы;
- 2 – дистанционное кольцо.

Для зубчатых венцов диаметром $\phi 8000$ мм разработана технология чистового зубофрезерования твердосплавными червячными фрезами (рис. 5) на вертикально-зубофрезерном станке мод. КУ-306 с диаметром планшайбы $\phi 8000$ мм. Направление фрезерования используют встречное, режимы резания следующие: $t=0,6$ мм; $S=3,86$ мм/об; $n_\phi=20$ об/мин.

Машинное время чистовой обработки венца составляет 65 часов. Максимальный износ зубьев фрезы после указанного непрерывного времени работы не превысил 0,4 мм, что в 2-3 раза меньше, чем при аналогичной обработке быстрорежущими червячными фрезами.

О высокой стойкости фрезы свидетельствует и то, что разность толщин зубьев обработанного венца у верхнего и нижнего торцов не превышает 0,06 мм.

Применение твердосплавных фрез позволяет повысить производительность чистового зубофрезерования крупногабаритных венцов, по сравнению с быстрорежущими стандартными фрезами, в 1,5 раза при одновременном повышении точности изготовления по направлению зубьев.

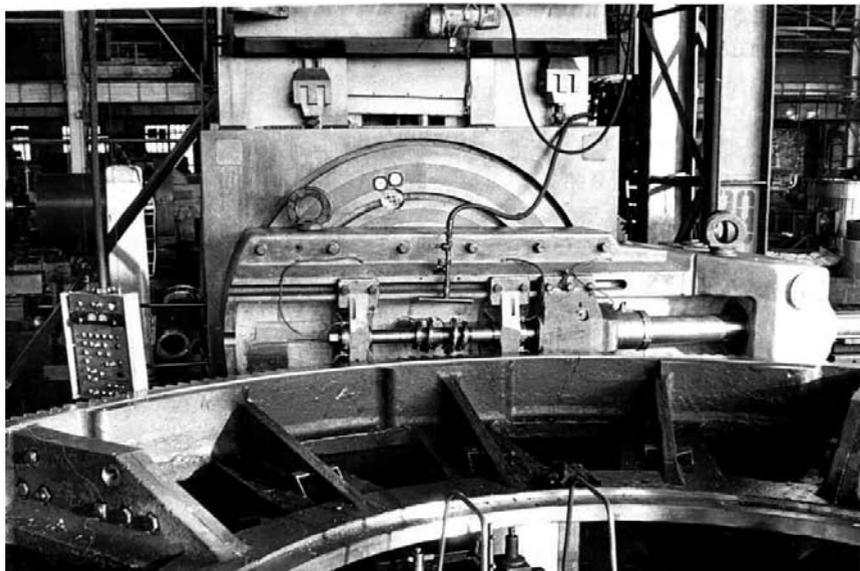


Рис. 5. Чистовое зубофрезерование венца $m=28$ мм; $z_k=284$; $\beta_d=6^\circ 25'$; $b=1000$ мм, на уникальном станке мод. КУ-306

Наиболее широкое применение различные конструкции твердосплавных фрез получили в производственных условиях ЗАО «НКМЗ». Фрезы используют для предварительной под зубошлифованию лезвийной обработки закаленных колес $m=16-36$ мм; $z_k=12-86$; $b=200-700$ мм; $\beta_d=0^\circ-28^\circ$; $D_a=400-1800$ мм; сталь 20ХН3А; $HRC \geq 55$; используемых в прокатных станах «2500», «3600» и «5000».

Зубофрезерование осуществляется червячными твердосплавными фрезами (рис. 6).

Обработка колес ведется (рис. 7), (рис. 8) на тяжелых зубофрезерных станках мод. 5В375, 5353, ZFWZ – 3150/30 АВНВС «Modul» (ФРГ) без применения смазывающе-охлаждающих жидкостей.

Направление фрезерования используется встречное и попутное.

Режимы резания при обработке закаленных зубьев следующие:

глубина резания: $t=0,5-0,8$ мм за один проход;

подача фрезы: $S=1,5-3$ мм/об;

частота вращения фрезы: $n=10-20 \text{ мин}^{-1}$;
скорость резания: $V=10-20 \text{ м/мин}$.

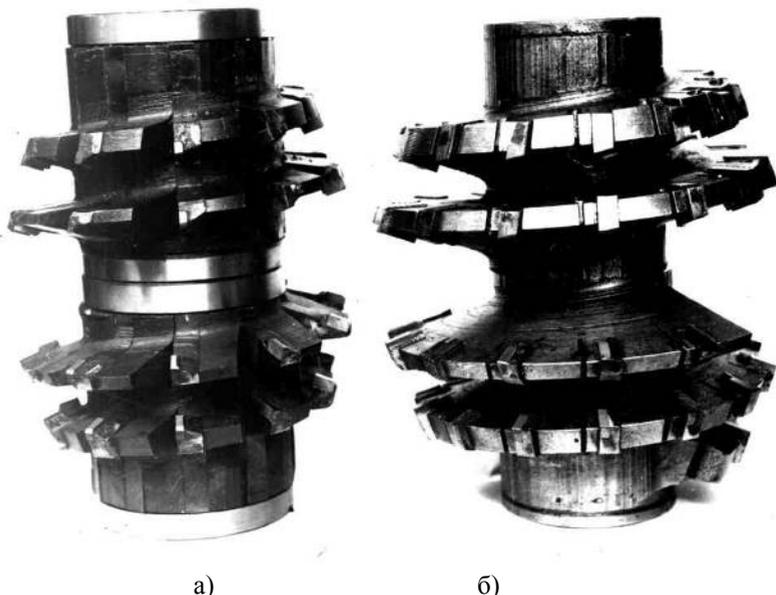


Рис. 6. Универсальные двухкорпусные фрезы одностороннего резания [2]:

а) – со вставными зубчатыми рейками $m=16 \text{ мм}$;

б) – со вставными зубьями $m=20 \text{ мм}$.

В течение 3-х лет было обработано свыше 250 закаленных зубчатых колес под последующие зубошлифование.

Применение фрез позволило устранить деформации зубьев после термообработки и снизить припуск под зубошлифование с 1-2,5 мм до 0,3-0,5 мм на сторону зуба.

Результаты промышленного внедрения технологии лезвийной обработки позволили установить следующее:

- имеющиеся на ЗАО «НКМЗ» зубофрезерные станки мод. 5353, 5В375 позволяют стабильно вести предварительную обработку закаленных колес твердосплавными червячными фрезами новой конструкции;

- разработанные конструкции червячных фрез технологичны и экономичны в изготовлении и эксплуатации;

- достигаемое качество и точность лезвийной обработки достаточны для обеспечения после зубошлифования 6-7-й степени точности колес по ГОСТ 1643-81;

- применение лезвийной обработки позволяет за счет уменьшения припуска снизить трудоемкость малопроизводительных, но дорогостоящих

операций зубошлифования на уникальных станках мод. ZSTZ-2500 и мод. HSS-460 фирмы «МааГ» (Швейцария) в 3-4 раза.

Разработана и освоена технология чистовой лезвийной обработки крупногабаритных зубчатых венцов твердосплавными фрезами специальной конструкции (рис. 9).

Обработка (рис. 10) производится на вертикально-зубофрезерном станке мод. ННА-750А фирмы «Шибaura» (Япония), встречным фрезерованием с применением охлаждающей жидкости – масло индустриальное 20.

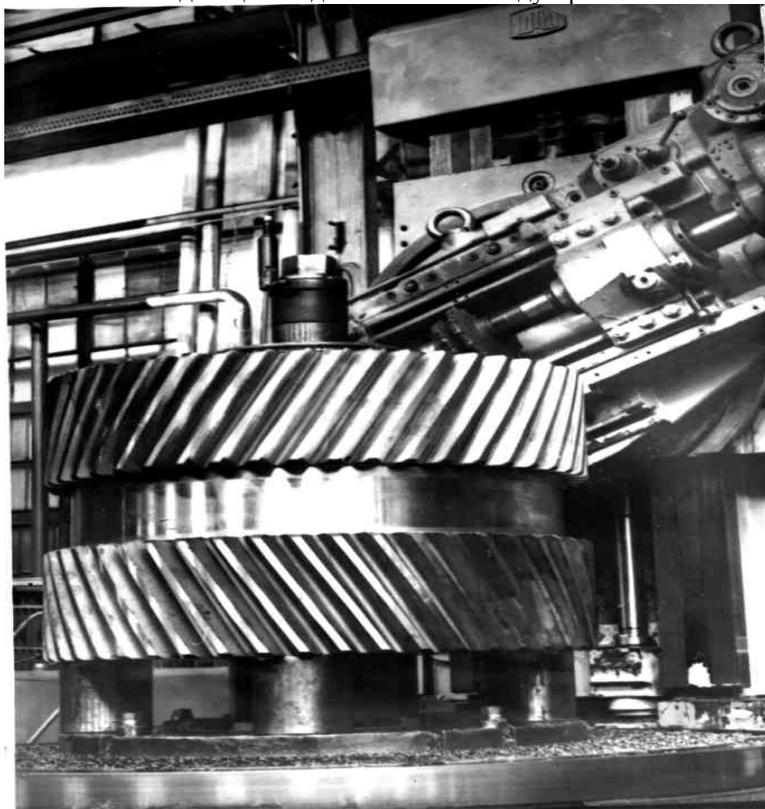


Рис. 7. Лезвийная обработка закаленного шевронного зубчатого колеса $m=28$ мм; $z=48$; $\beta=27^{\circ}26'$; $b=390$ мм; сталь 20ХН3А, $HRC \geq 55$ в редукторном цехе ОАО «НКМЗ»

Чистовое нарезание венца $m=20$ мм; $z_k=268$; $\beta=5^{\circ}15'$; $b=700$ мм; сталь 35ЛПШ, $HV=140-160$ осуществляется за один проход при режимах резания: $t=0,9$ мм; $S=4,72$ мм/об; $n_{фигр}=30$ об/мин; $V_{рез}=32$ м/мин.

Машинное время обработки одного венца составляет 24 часа, что в 1,8 раза меньше, чем при обработке быстрорежущей фрезой конструкции ЗАО «НКМЗ».

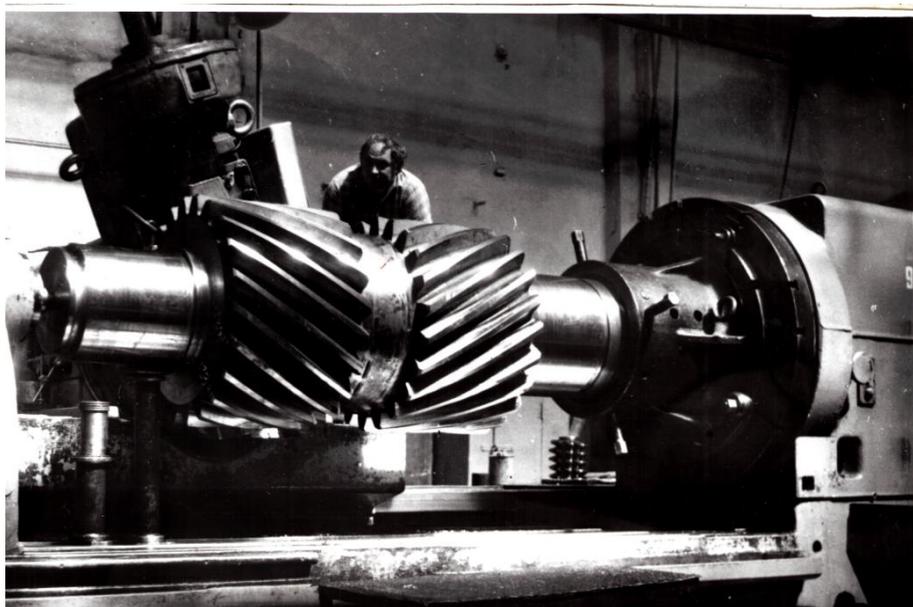


Рис. 8. Лезвийная обработка закаленной вал-шестерни $m=32$ мм; $z=22$; $\beta=28^{\circ}21'$; $b=575$ мм; сталь 20ХН3А, $HRC \geq 55$ в редукторном цехе ОАО «НКМЗ».

Максимальная потребляемая станком мощность составляет 7,6 кВт, что соответствует его загрузке на 26%.

Шероховатость отработанных поверхностей зубьев соответствует $R_a=10$ мкм. максимальная разница в толщине обработанных зубьев между верхним и нижним торцом составляет 0,1 мм.

Заточка и переточка фрез осуществляется на специальном станке-полуавтомате с ЧПУ мод. ВЗ-253Ф2.

Также разработана технология предварительной под зубошлифование обработки закаленных колес червячными фрезами, оснащенными неперетачиваемыми поворотными пластинками.

Освоено изготовление универсальных фрез $m=10-36$ мм одностороннего и двухстороннего резания (Рис. 11), оснащенных пластинками из сплавов ВК10-ОМ, ВК10-ХОМ.

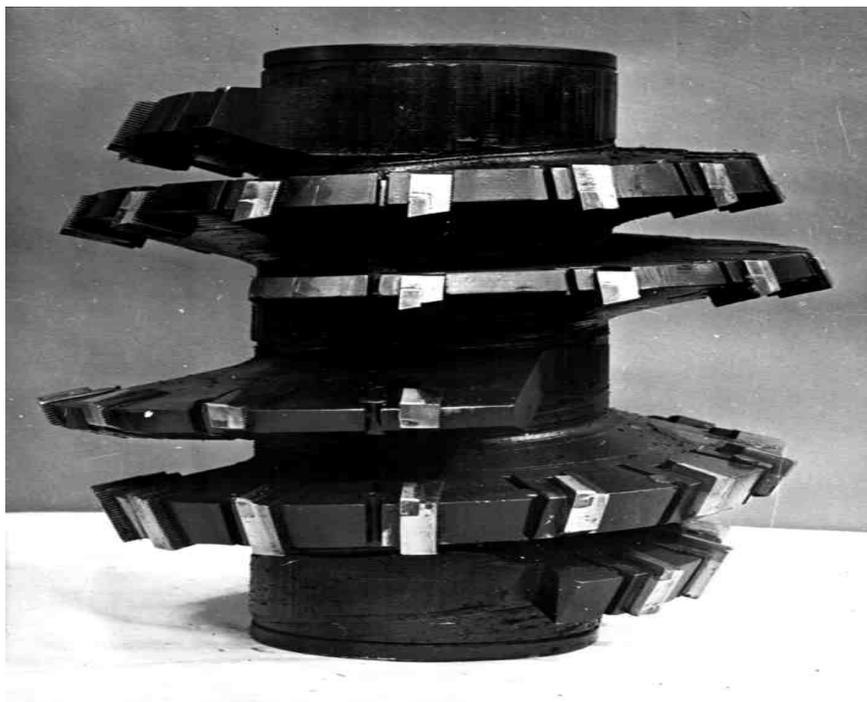


Рис. 9. Специальная червячная двухкорпусная фреза двухстороннего резания $m=20$ мм.

Фрезы одностороннего резания (рис. 11, а) состоят из двух корпусов: левого и правого с конической винтовой нарезкой одного направления.

Каждый из корпусов фрезы, в свою очередь, выполнен из двух одновитковых частей для обеспечения удобства фрезерования гнезд под твердосплавные поворотные пластинки, расположенные из условия тангенциального резания.

Обработка колеса такими фрезами осуществляется за два прохода: вначале левым корпусом обрабатывают левые боковые поверхности зубьев колеса, а затем, после смены корпусов на зубофрезерной оправке, правым корпусом обрабатывают правые боковые поверхности зубьев или наоборот. [2].

У однокорпусной фрезы двухстороннего резания (Рис. 11, б) так же, как и у фрезы одностороннего резания, корпус выполнен из двух одновитковых частей, скрепленных шпильками и гайками, но поворотные твердосплавные пластинки и крепежные винты размещены на обеих боковых поверхностях цилиндрических витков корпуса.

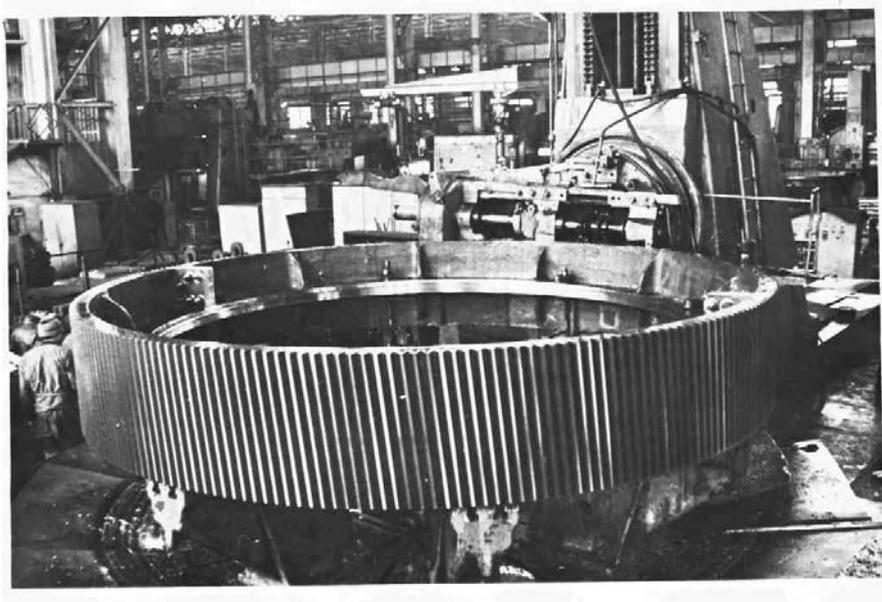
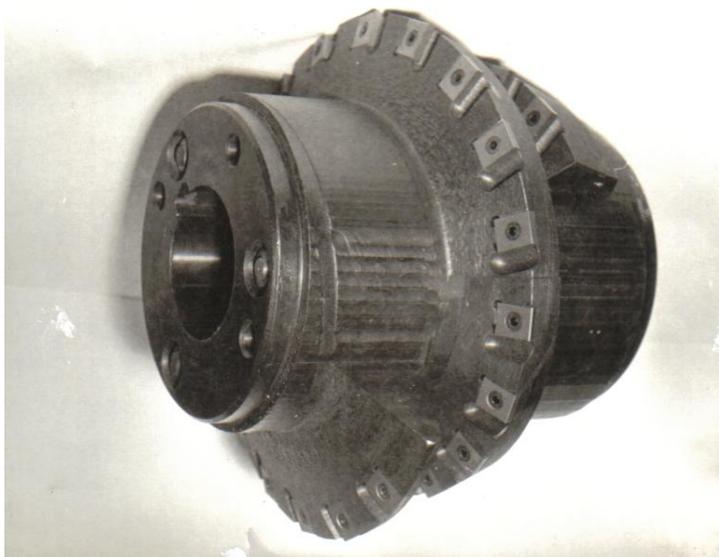


Рис. 10. Чистовое нарезание зубьев венца $m=20$ мм; $z_k=268$; $b=700$ мм на станке мод. ННА-750А.

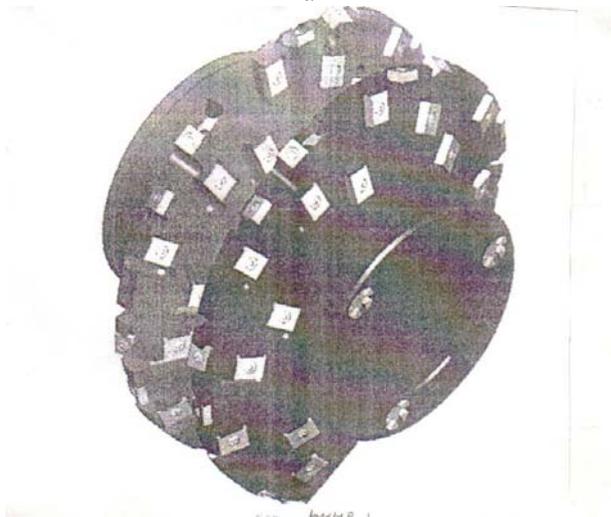
При этом, пластинки располагаются только вдоль линий станочного зацепления инструмента, или в 1÷3 ряда с перекрытием, продлевая, таким образом, боковую режущую кромку. На вершине витков также расположены твердосплавные пластинки, что позволяет производить такими фрезами предварительное формообразование зубьев.

Такая конструкция фрезы [3] позволяет обрабатывать обе боковые поверхности зубьев колеса за один проход, т.е. в два раза производительней, чем фрезой одностороннего резания. Вместе с тем, фреза одностороннего резания более экономична по расходу твердосплавных пластинок, т.к. в диапазоне модулей $m=10-36$ мм для одного корпуса требуется только 29 пластинок.

Большим преимуществом разработанных фрез является то, что в диапазоне модулей $m=10-65$ мм они оснащаются одинаковыми по размерам твердосплавными пластинами, т.е. сняв пластины с фрезы модуль $m=10$ мм можно оснастить ими фрезу $m=65$ мм. При дефиците пластинок это позволяет обработать колеса всего вышеуказанного диапазона модулей и существенно экономить твердый сплав.



а



б)

Рис. 11. Червячные универсальные фрезы, оснащенные неперетачиваемыми поворотными пластинками:

а- правый корпус фрезы одностороннего резания $m=20$;

б- однокорпусная фреза двухстороннего резания $m=20$.

В производственных условиях ОАО «НКМЗ» расчет и проектирование червячных твердосплавных фрез осуществляется в электронном виде с получением твердотельной модели в программе SOLID WORKS. Далее

производится разработка управляющей программы для обработки пазов под тангенциально расположенные пластинки на станке с ЧПУ фирмы «Ferrari» (Италия). Машинное время фрезерования пазов одного корпуса фрезы составляет $T_{\text{маш}}=16\pm 20$ н. час.

Зубофрезерование закаленных колес на станках мод. 5B375 и ZFWZ-3150/30 фирмы «Модуль» (ФРГ) осуществляется без применения охлаждения, встречным или попутным фрезерованием, при следующих режимах резания: $t=0.5\dots 1.5$ мм; $S=1.5\dots 2$ мм/об; $V=0.25$ м/сек.

На станке мод. P1200/1600 (рис. 12) фирмы «Gleason-Pfauter» (Германия) и при оснащении фрез твердым сплавом фирмы «Fette» (Германия) скорость резания увеличивается до $V=0.65$ м/сек.

Стойкость фрез новой конструкции до первого затупления в 1,8...2,0 раза выше, чем у напайных фрез, благодаря тангенциальному расположению пластин, отсутствию в них внутренних напряжений, а также благодаря нанесению на них износостойкого покрытия из нитрида титана.

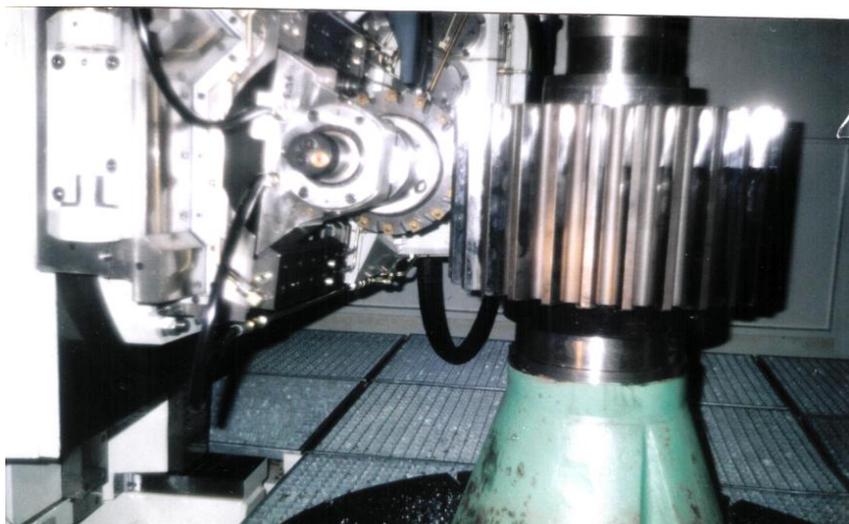


Рис. 12. Предварительная обработка закаленного колеса $m=16$ мм; $z=41$; $\beta=0^\circ$; $b=450$ мм; сталь 20ХН3А, $HRC\geq 55$ на станке «Gleason-Pfauter» (ФРГ).

Применение предварительной лезвийной обработки зубьев закаленных колес разработанными твердосплавными фрезами позволяет снизить трудоемкость малопроизводительных зубошлифовальных операций в зависимости от модуля колес в 3-4 раза.

Твердосплавные червячные фрезы опробованы и внедрены и на других предприятиях, в частности, на таких предприятиях Российской Федерации как ООО «ЮУМЗ» (г. Орск), ОАО «Сибтяжмаш» и ОАО «Крастяжмаш» (г. Красноярск) и др.

Рекомендации по режимам резания твердосплавными червячными фрезами разработаны на основе проведенных лабораторных и производственных исследований с учетом оборудования, материала и твердости обрабатываемых колес, материала режущей части фрезы, и др.

Припуск на толщину зуба для чистого нарезания следует распределять эквидистантно эвольвентной поверхности зуба, а дно впадины обрабатывать в размер при черновом нарезании колес червячными, дисковыми или пальцевыми фрезами с «протуберанцем».

Глубина резания в зависимости от твердости заготовки и вида обработки приведена в табл. 1

Таблица 1

Глубина резания в зависимости от твердости заготовки и вида обработки

Глубина резания на один проход фрезы, мм			
Вид обработки	Твердость зубьев		
	HB 260-320	HRC _э 35-50	HRC _э >50
Предварительная	1,2 – 2,5	0,8-1,2	0,6-0,8
Чистовая	0,8-1,2	0,5-0,7	0,3-0,5

Подача при работе фрезой назначается, исходя из твердости обрабатываемых зубьев и требуемой шероховатости. Величины подач приведены в табл. 2

Таблица 2

Подача при чистовом нарезании зубьев

Скорость резания при чистовом нарезании зубьев м/мин						
Тип станка	Модуль, мм					
	5-10			12-36		
	HB _≤ 320	HRC _≤ 45	HRC _{>} 45	HB _≤ 320	HRC _≤ 45	HRC _{>} 45
Горизонтально-зубофрезерный	30-25	25-20	18-20	15-20	12-15	10-12
Вертикально-зубофрезерный	30-35	25-30	20-25	18-20	12-18	12-10

Указанная шероховатость поверхности зубьев обеспечивается при соблюдении следующих условий: работа на исправном станке соответствующей группы жесткости, жесткое закрепление заготовки, отсутствие вибраций в технологической системе СПИД, правильная заточка фрезы, равномерный припуск.

Скорость резания при чистовом нарезании зубьев назначается исходя из модуля обрабатываемых зубьев, типа зубофрезерного станка и твердости зубьев. Величина скорости резания приведена в табл. 3

Таблица 3

Скорость резания при чистовом нарезании зубьев						
Скорость резания при чистовом нарезании зубьев м/мин						
Тип станка	Модуль, мм					
	5-10			12-36		
	HB ≤32 0	HRC≤4 5	HRC>4 5	HB≤32 0	HRC≤4 5	HRC>4 5
Горизонтально-зубофрезерный	30-25	25-20	18-20	15-20	12-15	10-12
Вертикально-зубофрезерный	30-35	25-30	20-25	18-20	12-18	12-10

Примечание: скорости резания даны для случая жесткого крепления заготовки и резания без вибраций. При наличии вибраций скорость резания следует уменьшить.

Стойкость фрезы при обработке колес диаметром 8000-13000 с твердостью зубьев HB 260-300 не менее 80 часов, а при твердости HRC>35 и диаметре 350-1500 мм – не менее 15 часов. Износ зубьев должен быть при этом не более 0,4-0,6 мм.

В табл. 4 приведен поправочный коэффициент K_v на скорость резания в зависимости от механических свойств режущей части инструмента.

Таблица 4

Поправочный коэффициент K_v на скорость резания в зависимости от механических свойств режущей части инструмента

Материал режущей части (твердый сплав)	K_v
ВК10-ОМ	1
ВК10-ХОМ	1,1
импортный («Fette», ФРГ)	1,5

Список литературы: 1. Ю.В.Тимофеев, А.А.Клочко, В.Ф.Шаповалов, Е.В. Мироненко. Технологические особенности обработки закаленных крупномодульных колес.- Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сборник научных трудов. - Краматорск, ДГМА, вып.26, 2010.- С 183-190. 2. Шаповалов В.Ф., Печеный В.И., Коротун А.Н., Клочко А.А., Михайлов Г.И. О патриархе зубообработки А.К. Сидоренко (к 100-летию со дня рождения). – В сб. Вестник национального технического университета ХПИ, - 2009, №20. с.3-9. 3. Ю.В.Тимофеев, Е.В.Мироненко, А.А.Клочко, В.Ф.Шаповалов, О.Е.Мироненко. Технологические способы повышения точности зубофрезерования универсальными червячными фрезами.- Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні.-Харків: НТУ «ХПІ».- 2010.- №25. - С. 134-141.

Поступила в редколлегию 09.09.10

СОДЕРЖАНИЕ

М.Э. Колесник, Е.В. Набока Разработка системы поддержки принятия решений по выполнению бизнес-процесса.....	3
Н.Л.Шелкунова Г.Я.Андреев – основатель школы индукционно - тепловой сборки - разборки соединений с гарантированным натягом	7
Кондратюк О.Л., Сычев Ю.И., Скоркин А.О. Особенности динамического моделирования формообразующих движений при сверлении глубоких отверстий малого диаметра.....	13
Н.К. Резниченко Основные направления создания энергосберегающих индукционных нагревателей.....	26
В.В. Фролов Разработка элементной базы дискретной оптимизации параметров технологической системы.....	29
А.Я. Мовшович, Г.И. Ищенко, Н.К. Резниченко, И.К. Кириченко Перспективные направления совершенствования и дальнейшего развития высоких технологий в машиностроении.....	34
Э.С. Геворкян, Ю.Г. Гуцаленко, О.М. Мельник Особенности создания высокоплотных композиционных материалов на основе нанопорошков диоксида циркония горячим прессованием.....	43
А.В.Куприянов, Н.Ю. Ламнауэр Аналитическое построение функции плотности распределения годности размеров.....	48
Н.К. Резниченко, О.М. Дубовец Использование дифференцированного принципа при конструировании первичных различных технологических параметров.....	56
Е.В.Мироненко, В.С. Гузенко, Л.В. Васильева, О.Е.Мироненко Оптимизация режимов резания при обработке на тяжелых токарных станках с учетом энергозатрат.....	62
О.О. Волков, Г.Г. Кулик, М.А. Погребной, Ю.А. Сизый Дослідження ролі теплових явищ у формуванні структур та властивостей сталей різних марок при зміцненні методом ТФО	71
А.В. Гайдамака, В.Ю. Алефиренко, М.В. Павлюченко Влияние геометрии маслоудерживающей канавки в гнездах сепаратора со стороны поверхностей трения колец на напряженно-деформированное состояние его конструкции.....	79
А.В. Гайдамака, В.В. Немчик О повышении износостойкости торцевого контакта роликоподшипников.....	83
И.Э. Яковенко, Е.И. Яковенко Синтез структур многоинструментальных блоков при обработке концевым инструментом.....	90
Ю.А. Сизый, А.В. Фесенко, Ю.Н. Любимый Теплонапряженность процесса круглого прерывистого шлифования с Охлаждением.....	94

А.А. Пермяков, А.А. Жижев	
Выбор наиболее производительного метода предварительной механической обработки прокатных валков.....	104
Ю.В. Тимофеев, А.А. Ключко, Е.В. Мироненко, В.Ф. Шаповалов	
Технология обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес твердосплавными червячными фрезами	109

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО

УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"

Збірник наукових праць

Тематичний випуск

Технології в машинобудуванні

Випуск №40

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. № 200-10

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 №456
