

## Серия

### «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии»



#### СОДЕРЖАНИЕ

• **ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ:**

**Василенко Ю.В., Подзолков М.Г., Воронков А.В.** Совершенствование техники подачи СОЖ при шлифовании кругами с аксиально-смещенным режущим слоем  
**Кузин И.В.** Способы базирования и закрепления рабочих лопаток турбины при механической обработке  
**Урядов С.А.** Методика расчетного определения предела выносливости при шлифовании

• **ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТ УПРОЧНЯЮЩЕЙ И ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

**Афонин А.Н.** Напряженно-деформированное состояние инструмента и заготовки при накатывании круглых резцов  
**Белых В.В.** Технологическое обеспечение надежности пар трения землеройной техники  
**Бологов Е.Н., Сокотущенко В.Н., Азаров А.С.** Расчет температурных полей в телах вращения при обработке диском трения  
**Хромов В.Н., Гущина Т.В., Волкова И.** Организация безопасной эксплуатации техники  
**Киричек А.В., Соловьев Д.Л.** Повышение эффективности деформационного упрочнения внутренних цилиндрических поверхностей нагружением пролонгированным ударным импульсами  
**Хромов В.Н., Антипова Е.Н., Мошкин А.А., Храпоничев Д.Н., Трошин Д.Н., Горчаренко В.В.** Восстановление и упрочнение деталей машин и инструмента

• **ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ:**

**Емельянов А.А., Золотарев А.Г., Долженков В.В., Емельянов К.А.** Получение порошка из натурального сока клюквы в вакууме  
**Загрядский В.И., Свидченко С.Ю.** Системы электропривода с торцовыми электродвигателями  
**Корячкин В.П., Масютин Ю.М.** Определение усилия штампования круглой заготовки с учетом реологических свойств материала заготовки  
**Степанов Ю.С., Барсуков Г.В., Михеев А.В.** Моделирование активной границы действия струи при гидроабразивном резании  
**Емельянов А.А., Золотарев А.Г., Долженков В.В., Емельянова К.А.** Исследование режимов выпаривания влаги в вакууме  
**Степанов Ю.С., Барсуков Г.В., Михеев А.В.** Управление процессом гидроабразивного резания хрупких неметаллических материалов на основе изучения условий трещинообразования

• **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ:**

**Киричек А.В., Афонин А.Н., Апальков А.Г., Должиков Д.А.** Моделирование поверхностно-объемного пластического деформирования  
**Крутых О.П., Кириченко Д.В.** Влияние систем сбора и обработки данных в среде графического программирования LABVIEW на управление технологическими процессами в промышленности  
**Польский Е.А., Сорокин С.В.** Концепция автоматизации проектирования деталей, работающих в условиях трения скольжения без смазочного материала  
**Тарапанов А.В., Харламов Г.А., Гордиенко А.П., Полохин О.В., Сухарский Н.Н., Алымов А.В.** Визуализация процесса нарезания зубьев червячных колес

• **ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СИСТЕМЕ МНОГОУРОВНЕВОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ:**

**Морозова А.В.** Содержание и характер труда профессионально-технического класса современной России  
**Климова Н.А.** Концепция исторического образования и использование на уроках истории новых информационных технологий  
**Морозова А.В.** Квалиметрическая оценка уровня социально-профессиональной конкурентоспособности выпускников на региональном рынке труда  
**Рабинович М.И.** О контроле достоверности исходных данных для получения объективных рейтинговых оценок сотрудников и структурных подразделений во внутривузовской системе управления качеством образования  
**Морозова А.В.** Концептуальные основы управления научно-исследовательской и инновационной деятельностью в системе качества профильного вуза

#### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель:  
**Голенков В. А.** д.т.н., проф.  
Зам. председателя:  
**Степанов Ю С.** д.т.н., проф.

**Светкин В. В.** к.т.н. доц.  
**Колчунов В. И.** д.т.н., проф.  
**Гордон В. А.** д.т.н., проф.  
**Константинов И. С.** д.т.н., проф.  
**Садков В. Г.** д.э.н., проф.  
**Фролова Н. А.** к.соц.н., доц.  
**Радченко С.Ю.** д.т.н., проф.  
**Снежко О.А.** к.ю.н., доц.  
**Борзенков М. И.** к.т.н., доц.  
**Одолеева М. В.**  
**Поландова Л. И.**

#### РЕДКОЛЛЕГИЯ СЕРИИ:

Главный редактор:  
**Степанов Ю С.** д.т.н., проф.  
Зам. главного редактора:  
**Подмастерьев К. В.** д.т.н., проф.  
Зам. главного редактора:  
**Киричек А. В.** д.т.н., проф.  
Зам. главного редактора:  
**Константинов И.С.** д.т.н., проф.  
Зам. главного редактора:  
**Гордон В.А.** д.т.н., проф.

Технический редактор:  
**Морозова А.В.** к.с.н., доц.  
Художественный редактор:  
**Кобзева М.С.**  
Компьютерная верстка:  
**Алисова М.В.**

#### АДРЕС РЕДАКЦИИ СЕРИИ:

302030 Россия, Орел,  
ул. Московская, д. 34  
Кафедра ТМиКТИ  
Редколлегия журнала Известия  
ОрелГТУ.  
Серия: «Фундаментальные и  
прикладные проблемы техники и  
технологии»

тел: (4862) 55-55-24, 54-15-03  
факс: (4862) 55-55-24  
e-mail: ti@ostu.ru, upk@ostu.ru

Формат 69×90/8  
Печать ризография. Бумага  
Офсетная. Усл. печ. л – 10.0  
Тираж 500 экз.

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИКИ ПОДАЧИ СОЖ ПРИ ШЛИФОВАНИИ КРУГАМИ С АКСИАЛЬНО-СМЕЩЕННЫМ РЕЖУЩИМ СЛОЕМ**

Ю. В. Василенко, к.т.н., М. Г. Подзолков, к.т.н., А. В. Воронков  
Орловский государственный технический университет  
Орел, тел.(4862) 419877, fax (4862) 419877, E-mail: admin@ostu.ru

## **PERFECTION OF SERVE OF TECHNOLOGICAL LIQUID AT POLISHING CIRCLES WITH THE AXIAL-DISPLACED CUTTING LAYER**

Yu. V. Vasilenko, Ass. prof., M. G. Podzolkov, Ass. prof., A. V. Voronkov  
Oryol State Technical University  
Oryol, tel. (4862) 419877, fax (4862) 419877, E-mail: admin@ostu.ru

*In this article presents a short analysis is conducted some from the existent methods of serve of technological liquid at polishing circles with the axial-displaced cutting layer and the new combined method is offered.*

В нынешних сложных экономических условиях, в которых находится большинство отечественных машиностроительных предприятий, оправданным является сосредоточение усилий на конструкторско-технологическом совершенствовании существующего парка оборудования, что поможет предприятиям поддерживать конкурентоспособность своей продукции с минимальными затратами.

Качество и конкурентоспособность машиностроительной продукции в значительной степени определяются точностью размеров, формы и взаимного расположения поверхностей деталей, а также состоянием их поверхностного слоя (микро- и макрогеометрией поверхности, физико-механическими свойствами), окончательное формирование которых происходит на финишных операциях механической обработки.

Абразивная обработка среди других видов механической обработки и в частности - шлифование, является одним из самых точных и производительных. Объем шлифовальных работ постоянно возрастает, что подчеркивает постоянную динамику развития данного вида механической обработки. В отдельных отраслях промышленности шлифование составляет до 80% всех станочных работ.

Одним из важнейших элементов технологического обеспечения финишных операций механической обработки вообще, абразивной обработки в частности, наряду со станком, приспособлением и режущим инструментом, является смазочно-охлаждающая технологическая жидкость (СОЖ). Так как СОЖ са-

ма по себе не реализует своих целей и функций, то под элементом технологической системы подразумевается СОЖ совместно с системой применения, куда входит оборудование для подачи технологической жидкости к зоне резания и поддержания ее в течение необходимого времени в работоспособном состоянии.

Внедрение некоторых прогрессивных технологических процессов обработки деталей резанием возможно только при использовании высокоэффективных технологических жидкостей (например, силовое шлифование). Обработка деталей из материалов со специальными свойствами и труднообрабатываемых материалов выполняется только с СОЖ. В связи с этим существует важное научное направление, связанное с совершенствованием технологических процессов окончательной механической обработки путем рационального применения СОЖ, которое нашло свое отражение в работах ученых: М. Б. Гордона, В.Ф. Гурьянихина, В. Г. Гусева, В. В. Ефимова, М. И. Клушина, Е. Н. Маслова, Ю. В. Полянскова, П. А. Ребиндера, В. В. Рябова, Ю. С. Степанова, В. И. Туромши, Л. В. Худобина, Г. В. Чиркова, Е. Д. Щукина, П. И. Ящерицына и других исследователей, установивших, что путем такого использования СОЖ возможно снижение износа и засаливания шлифовального круга, увеличение отвода тепла и в целом повышение производительности и улучшение качества обработанной поверхности детали. На данный момент известно более 200 различных способов подачи СОЖ при шлифовании.

В ОрелГТУ в рамках ведомственной научной программы Федерального агентства по образованию «Развитие научного потенциала высшей школы» (2005 г.) был выполнен проект на тему «Совершенствование технологии и технологического оснащения обработки прецизионных деталей путем использования высокоэффективного шлифования с локальным контактом». Одним из результатов проекта стала разработка нового способа подачи СОЖ при шлифовании продольно-прерывистыми кругами с аксиально-смещенным режущим слоем на традиционном шлифовальном оборудовании (плоскошлифовальных станках 3Е710В, 3Е711ВФ1).

Известно, что шлифовальные круги с локальным бегущим контактом снижают теплонапряженность процесса шлифования на 30% и более. Применение СОЖ обеспечивает дополнительное кратное снижение температуры в зоне резания, что позволяет значительно повысить производительность и качество обработки в целом. Однако, в работах [1, 2] показано, что круги с локальным бегущим контактом генерируют более интенсивные воздушные потоки, чем обычные круги формы ПП. Поэтому традиционные способы подачи СОЖ при шлифовании с локальным бегущим контактом малоэффективны. В этой связи ранее нами уже был разработан ряд способов подачи СОЖ учитывающих конструктивные особенности кругов с локальным бегущим контактом [3, 4]:

- ПОДАЧА СОЖ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ В ШПИНДЕЛЕ;
- КОМБИНИРОВАННЫЙ – ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ В ШПИНДЕЛЕ И ПОРЫ КРУГА.

На *рис. 1* представлены способы подачи СОЖ в зону резания через полый шпиндель зазоры между единичными абразивными дисками и поры круга.

При подаче СОЖ через полый шпиндель исключается отрицательное воздействие торцевых и периферийных воздушных потоков, генерируемых шлифовальным кругом. Дополнительное ускорение технологической жидкости под действием центробежных сил при его истечении из отверстий в шпинделе обеспечивают его доставку к зоне обработки. Вслед за осциллирующим движением зоны резания, на обрабатываемую поверхность подаются так же осциллирующие в продольном направлении струи СОЖ, имеющие высокую скорость движения относительно заготовки.

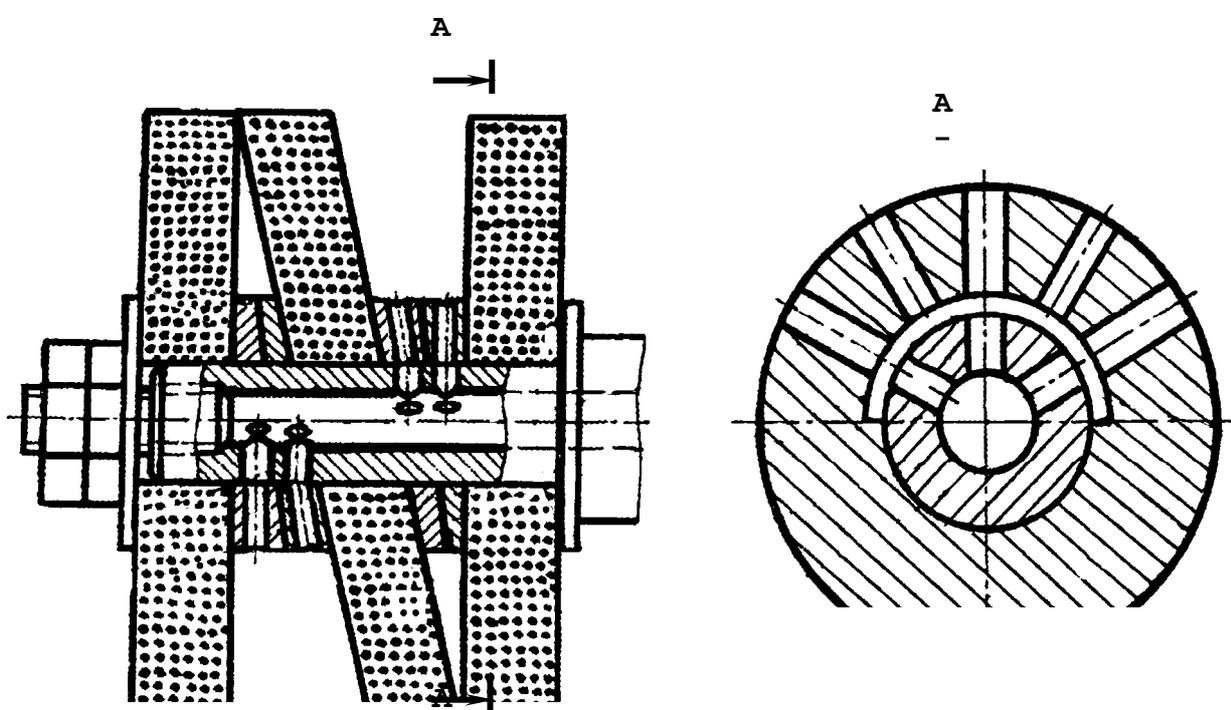
Дополнительная подача СОЖ через поры в круге (*рис. 1, б*) гарантирует ее попадание непосредственно в зону контакта инструмента и заготовки.

Таким образом, осциллирующий характер подачи СОЖ в совокупности с его смазочно-моющим, охлаждающим и диспергирующим действиями значительно снижают вероятность появления прижогов в поверхностном слое обрабатываемой заготовки.

Снижение температуры в зоне резания при шлифовании продольно-прерывистыми кругами позволяет в несколько раз повысить производительность обработки, а следовательно и увеличить металлоъем в единицу времени, следствием чего является значительное увеличение факела отходов шлифования, образующегося за зоной обработки (*рис. 2*). Некоторые из существующих способов подачи СОЖ частично реализуют функцию улавливания отходов шлифования (факела), однако для этих способов функция улавливания является второстепенной и эффективность ее реализации низка [5]. В то же время известно, что факел, образующийся при шлифовании и направлен движущийся из зоны обработки, является основным источником безвозвратных потерь технологической жидкости, источником загрязнений на рабочем месте и может оказывать отрицательное воздействие на качество обработки, так как представляет собой источник твердых частиц, которые повторно засасываются шлифовальным кругом в зону контакта с деталью [5].

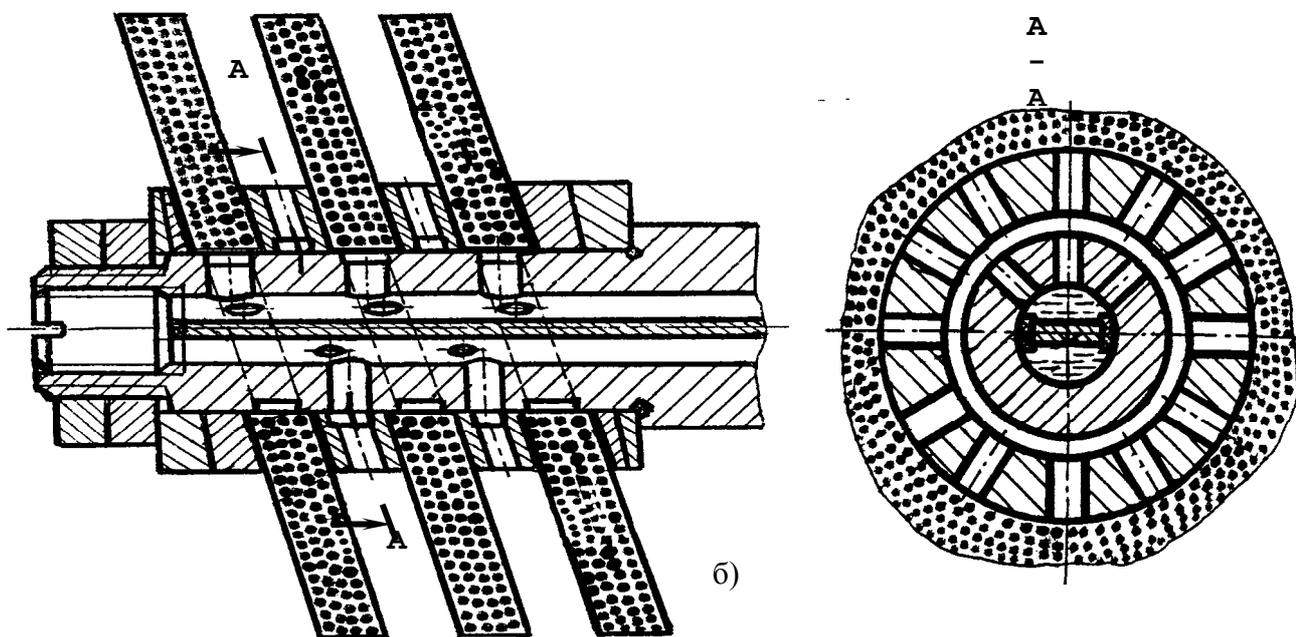
На основании вышесказанного был разработан заградительный способ подачи СОЖ, в котором улавливание факела шлифования придается основное значение и достигается это посредством вертикального расположения сопла для подачи СОЖ за зоной обработки так, что на пути факела создается заградительная штора из жидкости, обеспечивающая его эффективное улавливание. Сущность заградительного способа поясняется устройством, показанным на (*рис. 3*).

При шлифовании детали 10 кругом 2, из зоны обработки 11 направленно движется факел шлифования 12. От трубопровода 6 системы подачи СОЖ станка, через вентиль 7 и соединительную трубу 8, жидкость подают в сопло 9, расположенное за зоной обработки, которое формирует струю СОЖ 13, улавливающую факел шлифования 12. Отработавшая жидкость отводится на очистку посредством дренажной системы 3. Кронштейном 4 и винтом 5 элементы системы подачи СОЖ закреплены на корпусе защитного кожуха 1. Устройство позволяет изменять условия истечения СОЖ из сопла 9 путем изменения геометрических размеров выходного отверстия и давления жидкости в системе вентилем 7.



а)

Рисунок 1 – Конструкции шлифовальных кругов с локальным бегущим контактом



б)

для подачи СОЖ в зону резания через полый шпindel и зазоры между единичными абразивными дисками



Рисунок 2 – Направленный поток шлама (факел), образующийся при плоском шлифовании продольно-прерывистым шлифовальным кругом

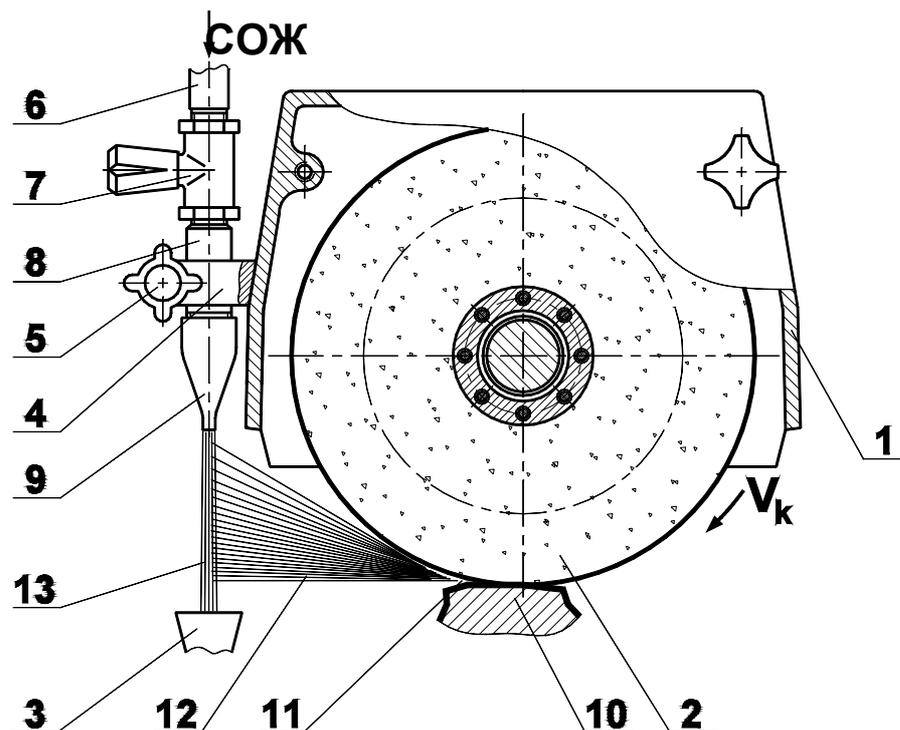


Рисунок 3 – Устройство для реализации заградительного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании

По результатам теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по выбору оптимальных технологических параметров реализации заградительного способа подачи СОЖ (5%-ный раствор эмульсола

НГЛ-205) в зависимости от режимов резания и характеристики элементов технологической системы. Оптимизация параметров улавливания факела шлифования позволяет сократить выбросы аэрозоля СОЖ и абразивно-металлической пыли до 80÷100%, что значительно снижает себестоимость обработки за счет экономии технологической жидкости и улучшения санитарно-гигиенических условий труда.

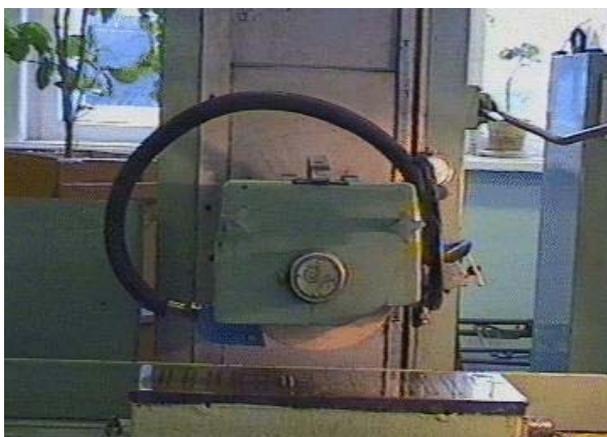
Анализ заградительного способа подачи СОЖ показал, что он инертен к обрабатываемому материалу: металл или неметалл, магнитный или немагнитный материал, а так же типу и составу связки абразивного круга. Может реализовываться самостоятельно или легко комбинироваться с другими способами подачи СОЖ (поливом в зону обработки; поливом на периферию круга вне зоны обработки и др.).

Как уже отмечалось ранее, заградительный способ подачи СОЖ может успешно комбинироваться с другими способами подачи технологической жидкости, что повышает эффективность реализации ее технологических функций. На основании выполненных теоретико-экспериментальных исследований разработана установка внезонной комбинированной подачи (УВКП) СОЖ при шлифовании с бегущим контактом, совмещающая в себе три способа подачи:

- напорной струей на круг вне зоны резания;
- поливом на заготовку вне зоны резания;
- заградительный способ подачи.

Кроме того, сохраняется возможность применения на станке традиционного способа подачи СОЖ – поливом в зону обработки или других способов, использовавшихся ранее.

Общий вид УВКП СОЖ, установленной на станке 3Е711ВФ1, показан на (рис. 4), на (рис. 5) показана модель установки смонтированной на станке 3Е710В, на (рис. 6) приведена модель УВКП СОЖ для использования при шлифовании с локальным контактом, на (рис. 7) приведен эскиз модернизации станка 3Е710В с применением УВКП СОЖ.



а) общий вид,



б) в работе

Рисунок 4 – Устройство внезонной комбинированной подачи СОЖ на станке 3Е711ВФ1

УВКП включает (рис. 7) башмачок 3 с прямой или криволинейной поверхностью, обращенной к периферии шлифовального круга 1 так, что образуется клиновидная полость. Башмачок крепится к боковым стенкам корпуса винтами 19, с возможностью регулирования наклона, для обеспечения оптимального зазора между периферией круга и поверхностью башмачка.

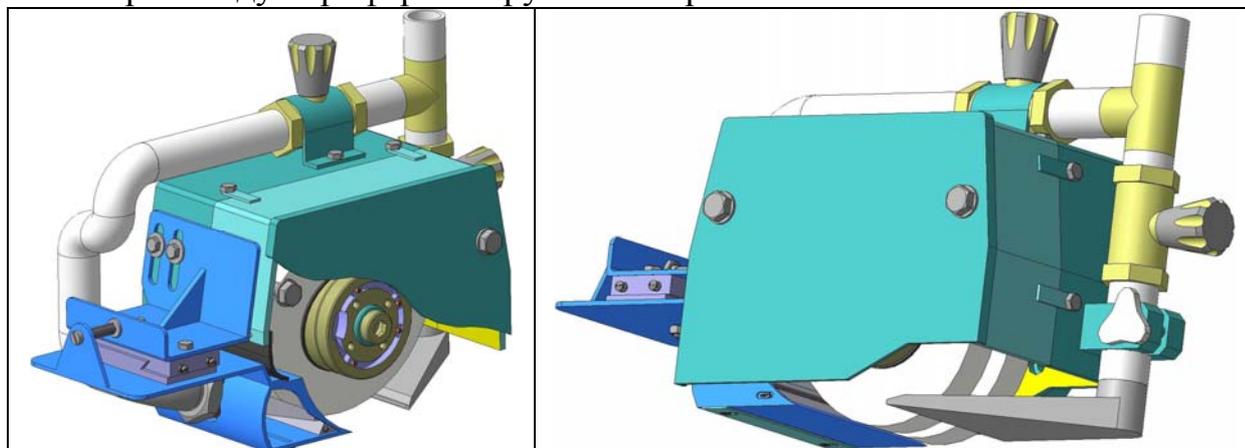


Рисунок 5 – Модель установки внезонной комбинированной подачи СОЖ, установленной на станке 3Е710В

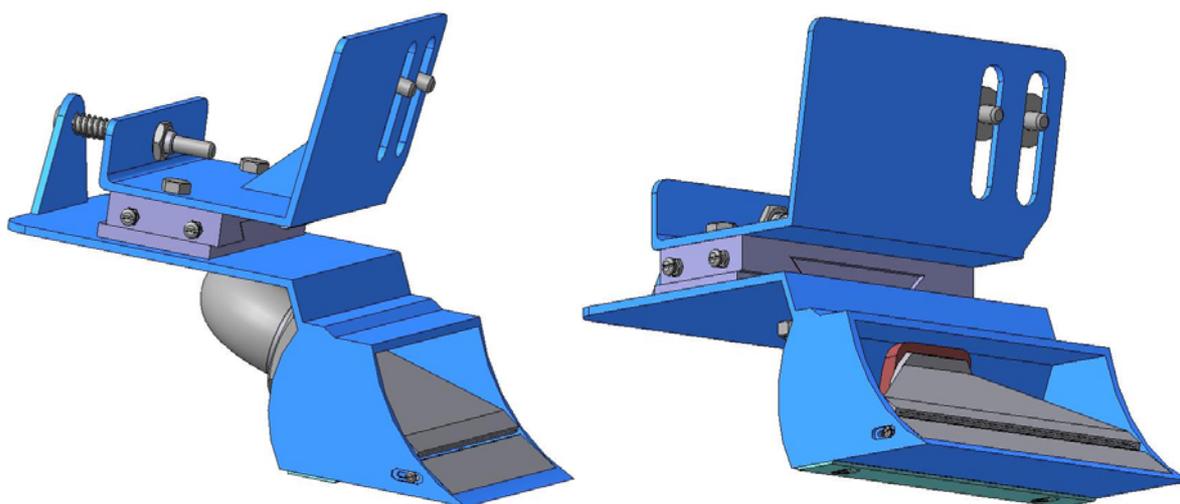


Рисунок 6 – Модель установки внезонной комбинированной подачи СОЖ для шлифования с бегущим контактом

В корпусе установлено сопло 5, имеющее возможность радиального перемещения, для обеспечения заданного угла наклона к поверхности круга 1. Фиксирование сопла осуществляется посредством гайки 21 и сферических шайб внутренней 6 и наружной 7.

Брызговик 14 служит для предотвращения разбрызгивания СОЖ из-под кожуха 16.

Подвод СОЖ к соплу 5 осуществляется при помощи резиновых трубок от гидросистемы станка через тройник. Регулируют напор шаровым краном 29, а контролируют давление жидкости в системе по манометру (не показан).

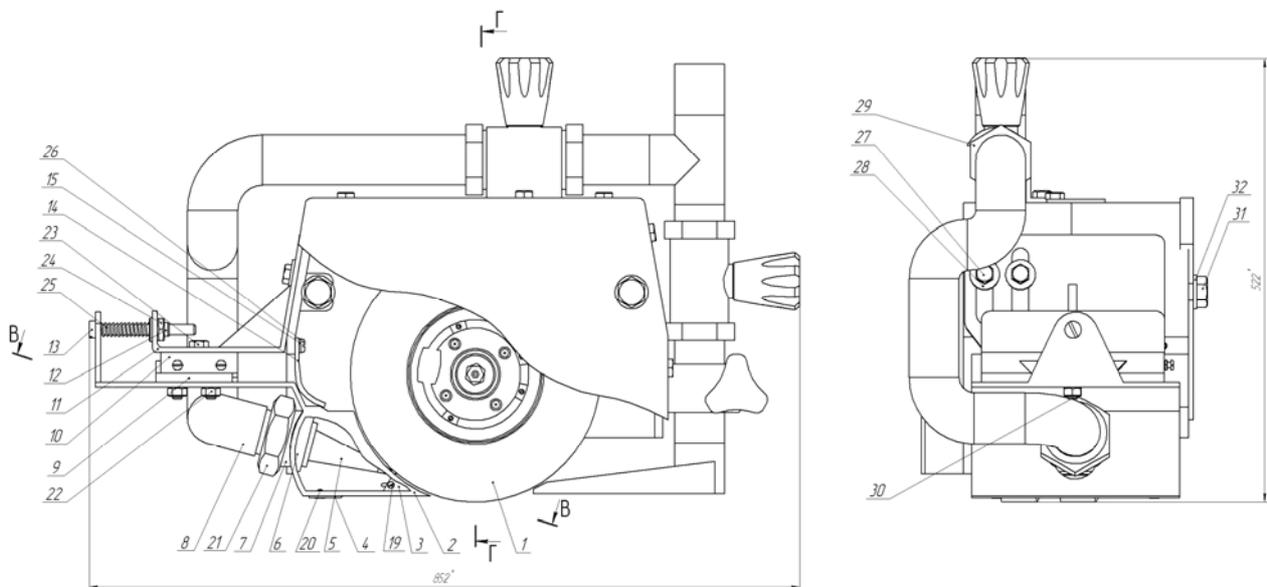


Рисунок 7 - Эскиз модернизации станка 3Е710В с применением установки внезонной комбинированной подачи СОЖ

Подвес установки 11 крепится к защитному кожуху шлифовального круга 1 с помощью крепежных болтов 27, имея возможность перемещаться в вертикальном и горизонтальном направлениях при помощи направляющих 9 и 10 типа «ласточки хвоста», что необходимо для обеспечения плавной настройки положения корпуса установки после правки круга. Для точной установки зазора между башмачком 3 и кругом 1 предназначен винт микрометрической подачи 13, вращающийся во ввертыше 12. Дополнительный натяг в системе с целью выборки зазоров обеспечивается при помощи пружины 25.

В дне корпуса установки расположено щелевое отверстие, толщина которого регулируется планкой прижимной 4 на винтах 20. Отверстие предназначено для отвода отработавшей СОЖ из корпуса установки и образования заградительной шторы из технологической жидкости.

Установка работает следующим образом, как показано на (рис. 8). Башмачок 1 установлен в корпусе установки 8, обеспечивая зазор с периферийной поверхностью круга 2. Оптимальный размер зазора настраивается так, чтобы с одной стороны, отсечь корпусом башмачка периферийные воздушные потоки, генерируемые кругом, а с другой стороны, обеспечить эффективное многократное взаимодействие СОЖ с поверхностью инструмента. В клиновой полости зазора, при попадании струи СОЖ из сопла 3 на круг 2, образуется зона разряжения, что способствует возникновению эффекта кавитации, в результате которой увеличивается моющее действие жидкости и охлаждение инструмента. Увеличению моющего действия также способствует последовательное многократное отражение струи СОЖ от поверхностей круга и башмачка.

После многократного взаимодействия с поверхностью круга, технологическая жидкость теряет первоначальную энергию, выносится кругом из клинового зазора в полость корпуса установки и распыляется там в виде брызг и тумана 6. Воздушно-капельная смесь конденсируется на внутренней

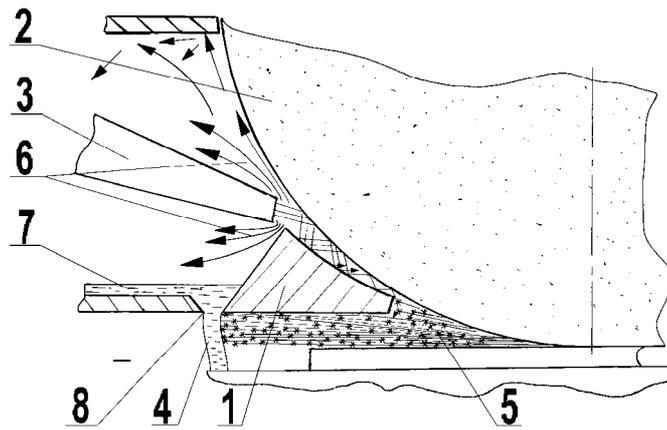


Рисунок 8 – Схема работы установки внезонной комбинированной подачи СОЖ

поверхности корпуса и образовавшаяся жидкость 7 вытекает из установки через щелевое отверстие 8, образуя заградительную штору 4, которая улавливает факел шлифования 5, движущийся из зоны резания. Затем СОЖ частично попадает на обрабатываемую поверхность детали, дополнительно охлаждая и смазывая ее.

За счет такой конструкции и месторасположения установки, обеспечивается эффективная очистка и интенсивное охлаждение шлифовального круга, что ведет к повышению качества обработки. Эффективность действия установки зависит от формы и размера зазора между башмачком и шлифовальным кругом, количества и скорости подачи СОЖ, параметров водяной шторы.

#### Литература:

1. Степанов Ю.С., Подзолков М.Г. Обеспечение качества поверхностного слоя при обработке кругами с продольно-прерывистым аксиально-смещенным режущим слоем // Актуальные проблемы машиностроения: матер. 1-ой междунар. науч.-техн. конф. – Владимир: Владимирский гос. ун-т, 2001. – С. 124-127.
2. Степанов Ю.С., Подзолков М.Г. Исследование процесса абразивной обработки продольно-прерывистыми кругами с аксиально-смещенным режущим слоем // Нетрадиционные методы обработки : сб. научн. тр. междунар. конф. Ч. 1. – Воронеж: Вор. гос. унив. 2002. – С. 84-89.
3. Пат. 2162787 РФ, МКИ 7 в 24 в 55/02. Способ осциллирующей подачи смазочно-охлаждающей жидкости патент / Степанов Ю.С., Афонасьев Б.И., Подзолков М.Г., Бородин В.В. (РФ). - заявл. 07.04.1999; опубл.10.02.2001, бюл. № 4. – 6 с.
4. Василенко Ю. В. Современное состояние техники подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга // СТИН.- 2005. - №5. - С. 19-23.
5. Василенко Ю. В. Прогрессивная технологическая оснастка для подачи СОЖ при абразивной обработке // Орловский государственный технический

университет // Известия ОрелГТУ, Серия «Машиностроение. Приборостроение». – №1–2. – Орел: ОрелГТУ, 2003. – С. 13-15.

УДК 621.44

## **СПОСОБЫ БАЗИРОВАНИЯ И ЗАКРЕПЛЕНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

И.В. Кузин, аспирант

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия  
им. П.А. Соловьёва

152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, тел.(0855) 52-00-91

## **METHODS OF T.BLADES LOCATION AND FIXING FOR MACHINING**

I.V. Kuzin, post-graduate student

Rybinsk state academy of aviation technology

Rybinsk, ph.(0855) 52-00-91

*In the article the following methodes for blades location and fixing are specified: within three points, in the assembly and with fusible alloy in briquette. The advantages and disadvantages of each method are defined.*

Одним из самых распространенных способов базирования рабочих лопаток турбины при механической обработке является базирование в 3-х центрах. При этом заготовка выполняется методом точного литья по выплавляемым моделям с окончательным обеспечением всей профильной части лопатки. С точки зрения работоспособности и надежности работы пера лопаток при высоких температурах литая поверхность с минимальной механической обработкой является благоприятной. Заготовка может иметь литейные базы в виде центровых отверстий или обратных центров. На рис. 1 представлена схема расположения баз в виде обратных центров с параллельными осями на заготовке рабочей лопатки турбины. Каждый из трех центров лопатки лишает ее двух степеней свободы, поэтому при установке заготовки на эти центры ее положение определено однозначно.

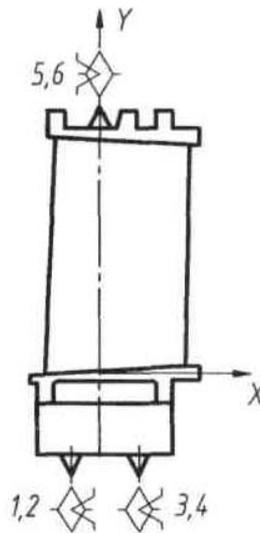


Рис. 1. Схема расположения баз в виде обратных центров с параллельными осями на заготовке лопатки

Полученные в отливке технологические базы в виде обратных центров в дальнейшем используются для создания развитых технологических баз в виде плоских поверхностей. Данный переход необходим для надежного и жесткого закрепления заготовки при ее последующей механической обработке. Кроме того, развитые технологические базы позволяют помещать деталь на установочные поверхности приспособлений, которые имеют необходимую площадь опорной поверхности. Такие поверхности имеют значительный срок службы, т. е. не деформируются при закреплении детали и практически не изнашиваются.

Однако рабочие лопатки турбины имеют разнообразные конструкции, причем далеко не все типы лопаток позволяют осуществлять переход от центров к плоским поверхностям на хвостовике и бандажной полке. Существует большое количество лопаток, имеющих тонкий профиль проточной части. При установке таких лопаток на заготовительные базы в виде фасок происходит деформация базовых поверхностей как при закреплении, так и при обработке. В этом случае технологически целесообразно за счет оснастки создать развитые базовые поверхности. Данная проблема решается при установке и закреплении лопатки в кассетах (рис.2).

Лопатка турбины закрепляется в данной кассете за проточную часть лопатки. Установка осуществляется на установочные и прижимные элементы, выполненные в виде профильных ложементов тех сечений лопатки, в которых расположены ее литейные базы. При установке добиваются полного совпадения установочного элемента приспособления с профилем лопатки в устанавливаемом сечении. После установки деталь закрепляется.

В дальнейшем лопатка переставляется с операции на операцию в этой кассете, устанавливаясь в различных приспособлениях на технологические базы кассеты. Таким образом, один раз установленная и закрепленная деталь из кассеты не вынимается до завершения механической обработки лопатки. Однако у данного способа базирования рабочих лопаток существует множество недостатков:

- в результате износа установочных элементов приспособлений лопатки по профилю пера устанавливаются на площадки, а не точки. В результате нарушается точность ориентирования пера, что в последующем может привести к чрезмерным пространственным отклонениям пера лопатки в рабочем колесе;

- при закреплении на поверхности пера создаются локальные очаги контактных напряжений, что также может привести к нежелательным явлениям;

- использование кассет с механическим креплением детали требует

создания некоторого парка (обменного фонда) приспособлений абсолютно идентичных друг другу. При этом каждая из этих кассет должна обеспечивать полную повторяемость условий закрепления детали по сравнению с предыдущим приспособлением.

На ОАО "НПО"Сатурн" разработана технология изготовления рабочих лопаток турбины, исключая данные недостатки. При этом закрепление детали производится с помощью легкоплавких сплавов в брикет. Лопатка устанавливается в приспособление хвостовиком вверх (рис.3). Установка производится на литейные базы заготовки: три точки проточной части (1, 2 и 3); две точки на входной кромке (4 и 5); и точку на хвостовике со стороны проточной части (6). После базирования деталь прижимают к установочным элементам приспособления винтом, при этом образуется заливочная камера, открытая только сверху (со стороны хвостовика). Совпадение каждого установочного элемента приспособления с базовой точкой на детали подтверждается загоранием соответствующей лампочки.

После подтверждения совпадения всех установочных поверхностей приспособления с базовыми точками заготовки, осуществляется заливка брикета. При этом осуществляется переход от литейных баз к технологическим базам в виде плоскостей брикета: установочной базе в виде наиболее развитой плоскости брикета; направляющей базе в виде боковой поверхности брикета; опорной базе в виде торца.

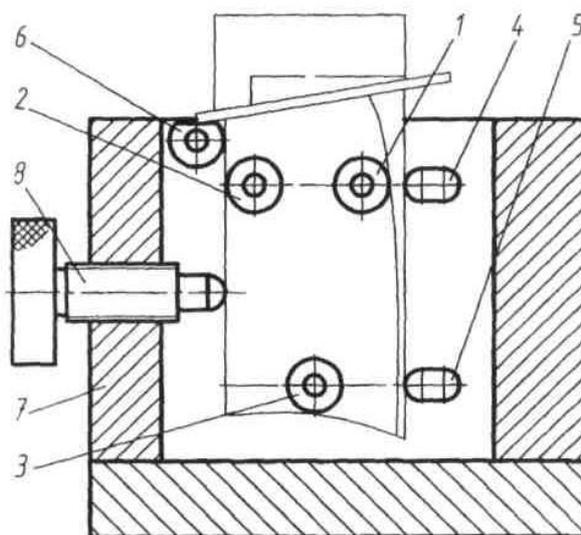


Рис.3. Приспособление для закрепления (заливки) детали в брикет:  
 1...6—установочные элементы приспособления; 7—корпус заливочной камеры;  
 8—винт для прижима направляющей базы детали к установочным элементам 4, 5.

В качестве легкоплавких сплавов рекомендуется использовать следующие:

1. Вi - 50%, Sn 12,5%, Pb - 25%, Cd 12,5%; температура плавления - 68 С, предполагаемая прочность - 2,2 кгс/мм<sup>2</sup>;
2. Вi - 52%, Sn - 48%; температура плавления - 139°С, предполагаемая прочность - 3,4 кгс/мм<sup>2</sup>.

В производстве предпочтение отдается легкоплавкому сплаву №1, известному под названием сплава Вуда. Достоинством сплава №1 по сравнению со сплавом № 2, известным под названием сплава Cerrotu, является то, что он плавится в кипящей воде, а также отсутствие усадки при затвердевании, что присуще и сплаву № 2.

Таким образом, при механической обработке рабочих лопаток турбины, имеющих тонкий профиль проточной части, целесообразно применять заливку лопаток легкоплавким сплавом в брикет. При этом осуществляется переход от литейных баз лопатки к технологическим базам в виде плоскостей брикета.

УДК 621.91

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

С. А. Урядов, аспирант

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

Рыбинск, ул. Пушкина, 57, e-mail: [root@rgata.ru](mailto:root@rgata.ru) (0855) 21-53-03

## **THEORETICAL METHOD OF FATIGUE STRENGTH CALCULATION IN GRINDING**

S. A. Uryadov

Rybinsk State Academy of Aviation Technology

Rybinsk, Pushkina st, 57, e-mail: [root@rgata.ru](mailto:root@rgata.ru) (0855) 21-53-03

*The technological conditions of the machining such as type of a machining, of a tools characteristic, of an allowance and others, in a considerable degree influenced on the fatigue of a parts. In this article the author made a review one of the methods of fatigue strength calculation .*

Механическая обработка (точение, фрезерование, шлифование, полирование и т.д.) вызывает пластическую деформацию, нагрев и структурные превращения поверхностных слоев и сопровождается появлением неравномерных по глубине остаточных деформаций и напряжений. В зависимости от того, какое явление преобладает (пластическая деформация, нагрев или структурные превращения), поверхностный слой может отличаться различными глубиной и степенью наклепа, величиной и знаком остаточных напряжений. Эти параметры, а также шероховатость поверхности, в основном характеризуют качество поверхностного слоя и оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин.

Вопросам механической обработки высокопрочных авиационных материалов посвящено много исследований, на основании которых составлены нормативы оптимальных режимов и геометрических параметров режущего инструмента, но в этих нормативах, как правило, не учено влияние технологических факторов на сопротивление деталей машин усталостному разрушению. В инженерной практике чаще всего регламентируются лишь высотные параметры шероховатости  $Ra(Rz)$ .

Возрастающие требования к качеству выпускаемой продукции, особенно к ответственным деталям ГТД, ставят проблему обеспечения эксплуатационных свойств на основе нормирования параметров качества поверхностного слоя. В связи с этим перспективным представляется подход, при котором на стадии конструкторско-технологической подготовки производства производится нормирование параметров поверхностного слоя, обеспечивающих заданное значение предела выносливости детали. Управляя процессом

обработки, можно получить требуемые значения параметра шероховатости, глубины и степени наклепа, остаточных напряжений, необходимые для обеспечения прогнозируемого значения предела выносливости.

Автором была выведена формула по расчетному определению предела выносливости детали,

$$\sigma_{-1} = \tilde{N} \cdot \frac{\sigma_{-1\dot{E}\tilde{N}\ddot{O}}}{E_{\dot{E}\tilde{N}\ddot{O}}} \cdot \left[ 0,885 \cdot \sqrt{\dot{A}} \cdot \left( 1 + \sqrt{\tilde{A}} + 0,565 \sqrt{\dot{A}} \cdot \ddot{A} \right) \right]^k$$

где  $\tilde{N} = \tilde{N}_1^{k_2}$  и  $k = k_1 \cdot k_2$  - коэффициенты, зависящие от вида материала и метода обработки;

$\sigma_{-1\dot{E}\tilde{N}\ddot{O}}$  - предел выносливости заготовки;

$E_{\dot{E}\tilde{N}\ddot{O}}$  - модуль упругости заготовки;

$\dot{A} = \frac{v_{\dot{A}}^l}{a_{\dot{A}}}$  - критерий Пекле, отражающий влияние режимных условий

( $v_{\dot{A}}^l$ ) и теплофизических свойств обрабатываемого материала ( $a_d$ ) на характер протекания процессов шлифования;

$\tilde{A} = \frac{(\lambda_{\tilde{A}\ddot{O}})_e}{(\lambda_{\tilde{A}\ddot{O}})_{\dot{A}}}$  - критерий, учитывающий теплофизические свойства

детали и круга;

$\ddot{A} = \frac{t \cdot s}{lB}$  - критерий, учитывающий геометрию зоны

шлифования.

Зависимость (1) позволяет определить предел выносливости обработанной детали в зависимости от принятых режимов обработки, параметров режущего инструмента, характеристик обрабатываемого материала и т. п., так как величины, входящие в формулу, являются или паспортными данными материала, или могут быть рассчитаны без проведения экспериментов. На основании этого возможно составление нормативов по определению технологических условий обработки с целью обеспечения заданного значения предела выносливости

Расчет коэффициентов  $C_i$  и  $k_i$  присутствующих в формуле (1), производится по разработанной автором методике .

Определение коэффициентов  $C_1$  и  $k_1$  производится по алгоритму, приведенному на рисунке 1. В качестве исходных данных служат свойства обрабатываемого материала ( $\tau_\rho, \lambda_{\dot{A}}, c\rho, HRC_y$  и др.), свойства абразивного инструмента (геометрические размеры, тип абразива, структура, вид связки, твердость и др.), геометрические параметры зоны обработки, другие технологи-

ческие параметры обработки (тип применяемой СОТС, наличие правки инструмента и др.). В соответствии с исходными данными по существующим зависимостям или рекомендациям, например [1], назначаются режимы обработки ( $V_k, V_{\dot{A}}, S, t$ ). По имеющимся зависимостям определяются необходимые критерии подобия (Б, Г, Д). Определяется составляющая сил резания  $P_z$ . Далее, в соответствии с формулой (7) определяется максимальная поверхностная температура  $\Theta_m$ . По формуле, приведенной на схеме, рассчитываются коэффициенты  $C_1$  и  $k_1$ .

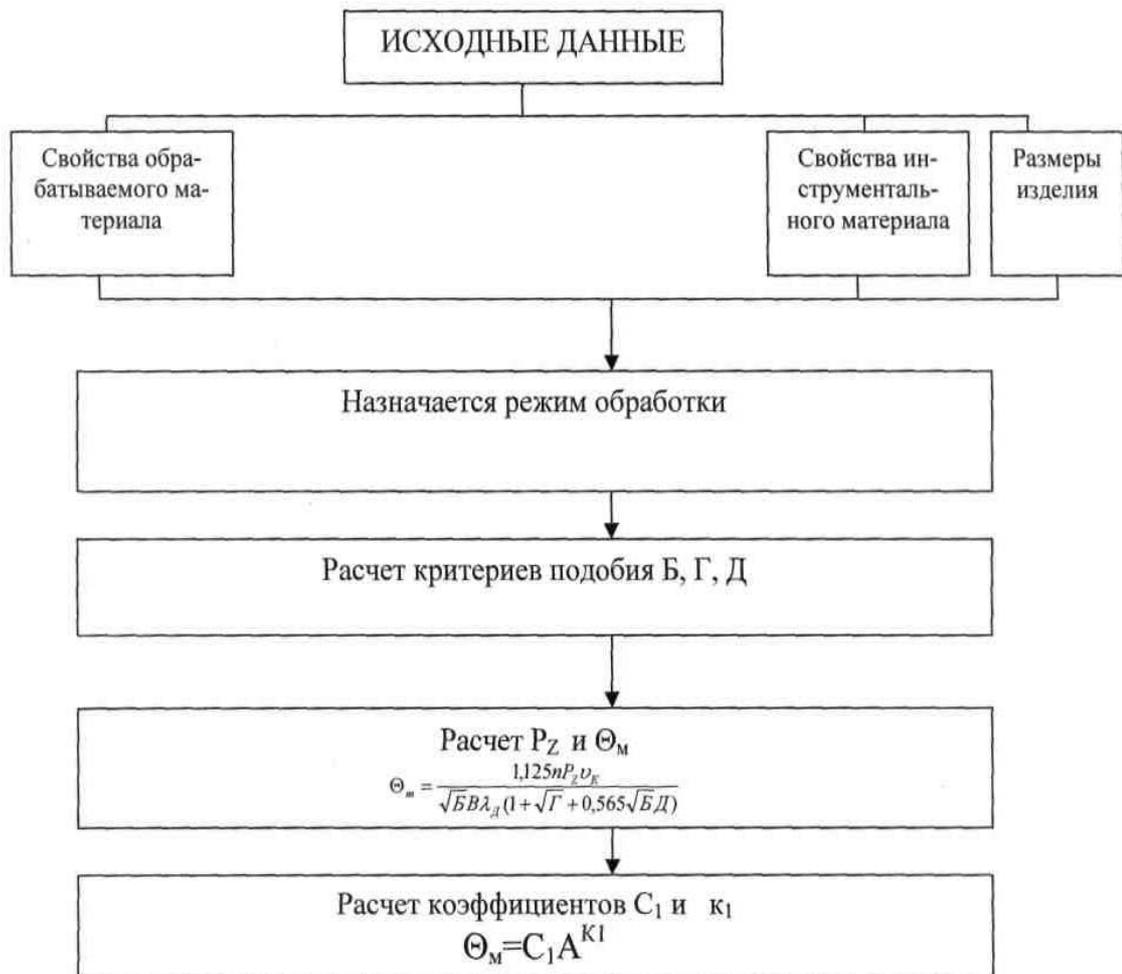


Рисунок 1 – Алгоритм расчета коэффициентов  $C_1$  и  $k_1$

Коэффициенты  $C_2$  и  $k_2$  характеризуют зависимость между модулем упругости  $E$  и температурой в зоне обработки:

$$E_{iAD} = C_2 \cdot \Theta_{DAC}^{k_2}$$

Установлено, что для различных материалов в одной группе данная взаимосвязь имеет идентичный характер [2].

При обработке полученных результатов были установлены математические зависимости модуля упругости  $E$  от температуры в зоне обработки.

Коэффициенты обобщенных зависимостей для материалов разных групп приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Коэффициенты обобщенных зависимостей вида (2) модуля упругости от температуры в зоне обработки

Группа материалов	Коэффициенты	
	$C_2 \cdot 10^3$	$K_2$
Жаропрочные никелевые сплавы	452	-0,15
Титановые сплавы	449	-0,24
Конструкционные стали	612	-0,21

После проведения математической обработки полученных расчетно-экспериментальных данных могут быть установлены зависимости вида (1) между модулем упругости обрабатываемого материала и величиной предела выносливости материала изделия.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. - М.: Машиностроение, 1986. Т.2 - 496 с.
2. Справочник по авиационным материалам / Под ред. А.Т. Туманова. М.: Гос. изд. оборонной промышленности, 1958.

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ ПРИ НАКАТЫВАНИИ  
КРУГЛЫХ РЕЗЬБ**

А.Н. Афонин, к.т.н., доц.

Орловский государственный технический университет  
Орел, тел. (4862)555524, fax (4862) 416684

**MODELLING STRESS-STRAIN CONDITIONS OF THE TOOL AND  
WORKPIECE AT ROLLING ROUND GROOVES**

A.N. Afonin

Oryol State Technical University  
Oryol, tel (+7 4862)555524, fax (+7 4862) 416684

*Researches is stress-strain conditions of the tool and workpiece are made at rolling external round grooves by a method of finite elements.*

Круглые резьбы нашли достаточно широкое применение в промышленности. Они используются как в качестве ходовых (например, в шарико-винтовых передачах), так и в качестве крепежных (например, резьбы по ГОСТ13536-68). Однако, изготовление круглых резьб вызывает существенно большие технологические трудности по сравнению с треугольными или трапецеидальными. В частности, резьбонакатывание, являющееся наиболее перспективным методом обработки резьб, обеспечивающим высокое качество получаемой резьбы при высокой производительности, не нашло широкого применения для получения круглых резьб. Причиной этого является специфическая форма профиля круглой резьбы, создающая неблагоприятны условия для течения металла, что приводит к возникновению значительных сил накатывания и разрушению витков накатываемой резьбы из-за переупрочнения.

Для расширения области применения резьбонакатывания необходимо совершенствования его технологии и конструкции резьбонакатного инструмента. Одним из основных направлений развития резьбонакатывания является совершенствование схемы деформирования, для чего, в свою очередь, необходимо исследование напряженно-деформированного состояния инструмента и заготовки.

Исследования напряженно-деформированного состояния инструмента и заготовки при накатывании круглых резьб до настоящего времени практически не производились. Существующие рекомендации [1] по схеме деформирования при накатывании круглых резьб основаны на производственном опыте. Поскольку экспериментальные исследования локальной пластической деформации при резьбонакатывании весьма трудоемки и дорогостоящи, приоритет должен принадлежать теоретическим методам.

Для исследования напряженно-деформированного состояния заготовки при накатывании треугольных и трапецеидальных резьб в настоящее время наибольшее применение нашел метод линий скольжения [4]. Существенным

недостатком данного способа является то, что он позволяет определять только контактные давления и не имеет возможности выявить распределение полей напряжений и деформаций по всему объему тела. Кроме того, ввиду криволинейной формы поверхности контакта, получение точных формул для определения напряжений при накатывании круглых резьб методом линий скольжения затруднительно.

В последнее время, в связи с развитием вычислительной техники широкое применение для расчета напряженно-деформированного состояния тел нашел метод конечных элементов (МКЭ) [2], разработанный на основе матричных методов расчета механических конструкций. МКЭ несомненно является одним из наиболее перспективных способов исследования пластической деформации при резьбонакатывании [3]. Наиболее важными преимуществами МКЭ, благодаря которым он может быть использован для исследования полей напряжений и деформаций при резьбонакатывании, являются следующие:

- Свойства материалов смежных элементов могут быть различны.

- Криволинейная область может быть аппроксимирована с помощью прямолинейных элементов или описана точно с помощью криволинейных элементов.

- Размеры элементов могут быть переменными.

Однако, он обладает рядом недостатков, свойственных всем численным методам. Одним из наиболее существенных недостатков МКЭ как численного метода является то, что он позволяет получать лишь частные решения для конкретных условий деформации [2]. В то же время, для определения рациональной схемы деформации при накатывании круглых резьб необходимо выявить закономерности влияния параметров процесса накатывания на поля напряжений и деформаций в инструменте и заготовке.

Решить данную проблему можно с помощью построения регрессионных математических моделей напряжений и деформаций в инструменте и заготовке при резьбонакатывании. Для получения массива экспериментальных данных необходимо провести спланированный вычислительный эксперимент по моделированию накатывания круглых резьб с помощью МКЭ, варьируя основные параметры процесса: механические характеристики материала заготовки, геометрию контактирующих тел, текущие и накопленные радиальные обжатия в диапазоне, установленном планом эксперимента. Замена натурального эксперимента вычислительным позволит значительно снизить трудоемкость и стоимость исследований. Адекватность результатов вычислительного эксперимента в некоторых характерных точках факторного пространства необходимо проверить натурными экспериментами по накатыванию круглых резьб и при необходимости скорректировать полученные регрессионные математические модели.

Примером подобных моделей являются математические модели распределения эквивалентных напряжений в инструменте (1) и заготовке (2) по глубине  $H$  соответственно в выступе и во впадине в зависимости от радиального обжатия  $h$  (при варьировании его в пределах 0,05...0,25 мм, материал заготовки – сталь 45, радиус профиля витка 1 мм).

$$\sigma = 470 - 74,4H + 4932,3h - 20389,4h^2 + 33988,3h^3 \quad (1)$$

$$\sigma = 622,8 + 3584,4h - 335,2H - 8828,7h^2 + 29474,6h^3 \quad (2)$$

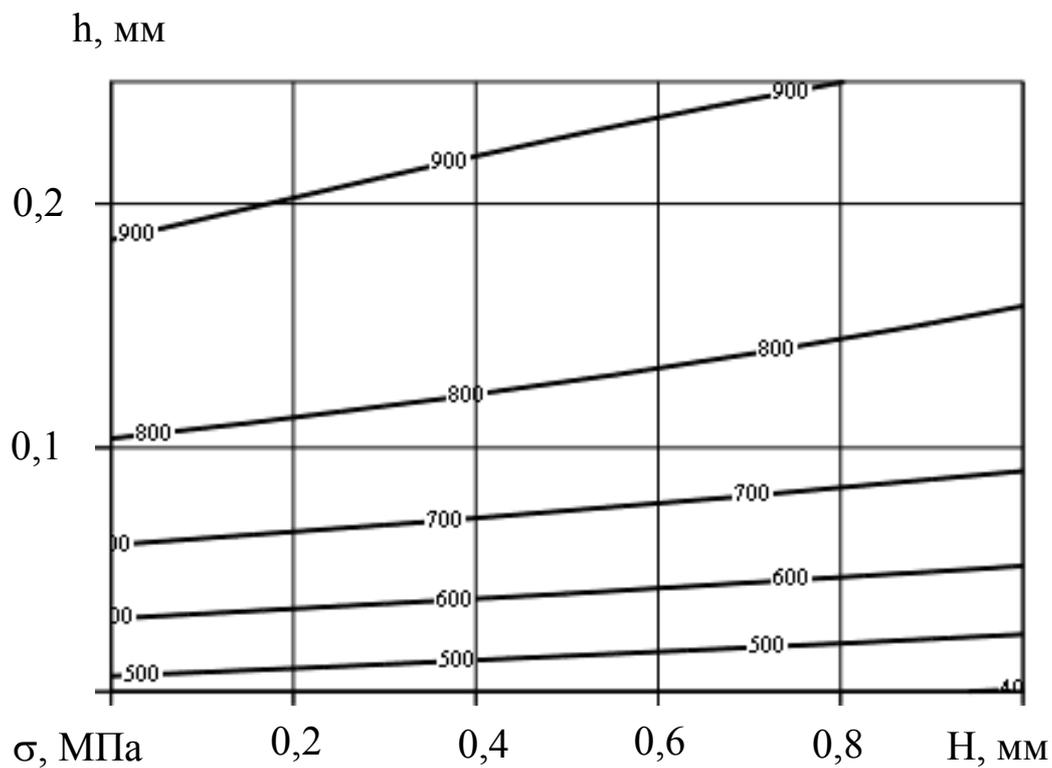
Графики зависимости эквивалентных напряжений в инструменте и заготовке при накатывании круглых резьб от радиального обжатия и глубины рассматриваемого слоя, полученные при расчете по формулам (1) и (2) соответственно, приведены на рисунке 1.

Из данных зависимостей можно сделать вывод о том, что вершина витка инструмента является максимально нагруженной только в начальный момент внедрения его в заготовку. При увеличении радиального обжатия максимум напряжений в инструменте смещается в направлении боковой стороны профиля.

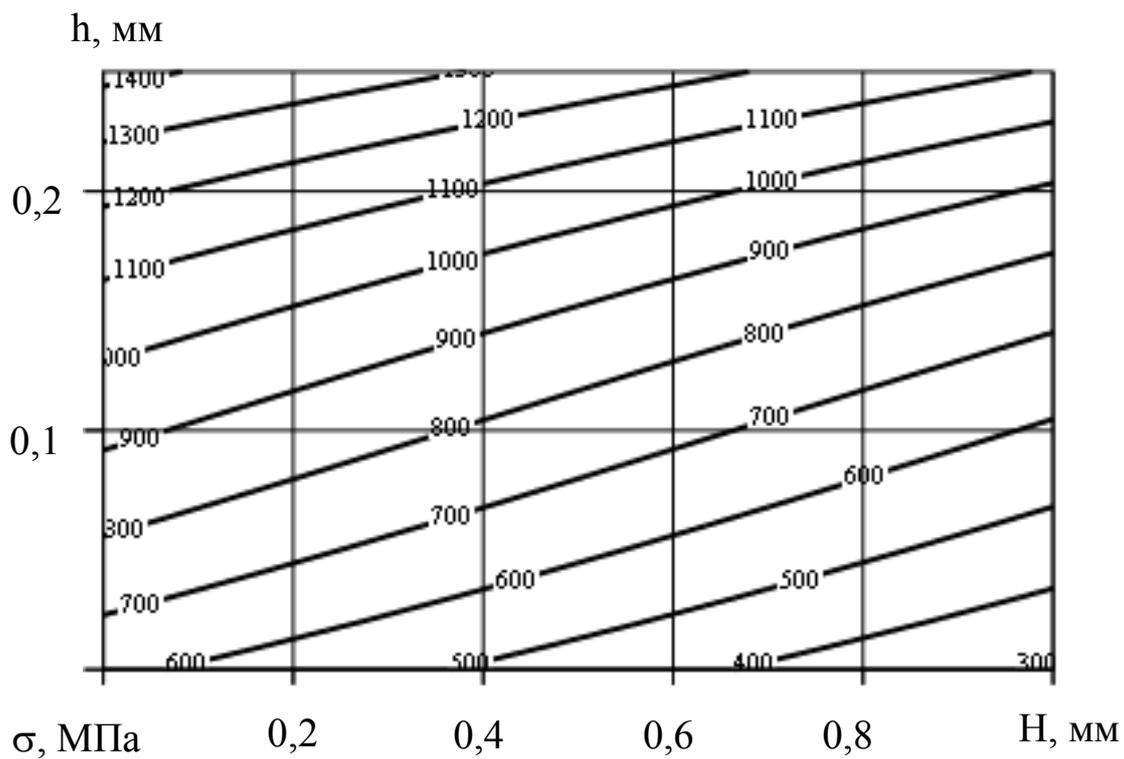
На основании регрессионных математических моделей напряженно-деформированного состояния предполагается создать методику определения рациональной схемы деформации при резьбонакатывании, дающую возможность обеспечить возможность накатывания круглых резьб. Исследования проводятся при поддержке гранта президента Российской Федерации МК-2575.2005.8.

#### Литература

1. Васильчиков М.В., Волков М.М. Поперечно-винтовая прокатка изделий с винтовой поверхностью. - М.: Машиностроение, 1968. - 142 с.
2. Воронцов А.Л. Сопоставление применения метода конечных элементов и аналитических методов решения задач обработки давлением. // Вестник машиностроения, 2003, №4. – С.67-71.
3. Киричек А.В., Афонин А.Н. Перспективы применения методов теоретического расчета пластической деформации для исследования накатывания резьб. // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. 2004, № 1. - С. 32-33.
4. Кузьменко А.Ф. Закономерности распределения контактных напряжений при накатывании резьбы.// Автомобильная промышленность, 2004, №2. – С. 25-28.



а



б

а – инструмент; б - заготовка

Рис. 1. – Зависимость распределения эквивалентных напряжений по глубине от накопленно-го радиального обжатия при накатывании круглых резцов.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ПАР ТРЕНИЯ ЗЕМЛЕРОЙНОЙ ТЕХНИКИ

В.В. Белых, к.т.н., доц.

Ставропольский государственный аграрный университет  
Ставрополь, тел. (8652) 349867, fax (8652) 347345, E-mail:  
[belih@iskra.stavropol.ru](mailto:belih@iskra.stavropol.ru)

## THE TECHNOLOGICAL RELIABILITY CONTROL OF TRIBOLOGICAL SITUATION OF EXCAVATION TECHNICS

V.V. Belih, associate professor, Candidate of Technical Sciences  
Stavropol State Agrarian University  
Stavropol, tel. (8652) 349867, fax (8652) 347345, E-mail: [belih@iskra.stavropol.ru](mailto:belih@iskra.stavropol.ru)

*Few abrasive testers for determination of wear of applying and promising materials with different coatings of dipper teeth have been developed in StGAU. A research result determines, that any previous rubbing of steely primary part, which has different hardness index, with appointed materials chosen for experiments (copper, aluminum, babbitt, fluoroplastic 4), exerted positive influence on wear hardness for the initial period of run.*

Среди множества видов сельскохозяйственной техники, а также техники, входящей в комплекс землеройных машин, своей массовостью выделяется многочисленная группа экскаваторов, имеющих самые различные габариты и мощности. Рабочая (заборная) часть ковша, как и сам ковш, испытывают весьма большие силовые нагрузки, дополненные ударно-механическим воздействием со стороны грунтовых частиц.

Повышенный износ материала зубьев, как показывают наблюдения и практика эксплуатации подобной техники, особенно сильно проявляется в начальные часы работы системы, что связано с процессами упрочнения поверхности контакта с рабочей средой, обусловленными эффектом наклёпа. Поэтому, с нашей точки зрения, следует решить вопрос по повышению надёжности работы зубьев ковша экскаватора именно на начальной стадии эксплуатации, то есть до сглаживания начальных неровностей и частичного доупрочнения поверхностей, непосредственно контактирующих с грунтом. Весьма значительный износ материала зубьев ковша экскаватора именно на начальной стадии работы существенно снижает технический гарантийный ресурс использования техники, а потому превращается в актуальную проблему по поиску путей заметного уменьшения вредного начального воздействия грунта.

Поэтому научные исследования, направленные на анализ работоспособности сложной системы и её моделирования, в первую очередь наиболее ответственных частей экскаватора, имеют целью проверить надёжность техники, выбрать наиболее рациональные конструкторские и технологические решения.

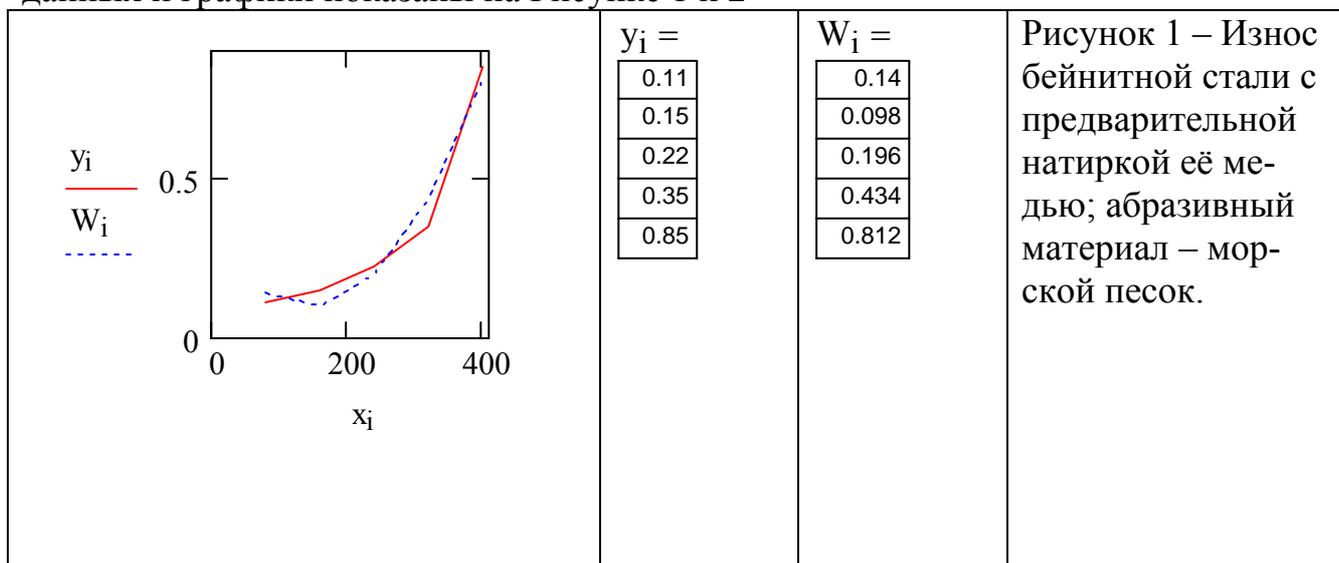
Для более точного моделирования процессов, реально происходящих с ковшом и зубьями экскаватора на практике, были спроектированы стенды таким образом, чтобы одновременно можно было бы исследовать максимально до шести одинаковых или различных вариантов, как с точки зрения применяемых материалов, так и с точки зрения их первоначального упрочнения с целью проверки эффективности технических решений.

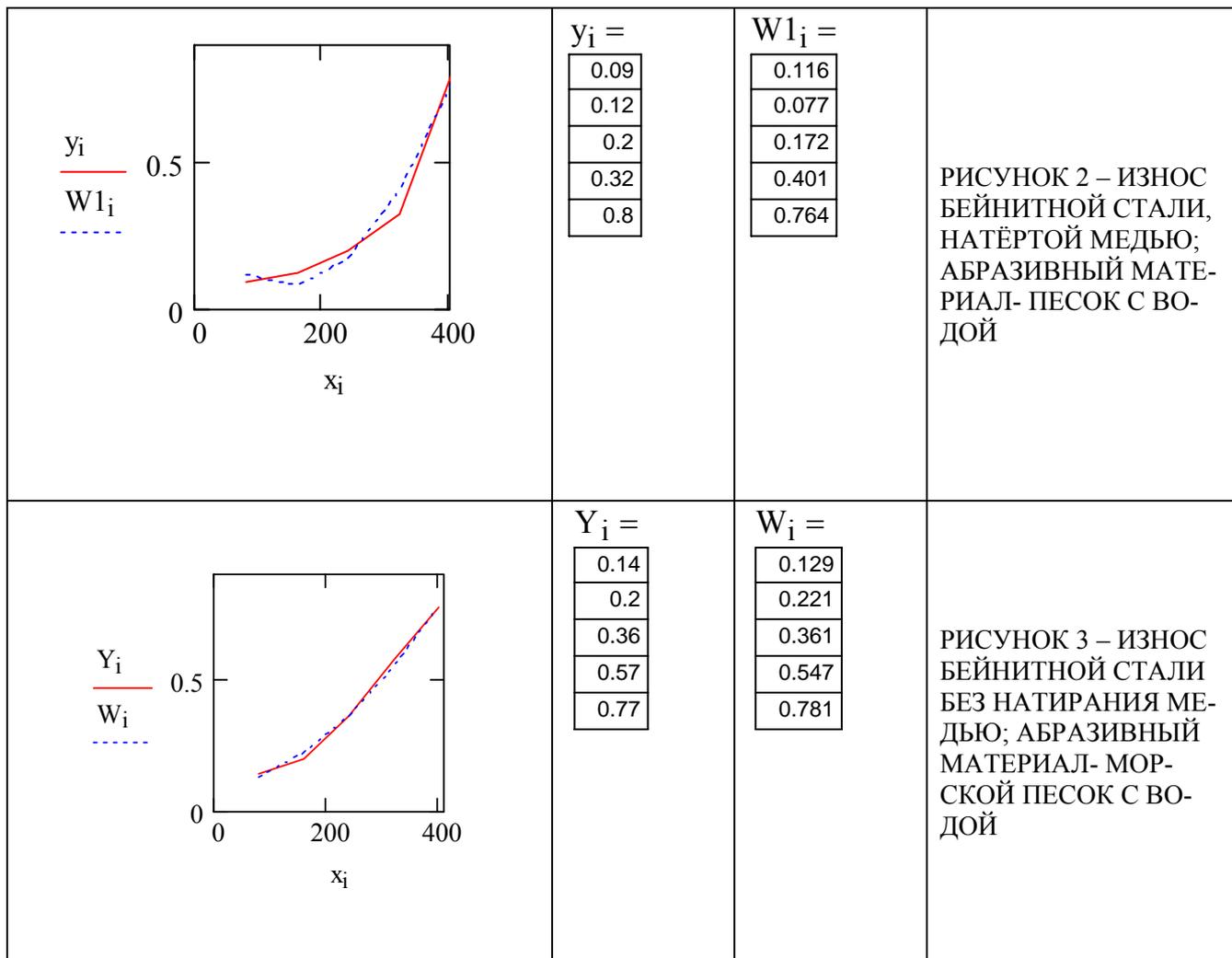
Целью настоящей работы является выбор и исследование эффективного технологического способа повышения надёжности материала [1], используемого для изготовления зубьев ковшей экскаваторов, в частности, на начальном периоде эксплуатации, то есть в период приработки.

Здесь представлены статистические данные об износах исследуемых сталей в различных абразивных средах, а также с натиранием до опытов рабочих поверхностей более мягкими материалами. Математическая обработка выполнялась в программе mathcad [2, 3] для чётного и нечётного числа точек наблюдения. Несмотря на то, что эксперименты были выполнены в лабораторных условиях, их результаты будут полезны для дальнейшего совершенствования технологии изготовления пар трения и не только для землеройной техники, а и для иного механического оборудования. Итоговая числовая информация представлена через косую черту: слева – итоговые результаты с натиркой поверхности конкретной стали более мягкими компонентами, а справа – без использования такого технологического приёма.

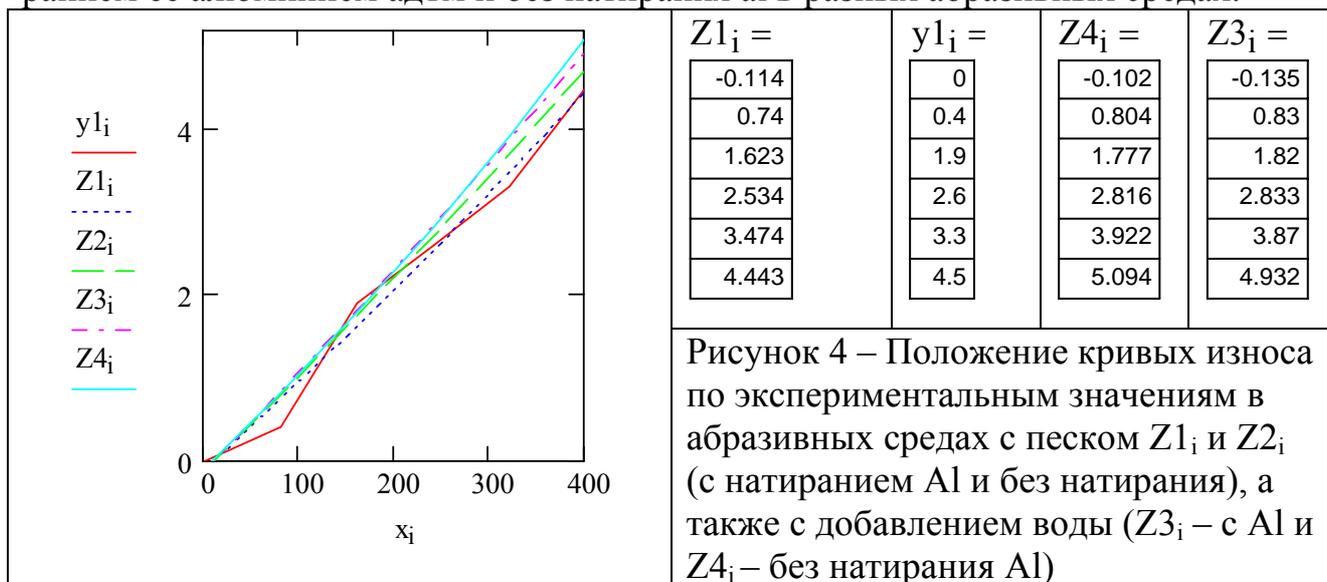
В качестве примера, приводим данные по бейнитной стали (с натиранием медью/без натирания).

Для наработки 80, 160, 240, 320 и 400 часов имеем следующие величины износа: 0,11/0,18; 0,15/0,30; 0,22/0,42; 0,35/0,69; 0,85/0,80. Программа обработки данных и графики показаны на Рисунке 1 и 2

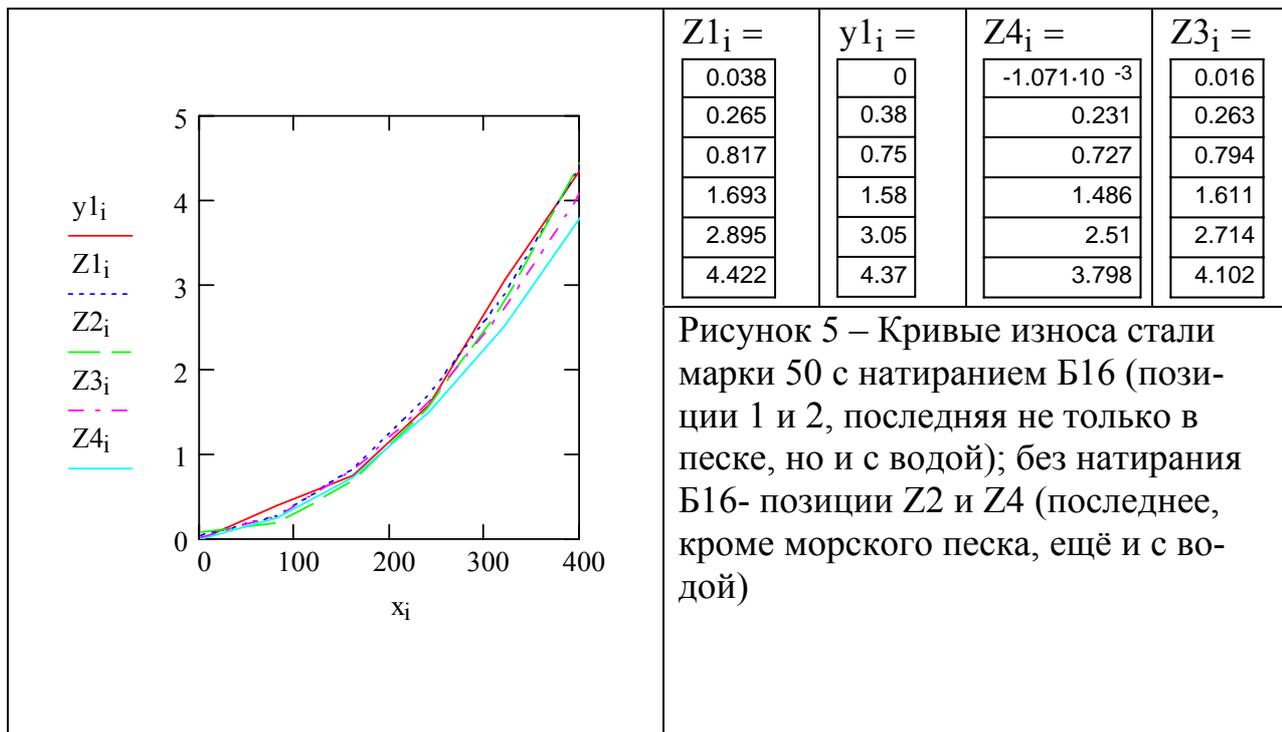




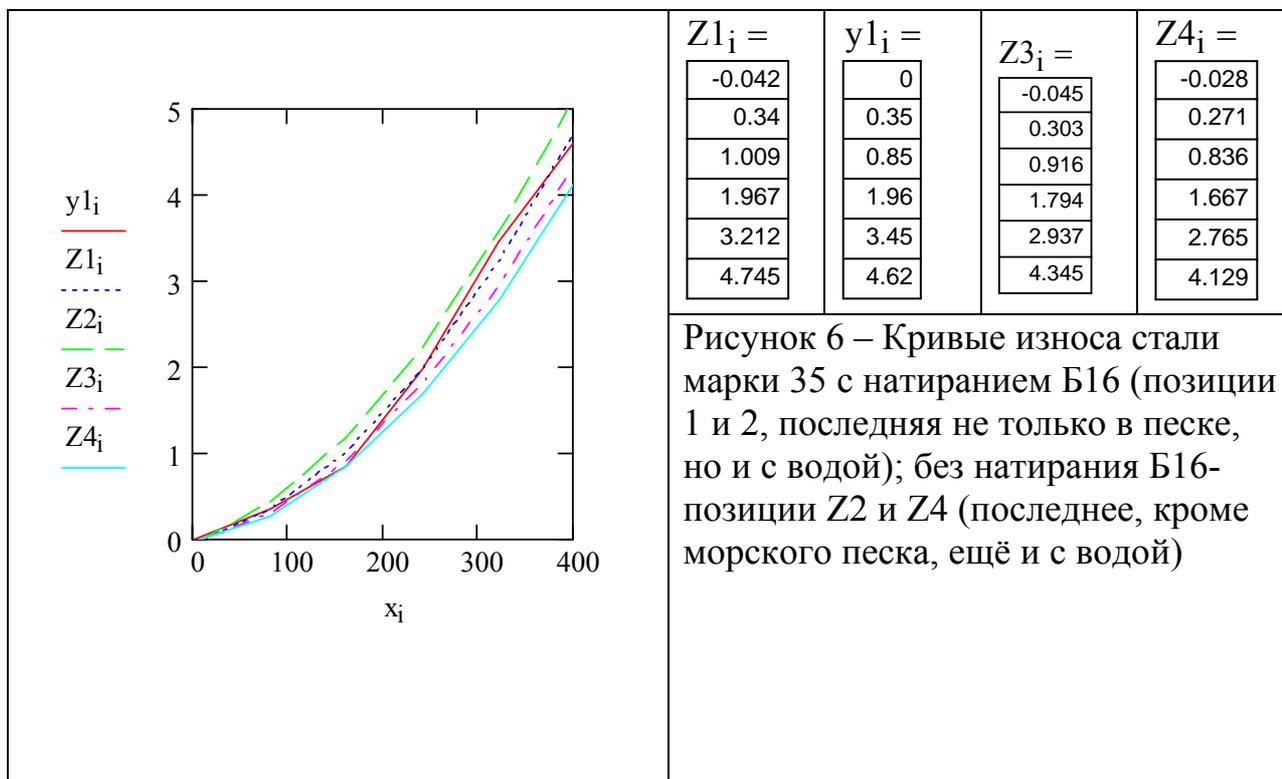
Теперь представим обобщённые данные по износу стали марки 35 с натиранием её алюминием ад1м и без натирания а1 в разных абразивных средах.



Аналогичные сведения по результатам проведённых экспериментов приводятся ниже для стали марки 50 также с натиранием Б16; абразивная среда-песок и песок с водой.

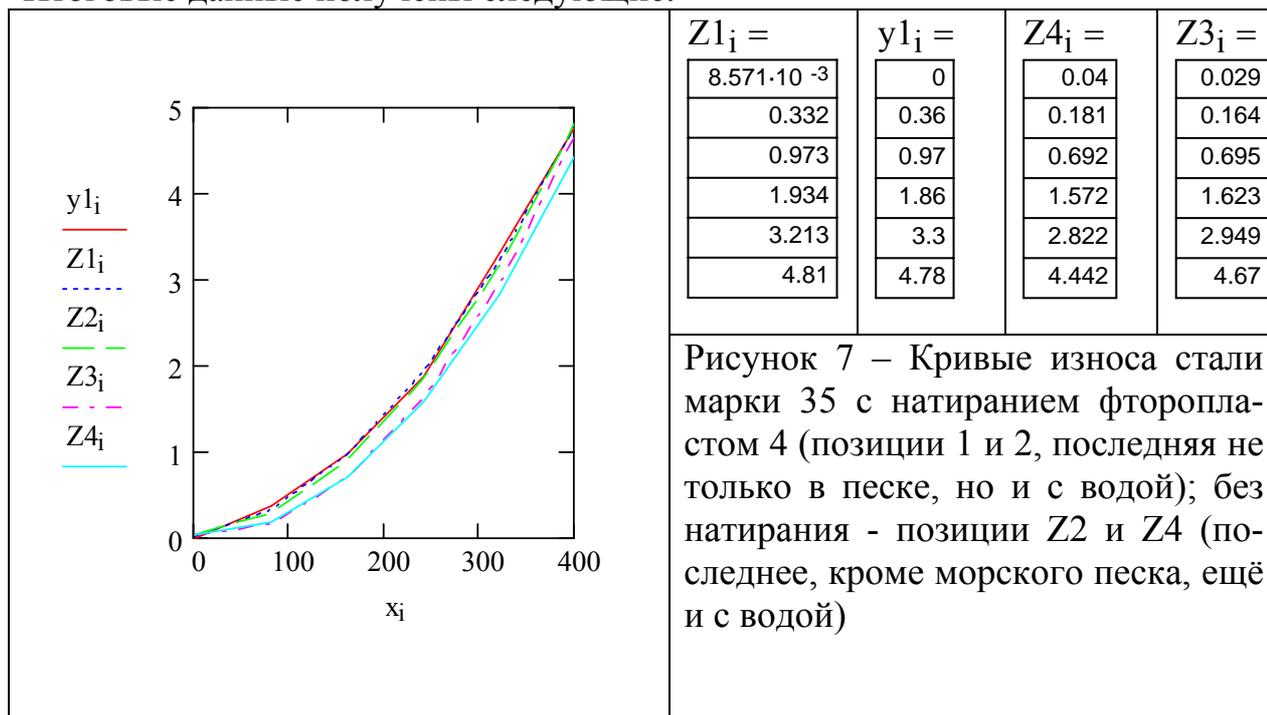


Теперь приведём данные по результатам испытаний выбранных материалов с натиранием их свинцовооловянистым баббитом марки Б16. Сперва для стали марки 35.



Последняя серия опытов была сделана при натирании образцов сталей с помощью фторопласта 4.

Итоговые данные получены следующие.



Из приведённой обширной информации можно заключить следующее.

Практически, любое предварительное натирание исходных стальных заготовок, имеющих различную твёрдость, с помощью выбранных для экспериментов проверок оказывает положительное влияние на износостойкость. Этот эффект сохраняется только до тех пор, пока не будет полностью изношен нанесённый слой. Очевидно, что повторное нанесение компонентов мягких материалов также могло бы способствовать большей надёжности работы деталей в последующей эксплуатации. Износостойкость медного покрытия и алюминиевого дают близкие по износу результаты, также как и покрытия свинцовооловянистым баббитом и фторопластом 4. При длительной эксплуатации доминирующей останется структура из более твёрдого материала с позиции износостойкости. Практически во всех случаях отмечена позитивная роль наличия воды в абразивной среде, снижающей величины наблюдаемых износов у исследованных марок сталей.

#### Литература

1. Зорин В.А. Основы работоспособности технических систем: Учебник для вузов / В.А. Зорин. М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005. – 536 с.
2. Плис А.И., Сливина Н.А. MathCad 2000 математический практикум для экономистов и инженеров. М., «Финансы и статистика», 2000. – 656 с.
3. Дьяконов В. Mathcad 8/2000. Специальный справочник. СПб-Москва-Харьков-Минск, «Питер», 2001. – 592 с.

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ТЕЛАХ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДИСКОМ ТРЕНИЯ

Е.Н. Бологов, к.т.н., доцент, В.Н. Сокотущенко, А.С. Азаров  
Орловский государственный технический университет

Орел, тел. (4862) 555524, E-mail: [ebologov@yandex.ru](mailto:ebologov@yandex.ru)

## CALCULATION OF TEMPERATURE FIELDS IN BODIES OF ROTATION AT PROCESSING BY THE DISK OF FRICTION

E.N.Bologov, V.N.Sokotushchenko, A.S.Azarov  
Oryol state technical university  
Oryol, tel. (4862) 555524, E-mail: [ebologov@yandex.ru](mailto:ebologov@yandex.ru)

*In clause calculation of temperature fields in bodies of rotation is considered at processing by a disk of friction. The three-dimensional problem is solved Green's by method.*

Фрикционно-упрочняющая обработка (ФРУО) является новым видом технологии упрочнения, обеспечивающим заданные параметры качества поверхностного слоя. При обработке дисками трения происходит поверхностная закалка обрабатываемой детали. Глубина и степень поверхностной закалки зависят от распространения тепловых полей в поверхностном слое детали, которые в свою очередь зависят от технологических режимов обработки.

Рассмотрим процесс обработки детали диском трения (рис. 1). Цилиндр-деталь длиной  $l$ , радиуса  $R$  вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . При этом тело  $A$  – диск трения перемещается по образующей цилиндра с постоянной скоростью  $V$ .

Относительно неподвижной системы координат  $Oz$ , скорость движения детали по оси  $Oz$  равна нулю (происходит только вращение). Для учета движения тела  $A$ , необходимо ввести подвижную систему координат  $O'z'$ , связанную с телом  $A$  (рис. 1). Тогда  $z = z' + Vt$  и  $\dot{z} = \dot{z}' + V$ . Но скорость детали  $\dot{z} = v_z$  относительно неподвижной системы координат  $Oz$  равна нулю, поэтому  $\dot{z}' = -V$ . При этом, поскольку  $V = \text{const}$ , то можно считать, что происходит движение детали со скоростью  $V$ , а тело  $A$  неподвижно относительно  $Oz$ . Тогда связывая с движущимся цилиндром систему координат  $Ox$  ( $0 \leq x \leq l$ ), имеем  $z = x + Vt$ , (рис. 1), следовательно  $z' = x$ .

Уравнение теплопроводности в неподвижной системе координат  $O'z'$  имеет вид:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{1}{\tau_r} \frac{\partial T}{\partial t} = V_\tau^2 \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z'^2} \right] + \frac{1}{\lambda \tau_r} \left( 1 + \tau_r \frac{\partial}{\partial t} \right)^2 (q_r v_r + q_\varphi v_\varphi + q_{z'} v_{z'}) \quad (1)$$

Используя преобразование координат  $z' = x$ :

$$v_{z'} = \dot{z}' = -V,$$

$$T(r, \varphi, z', t) = T(r, \varphi, x, t),$$

уравнение теплопроводности примет вид:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{1}{\tau_r} \frac{\partial T}{\partial t} = V_\tau^2 \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] + \Phi(r, \varphi, x, t), \quad (2)$$

где

$$\Phi(r, \varphi, x, t) = \frac{1}{\lambda \tau_r} \left( 1 + \tau_r \frac{\partial}{\partial t} \right)^2 (V_r q_r + \omega R q_\varphi - V q_x),$$

$V$ ,  $\omega$  – соответственно скорость движения обрабатывающего инструмента (тела  $A$ ) и угловая скорость движения обрабатываемой детали.

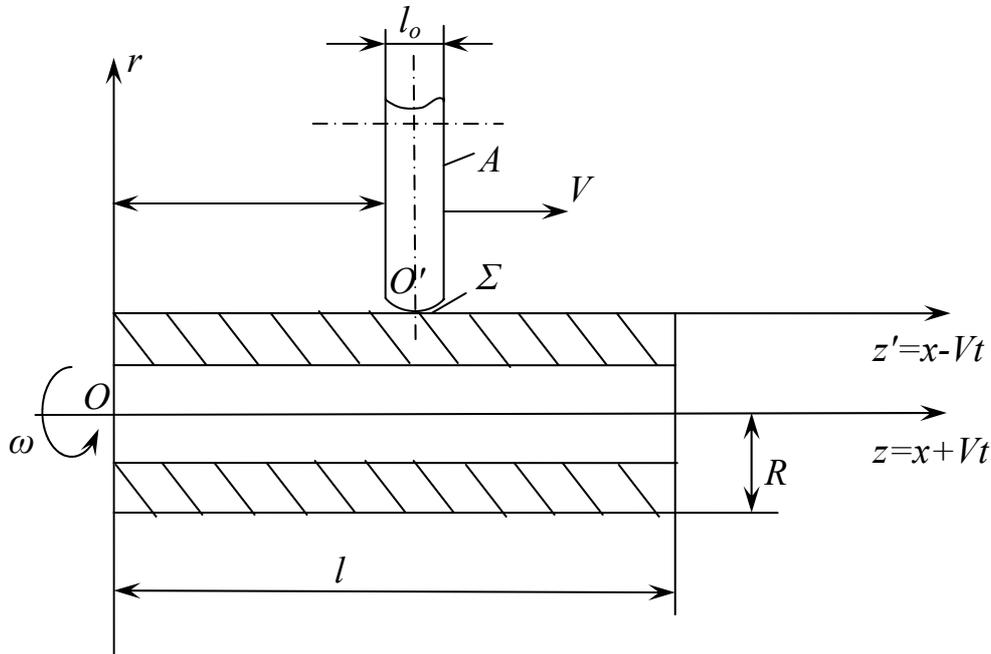


Рис. 1 Схема движения инструмента по обрабатываемой детали

Если учесть величину деформации поверхностного слоя, то скорость  $V_r$  можно вычислить и считать известной.

Далее зададим компоненты плотности вектора потока тепла  $q_{r,\varphi,x} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$  в

зоне контакта тела А с движущейся втулкой (рис. 2).

Для упрощения решения форму пятна контакта в виде эллипса заменяем на прямоугольную, причем большая ось эллипса своей длины не меняет. Тогда площадь пятна контакта равна:  $\Delta\Sigma = R\varphi_0 l_0$ , где  $\varphi_0$ ,  $l_0$  – соответственно угловой и линейный размеры пятна контакта. Если известны размеры обрабатываемого инструмента (тела А), то  $l_0$  и  $\varphi_0$  можно также считать известными.

Компоненты теплового потока на границе втулки  $\Sigma$  ( $r = R$ ) задаются в виде:

$$q_{r,\varphi,x} = \frac{N_{r,\varphi,x}(\varphi, x, t)}{R\varphi_0 l_0} \left[ 1 - H\left(\varphi - \frac{\varphi_0}{2}\right) + H\left(\varphi - 2\pi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \right] \times \\ \times \left[ H\left(x - l_1 + \frac{l_0}{2} + vt_0\right) - H\left(x - l_1 - \frac{l_0}{2} + vt_0\right) \right] [1 - H(t - t_0)], \quad (3)$$

где  $H(c) = \begin{cases} 0, & c < 0 \\ 1/2, & c = 0 \\ 1, & c > 0 \end{cases}$ , - функция Хевисайда;

где  $N_{r,\varphi,x}$ , [Вт] – мощность теплового потока в зоне контакта,

$\varphi_0, l_0, t_0$  - соответствующие размеры зоны контакта и время контакта;

$v$  - скорость движения контактирующего тела (диска трения) вдоль детали.

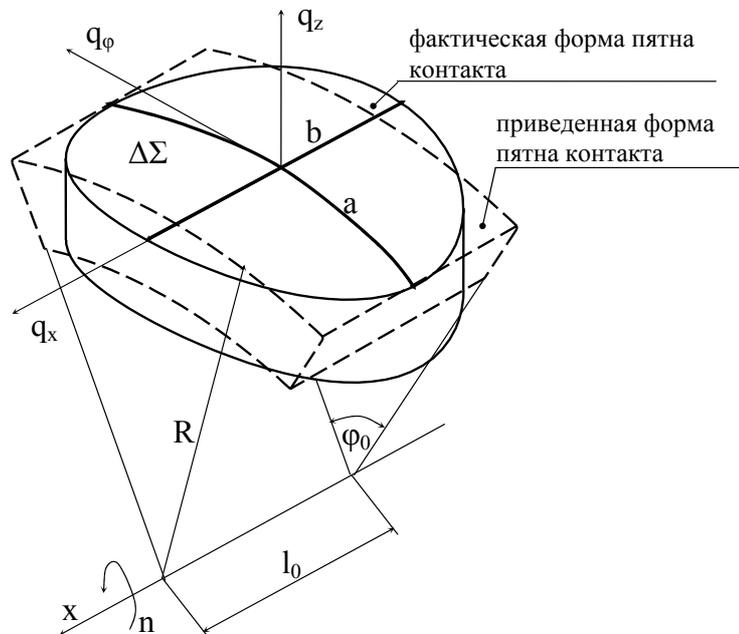


Рисунок 2 - Элемент цилиндра в зоне поверхностного контакта

Таким образом, решается смешанная краевая задача для неоднородного уравнения теплопроводности гиперболического типа:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{1}{\tau_r} \frac{\partial T}{\partial t} = V_\tau^2 \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] + \Phi(r, \varphi, x, t) \quad (4)$$

$T = T_0$  при  $t = 0$  (начальное условие)

$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$  при  $t = 0$  (начальное условие)

$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{1}{\lambda} \left( q_r + \tau_r \frac{\partial q_r}{\partial t} \right)$  при  $r = R$  (граничное условие)

$T$  – ограничена при  $r = 0$  (граничное условие)

$T = T_0$  при  $x = 0$  (граничное условие)

$T = T_0$  при  $x = 1$  (граничное условие),

где  $\Phi(r, \varphi, x, t) = \frac{1}{\lambda \tau_r} \left( 1 + \tau_r \frac{\partial}{\partial t} \right)^2 (V_r q_r + \omega R q_\varphi - V q_x)$ ,

Далее, для практического расчета считаем, что  $N_{r,\varphi,x}(\varphi, x, t)$  – известна из соответствующего трибологического расчета.

Применим для данного уравнения процедуру представления решения через функцию Грина, а решение поставленной задачи, представим в виде функции Грина.

Преобразование  $T(r, \varphi, x, t) = \Theta(r, \varphi, x, t) e^{-\frac{t}{2\tau}}$ , приводит к уравнению гиперболического типа, не содержащего первую производную:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} = V_\tau^2 \Delta \Theta + \frac{1}{4\tau^2} \Theta + \psi(r, \varphi, x, t) \quad (\text{уравнение Клейна – Гордона}) \quad (5)$$

где  $\psi(r, \varphi, x, t) = \Phi(r, \varphi, x, t) e^{\frac{t}{2\tau}}$ ;

и следующим краевым уравнениям:

$\Theta = T_0$  при  $t = 0$

$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{T_0}{2\tau}$  при  $t = 0$

$\frac{\partial \Theta}{\partial r} = -\frac{1}{\lambda} \left( q_r + \frac{\partial q_r}{\partial t} \right) e^{\frac{t}{2\tau}} = 0$

$\Theta$  – ограничена при  $r = 0$

$\Theta = T_0 e^{\frac{t}{2\tau}}$  при  $x = 0$

Решение:

$$\begin{aligned}
\Theta(r, \varphi, x, t) &= \frac{\partial}{\partial t} \int_0^l \int_0^{2\pi} \int_0^R \varepsilon T_0 G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t) d\varepsilon d\eta d\zeta + \\
&+ \int_0^l \int_0^{2\pi} \int_0^R \varepsilon \frac{T_0}{2\tau_r} G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t) d\varepsilon d\eta d\zeta + \\
&+ V_\tau^2 R \int_0^t \int_0^l \int_0^{2\pi} \left( -\frac{e^{\frac{\tau}{2\tau_r}}}{\lambda} \right) \left( 1 + \frac{\partial}{\partial t} \right) q_{r, \varphi, x}(\eta, \zeta, \tau)_{t=\tau} G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t - \tau) d\eta d\zeta d\tau + \\
&+ V_\tau^2 \int_0^t \int_0^{2\pi} \int_0^R \varepsilon T_0 e^{\frac{\tau}{2\tau_r}} \left[ \frac{\partial}{\partial \zeta} G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t - \tau) \right]_{\zeta=0} d\varepsilon d\eta d\tau - \\
&- V_\tau^2 \int_0^t \int_0^{2\pi} \int_0^R \varepsilon T_0 e^{\frac{\tau}{2\tau_r}} \left[ \frac{\partial}{\partial \zeta} G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t - \tau) \right]_{\zeta=1} d\varepsilon d\eta d\tau + \\
&+ \int_0^t \int_0^l \int_0^{2\pi} \int_0^R \varepsilon e^{\frac{\tau}{2\tau_r}} \Phi(\varepsilon, \eta, \zeta, \tau) G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t - \tau) \varepsilon d\varepsilon d\eta d\zeta d\tau
\end{aligned}$$

(6)

Функция Грина имеет вид:

$$\begin{aligned}
G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t) &= \frac{2}{\pi^2 V_\tau R^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\beta_k}} \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right) \sin\left(\frac{k\pi \zeta}{l}\right) \sin(t\sqrt{\beta_k}) + \\
&+ \frac{2}{\pi l} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A_n \mu_{nm}^2 J_n(\mu_{nm} r) J(\mu_{nm} \varepsilon)}{(\mu_{nm}^2 R^2 - n^2) [J_n(\mu_{nm} R)]^2 \sqrt{\lambda_{nmk}}} * \\
&* \cos[n(\varphi - \eta)] \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right) \sin\left(\frac{k\pi \zeta}{l}\right) \sin(t\sqrt{\lambda_{nmk}})
\end{aligned}$$

(7)

$$\text{где } \beta_k = \frac{V_\tau^2 k^2 \pi^2}{l^2} + \frac{1}{4\tau_r^2}, \quad \lambda_{n,m,k} = V_\tau^2 \mu_{n,m} + \frac{V_\tau^2 k^2 \pi^2}{l^2} - \frac{1}{4\tau_r^2},$$

$$A_n = \begin{cases} 1 & \text{при } n = 0; \\ 2 & \text{при } n > 0. \end{cases}$$

$J_n(\varepsilon)$  - функция Бесселя первого рода,  $\mu_{nm}$  - положительные корни трансцендентного уравнения  $J_n(\varepsilon) = 0$  при  $\varepsilon = \mu R$ .

$$J_n(\varepsilon) = \sum_{S=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^{S+2n}}{S! \Gamma(n+S+1)}, \Gamma(n+S+1) = \int_0^{\infty} e^{-\alpha} \alpha^{n+S} d\alpha,$$

$$J_n(\varepsilon) = \sum_{S=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^{S+2n}}{S! \int_0^{\infty} e^{-\alpha} \alpha^{n+S} d\alpha} \quad (8)$$

здесь  $G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t)$ - функция Грина, которая удовлетворяет однородному уравнению:

$$\frac{\partial^2 G}{\partial t^2} + \frac{1}{\tau_v} \frac{\partial G}{\partial t} - a \Delta G = 0,$$

(9)

полуоднородным начальным условиям:

$$G = 0 \quad \text{при } t = \tau,$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} = \delta(r - \varepsilon, \varphi - \eta, x - \zeta) \text{ при } t = \tau,$$

и однородным граничным условиям.

Поскольку коэффициенты в уравнении относительно  $G$  и граничные условия не зависят от времени  $t$ , то функция Грина  $G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t) = G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t - \tau)$ . В этом случае при получении решения

для  $T(r, \varphi, x, t)$  положили  $\frac{\partial}{\partial \tau} G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, \tau) \Big|_{\tau=0} = -\frac{\partial}{\partial \tau} G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t)$ .

После того как решена краевая задача относительно  $\Theta$ , распределение температуры в детали вычисляется по формуле:  $T = \Theta e^{-\frac{t}{2\tau}}$ .

### Литература

1. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики. А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. Издание четвертое, исправленное. Учебное пособие для университетов. Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, М., 1972 г.
2. Корн Г. Справочник по математике. Г. Корн, Т. Корн / Для научных работников и инженеров. – М., 1973 г., 832 с.

УДК 631.3.004.5/.67

## ОРГАНИЗАЦИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИКИ

В.Н. Хромов, д.т.н., проф., Т.В. Гущина, д.т.н., проф., Волкова И.  
Орловский государственный аграрный университет  
Орел, тел. (4862) 431979, e-mail: chrom@orel.ru

## THE ORGANIZATION OF SAFE OPERATION OF TECHNICAL EQUIPMENT

V.N.Khromov, Dr.Sci.Tech., Prof., T.V.Guschin, Dr.Sci.Tech., Prof.,  
I. Wolkova And.  
Oryol State Agrarian University  
Orel, ph. (4862) 431979, e-mail: chrom@orel.ru

### *Annotation*

*Questions of a labour safety are considered at operation of mobile technics(technical equipment) and load-lifting machines and necessity of increase of a learning efficiency in the field of a labour safety and the safety precautions of students of educational institutions and the personnel of the enterprises.*

В АПК России занято около 35 % всех работников сферы материального производства. Предприятия агропромышленного комплекса являются стратегической отраслью экономики, на долю которых приходится 25% производственных фондов и более 14 % валового внутреннего продукта. Производственный травматизм и профессиональная заболеваемость являются актуальной социально-трудовой проблемой. На долю АПК приходится около 42% производственных травм в России и 20 % профессиональных поражений.

По данным Госкомстата России профессия механизатора является самой травмоопасной. На каждые 10000 работающих механизаторов ежегодно в сельском хозяйстве погибает от 7 до 8 человек, в то время как в целом по сельскому хозяйству эта цифра не превышает - 2,3 человек.

Происходит неуклонный рост травматизма в т.ч. со смертельным и тяжелым исходом при эксплуатации грузоподъемных сооружений на предприятиях, поднадзорных Ростехнадзору РФ.

Анализ обстоятельств и причин аварий и несчастных случаев, показывает, что все они произошли вследствие:

- грубых нарушений правил безопасности вследствие невыполнения инженерно-техническими работниками своих прямых обязанностей по созданию безопасных условий эксплуатации мобильной техники и грузоподъемных машин, обеспечению их исправного состояния;

- низкой производственной дисциплины обслуживающего персонала;
- невыполнения мероприятий по техническому надзору и (или) отсутствия контроля за их выполнением;
- недостаточного (формального) обследования условий эксплуатации специалистами мобильной техники и грузоподъемных машин;
- отсутствие своевременных мероприятий к устранению имеющихся нарушений.

Достаточно сложной в техническом отношении и требующей высокой квалификации работников является эксплуатация грузоподъемных машин. Причинами травматизма в данном случае является нарушение требований технических условий по устройству и содержанию крановых путей:

- балластный слой не обеспечивает равномерной посадки путей;
- уклоны путей превышают допустимые значения;
- используются тупиковые упоры несовершенной конструкции;
- схемы строповки грузов не охватывают всей номенклатуры перемещаемых грузов;
- к обслуживанию грузоподъемных кранов и строповке грузов допускается персонал, не прошедший специализированное обучение и не аттестованный.

За критерий безопасности техносферы при травмоопасных ситуациях и авариях принята допустимая вероятность (риск) возникновения угрожающего события.

Источники опасностей в современной техносфере давно классифицированы. Производственная среда, в которой обитает работник, является источником опасных и вредных факторов (физических, химических, биологических и психофизиологических).

Поражение человека рассматривается как поток случайных событий, который описывается законом Пуассона. Риск – это вероятность практической реализации отрицательного воздействия в зоне пребывания работника.

Из анализа статистических данных установлено, что вероятность возникновения  $R$  (риск) чрезвычайных ситуаций при эксплуатации производственного оборудования и функционирования технологического процесса описывается формулой:

$$R = \frac{N_{\text{чс}}}{N_o} \leq R_{\text{доп}},$$

где  $N_{\text{чс}}$  – число чрезвычайных событий за год;  $N_o$  – общее число событий за год;  $R_{\text{доп}}$  – допустимый риск.

Условием безопасного стабильного функционирования систем «человек – производственная среда» при воздействии вредных и опасных факторов производственной среды являются следующие принципы защиты:

- увеличение расстояния между работником и источником опасности;
- уменьшение времени воздействия опасности;
- экранирование и совершенствование технических систем;
- пропаганда мер безопасности и обучение профессиональным знаниям;

- организационные и технические решения в области безопасности жизнедеятельности.

Безопасность человека на производстве зависит от вероятности поражения при воздействии вредных и опасных факторов. Критерий безопасности системы «человек - производственная среда» определяется безопасностью всех составляющих производства: оборудования, применяемых технологий и режимов работы и т.д. На предприятии не должно возникать источников травматизма и профессиональных заболеваний, необходимо уменьшать негативное воздействие существующих.

Значения вредных и опасных производственных факторов не должны превышать нормативных величин, которые устанавливаются законодательно.

Согласно требованиям ГОСТ 12.3.002 безопасность производственных процессов достигается упреждением опасной аварийной ситуации и возникновения несчастного случая в течение всего времени их функционирования и обеспечивается применением безопасных технологических процессов и производственного оборудования.

Анализ причин травматизма на предприятиях всех отраслей экономики выводит на первое место организационные и технические (машинные) причины. Эффективность мероприятий, направленных на повышение безопасности труда, предполагает:

- включение требований безопасности в нормативно-техническую, проектно-конструкторскую и технологическую документацию, соблюдение этих требований, а также требований соответствующих правил безопасности и других документов по охране труда;

- профессиональный отбор, обучение работающих, проверка их знаний и навыков безопасности труда.

Система управления охраной труда в организациях и на предприятиях к одним из основных направлений своей работы относит профессиональное обучение, повышение квалификации и компетентности персонала. В процессе обучения работников и проверки их знаний по охране труда необходимо принимать во внимание различные уровни ответственности, требуемой ответственности и риска на рабочих местах. Работники организаций должны:

- соблюдать свои обязанности в области охраны труда в соответствии с действующим законодательством;

- осознавать ответственность за соответствие своих действий политике организации в области охраны труда, требованиям технике безопасности;

- понимать последствия воздействия фактических или потенциальных последствий их деятельности на безопасность труда;

- исключать возможные негативные последствия несоблюдения технологических инструкций.

Работники должны обучаться с учетом специфики выполняемых работ, иметь соответствующую квалификацию и компетентность, необходимые для выполнения рабочих заданий, которые могут оказывать влияние на охрану труда на рабочих местах.

Организация должна выявлять потребности в обучении персонала для компетентного выполнения работ, включая обучение по охране труда и безопасности персонала.

#### ВЫВОДЫ:

1. В целях снижения уровня травматизма при эксплуатации мобильной техники и грузоподъемных машин необходимо повысить эффективность организационных, технических и организационно-технических мероприятий по повышению промышленной безопасности предприятий.

2. Следует повысить качество обучения будущих специалистов ИТР всех отраслей экономики в области охраны труда и техники безопасности при одновременном увеличении объема изучаемой дисциплины и повышении ее престижа.

3. Необходимо привлекать специалистов предприятий машиностроения и других отраслей экономики к получению второго профессионального образования в области охраны труда и техники безопасности на основе базового технического.

#### Литература:

1. Федеральный закон «Об основах охраны труда в Российской Федерации» от 17.07.99 № 181-ФЗ.

2. ГОСТ Р 12.0.006-2002 ССБТ. Общие требования к управлению охраной труда в организации.

УДК

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО  
УПРОЧНЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
НАГРУЖЕНИЕМ ПРОЛОНГИРОВАННЫМИ УДАРНЫМИ  
ИМПУЛЬСАМИ**

А.В. Киричек, д.т.н., проф., Д.Л. Соловьев, д.т.н., проф.  
Орловский государственный технический университет  
Г. Орел, тел (4862) 5555524, e-mail: [ti@ostu.ru](mailto:ti@ostu.ru)

**INCREASE OF EFFICIENCY OF DEFORMATION HARDENING OF IN-  
TERNAL CYLINDRICAL SURFACES TO LOAD PROLONGED SHOCK  
PULSES**

A.V.Kirichek, Dr. Sci. Tech., Prof., D.L.Solovjov, Dr. Sci. Tech., Prof.  
Oryol State Technical University  
Orel, Ph. (4862) 5555524, e-mail: [ti@ostu.ru](mailto:ti@ostu.ru)

*Annotation*

*In article the question of increase of efficiency of deformation hardening of internal cylindrical surfaces is analyzed*

В настоящее время в машиностроении широкое применение находят детали типа гильз и втулок. В зависимости от длины, диаметра отверстия, точности и шероховатости поверхности обработка отверстий производится в несколько операций режущими, абразивными и калибрующими инструментами. При этом в зависимости от точности исходной заготовки в стружку уходит от 20 до 35 % металла, а трудоемкость обработки отверстий составляет 40...90 % всей трудоемкости механической обработки.

В связи с этим для обработки внутренних цилиндрических поверхностей большое распространение получили методы поверхностного пластического деформирования (ппд). Внедрение методов ппд взамен резания исключает предварительную механическую обработку, что снижает расход металла; в два-четыре раза уменьшает трудоемкость обработки; снижает на 30...50 % затраты по инструменту, электроэнергии, вспомогательным материалам, амортизационным отчислениям. После ппд в поверхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения, что наряду с повышением твердости и улучшением микрогеометрии поверхности упрочненного отверстия приводит к значительному повышению износостойкости и долговечности деталей в различных условиях эксплуатации. За счет использования в технологических процессах операции упрочнения ппд в большинстве случаев удается исключить термообработку, а также уменьшить сечение несущих деталей, что также является дополнительным резервом экономии [1, 2].

Эффективность способов ППД будет зависеть от того, насколько получаемые показатели качества поверхностного слоя соответствуют условиям эксплуатации. В этой связи все более значительной становится возможность точного обеспечения способами ППД эпюр распределения твердости и остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя, а также микрогеометрии поверхности.

Известно, что энергетически динамическое воздействие на материал более выгодно, по сравнению со статическим, необходимым для достижения аналогичных результатов. Однако предсказать результаты пластического деформирования динамической энергией гораздо сложнее.

Исследованиями ударных процессов [3] установлено, что наибольшее количество энергии передается ударными импульсами прямоугольной (трапециидальной) или близкой к ней пролонгированной формы. Для генерирования пролонгированных ударных импульсов необходимо в качестве рабочих элементов вместо шаров или роликов использовать бойки вытянутой цилиндрической формы, длина которых удовлетворяет условию  $l_1 > 0,05...0,08$  м. Более рациональное использование энергии удара при упругопластической деформации позволяет создавать глубоко упрочненные поверхностные слои материала, расширяя возможности ППД.

В результате разработано ряд ранее не использовавшихся схем осуществляющих пролонгированное импульсное нагружение при ппд. Схемы основываются на базе известных способов обработки внутренних цилиндрических поверхностей, использующих для нагружения динамическую энергию [2].

При центробежной обработке бойковым инструментом (рис. 1) на упрочняемую поверхность наносят последовательные удары рабочими элементами – бойками, свободно сидящими в радиальных отверстиях вращающегося диска. Под действием центробежных сил рабочие элементы в радиальных отверстиях занимают крайнее положение, а при ударе об обрабатываемую поверхность опускаются на глубину, равную натягу, отдавая энергию, создаваемую центробежной силой.

При ударном раскатывании (рис. 2) рабочие элементы – бойки, установленные в сепараторе, вращаются между поверхностью обрабатываемого отверстия и поверхностью кулачковой оправки, совершая переносное или планетарное движение. Кулачковая оправка представляет собой цилиндр, на котором равномерно по окружности выполнено несколько равных площадок (лысок) или профильных канавок. Обкатывая выступающие участки кулачковой оправки, бойки совершают быстрые радиальные перемещения, ударяя с большой частотой по обрабатываемой поверхности в момент заклинивания, при этом натяг максимален. При перемещении бойка на цилиндрическом участке кулачковой оправки происходит обкатывание. При прохождении бойком лыски натяг минимален или равен нулю. Натяг изменяется от минимального до максимального в течение примерно  $10^3...10^4$  с. Число таких импульсов за один оборот раскатника равно произведению числа лысок на число инструментов.

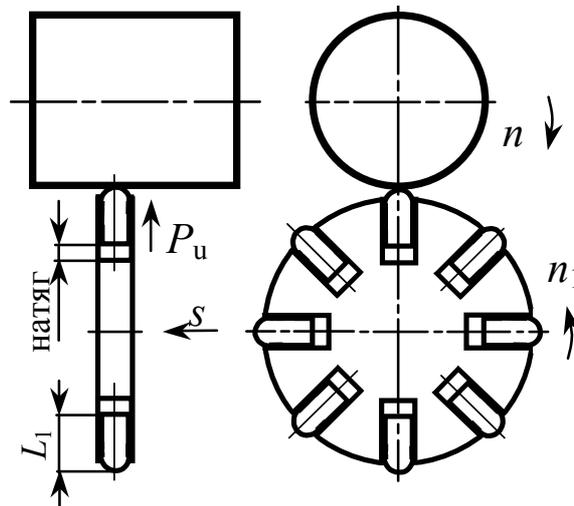


РИС. 1. ЦЕНТРОБЕЖНАЯ ОБРАБОТКА БОЙКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Реализовать пролонгированное ударное воздействие в очаге деформации за счет рекуперации отраженных волн деформации, формирующих хвостовую часть ударного импульса, позволяет ударная система боек-волновод [4]. Нагружение ударными импульсами должно происходить в условиях предварительного статического поджатия инструмента к очагу деформации, которое не позволяет прерывать его контакт после действия головной части импульса, давая возможность для повторного воздействия отраженных волн деформации после удара.

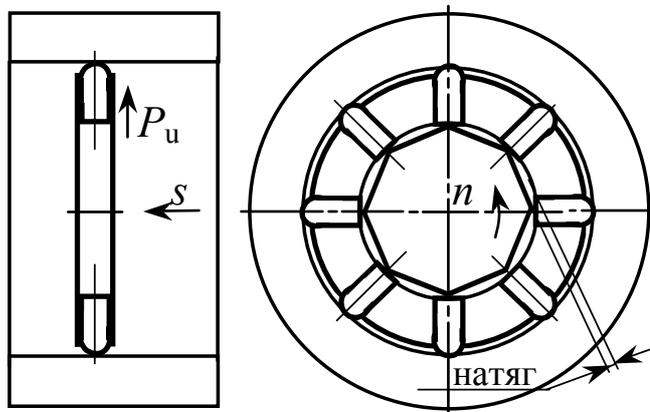


РИС. 2. УДАРНОЕ РАСКАТЫВАНИЕ БОЙКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

В результате предложена схема статико-импульсной обработки (СИО) при ударном раскатывании (рис. 3). Устройство для нагружения содержит вращающийся диск с радиальными отверстиями, в которых размещается ударная система боек-волновод. Отверстия имеют две ступени. В первой (меньшего диаметра) свободно размещается боек и частично волновод, а во второй (большого диаметра) оставшаяся часть волновода и пружина, расположенная между пояском волновода и торцевой частью второй ступени отверстия.

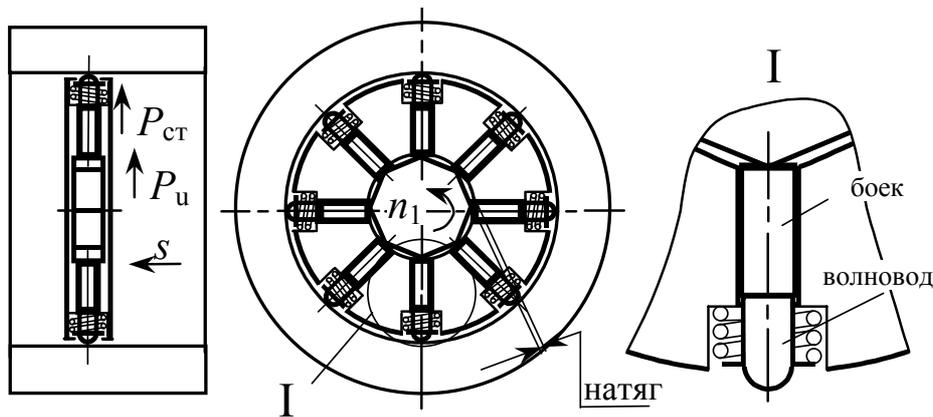


РИС. 3. СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЕ РАСКАТЫВАНИЕ

При размещении устройства внутри обрабатываемого отверстия волновод упирается в нагружаемую поверхность, сжимая пружину. В результате волновод воздействует на очаг деформации под действием силы упругости сжатой пружины. Обкатывая, выступающие участки кулачковой оправки совершают быстрые радиальные перемещения, ударяя с большой частотой по статически поджатому волноводу в момент заклинивания.

Достоинством такой схемы является увеличение энергии удара, генерируемой бойком, за счет увеличения массы рабочих элементов и увеличение количества энергии удара расходуемой на пластическую деформацию за счет увеличения длительности ударных импульсов. Коэффициент передачи энергии удара упрочняемому материалу может достигать до 86 %.

Предлагаемые схемы могут использоваться для обработки внутренних отверстий больших диаметров: центробежная обработка бойковым инструментом и ударное раскатывание бойковым инструментом – для диаметров более 35 мм, статико-импульсное раскатывание – для диаметров более 50 мм. В результате их применения может быть получена высокая степень упрочнения до 60...100 % и повышена глубина упрочнения в 1,5...2 раза, достигая 3 мм и более.

#### Список используемой литературы

1. Монченко В.П., Белотелов В.В. Деформирующая обработка отверстий втулок и гильз гидропневмоцилиндров. М.: НИИМаш. 1976. 91 с.
2. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справ. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
3. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э. Удар. Распространение волн деформации в ударных системах. М.: Наука, 1985. 357 с.
4. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога. М.: Машиностроение. 2004. 288 с.

## **ВОССТАНОВЛЕНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТА**

В.Н. Хромов, д.т.н., профессор, Е.А. Антипова, аспирант, А.А. Мошкин, аспирант, Д.Н. Храпоничев, аспирант, Д.Н. Трошин, аспирант, В.В. Гончаренко, аспирант

Орловский государственный аграрный университет  
Орел, тел. (4862) 431979, 430741, факс: (4862) 454079, E-mail: chrom@orel.ru, servise1@orelsau.orel.ru, servise2@orelsau.orel.ru, khraponichev@rambler.ru

## **RESTORATION AND HARDENING OF THE MACHINE ELEMENT AND THE TOOL**

V.N. Khromov, Prof., Dr., E.A. Antipova, the post-graduate student, A.A. Moshkin, the post-graduate student, D.N. Hraponichev, post-graduate student, D.N. Troshin, post-graduate student, V.V. Goncharenko, post-graduate student

Orel State Agrarian University  
Orel, tel.: (4862) 431979, 430741, fax: (4862) 454079; E-mail: chrom@orel.ru, servise1@orelsau.orel.ru, servise2@orelsau.orel.ru, khraponichev@rambler.ru

*At the Oryol State Agrarian University research work on development of technology of hardening and restoration of the cutting tool by electrospark processing is conducted.*

*The basic advantage of hardening and restoration of the cutting tool by electrospark processing consists in ample opportunities of carry on a processable detail of any current-carrying materials, as refractory and high-strength metals and connections, and soft, antifrictional materials with high adhesion of a layer with a basis.*

*The article describes the technology of restoration and hardening of blade and front part of slice share in the plow body by means of hard alloys welding in electrolizers.*

Восстановление и упрочнение деталей термоупруго-пластическим деформированием. В настоящее время в мировой практике широкое распространение получили методы завершающей обработки сталей и сплавов, совмещающие термическое воздействие на металл с его пластической деформацией.

Сущность предложенного метода заключается в том, что путем создания градиента температуры в деталях типа «полый цилиндр» по сечению или вдоль оси, можно получать остаточные деформации достаточные для компенсации изношенных поверхностей. При этом физико-механические свойства деталей, восстановленных термоупруго-пластическим деформированием, не только не уступают новым, но превосходят их.

Явление термоупруго-пластического деформирования (ТПД), связанное с быстрым нагревом и охлаждением материала деталей, обладает рядом преимуществ и может быть использовано для их восстановления и упрочнения. Однако при этом остаются открытыми вопросы о возможностях этого метода восстановления деталей; до настоящего времени не развиты достаточно точные модели (например, конечно-элементные), учитывающие специфику термомеханических процессов при восстановлении деталей ТПД.

Установление закономерностей и взаимосвязей процесса с возникающими при ТПД явлениями и прогнозирование свойств деталей, представляет собой сложную научную задачу, заключающуюся в разработке программного обеспечения математических моделей восстановления деталей и обосновании оптимальных параметров ТПД как метода восстановления.

Одной из важнейших составляющих моделирования восстановления деталей методом ТПД является анализ термомеханического состояния.

Нелинейный анализ таких процессов предусматривает решения двух основных задач.

Сущность первой из них состоит в математической формулировке задачи и конкретизации определяющих уравнений материала, способных адекватно описывать эффекты пластичности и ползучести при соответствующих историях температуры и деформации.

Вторая задача состоит в разработке эффективных численных подходов к решению соответствующих задач термомеханики.

Ключевым вопросом в математической постановке задачи является формулировка определяющих уравнений, описывающих поведение материала под действием механического напряжения с учетом температурных факторов.

В настоящее время в теории и технологических процессах широко используется три основных подхода к описанию термовязкопластических процессов деформирования элементов твердого тела.

Анализ последних результатов в этом направлении обнаруживает тенденцию к наиболее интенсивному развитию третьего подхода, сущность которого составляют так называемые обобщенные теории вязкопластического течения.

Вторым основным вопросом моделирования технологии восстановления деталей методом ТПД является разработка методов численной реализации задачи.

Современные ЭВМ дают возможность широкого использования численных методов определения напряжений и деформаций в элементах конструкций сложной формы. Метод конечных элементов (МКЭ), разработанный и усовершенствованный в последние годы – один из основных методов решения задач теплопроводности и механики деформируемого твердого тела. Идея метода заключается в аппроксимации сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы совокупностью простых элементов, имеющих конечное число степеней свободы и связанных между собой в узловых точках.

В общем случае полная деформация материального элемента состоит из упругой, вязкопластической, термической и связанной с фазовыми и структурными превращениями

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^{vp} + \varepsilon_{ij}^{th} + \varepsilon_{ij}^{ph} + \varepsilon_{ij}^c$$

где  $\varepsilon_{ij}$  – тензор полной деформации;  $\varepsilon_{ij}^e$  – упругая деформация;  $\varepsilon_{ij}^{vp}$  – вязкопластическая деформация;  $\varepsilon_{ij}^{th}$  – термическая деформация;  $\varepsilon_{ij}^{ph}$  – деформация фазового превращения;  $\varepsilon_{ij}^c$  – деформация ползучести.

Разработана структурная схема математического моделирования восстановления деталей ТПД, представленная на рисунке. Структурная схема определяет последовательность выполнения расчетных этапов моделирования восстанавливаемых деталей ТПД. Математическая модель предполагает наличие входных и выходных параметров связанных между собой детерминистическим образом.

Выявлено влияние многих факторов на величину остаточной деформаций при восстановлении деталей ТПД: геометрические параметры деталей; материал (химический состав; физико-механические свойства:  $\sigma_B$ ,  $E$ ,  $\lambda$ , ...); вид химико-термической обработки; температура нагрева; скорость нагрева; скорость охлаждения; форма распределения температурного поля по радиусу и вдоль оси восстанавливаемой детали; свойства охлаждающей среды и ряд других.

Вначале входные параметры разделяют на заданные и управляющие. Затем определяют выходные параметры и устанавливают взаимосвязь их с входными.

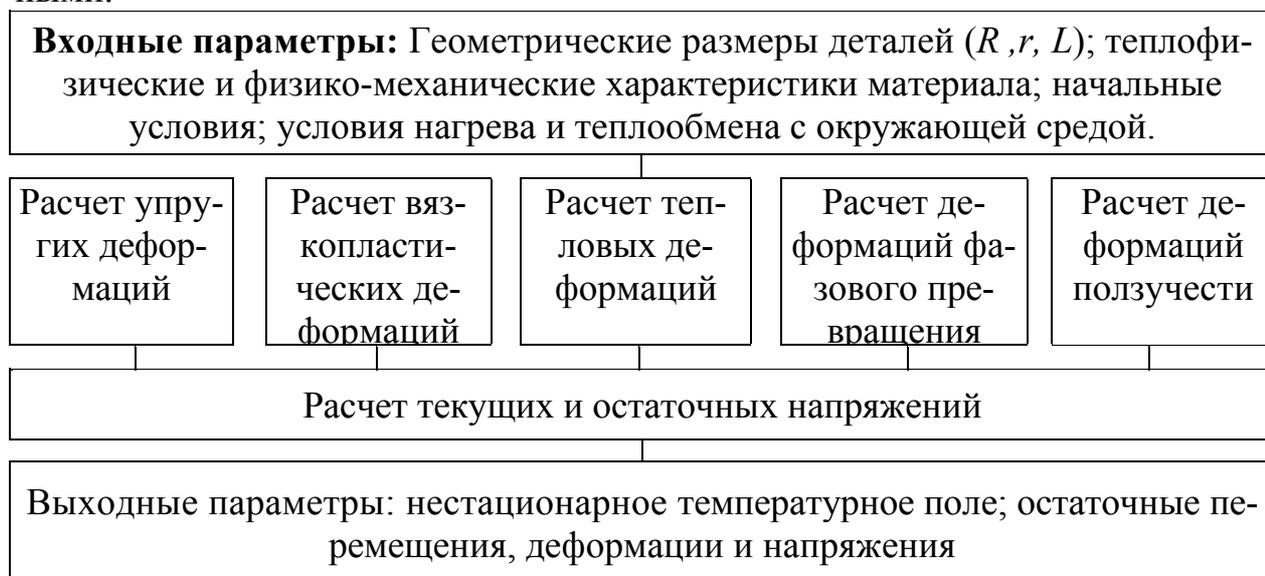


Рис. 1. Структурная схема математического моделирования восстановления деталей ТПД

Восстановление и упрочнение режущего инструмента электроискровой обработкой. В настоящее время в Орловском государственном аграрном университете ведется научно-исследовательская работа по разработке технологии

упрочнения и восстановления режущего инструмента электроискровой обработкой (легированием).

Одним из перспективных способов, находящих все более широкое применение в ремонтной практике, являются способы, основанные на явлении электрической эрозии металлов при прохождении между ними электрических разрядов. Во время электроискрового разряда через электроды проходит мощный импульс тока. Движущийся с огромной скоростью поток электронов приводит к нагреву поверхности анода и межэлектродного зазора до  $11000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , плавлению металла анода, переносу металла с анода на катод и оплавлению его на поверхности детали. Вследствие его кратковременности (до  $10\text{ мкс}$ ) и локальности нагретые микрообъемы переносимого металла на деталь мгновенно охлаждаются. При определенных режимах обработки происходит сверхскоростная закалка поверхностного слоя детали до высокой твердости.

Электроискровая обработка заключается в легировании поверхностного слоя металла детали материалом электрода-инструмента. В результате высоких температур, химических реакций легирующего металла с диссоциированным атомарным азотом и углеродом воздуха, а также с материалом детали в поверхностных слоях образуются закалочные структуры и сложные химические соединения, возникает диффузионный износостойкий упрочненный слой, имеющий высокую микротвердость.

Принцип работы установок электроискрового наращивания и упрочнения легированием (ЭИНУЛ) с RC-генераторами основан на периодических разрядах накопительных конденсаторов "С" при касании вибрирующим электродом 2 поверхности обрабатываемой детали 1 (рисунок 1). При отходе вибрирующего электрода от детали происходит заряд и накопление энергии в конденсаторах "С" зарядным током, регулируемым резистором "R".

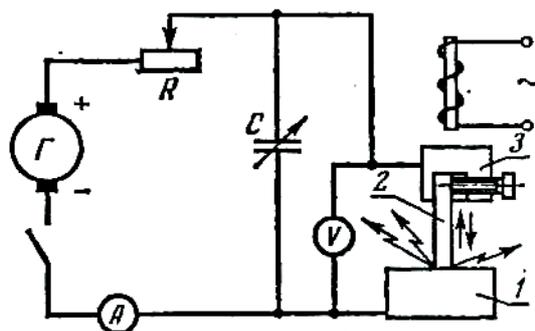


Рис. 2. – Принципиальная электрическая схема электроискровой установки: 1 – деталь; 2 – электрод; 3 – электромагнитный вибратор.

Основное достоинство упрочнения и восстановления режущего инструмента электроискровым легированием заключается в широких возможностях переноса на обрабатываемую деталь любых токопроводящих материалов, как тугоплавких и высокопрочных металлов и соединений, так и мягких, антифрикционных материалов с высокой адгезией слоя с основой. Электроискровое наращивание и упрочнение легированием обеспечивает значительное повыше-

ние износостойкости при абразивном износе, сухом трении, а так же воздействию высоких температур и нагрузок.

При восстановлении поверхностей, участвующих в трении, можно наносить покрытия толщиной до 0,25 мм, а поверхностей неподвижных соединений – до 1,5 мм. Для упрочнения режущих кромок инструмента наносят покрытия толщиной до 0,1 мм. Шероховатость и сплошность покрытия регулируются.

Глубина термического влияния на материал детали составляет 0,8-1,0 мм. Предел выносливости детали практически не изменяется.

Формирование микрогеометрии и несущей способности покрытий при ЭИНУЛ имеет особенности.

Исходная шероховатость восстанавливаемой поверхности не должна превышать  $R_z=10$  мкм. Поверхность после электроискрового наращивания существенно отличается от поверхностей, полученных другими способами.

После снятия случайно прилипших частиц распыленного металла на поверхности остаются равномерно расположенные скругленные сферические выступы и впадины. Микрорельеф имеет практически одинаковые характеристики по всем направлениям и не содержит острых гребешков, как после механической обработки. Однако с увеличением толщины покрытий средняя высота  $R_z$ , радиус закруглений и средний шаг неровностей непрерывно растут.

При обработке ЭИНУЛ инструментов и штампов применяют электроды из различных токопроводящих материалов, в том числе металлокерамические твердые сплавы групп ТК, ВК, ТТК, сплавы типа СТИМ, безвольфрамовые твердые сплавы, мелкодисперсные графиты марок МПГ-6, -7, -8, ЭЭПГ, хром и высокохромистые сплавы, медь и сплавы на ее основе, другие материалы. При выборе материала электрода надо исходить из того, что формируемый поверхностный слой должен отвечать ряду требований:

- быть твердым и противостоять реальным давлениям на контакте;
- хорошо отводить тепло от локальных зон тепловых вспышек либо надежно изолировать от локальных высоких температур контактные поверхности инструмента;
- площадь опорной поверхности должна соответствовать силовому нагружению во избежание продавливания слоя в основной металл или металл сопряженной детали;
- противостоять схватыванию с материалом сопряженной детали;
- быть химически неактивным по отношению к окружающей среде в контактной зоне.

Для проведения исследований процесса упрочнения и восстановления режущего инструмента электроискровым легированием нами используется установка UR-121 (рис. 3), находящаяся на кафедре «Надежность и ремонт машин» ОрелГАУ.

Установка (рис. 3) состоит из генератора 1, вибратора 2, пластины 3 и кабеля 4 для подключения генератора к пластине, на которой размещают обрабатываемую деталь.



Рис. 3 – Установка электроискрового легирования UR-121:  
1 – генератор; 2 – вибратор; 3 – пластина; 4 – кабеля.

Восстановление сферической поверхности шарового пальца наконечника рулевой тяги трактора МТЗ методом газопламенного напыления с применением водородно-кислородного пламени. Одним из перспективных методов повышения долговечности металлоконструкций и деталей машин является создание на их поверхности защитных покрытий, препятствующих ее повреждению в результате коррозии, изнашивания и воздействия агрессивных сред.

Существует множество способов нанесения защитных покрытий: хромирование; железнение; наплавка и т.д. Наиболее рациональным является способ газопламенного напыления.

Этот способ в силу своей простоты и экономичности нашел наиболее широкое применение в практике. Важная особенность этого метода – низкое термическое воздействие на восстанавливаемую поверхность. В этой связи исключаются деформации, а несущая способность детали не снижается. Покрытия, нанесенные этим способом, выдерживают обычные статистические и знакопеременные нагрузки.

Процесс газопламенного напыления состоит в расплавлении с помощью какого-либо источника теплоты материала, подлежащего нанесению на предварительно подготовленную поверхность, с его последующим распылением газовой струей и перемещением расплавленных частиц до соударения с обрабатываемой поверхностью.

В качестве источника теплоты предлагаем использовать водородно-кислородное пламя, вырабатываемое электролизером «Москва - 20», температура которого не превышает 3000 °С. А в качестве поверхности напыления изношенную сферическую поверхность шарового пальца наконечника рулевой тяги трактора МТЗ.

В процессе работы сферическая поверхность шарового пальца изнашивается до предельной величины. Также характерным дефектом шарового пальца

является повреждение резьбы. Этот дефект встречается редко (4%). Замер диаметра изношенной сферической поверхности шарового пальца предлагаем проводить в двух плоскостях (А-А, Б-Б) и двух сечениях (I-I, II-II) как показано на рис. 4.

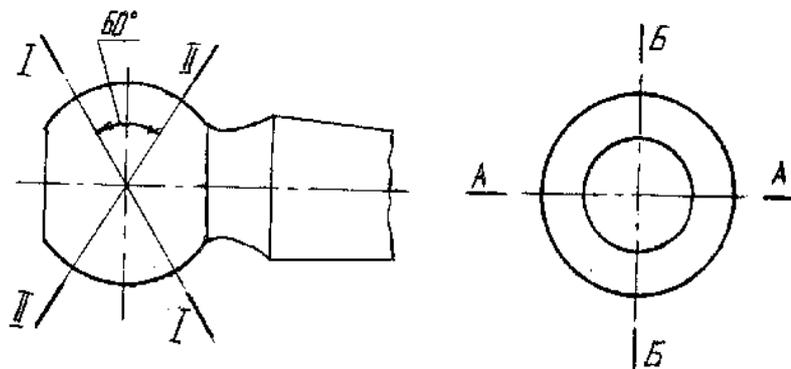


Рис. 4. Схема проведения замеров диаметра изношенной сферической поверхности шарового пальца

Измерения диаметра сферической поверхности детали предлагаем проводить при помощи микрометра МК50-1 ГОСТ 6507-88 с ценой деления 0,01 мм.

При напылении распыляемый материал, попадая в факел водородно-кислородного пламени горелок, разогревается до температуры, близкой к температуре плавления, и разгоняется до скорости 20-30 м/с [3]. При соударении с изделием, разогретые частицы соединяются с поверхностью (рис. 5) и между собой, образуя достаточно плотное и равномерное покрытие, толщина которого может изменяться в широких пределах. С помощью газопламенных пистолетов (горелок) производят напыление как легкоплавких (алюминий, бронза, баббит) материалов, так и относительно тугоплавких керамических соединений (окись титана, окись алюминия и др.).

Распыляемый материал подается в водородно-кислородное пламя горелки в виде порошка.

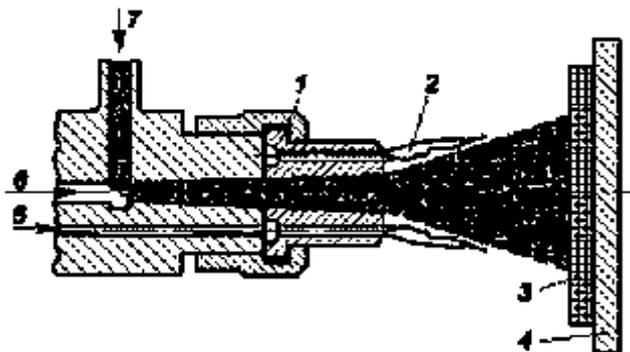


Рис. 5. Схема порошкового распылителя: 1 - газовое сопло; 2 - кольцевое пламя; 3 - покрытие; 4 - подложка; 5 - горючий газ; 6 - кислород; 7 - порошок.

Данный способ напыления, однако, не позволяет получать качественные высокоизносостойкие покрытия при использовании в качестве горючей смеси водородно-кислородного пламени. Предлагаем последующую термическую обработку для упрочнения в виде оплавления.

Технология газодинамического нанесения металлических покрытий. Технология нанесения порошковых материалов (покрытий) на поверхность деталей и изделий, реализуемая оборудованием ДИМЕТ, использует газодинамическое нанесение покрытий. Способ разработан на основе, открытого в 80-х годах прошлого столетия, эффекта закрепления твердых частиц, движущихся со сверхзвуковой скоростью, на поверхности при соударении с ней. Нанесение покрытий включает в себя нагрев сжатого газа (воздуха), подачу его в сверхзвуковое сопло и формирование в этом сопле сверхзвукового воздушного потока, подачу в этот поток порошкового материала, ускорение этого материала в сопле сверхзвуковым потоком воздуха и направление его на поверхность обрабатываемого изделия.

Технология газодинамического нанесения покрытий оборудованием ДИМЕТ – один из наиболее эффективных способов восстановления поврежденных участков и нанесения новых поверхностей на различные детали и изделия. В большей степени это обусловлено тем, что из-за низкого тепловложения устранение дефекта не приводит к деформации изделия, возникновению внутренних напряжений, структурным превращениям в металле изделия. При этом конструкция оборудования обеспечивает локальное воздействие на обрабатываемую деталь, не затрагивающее бездефектных участков. Однако эта технология пригодна только в тех случаях, когда не предъявляют высоких требований к твердости и износостойкости наносимых



Рис. 6 – Нижняя головка шатуна до нанесения алюминиевого слоя.

покрытий. С этим ограничением такие покрытия могут быть использованы для устранения дефектов не только деталей из алюминиевых сплавов, но и других металлов. Важно отметить, что низкая энергетика процесса позволяет устранять дефекты и повреждения тонкостенных деталей, восстановление которых другими способами (например, наплавкой) просто невозможно.

Одним из примеров данной технологии является нанесение алюминиевого покрытия, играющего роль подшипника скольжения, на нижнюю головку ша-

туна компрессора. В процессе эксплуатации компрессора геометрические размеры посадочного места шатуна увеличиваются, что, несомненно, требует либо восстановления, либо его замены.

При восстановлении геометрических размеров напыление производится непосредственно на изношенную поверхность без предварительной подготовки и обработки посадочного места.



Рис. 7 – Нижняя головка шатуна после нанесения алюминиевого слоя.

Покрyтия оборудованиeм ДИМЕТ можно наносить на любые металлы тех деталей, которые испытывают незначительные нагрузки, иначе при их возникновении возможно разрушение, отрыв нанесенного слоя от основания и выход узла из строя.

Восстановление и упрочнение лемехов плугов пайкой металлокерамическими пластинками с использованием водородно-кислородного пламени. Лемех плуга изготавливают из высококачественных марок сталей л65, л53, лемеха быстро изнашиваются лезвия затупляются.

Лемеха используемые для восстановления необходимо: очистить от загрязнений до состояния, обеспечивающего возможность осмотра и выявления дефектов; определить толщину основы изношенного лемеха.

Лемеха могут иметь обломы и затупления лезвия, а также трещины.

Работоспособность лемеха зависит от скорости затупления и прочности лезвия. Затылочная сторона фаски на лезвии лемеха является главной причиной преждевременной его выбраковки (при ширине фаски менее 2,5 мм лемех выбраковывается).

В засушливые годы на тяжелых почвах закаленные лемеха часто ломаются, а наплавленные сормайтом, гнутся в месте перехода носка в остов.

В настоящее время для обработки почвы в большинстве случаев используются рабочие органы, конструктивные параметры которых были разработаны 30 – 40 лет назад. Их технический уровень и качество не удовлетворяют требо-

ваниям, предъявляемых к ним по таким параметрам как прочность, износостойкость, выполнение агротехнических требований.

В последние годы за рубежом большое внимание уделяется применению технической керамики для повышения износостойкости рабочих органов сельхозмашин. Керамика – многокомпонентный, гетерогенный материал, получаемый спеканием высокодисперстных минеральных частиц (глин, оксидов, карбидов, нитридов и др.). Если в состав керамики входят металлы, то этот вид керамики называют керментами.

Так как в современном инструментальном производстве при механической обработке деталей выбраковывается большое количество резцов с металлокерамическими пластинками марок ТН-20, Т5К10, Т15К6 и др., то целесообразно вместо утилизации этих пластин использовать их для восстановления и упрочнения лезвия лемехов сельскохозяйственных машин.

Известно несколько способов упрочнения и восстановления почвообрабатывающих рабочих органов: оттяжка, заточка, закалка, наплавка сормайтотом, газопламенная наплавка износостойкими порошками и в настоящее время разработаны современные технологии режущей кромки почвообрабатывающих машин, металлокерамическими пластинками.

В Орловском государственном аграрном университете ведется научно-исследовательская работа по восстановлению лемеха плуга металлокерамикой с применением водородно-кислородного пламени. Сущность процесса восстановления заключается в том, что с тыльной стороны лезвия лемеха припаивают твердосплавные пластины сплошного и прерывистого расположения позволяющие получить самозатачивающийся лемех. Также металлокерамические пластины можно припаивать и на культиваторные лапы с лицевой и с тыльной стороны, что повысит их износостойкость и срок службы.

Для подготовки лемеха, к водородно-кислородной пайке металлокерамических пластин, применяли фрезерный станок с помощью которого снимали 1,5-2 мм слой с поверхности лемеха (рис. 8).



Рис. 8 – Лемех, подготовленный к восстановлению

Для пайки технической керамики используют водородно-кислородное пламя, воздействие которого не оказывают негативного влияние на использование припоя, флюса, металлокерамические пластины и металл лемеха.

Лемех, на данную глубину припаиваем металлокерамические пластины с использованием водородно-кислородного пламени (рис. 9). Используя при этом

установки имеющиеся на кафедре «Надежность и ремонт машин» ОрелГАУ электролизеры Энергия-1,5 УХЛ4 и МБВ-500.



Рис. 9. Лемех с лицевой стороны напаянный металлокерамическими пластинами с использованием водородно-кислородного пламени



Рис. 10. Лемех после эксплуатационных испытаний

После чего, нами была разработана программа и методика экспериментальных исследований, включающая: определение смачивания по краевому углу и площадки растекания; определение заполнения зазора припоем; контроль прочности сцепления покрытия; ультразвуковой контроль; радиографический контроль; коррозионные испытания; испытания на усилие отрыва; металлографические исследования; эксплуатационные испытания (рис. 10).

### Литература

1. Хромов В.Н., Сенченков И.К. Термоупругопластическое деформирование металла: Восстановление деталей машин. Орел.: ОрелГТУ, 2002.- 219 с.
2. Полевой Г.В. Газопламенная обработка металлов: Учебник для студ. учреждений сред. проф. образования/ Г.В. Полевой, Г.К. Сухинин. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 336с.
3. Храпоничев Д.Н. Восстановление деталей методом газопламенного напыления водородно-кислородным пламенем, например шарового пальца наконечника рулевой тяги трактора типа МТЗ. Производство и ремонт машин: Сборник материалов Международной научно-практической конференции.-Ставрополь: Издательство СтГАУ «АГРУС», 2005.-288с., с.134-138.
4. Патент РФ № 2211096. Способ газопламенного напыления и горелка для его осуществления / Хромов В.Н., Плетнев Э.П., Абашев Н.Г., Верцов В.Г., Корвин А.Я., Барабаш В.В. Оpubл. бюл. №24 от 27.08.2003. Патентообладатель - Орел ГАУ.
5. Беликов И.А. Повышение долговечности рабочих органов плуга керамическими материалами: Автореф. дис... канд. техн. наук – М.: 2002. – 20с.

6. Хромов В.Н., Семешин А.Л., Гончаренко В.В., Зайцев С.А. Упрочнение и восстановление лап при производстве и ремонте культиваторов. Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении: Материалы 4-го Международного научно-технического семинара, 24-26 февраля 2004 г., г.Свялява. – Киев: АТМ Украины, 2004. – 260 с., с.222-224.
7. Устройство для газопламенной обработки материалов. Патент РФ 216774. / В.Н. Хромов, А.Л. Семешин. – Б.И. – 2001. – №4.
8. Хромов В.Н., Семешин А.Л., Гончаренко В.В. Анализ конструкций электролизеров водородно-кислородной газовой смеси. Качество, стандартизация, контроль: теория и практика.: Материалы 3-й Международной научно-практической конференции, 23-26 сентября 2003 г., Крым, г.Ялта. – Киев: АТМ Украины, 2003., с.196-200.

УДК

## СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ТОРЦОВЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

ЗАГРЯДЦКИЙ В.И., д.т.н., проф., СВИДЧЕНКО С.Ю., к.т.н., доц.  
Орловский государственный технический университет  
тел.(4862) 419830, E-mail :zagr@ostu.ru

## SYSTEMS OF THE ELECTRIC DRIVE WITH FACE ELECTRIC MOTORS

Zagryadsky W. I., Dr.Sci.Tech., Professor,  
Swydchenko S. J., Cand.Tech.Sci., Senior lecturer  
Oryol State Technical University  
Ph. (4862) 419830, E-mail:zagr@ostu.ru

### *Annotation*

*The electric drive with disc (axial) asynchronous electric motors is considered. It has reduced angular velocity in comparison with usual asynchronous electric motors.*

В настоящее время выпускаемые асинхронные электродвигатели (АД) традиционной цилиндрической конструкции общепромышленных серий 4А, 5А, 6А, RA, AI [1] максимальное число пар полюсов не более 6 (см. таблицу). Это означает, что синхронная частота вращения при частоте питания 50 Гц не может быть меньше 500 об/мин.

Таблица.

Максимальное число пар полюсов АД общепромышленных серий

Серии электродвигателей	4А	5А	6А	R А	A И
Число пар полюсов	6	4	4	4	4

Для низкоскоростных (< 400 об/мин) производственных процессов такое ограничение приводит к усложнению системы электропривода.

Использование кольцевой обмотки [2] однодискового статора торцового асинхронного электродвигателя (ТАД) (см. рис. 1) позволяет получить двигатели с большим количеством полюсов. Понижение частоты вращения, возникающее при этом, позволяет обойтись в приводе без понижающего редуктора, снизив общие габариты и вес.

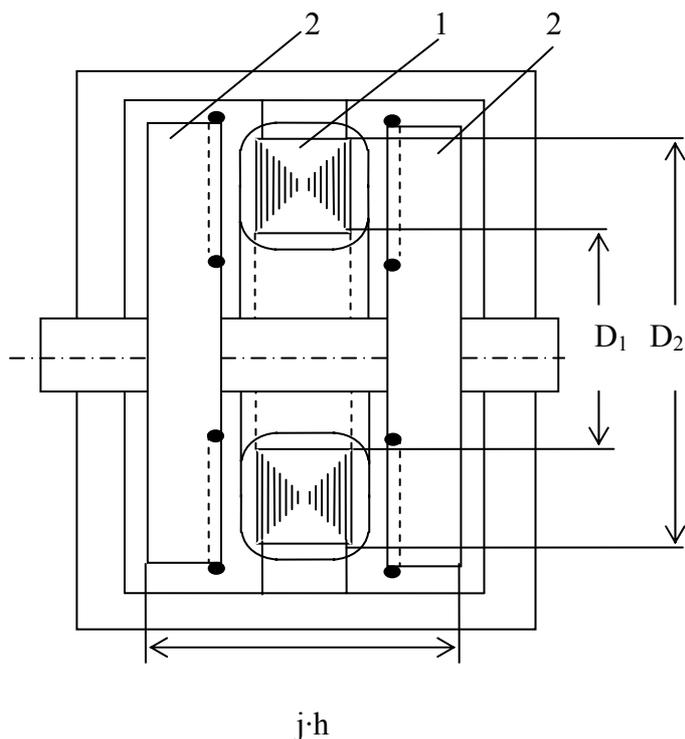


Рисунок 1. Эскиз торцового асинхронного ТАД может электродвигателя с двумя дисками ротора жением:

- 1 – статор с кольцевой обмоткой ;
- 2 – диски ротора.

$$S_2 = j \cdot 0,25 \cdot k \cdot n \cdot A_{\text{макс}} \cdot B_{\delta} \cdot D_2^3 \cdot \varphi(d^*), \quad (2)$$

где помимо аналогичных с формулой (1) по смыслу величин, относящихся к ТАД, применяются :

- j – число элементарных пар «статор-ротор» (j = 2 на рис. 1);
- вспомогательный коэффициент  $\varphi(d^*)$ , учитывающий конструктивную специфику расположения магнитной системы:  $\varphi(d^*) = d^* \cdot (1 - d^{*2})$ , причем  $d^* = D_1 / D_2$  (см. рис. 1). В [4] рекомендованы значения  $d^* = 0,4..0,6$ . Используемая в формуле (2) линейная нагрузка  $A_{\text{макс}}$  определяется на длине окружности  $D_1$  ТАД. Учитывая необходимость дальнейшего сопоставления ТАД с цилиндрическим АД, целесообразно в формуле (2) перейти к линейной нагрузке A, определяемой по среднему (расчетному) диаметру  $D_p = (D_1 + D_2) / 2$  :

$$A_{\text{макс}} = A \cdot \frac{D_p}{D_1} = A \cdot \frac{d^* + 1}{2 \cdot d^*}$$

Вместе с тем представляют проектировочный интерес условия, при которых подобное снижение частоты вращения не приведет к снижению мощности.

Как известно [3], полную мощность АД традиционной конструкции можно выразить следующей формулой:

$$S_1 = k_d \cdot n_d \cdot A_d \cdot B_{\delta} \cdot \lambda \cdot D^3, \quad (1)$$

где:

$k_d$ - коэффициент, учитывающий форму обмотки и распределения кривой индукции  $B_{\delta}$ - по окружности статора;  $n_d$ - синхронная частота вращения;  $A_d$ - линейная токовая нагрузка;  $B_{\delta}$ - амплитуда первой гармоники индукции вращающегося магнитного поля статора;  $\lambda = \ell / D$ , где  $\ell$  -расчетная длина магнитопровода, D - внутренний диаметр статора.

Согласно [4] мощность

быть представлена выра-

По этой же причине диаметр  $D_2$  в формуле (2) представим через  $D_p$ :

$$D_2 = D_p \cdot \frac{2}{d^* + 1}.$$

После подстановки этих формул в (2) она приобретает следующий вид :

$$S_2 = j \cdot k \cdot n \cdot A \cdot B_\delta \cdot D_p^3 \cdot \frac{1 - d^*}{1 + d^*}. \quad (3)$$

### Сопоставление АД и ТАД по мощности.

При этом будем считать, что  $n_d = n$ ;  $j = 1$ . Деля  $S_2$  на  $S_1$ , получим:

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{k \cdot n \cdot A \cdot B_\delta \cdot D_p^3 \cdot d^*}{k_d \cdot n_d \cdot A_d \cdot B_{d\delta} \cdot \lambda \cdot D^3} \cdot \frac{1 - d^*}{1 + d^*}.$$

Если, кроме того, считать, что  $k_d \approx k$ , а  $B_{d\delta} = B_\delta / b$ ,  $A_d = A/a$ , то

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{a \cdot b}{\lambda} \cdot \frac{1 - d^*}{1 + d^*} \cdot \left( \frac{D_p}{D} \right)^3. \quad (4)$$

Преимущества ТАД по мощности проявляются при  $\frac{S_2}{S_1} > 1$  или

$$\frac{a \cdot b}{\lambda} \cdot \frac{1 - d^*}{1 + d^*} \cdot \left( \frac{D_p}{D} \right)^3 > 1.$$

Последнее неравенство преобразуется в следующее:

$$\frac{D_p}{D} > \sqrt[3]{\frac{1 + d^*}{1 - d^*} \cdot \frac{\lambda}{a \cdot b}}. \quad (5)$$

Первый множитель, стоящий под знаком радикала представлен графически на рисунке 2.

По нему видно, что для возможных значений  $d^*$  кривая располагается выше 2. Поскольку коэффициенты  $\lambda$ ,  $a$ ,  $b$  имеют значения близкие 1, то это означает, что в большинстве случаев расчетный диаметр ТАД должен быть по крайней мере в  $\sqrt[3]{2} = 1,26$  раз больше диаметра статора  $D$  заменяемого АД. Например, при  $\lambda = 0,9$ ;  $d^* = 0,4$ ;  $a = 0,8$ ,  $b = 1$ ,  $D_p/D > 1,38$ . Если принять  $D_p/D = 1,6$ , то

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{a \cdot b}{\lambda} \cdot \frac{1 - d^*}{1 + d^*} \cdot \left( \frac{D_p}{D} \right)^3 = \frac{0,8 \cdot 1}{0,9} \cdot \frac{1 - 0,4}{1 + 0,4} \cdot (1,6)^3 = 1,56.$$

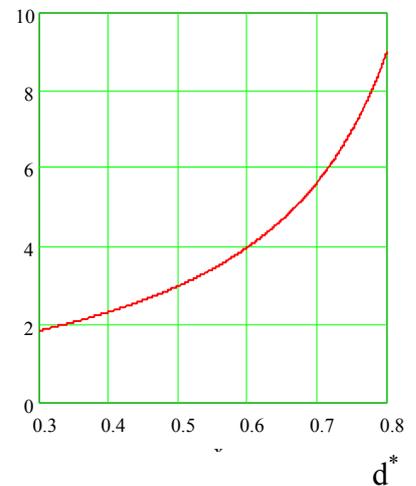


Рисунок 2. Вспомогательный множитель в неравенстве (5)

Если параметр  $d^*$  фиксирован, то кубическая степень в формуле (4) обеспечивает существенное увеличение мощности  $S_2 / S_1$  при росте  $D_p / D$ .

Вместе с тем увеличение  $d^*$  (при выполнении условия (5)) приводит к снижению выигрыша по мощности ТАД независимо от того, какими конструктивными путями обеспечивается рост  $d^*$ . Если фиксируется  $D_p / D$ , то увеличение  $d^*$  приводит к снижению  $D_2$  ТАД. Пусть  $d^* = 0,5$ ;  $a = 0,8$ ;  $b = 1$ ;  $\lambda = 0,9$ ;  $D_p / D = 1,6$ , тогда

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{0,8 \cdot 1}{0,9} \cdot \frac{1 - 0,5}{1 + 0,5} \cdot (1,6)^3 = 1,21.$$

Фиксация  $D_2$  при увеличении  $d^*$  приводит к некоторому увеличению расчетного диаметра

$$\left(\frac{D_p}{D}\right)_{d^*=0,5} = \left(\frac{D_p}{D}\right)_{d^*=0,4} \cdot \frac{0,5+1}{0,4+1} = 1,6 \cdot \frac{0,5+1}{0,4+1} = 1,714,$$

однако и здесь наблюдается снижение прироста мощности ТАД по сравнению со случаем  $d^* = 0,4$ :

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{0,8 \cdot 1}{0,9} \cdot \frac{1 - 0,5}{1 + 0,5} \cdot (1,714)^3 = 1,49,$$

что связано с уменьшением активной длины статора ТАД при увеличении  $d^*$ . Рассмотренные эффекты увеличения мощности ТАД тем сильнее, чем короче сопоставляемый АД ( $\lambda < 0,6$ ).

### Сопоставление АД и ТАД по частоте вращения.

При этом будем считать  $S_2 = S_1$ ,  $j = 1$ . Получим, деля  $n$  на  $n_d$ :

$$\frac{n}{n_d} = \frac{k_d \cdot A_d \cdot B_{\delta\delta} \cdot D^3 \cdot \lambda}{k \cdot A \cdot B_\delta \cdot D_p^3} \cdot \frac{1 + d^*}{1 - d^*} \quad (6)$$

Если как и в предыдущем случае принять, что параметры сопоставляемых двигателей близки, т.е.  $k_d \approx k$ , а  $B_{\delta\delta} = B_\delta / b$ ,  $A_d = A/a$ , то формула (6) упрощается до

$$\frac{n}{n_d} = \frac{\lambda}{a \cdot b} \cdot \frac{1 + d^*}{1 - d^*} \cdot \left(\frac{D}{D_p}\right)^3 \quad (7)$$

Скоростное преимущество ТАД по сравнению с цилиндрическими АД соответствует таким сочетаниям геометрических параметров, при которых  $n/n_d < 1$ , т.е.

$\frac{\lambda}{a \cdot b} \cdot \frac{1 + d^*}{1 - d^*} \cdot \left(\frac{D}{D_p}\right)^3 < 1$ . Это неравенство соответствует условию

$$\frac{D}{D_p} < \sqrt[3]{\frac{a \cdot b}{\lambda} \cdot \frac{1 - d^*}{1 + d^*}}, \quad (8)$$

являющемуся дуально тождественным ранее полученному (5). Идентичность формул (4) и (7) и условий (5) и (8) позволяет считать, что снижение частоты вращения ТАД при постоянстве мощности будет обратной величиной увеличения мощности, достигаемого при постоянстве частоты вращения ТАД и АД.

Уже рассмотренный при сопоставлении мощностей набор параметров  $\lambda=0,9$ ;  $d^*=0,4$ ;  $D_p/D = 1,6$ ;  $a = 0,8$ ;  $b = 1$  дает следующее снижение частоты вращения ТАД:

$$\frac{n}{n_d} = \frac{0,9}{0,8 \cdot 1} \cdot \frac{1+0,4}{1-0,4} \cdot (0,625)^3 = 0,641 \quad \left( = \frac{1}{1,56} \right)$$

Иными словами, если АД будет иметь  $p = 6$  ( $n_1 = 500$  об/мин), то у ТАД такой же расчетной мощности возможно получить  $p=9$  ( $n_1 = 333$  об/мин). Как и в предыдущем случае замена на ТАД «коротких» АД ( $\lambda < 0,6$ ) дает более существенный положительный эффект. Так при  $\lambda=0,5$ ;  $d^*=0,4$ ;  $D/D_p = 0,625$

$$\frac{n}{n_d} = \frac{0,5}{0,8 \cdot 1} \cdot \frac{1+0,4}{1-0,4} \cdot (0,625)^3 = 0,356$$

При этом число пар полюсов у ТАД можно увеличить до  $p = 6/0,356 \approx 17$ , а синхронную частоту вращения снизить до  $n_1 = 176$  об/мин.

Вместе с тем путь замены «коротких» АД на ТАД приводит к уменьшению величины среднего зубцового деления  $t_z$ , что может не только затруднить изготовление обмотки, но и увеличит магнитные нагрузки на зубцы. Для того, чтобы этого не допустить, следует придерживаться ограничений на  $\lambda$ , возникающих на основе уже полученных соотношений.

Для ТАД

$$t_z = \frac{\pi \cdot D_p}{Z} = \frac{\pi \cdot D_p}{6 \cdot p \cdot q} = \frac{\pi \cdot D_p \cdot n}{360 \cdot f \cdot q} \quad (9)$$

для АД

$$t_{zd} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_d}{360 \cdot f \cdot q_d} \quad (10)$$

Деление (9) на (10) дает

$$\frac{t_z}{t_{zd}} = \frac{q_d \cdot D_p \cdot n}{q \cdot D \cdot n_d} \quad (11)$$

Подставив в (11) соотношение (7), получим

$$\frac{t_z}{t_{zd}} = \frac{q_d}{q} \cdot \frac{\lambda}{a \cdot b} \cdot \frac{1+d^*}{1-d^*} \cdot \left( \frac{D}{D_p} \right)^2 \quad (\text{при } S_2 = S_1) \quad (12)$$

Условие  $\frac{t_z}{t_{zd}} > 1$  приводит к следующему ограничению

$$\lambda > \frac{q}{q_d} \cdot a \cdot b \cdot \frac{1-d^*}{1+d^*} \cdot \left( \frac{D_p}{D} \right)^2 \quad (13)$$

Если не прибегать к изменению числа зубцов на полюс и фазу  $q$ , то для последнего примера это условие не выполняется, т.к. в примере  $\lambda=0,5$ , а граничное значение

в (13) требует, чтобы  $\lambda$  было не менее

$$a \cdot b \cdot \frac{1-d^*}{1+d^*} \cdot \left( \frac{D_p}{D} \right)^2 = 0,8 \cdot 1 \cdot \frac{1-0,4}{1+0,4} \cdot (1,6)^2 = 0,877$$

Вариант с заменой более «длинного» АД ( $\lambda=0,9$ ) на ТАД с параметрами  $d^*=0,4$ ;  $D_p/D = 1,6$  при  $a = 0,8$ ;  $b = 1$  более успешен, т.к. для него не только выполняется условие (13)

$$a \cdot b \cdot \frac{1-d^*}{1+d^*} \cdot \left(\frac{D_p}{D}\right)^2 = 0,8 \cdot 1 \cdot \frac{1-0,4}{1+0,4} \cdot (1,6)^2 = 0,88, \text{ но и достигается небольшое увеличение}$$

среднего зубцового деления ТАД по сравнению с АД:

$$\frac{t_z}{t_{zd}} = \frac{\lambda}{a \cdot b} \cdot \frac{1+d^*}{1-d^*} \cdot \left(\frac{D}{D_p}\right)^2 = \frac{0,9}{0,8 \cdot 1} \cdot \frac{1+0,4}{1-0,4} \cdot \left(\frac{1}{1,6}\right)^2 = 1,03.$$

### Сопоставление АД и ТАД по удельным массам

Оценка двигателя по массе активных частей, приходящейся на единицу выходной мощности является важной в решении вопроса о его широком применении в электроприводе [3, 5]. Удельная масса может быть определена по формуле

$$m' = \frac{m}{P} = \frac{\gamma \cdot V \cdot k_E}{S \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad (14)$$

Если допустить, что средняя плотность активных частей двигателей одинакова  $\gamma_d = \gamma$ , то для определения соотношения удельных масс ТАД и АД можно применить формулу

$$\frac{m'}{m'_d} = \frac{V \cdot S_1 \cdot k_E \cdot \eta_d \cdot \cos \varphi_d}{V_d \cdot S_2 \cdot k_{Ed} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad (15)$$

Формула (4) сопоставления по мощностям  $S$  уже получена (при условии  $n = n_d$ ). Объем активных частей ТАД можно выразить через средний диаметр  $D_p$  и осевой размер  $h$  так:  $V = \pi \cdot h \cdot D_p^2 \cdot \frac{1-d^*}{1+d^*}$ . Объем активных частей

АД:  $V_d = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot l \cdot (1+k^*)^2$ , где  $k^* = 2h_{az}/D$  – относительная величина двойного слоя статора, сформированного высотой зубца и спинкой. Подставив  $V$ ,  $V_d$  и выражение обратное (4) в (15), получим

$$\frac{m'}{m'_d} = \frac{4 \cdot h \cdot k_E \cdot \cos \varphi_d \cdot \eta_d}{a \cdot b \cdot D \cdot k_{Ed} \cdot \cos \varphi \cdot \eta \cdot (1+k^*)^2} \cdot \frac{D}{D_p} \quad (16)$$

Если при замене АД на ТАД в первом приближении пренебречь изменениями режимных параметров  $\cos \varphi$ ,  $\eta$ ; считать, что  $k_E \approx k_{Ed}$ , то для соотношения удельных масс останется зависимость только от конструктивных параметров:

$$\frac{m'}{m'_d} = \frac{4 \cdot h}{a \cdot b \cdot D \cdot (1+k^*)^2} \cdot \left(\frac{D}{D_p}\right) \quad (17)$$

В этой формуле фигурирует осевая длина  $h$  только одной элементарной пары «статор-ротор» - число таких пар на отношение удельных масс не влияет. Из формулы (17) следует, что снижение удельной массы ТАД по отношению к удельной массе АД может быть достигнуто увеличением  $D_p/D$ . Уже было по-

казано, что этот путь приводит к уменьшению роста мощности ТАД по сравнению с АД и поэтому нецелесообразен. Выигрыш ТАД по удельным массам произойдет при выполнении неравенства

$$\frac{4 \cdot h}{a \cdot b \cdot D \cdot (1+k^*)^2} \cdot \left(\frac{D}{D_p}\right) \leq 1, \text{ что соответствует}$$

$$\frac{h}{D} \leq \frac{a \cdot b}{4} \cdot (1+k^*)^2 \cdot \left(\frac{D_p}{D}\right) \quad (18)$$

Последнее неравенство может быть использовано как рекомендация при оптимальном проектировании ТАД в виде (18) или в абсолютных значениях осевой длины  $h$ :

$$h \leq \frac{a \cdot b}{4} \cdot (1+k^*)^2 \cdot D_p.$$

Пример. АД мощностью 75 кВт имеет  $D_H = 393$  мм;  $D = 211$  мм;  $\lambda = 0,9$  ( $S_1 = 88$  кВА)

$$k^* = (D_H - D) / D = (393-211) / 211 = 0.863.$$

Если предпринять замену этого двигателя на ТАД с  $a = 0,8$ ;  $b = 1$ ;  $D_p / D = 1,6$ , то

$$\frac{h}{D} \leq \frac{a \cdot b}{4} \cdot (1+k^*)^2 \cdot \left(\frac{D_p}{D}\right) = \frac{0,8 \cdot 1}{4} \cdot (1+0,863)^2 \cdot (1,6) = 1,11.$$

Т.е. для рассмотренного двигателя снижение удельной массы при его замене на ТАД наступит лишь тогда, когда  $h$  будет меньше  $211 \cdot 1,11 = 235$  мм. Расчетный диаметр

$D_p = 1,6 \cdot 211 = 338$  мм, что при  $d^* = 0,4$  даст  $D_2 = 483$  мм. Согласно ранее произведенным оценкам мощность  $S_2$  такого ТАД будет в 1,56 раза больше исходного АД, т.е.  $\approx 183$  кВА.

### Оценка увеличения намагничивающего тока

Увеличение диаметра и числа полюсов асинхронного двигателя приводит к

увеличению намагничивающего тока и, как следствие, к снижению коэффициента мощности [1]. Поскольку массовое проявление этого процесса негативно сказывается на электроснабжении электропривода, представляет интерес, насколько сильным он будет при замене АД на ТАД. Оценить намагничивающие токи позволяют формулы:

$$I_{\mu d} = \frac{p_d \cdot F_d}{0,9 \cdot m \cdot w_{1d} \cdot k_{обд}} \quad \text{ - для АД} \quad \text{ и } \quad I_{\mu} = \frac{p \cdot F}{0,9 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{об}} \quad \text{ - для ТАД,}$$

где:  $m$ - число фаз обмотки статора;  $w_{1d}$ ,  $w_1$ - числа витков обмотки статора;  $F_d$ ,  $F$ - намагничивающие силы;  $k_{обд}$ ,  $k_{об}$  – обмоточные коэффициенты обмоток статора;

$p_d$ ,  $p$  – число пар полюсов обмоток статора АД и ТАД соответственно.

Если индукции в воздушном зазоре считать одинаковыми:  $B_{\delta d} = B_{\delta}$ , то при одинаковых коэффициентах насыщения и величинах воздушного зазора  $F_d = F$ , и отношение токов намагничивания может быть представлено формулой

$$\frac{I_{\mu}}{I_{\mu d}} = \frac{p \cdot w_{1d}}{p_d \cdot w_1} \quad (19)$$

При одинаковых величинах напряжения и частоты питания, коэффициентах формы поля и отношений э.д.с. обмотки к номинальным напряжениям

$$\frac{p}{p_d} = \frac{n_d}{n}, \quad a \quad \frac{w_{1d}}{w_1} = \frac{\Phi}{\Phi_d} \quad (20)$$

Отношение магнитных потоков можно получить, приравнявая в первом приближении выражения индукции в воздушном зазоре:

$$\text{-для АД} \quad B_{\delta d} = \frac{p_d \cdot \Phi_d}{D \cdot l} = \frac{p_d \cdot \Phi_d}{D^2 \cdot \lambda};$$

-для ТАД

$$B_{\delta} = \frac{p \cdot \Phi}{D_p \cdot l_p} = \frac{p \cdot \Phi \cdot (1 + d^*)}{D_p^2 \cdot (1 - d^*)}$$

После приравнивания и необходимых преобразований получим:

$$\frac{\Phi}{\Phi_d} = \frac{p_d \cdot (1 - d^*)}{p \cdot \lambda \cdot (1 + d^*)} \cdot \left( \frac{D_p}{D} \right)^2 \quad (21)$$

Подставляя (21) в (20), а затем в (19), получим окончательно:

$$\frac{I_{\mu}}{I_{\mu d}} = \frac{(1 - d^*)}{\lambda \cdot (1 + d^*)} \cdot \left( \frac{D_p}{D} \right)^2 \quad (22)$$

Отсутствие соотношений частот вращения в формуле (22) и сопутствующих допущений о равенстве мощностей или частот вращения позволяет считать эту формулу более универсальной, чем (4), (7), (12) и (15). Согласно этой формуле замена «коротких» АД на ТАД и увеличение расчетного диаметра  $D_p$  дадут большее значение намагничивающего тока, большее снижение коэффициента мощности, и следовательно таких шагов следует избегать. Для примера, при  $d^* = 0,4$ ;  $\lambda = 0,9$ ;  $D_p/D = 1,6$

$$\frac{I_{\mu}}{I_{\mu d}} = \frac{(1 - d^*)}{\lambda \cdot (1 + d^*)} \cdot \left( \frac{D_p}{D} \right)^2 = \frac{(1 - 0,4)}{0,9 \cdot (1 + 0,4)} \cdot (1,6)^2 = 1,22.$$

Если же избежать этих шагов не удастся, то для увеличения  $\cos\varphi$  ТАД необходимо снабдить батареей конденсаторов, разумеется, уменьшая в целом эффективность его использования. Таким образом, замена «коротких» АД на ТАД дает не столь однозначные результаты, как это могло бы быть при сопоставлении этих двигателей только по их мощности и частоте вращения.

### **Выводы.**

Использование ТАД позволяет получить электропривод с уменьшенной частотой вращения по сравнению с электроприводом на двигателях общепромышленных серий и, в ряде случаев, либо полностью отказаться от использования редукторов, либо перейти на редукторы с меньшим передаточным числом.

Наиболее целесообразной конструкцией ТАД, имеющего минимальную частоту вращения, следует считать конструкцию с одним диском статора и двумя дисками ротора.

## Литература

1. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию. 5-е издание  
- Ростов н/Д: Феникс, 2004.- 480 с.
2. Загрядцкий В.И., Кобяков Е.Т., Степанов Ю.С. Торцовые асинхронные электро-  
двигатели и совмещенные электромеханические агрегаты.-М.: Машинострое-  
ние – 1, 2003.- 287 с.
3. Бут Д.А. Основы электромеханики. - М.: Изд-во МАИ, 1996.- 468 с.
4. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. - М.: Высшая школа, 1985.-  
252 с.
5. Свечарник Д.В. Электрические машины непосредственного привода: Безре-  
дукторный электропривод.- М.: Энергоатомиздат, 1988.- 208 с.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ ШТАМПОВАНИЯ КРУГЛОЙ ЗАГОТОВКИ С УЧЕТОМ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ЗАГОТОВКИ**

В.П. Корячкин, д.т.н., проф

Ю.М. Масютин, инженер

Орловский государственный технический университет

Орел, тел. (4862) 551187, fax (4862) 551187, E-mail: mapp@ostu.ru

## **DEFINITION OF EFFORT STAMP OF ROUND PREPARATION WITH AC- COUNT REOLOGICAL OF PROPERTIES MATERIAL OF PREPARATION**

V.P.Korjachkin, Dr.Sci.Tech., Professor, J.M.Masjutin, Engineer

Oryol State Technical University

Orel, ph. (4862) 551187, fax (4862) 551187, E-mail: mapp@ostu.ru

### *ANNOTATION*

*IN ORELSTU IS CREATED THE SYSTEM OF MEASUREMENT REOLOGICAL PROPERTIES OF FOOD MATERIALS WITH USE OF A PERSONAL COMPUTER AND THE ENVIRONMENT OF GRAPHIC PROGRAMMING LABVIEW.*

*REOLOGICAL PROPERTIES OF FOOD MATERIALS ARE APPLIED TO CREATION OF EFFECTIVE TECHNOLOGIES AND THE EQUIPMENT OF THE FOOD-PROCESSING INDUSTRY.*

*THE ANALYSIS OF FLOW CURVES OF WIDE RANGE CONTINUOUS PLASTICITY MEDIUMS MADE IT POSSIBLE TO OFFER CHARACTERISTIC AND BASIC DIFFERENT THE REOLOGICAL STATE EQUATIONS WHICH GIVE THE OPPORTUNITY TO ESTIMATE THE RELATIONSHIP OF ELASTIC AND PLASTIC PROPERTIES OF SUBJECTS INQUIRY.*

*PARAMETERS OF THE REOLOGICAL EQUATIONS CAN BE APPLIED IN ENGINEER CALCULATIONS FOR PERFECTING TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN NEW KINDS PRODUCTION OF CONFECTIONERY GOODS.*

Современное создание эффективного технологического оборудования предприятий пищевых производств, в частности оборудования для формования пищевых материалов, необходимо основывать на знании реологических свойств объектов переработки.

Без учета реологических свойств пищевых материалов невозможен выбор геометрических размеров и определение оптимальных усилий рабочих органов разрабатываемого технологического оборудования. Знание реологических или физико-химических свойств объектов переработки позволит научно обоснованно производить инженерные расчеты разрабатываемого или модернизируемого оборудования, что на практике позволит обеспечить его эффективную работу и будет способствовать организации производства продукции при минимальном механическом воздействии на формуемый материал, что в целом минимизирует затраты на выпуск качественных изделий.

Физическая картина формирования штампованием имеет общий характер функционирования всех штампующих устройств. Это - сдавливание объекта формирования до получения заданной формы, размеров и требуемой массы.

Для выбора геометрических размеров и определения усилий при формировании штампованием рассмотрим процесс сжатия между двумя круглыми пластинами продукта, относящегося к наиболее сложному реологическому классу, а именно к упруго - вязко - пластичным материалам.

На рис. 1 приведена схема формирования штампованием слоя материала между двумя параллельными круглыми пластинами, при этом верхняя пластина движется вниз со скоростью  $u$ , а нижняя пластина неподвижна.

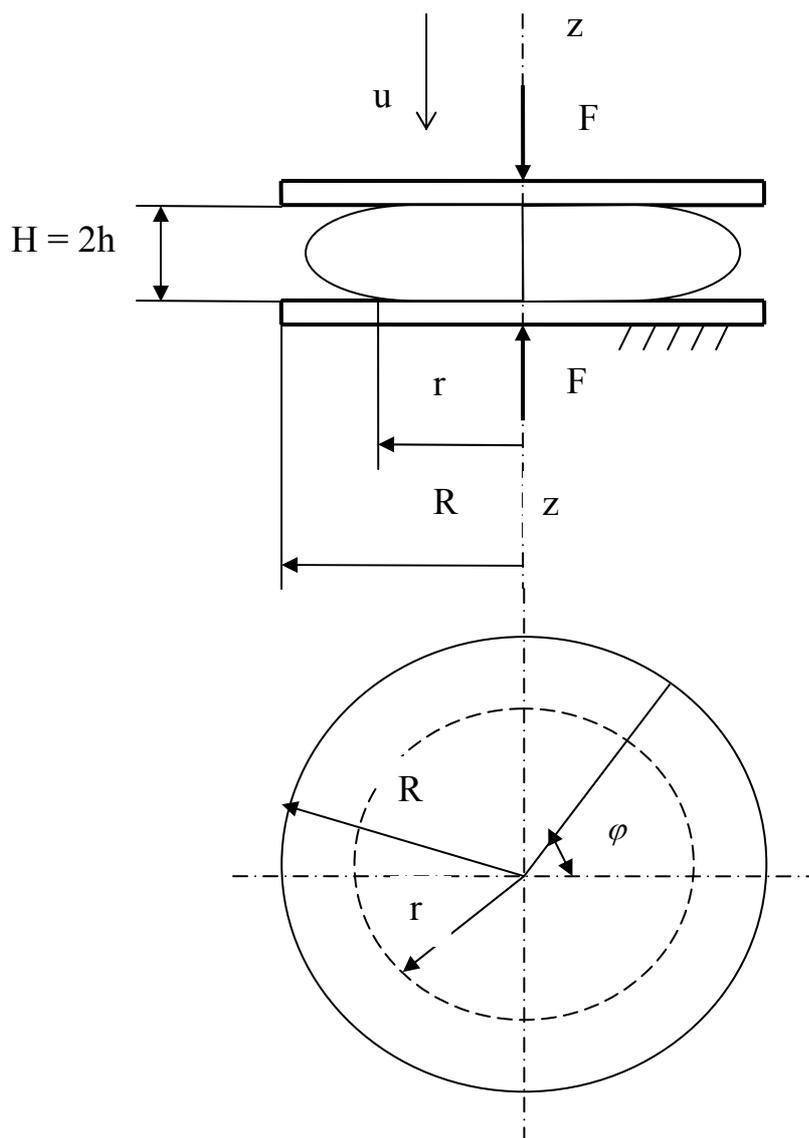


Рисунок 1 Схема сжатия слоя материала между круглыми дисками.

Для решения данной задачи целесообразно выбрать цилиндрическую систему координат с координатами  $r$ ,  $\varphi$ ,  $z$ . Заметим, что процесс течения материала между штампующими пластинами симметричен относительно оси  $z$ . Поэтому можно принять окружную скорость  $v_\varphi = 0$ , как и все ее производные по координате  $\varphi$ .

В первом приближении можно считать, что продукт в условиях изотермического режима несжимаем и нестационарное течение происходит в радиальном направлении,

Реологическое уравнение состояния упруго – вязко - пластичного материала, представим в виде:

$$\theta = \frac{(\pm \theta_0)^2}{\theta} + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

где  $\theta_0$  - предельное напряжение сдвига, Па;

$\eta$  - вязкость, Па с;

$\dot{\gamma}$  - скорость сдвига, с<sup>-1</sup>.

Это уравнение было получено при исследовании стационарного течения пряничного теста и некоторых новых видов песочного теста фундаментальными методами ротационной и капиллярной вискозиметрии. Анализ результатов экспериментальных исследований широкого ассортимента объектов дисперсных материалов, показал, что нелинейные графики зависимости касательного напряжения от скорости сдвига  $\lg \Theta = \lg \Theta(\lg \dot{\gamma})$  исследованных образцов имеют точку перегиба, делящую графики на участки, кривизна которых с ростом скорости сдвига изменяется на противоположное направление. Так если у предельного напряжения сдвига стоят знаки  $\pm \theta_0$  или  $\mp \theta_0$ , то это означает, что кривизна выпуклости графика меняется с направления к оси  $\lg \dot{\gamma}$  на направление к оси  $\lg \Theta$  или наоборот - с направления к оси  $\lg \Theta$  на направление к оси  $\lg \dot{\gamma}$  соответственно.

Для радиального течения материала между дисками можно записать:

$$\frac{\partial u_z}{\partial y} \ll \frac{\partial u_r}{\partial z}, \quad (2)$$

где  $u_z$ ,  $u_r$  – компоненты скорости по осям z и r соответственно.

Скорость сдвига при сдавливании материала между двумя круглыми дисками выразится зависимостью:

$$\dot{\gamma} = \frac{du_r}{dz}. \quad (3)$$

Величину касательного напряжения  $\theta$  выразим через градиент давления  $\frac{\partial p}{\partial z}$ :

$$\theta = \frac{\partial p}{\partial r} z. \quad (4)$$

Преобразовав (1), (3) и (4), получим дифференциальное уравнение течения упруго – вязко - пластичного между сжимающими дисками круглой формы:

$$du_r = \left( \frac{\partial p}{\partial r} z - \theta_\Delta \right) \eta dz. \quad (5)$$

где  $\theta_\Delta = \frac{(\pm \theta_0)^2}{\theta}$

Решением (5) при граничных условиях  $z = h$ ,  $u_r = 0$  будет:

$$u_r = \left[ \frac{\partial p}{\partial r} \cdot \frac{z^2 - h^2}{2} - \theta_\Delta (z - h) \right] \eta, \quad (6)$$

где  $H = 2h$  – расстояние между пластинами.

Полагаем, что объект несжимаем. Это условие представим уравнением:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

Уравнение (7) интегрируем от 0 до  $h$  с учетом того, что при  $z = h$   $u_z = -u$ .

Тогда скорость сдавливания будет:

$$u = \eta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( -\frac{h^3}{3} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} r + \theta_\Delta \frac{rh^2}{2} \right). \quad (8)$$

Из уравнения (8) определим величину давления в материале при сжатии его круглыми дисками:

$$p = \frac{3u(R^2 - r^2)}{4h^3\eta} + \frac{3}{2h} \theta_\Delta (R - r), \quad (9)$$

где  $R$  – радиус сжимающих дисков.

Уравнение (9) получено при условии, что при  $r = R$   $p = 0$ .

Усилие сдавливания объекта формования штампованием определяют зависимость:

$$F = 2\pi \int_0^R p r dr. \quad (10)$$

Проинтегрировав (10) с учетом значения  $p$  из (9), получим:

$$F = \frac{\pi R^3}{2h} \left( \frac{3uR}{4h^2\eta} + \frac{(\pm \theta_0)^2}{\theta} \right). \quad (11)$$

Уравнение (11) позволяет учесть реологические свойства объекта формования штампованием в инженерных расчетах известного совершенствуемого или нового создаваемого технологического оборудования для упруго – вязко – пластичных материалов и научно обосновывать геометрические размеры, усилия, а также кинематику рабочих органов оборудования, непосредственно взаимодействующих с объектами формования.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ ГРАНИЦЫ ДЕЙСТВИЯ СТРУИ ПРИ ГИДРОАБРАЗИВНОМ РЕЗАНИИ

*Ю.С. Степанов, д.т.н., проф.; Г. В. Барсуков, к.т.н., доц.;*

*А.В. Михеев, аспирант*

*Орловский государственный технический университет*

*Орел, Россия, тел.: (4862) 419818, факс: (4862) 416684, E-mail: upk@ostu.ru*

## SIMULATION OF THE ACTIVE BOUNDARY AN OPERATION JET AT ABRASIVE WATERJET CUTTING

*Yu.S. Stepanov, Prof., Dr., G.V. Barsukov, ass. prof., c.t.s.,*

*A.V. Miheev, the post-graduate student*

*Oryol State Technical University*

*Oryol, Russia, tel.: (4862) 419818, fax: (4862) 416684, E-mail [upk@ostu.ru](mailto:upk@ostu.ru)*

*In a paper the dimensions of an active jet edge, defining character of an exposure abrasive waterjet stream on the surface stratum, influencing on the gear and speed of collapse of a material, and, hence, shaping width of handling and a finishing condition of the surface stratum work piece are modelled.*

Скорость подачи сопла относительно материала, давление истечения и количество активных абразивных зерен на границе струи, обусловленных развитостью периферийной зоны, будут определять напряженно-деформационное состояние поверхностного слоя обрабатываемой детали. Меньшая скорость подачи, характеризуется интенсивностью подвода в зону резания энергии, что увеличивает область критических значений напряженного состояния. Таким образом, размеры активной границы струи  $x$  определяют характер внешнего воздействия гидроабразивного потока на поверхностный слой, влияют на механизм и скорость разрушения материала, а, следовательно, формируют ширину реза и финишное состояние поверхностного слоя обрабатываемой детали (рис. 1).

Рассмотрим действие гидроабразивной струи на клин, толщина которого равна единице (рис. 2). На поверхность клина действует распределенная нагрузка  $q(r)$ .

Данная задача может быть сведена к определению функции напряжений  $\Phi(r, \theta)$  при данном способе нагружения клина и полученное решение будет справедливо для  $0 < \beta < 2\pi$ .

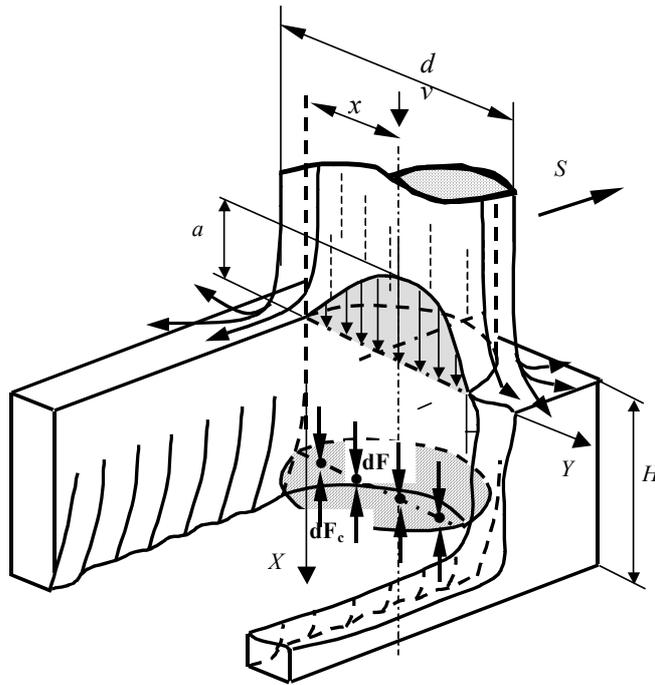


Рис. 1. Схема напряженного состояния материала под действием гидроабразивной струи

При указанном нагружении клина, граничные условия имеют вид:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta\theta} \Big|_{\theta=0} = -q(r) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \\ \sigma_{\theta\theta} \Big|_{\theta=\alpha} = q(r) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \\ \sigma_{r\theta} \Big|_{\theta=0} = \sigma_{r\theta} \Big|_{\theta=\alpha} = q(r) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right). \end{cases} \quad (1)$$

Представим функцию Эри в виде:

$$\Phi(r, \theta) = f(r) \varphi(\theta). \quad (2)$$

Напряжения в полярной системе координат определяются равенствами:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2}, \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2}, \\ \sigma_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right). \end{cases} \quad (3)$$

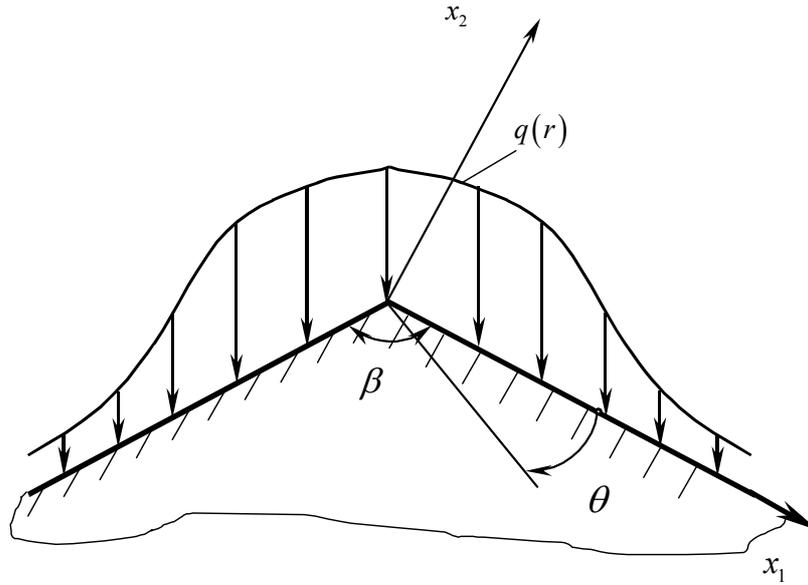


Рис. 2. Расчетная схема к определению напряженного состояния материала под действием гидроабразивной струи

С учетом зависимости (2), запишем (3) в виде:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{\varphi(\theta)}{r} \frac{\partial f(r)}{\partial r} + \frac{f(r)}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi(\theta)}{\partial \theta^2}, \\ \sigma_{\theta\theta} = \varphi(\theta) \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2}, \\ \sigma_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{f(r)}{r} \frac{\partial \varphi(\theta)}{\partial \theta} \right). \end{cases} \quad (4)$$

Подставив граничные условия (3.42) в (4) и опуская знаки, получим:

$$\begin{cases} q(r) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \varphi(\theta) \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2}, \\ q(r) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{f(r)}{r} \frac{\partial \varphi(\theta)}{\partial \theta} \right). \end{cases} \quad (5)$$

Так как на поверхности клина значения  $\varphi(\theta)$  постоянны, то можно записать что:

$$\varphi(\theta) \Big|_{\theta=0}^{\theta=\alpha} = const. \quad (6)$$

Учитывая (6), второе уравнение в системе (5) не определено, а первое, опуская  $\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ , можно переписать в виде:

$$f(r) = \int \left[ \int q(r) dr \right] dr . \quad (7)$$

Тогда с учетом (7) функция напряжений принимает вид:

$$\Phi(r, \theta) = \varphi(\theta) \int \left[ \int q(r) dr \right] dr . \quad (8)$$

Представим  $f(r)$  в виде степенного ряда:

$$f(r) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n r^n ,$$

тогда:

$$\Phi(r, \theta) = \varphi(\theta) \sum_{n=0}^{\infty} a_n r^n . \quad (9)$$

Используя общее выражение функции Эри:

$$\begin{aligned} \Phi(r, \theta) = & A\theta + A_0 r^2 \ln r + B_0 r^2 + C_0 \ln r + D_0 r^2 \theta + \\ & + (A_1 r^3 + B_1 r \ln r + C_1 r^{-1}) \cos(\theta) + Br\theta \sin(\theta) + \\ & + (A_1' r^3 + B_1' r \ln r + C_1' r^{-1}) \sin(\theta) + B' r \theta \cos(\theta) + \\ & + \sum_{n=2}^{\infty} (C_{1n} r^n + C_{2n} r^{n+2} + C_{3n} r^{-n+2}) \cos(n\theta) + \\ & + \sum_{n=2}^{\infty} (D_{1n} r^n + D_{2n} r^{n+2} + D_{3n} r^{-n+2}) \sin(n\theta) . \end{aligned} \quad (10)$$

выбираем слагаемые, удовлетворяющие условию (9):

$$\begin{aligned} \Phi(r, \theta) = & B_0 r^2 + D_0 r^2 \theta + A_1 r^3 \cos(\theta) + A_1' r^3 \sin(\theta) + \\ & + \sum_{n=2}^{\infty} (D_{1n} r^n + D_{2n} r^{n+2}) \sin(n\theta) + \sum_{n=2}^{\infty} (C_{1n} r^n + C_{2n} r^{n+2}) \cos(n\theta) . \end{aligned} \quad (11)$$

Легко убедиться, что полученная функция напряжений подчиняется бигармоническому уравнению

$$\nabla^2 \nabla^2 \Phi(r, \theta) = 0 . \quad (12)$$

Подставляя (11) в (3), с учетом граничных условий (1), приходим к формулам для напряжений, возникающих в пластине. Также используя зависимости теории упругости, можно определить деформации и перемещения в любой точке данного тела.

Рассмотрим пример.

На поверхность материала действует распределенная нагрузка по закону (рис. 3):

$$q(r) = q_0 r , \quad (13)$$

ГДЕ  $q_0$  - МАКСИМАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ НАГРУЗКИ,  $q_0 = \frac{F}{2/3\pi d^2}$ .  
 $F$  - СИЛА ВОЗДЕЙСТВИЯ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУИ НА МАТЕРИАЛ.

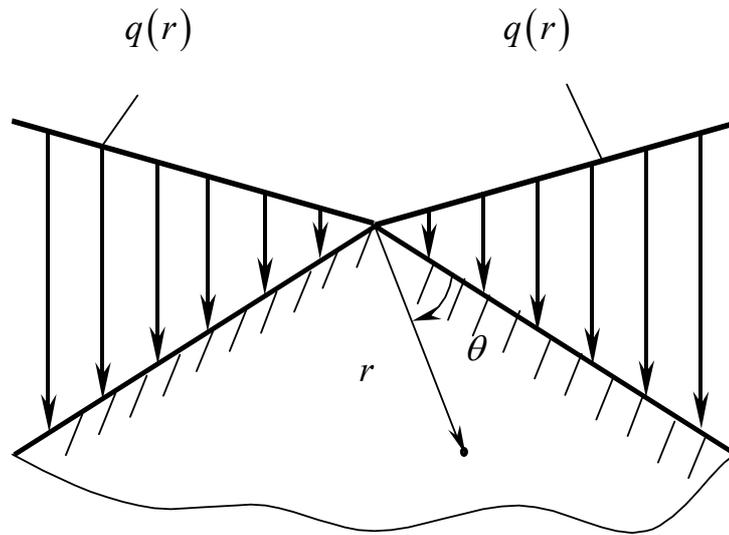


Рис. 3. Расчетная схема к определению напряженного состояния материала под действием гидроабразивной струи

Граничные условия при заданном законе нагружения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta\theta} \Big|_{\theta=0} &= -q_0 r \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \\ \sigma_{\theta\theta} \Big|_{\theta=\alpha} &= q_0 r \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \\ \sigma_{r\theta} \Big|_{\theta=0} &= \sigma_{r\theta} \Big|_{\theta=\alpha} = q_0 r \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right).\end{aligned}\tag{14}$$

Используя (7), получим:

$$f(r) = \frac{1}{3} r^3.\tag{15}$$

Тогда функция напряжений в общем виде принимает вид:

$$\Phi(r, \theta) = a_k r^3 \varphi(\theta).\tag{16}$$

С помощью (6) определим  $\varphi(\theta)$  и запишем функцию Эри для заданной распределённой нагрузки (13):

$$\Phi(r, \theta) = a_1 r^3 \sin(\theta) + a_2 r^3 \cos(\theta) + a_3 r^3 \sin(3\theta) + a_4 r^3 \cos(3\theta).\tag{17}$$

Этой функции соответствуют напряжения:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = 2a_1 r \sin(\theta) + 2a_2 r \cos(\theta) - 6a_3 r \sin(3\theta) - 6a_4 r \cos(3\theta) \\ \sigma_{\theta\theta} = 6a_1 r \sin(\theta) + 6a_2 r \cos(\theta) + 6a_3 r \sin(3\theta) + 6a_4 r \cos(3\theta) \\ \sigma_{r\theta} = -2a_1 r \cos(\theta) + 2a_2 r \sin(\theta) - 6a_3 r \cos(3\theta) - 6a_4 r \sin(3\theta) \end{cases} \quad (18)$$

При выполнении граничных условий определяются неизвестные  $a_1, a_2, a_3, a_4$ . По полученным зависимостям проанализировано напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя (рис. 4).

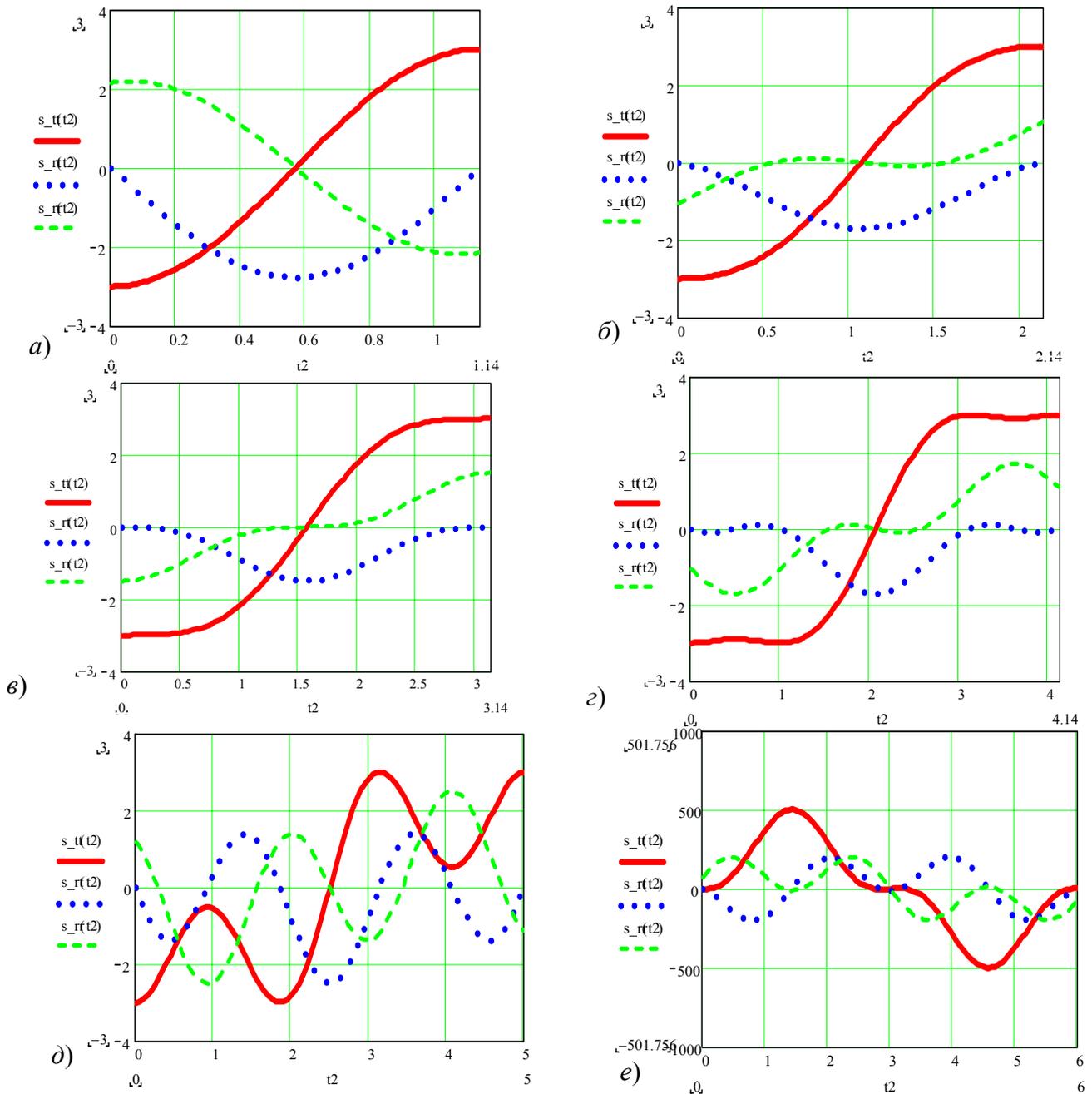


Рис. 4. Зависимости напряженно-деформированного состояния  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  поверхностного слоя от кинематического угла атаки  $\theta$ .

*a* -  $\theta = 1,14$  рад.; *б* -  $\theta = 2,14$  рад.; *в* -  $\theta = 3,14$  рад.; *г* -  $\theta = 4,14$  рад.;  
*д* -  $\theta = 5$  рад.; *е* -  $\theta = 6$  рад.

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИКИ ПОДАЧИ СОЖ  
ПРИ ШЛИФОВАНИИ КРУГАМИ С АКСИАЛЬНО-СМЕЩЕННЫМ РЕЖУЩИМ СЛОЕМ**

Ю. В. Василенко, к.т.н., М. Г. Подзолков, к.т.н., А. В. Воронков  
Орловский государственный технический университет  
Орел, тел.(4862) 419877, fax (4862) 419877, E-mail: admin@ostu.ru

**PERFECTION OF SERVE OF TECHNOLOGICAL LIQUID  
AT POLISHING CIRCLES WITH THE AXIAL-DISPLACED  
CUTTING LAYER**

Yu. V. Vasilenko, Ass. prof., M. G. Podzolkov, Ass. prof., A. V. Voronkov  
Oryol State Technical University  
Oryol, tel. (4862) 419877, fax (4862) 419877, E-mail: admin@ostu.ru

*In this article presents a short analysis is conducted some from the existent methods of serve of technological liquid at polishing circles with the axial-displaced cutting layer and the new combined method is offered.*

В нынешних сложных экономических условиях, в которых находится большинство отечественных машиностроительных предприятий, оправданным является сосредоточение усилий на конструкторско-технологическом совершенствовании существующего парка оборудования, что поможет предприятиям поддерживать конкурентоспособность своей продукции с минимальными затратами.

Качество и конкурентоспособность машиностроительной продукции в значительной степени определяются точностью размеров, формы и взаимного расположения поверхностей деталей, а также состоянием их поверхностного слоя (микро- и макрогеометрией поверхности, физико-механическими свойствами), окончательное формирование которых происходит на финишных операциях механической обработки.

Абразивная обработка среди других видов механической обработки и в частности - шлифование, является одним из самых точных и производительных. Объем шлифовальных работ постоянно возрастает, что подчеркивает постоянную динамику развития данного вида механической обработки. В отдельных отраслях промышленности шлифование составляет до 80% всех станочных работ.

Одним из важнейших элементов технологического обеспечения финишных операций механической обработки вообще, абразивной обработки в частности, наряду со станком, приспособлением и режущим инструментом, является смазочно-охлаждающая технологическая жидкость (СОЖ). Так как СОЖ сама по себе не реализует своих целей и функций, то под элементом технологической системы подразумевается СОЖ совместно с системой применения, куда входит оборудование для подачи технологической жидкости к зоне резания и поддержания ее в течение необходимого времени в работоспособном состоянии.

Внедрение некоторых прогрессивных технологических процессов обработки деталей резанием возможно только при использовании высокоэффективных технологических жидкостей (например, силовое шлифование). Обработка

деталей из материалов со специальными свойствами и труднообрабатываемых материалов выполняется только с СОЖ. В связи с этим существует важное научное направление, связанное с совершенствованием технологических процессов окончательной механической обработки путем рационального применения СОЖ, которое нашло свое отражение в работах ученых: М. Б. Гордона, В.Ф. Гурьянихина, В. Г. Гусева, В. В. Ефимова, М. И. Клушина, Е. Н. Маслова, Ю. В. Полянскова, П. А. Ребиндера, В. В. Рябова, Ю. С. Степанова, В. И. Туромши, Л. В. Худобина, Г. В. Чиркова, Е. Д. Щукина, П. И. Ящерицына и других исследователей, установивших, что путем такого использования СОЖ возможно снижение износа и засаливания шлифовального круга, увеличение отвода тепла и в целом повышение производительности и улучшение качества обработанной поверхности детали. На данный момент известно более 200 различных способов подачи СОЖ при шлифовании.

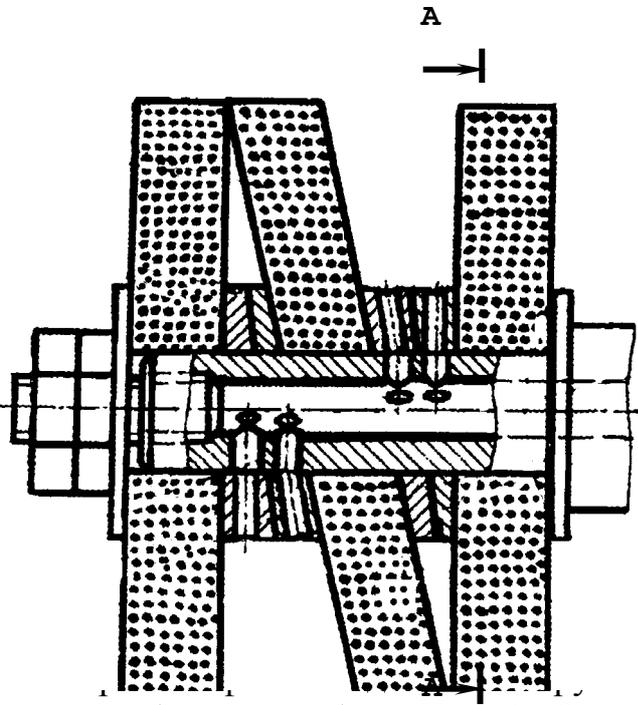
В ОрелГТУ в рамках ведомственной научной программы Федерального агентства по образованию «Развитие научного потенциала высшей школы» (2005 г.) был выполнен проект на тему «Совершенствование технологии и технологического оснащения обработки прецизионных деталей путем использования высокоэффективного шлифования с локальным контактом». Одним из результатов проекта стала разработка нового способа подачи СОЖ при шлифовании продольно-прерывистыми кругами с аксиально-смещенным режущим слоем на традиционном шлифовальном оборудовании (плоскошлифовальных станках 3Е710В, 3Е711ВФ1).

Известно, что шлифовальные круги с локальным бегущим контактом снижают теплонапряженность процесса шлифования на 30% и более. Применение СОЖ обеспечивает дополнительное кратное снижение температуры в зоне резания, что позволяет значительно повысить производительность и качество обработки в целом. Однако, в работах [1, 2] показано, что круги с локальным бегущим контактом генерируют более интенсивные воздушные потоки, чем обычные круги формы ПП. Поэтому традиционные способы подачи СОЖ при шлифовании с локальным бегущим контактом малоэффективны. В этой связи ранее нами уже был разработан ряд способов подачи СОЖ учитывающих конструктивные особенности кругов с локальным бегущим контактом [3, 4]:

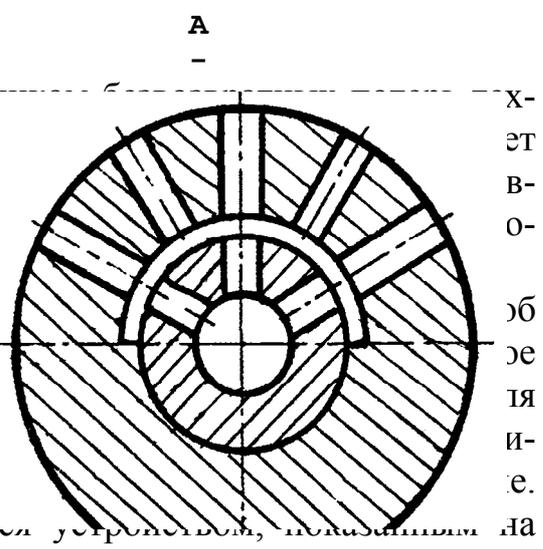
Таким образом, осциллирующий характер подачи СОЖ в совокупности с его смазочно-моющим, охлаждающим и диспергирующим действиями значительно снижают вероятность появления прижогов в поверхностном слое обрабатываемой заготовки.

Снижение температуры в зоне резания при шлифовании продольно-прерывистыми кругами позволяет в несколько раз повысить производительность обработки, а следовательно и увеличить металлоъем в единицу времени, следствием чего является значительное увеличение факела отходов шлифования, образующегося за зоной обработки (рис. 2). Некоторые из существующих способов подачи СОЖ частично реализуют функцию улавливания отходов шлифования (факела), однако для этих способов функция улавливания является второстепенной и эффективность ее реализации низка [5]. В то же время известно, что факел, образующийся при шлифовании и направлен движущийся

И  
Н  
О  
Л  
В  
П  
З  
П  
Т  
С  
(

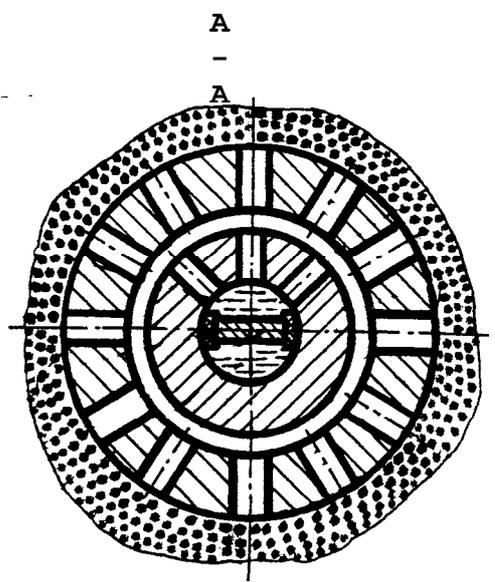
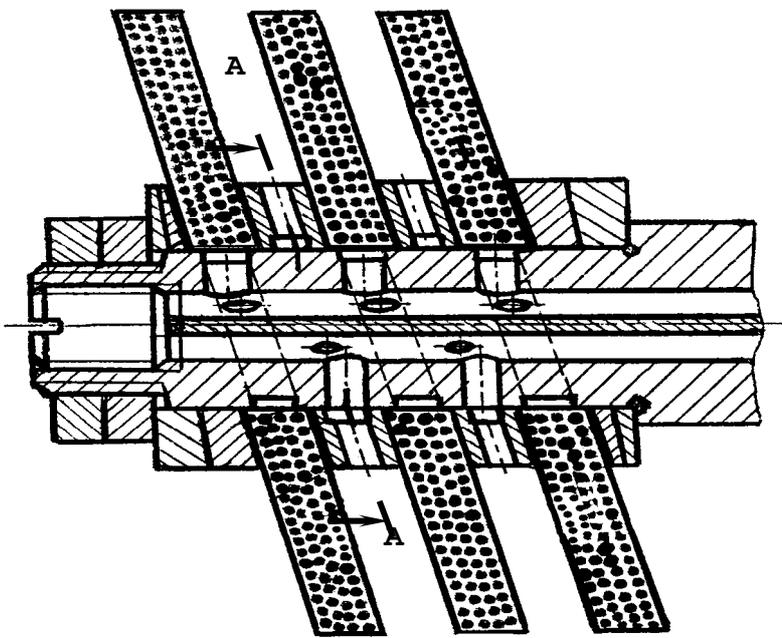


сточ  
рязн  
каче  
горы  
о [5]  
л ра  
кела  
ерти  
го на  
юша  
зняется



Х-  
ЭТ  
В-  
О-  
об  
се  
тя  
и-  
е.

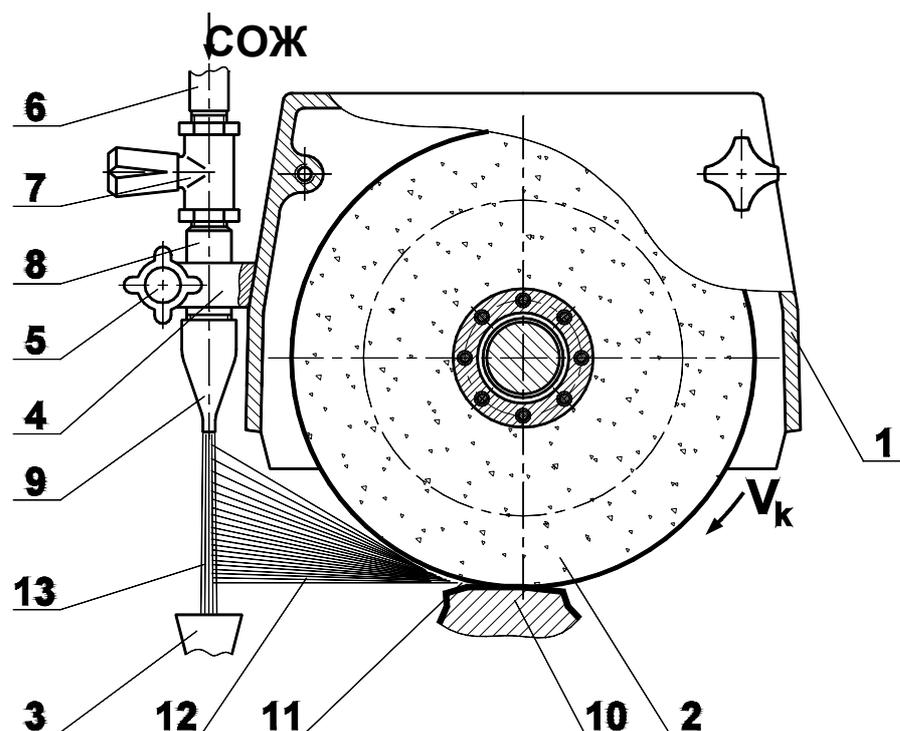
2, из зоны обработки 11 направленно движется факел шлифования 12. От трубопровода 6 системы подачи СОЖ станка, через вентиль 7 и соединительную трубу 8, жидкость подают в сопло 9, расположенное за зоной обработки, которое формирует струю СОЖ 13, улавливающую факел шлифования 12. Отрабатывающая жидкость отводится на очистку посредством дренажной системы 3. Кронштейном 4 и винтом 5 элементы системы подачи СОЖ закреплены на корпусе защитного кожуха 1. Устройство позволяет изменять условия истечения СОЖ из сопла 9 путем изменения геометрических размеров выходного отверстия и давления жидкости в системе вентилем 7.



**Рисунок 1 – Конструкции шлифовальных кругов с локальным бегущим контактом для подачи СОЖ в зону резания через полый шпиндель и зазоры между единичными абразивными дисками**



**Рисунок 2 – Направленный поток шлама (факел), образующийся при плоском шлифовании продольно-прерывистым шлифовальным кругом**



### **Рисунок 3 – Устройство для реализации заградительного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании**

По результатам теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по выбору оптимальных технологических параметров реализации заградительного способа подачи СОЖ (5%-ный раствор эмульсола НГЛ-205) в зависимости от режимов резания и характеристики элементов технологической системы. Оптимизация параметров улавливания факела шлифования позволяет сократить выбросы аэрозоля СОЖ и абразивно-металлической пыли до 80÷100%, что значительно снижает себестоимость обработки за счет экономии технологической жидкости и улучшения санитарно-гигиенических условий труда.

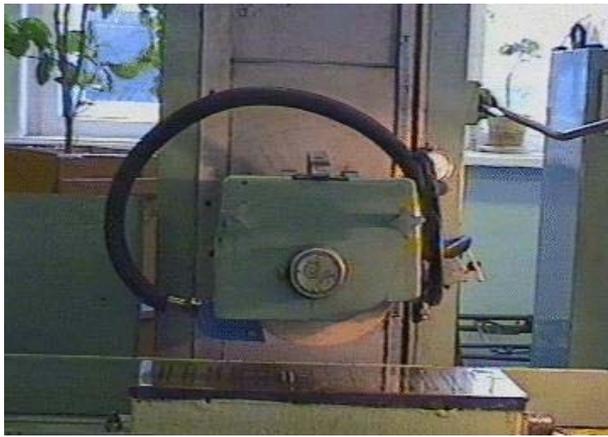
Анализ заградительного способа подачи СОЖ показал, что он инертен к обрабатываемому материалу: металл или неметалл, магнитный или немагнитный материал, а так же типу и составу связки абразивного круга. Может реализовываться самостоятельно или легко комбинироваться с другими способами подачи СОЖ (поливом в зону обработки; поливом на периферию круга вне зоны обработки и др.).

Как уже отмечалось ранее, заградительный способ подачи СОЖ может успешно комбинироваться с другими способами подачи технологической жидкости, что повышает эффективность реализации ее технологических функций. На основании выполненных теоретико-экспериментальных исследований разработана установка внезонной комбинированной подачи (УВКП) СОЖ при шлифовании с бегущим контактом, совмещающая в себе три способа подачи:

- напорной струей на круг вне зоны резания;
- поливом на заготовку вне зоны резания;
- заградительный способ подачи.

Кроме того, сохраняется возможность применения на станке традиционного способа подачи СОЖ – поливом в зону обработки или других способов, использовавшихся ранее.

Общий вид УВКП СОЖ, установленной на станке 3Е711ВФ1, показан на (рис. 4), на (рис. 5) показана модель установки смонтированной на станке 3Е710В, на (рис. 6) приведена модель УВКП СОЖ для использования при шлифовании с локальным контактом, на (рис. 7) приведен эскиз модернизации станка 3Е710В с применением УВКП СОЖ.



а) общий вид,



б) в работе

Рисунок 4 – Устройство внезонной комбинированной подачи СОЖ на станке 3Е711ВФ1

УВКП включает (рис. 7) башмачок 3 с прямой или криволинейной поверхностью, обращенной к периферии шлифовального круга 1 так, что образуется клиновидная полость. Башмачок крепится к боковым стенкам корпуса винтами 19, с возможностью регулирования наклона, для обеспечения оптимального зазора между периферией круга и поверхностью башмачка.

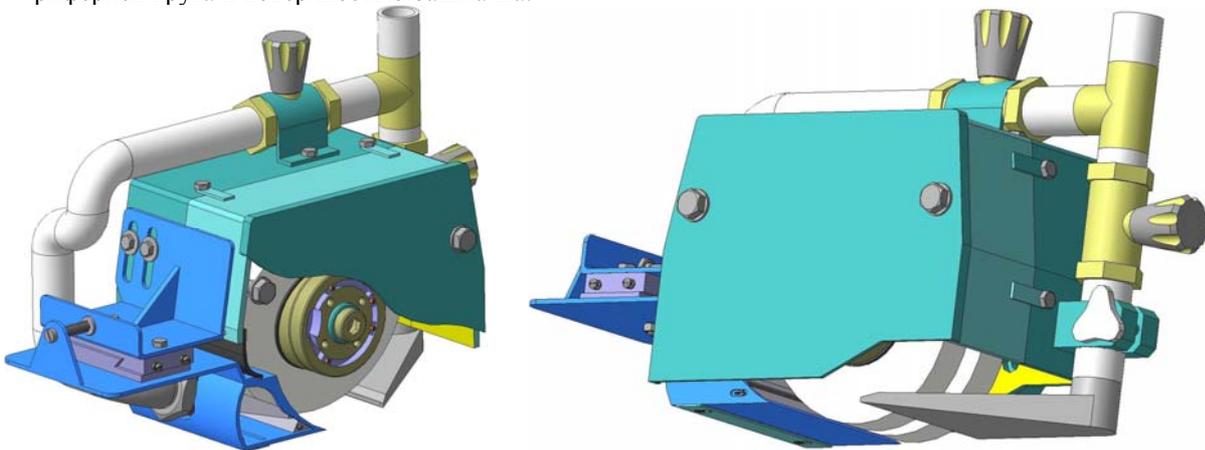


Рисунок 5 – Модель установки внезонной комбинированной подачи СОЖ, установленной на станке 3Е710В

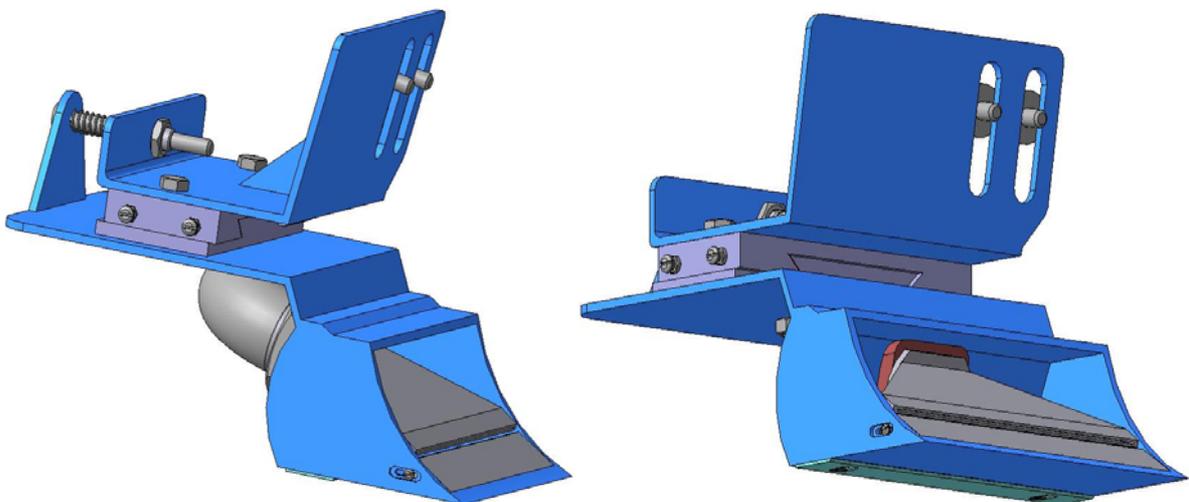


Рисунок 6 – Модель установки внезонной комбинированной подачи СОЖ для шлифования с бегущим контактом

В корпусе установлено сопло 5, имеющее возможность радиального перемещения, для обеспечения заданного угла наклона к поверхности круга 1. Фиксирование сопла осуществляется посредством гайки 21 и сферических шайб внутренней 6 и наружной 7.

Брызговик 14 служит для предотвращения разбрызгивания СОЖ из-под кожуха 16.

Подвод СОЖ к соплу 5 осуществляется при помощи резиновых трубок от гидросистемы станка через тройник. Регулируют напор шаровым краном 29, а контролируют давление жидкости в системе по манометру (не показан).

Подвес установки 11 крепится к защитному кожуху шлифовального круга 1 с помощью крепежных болтов 27, имея возможность перемещаться в

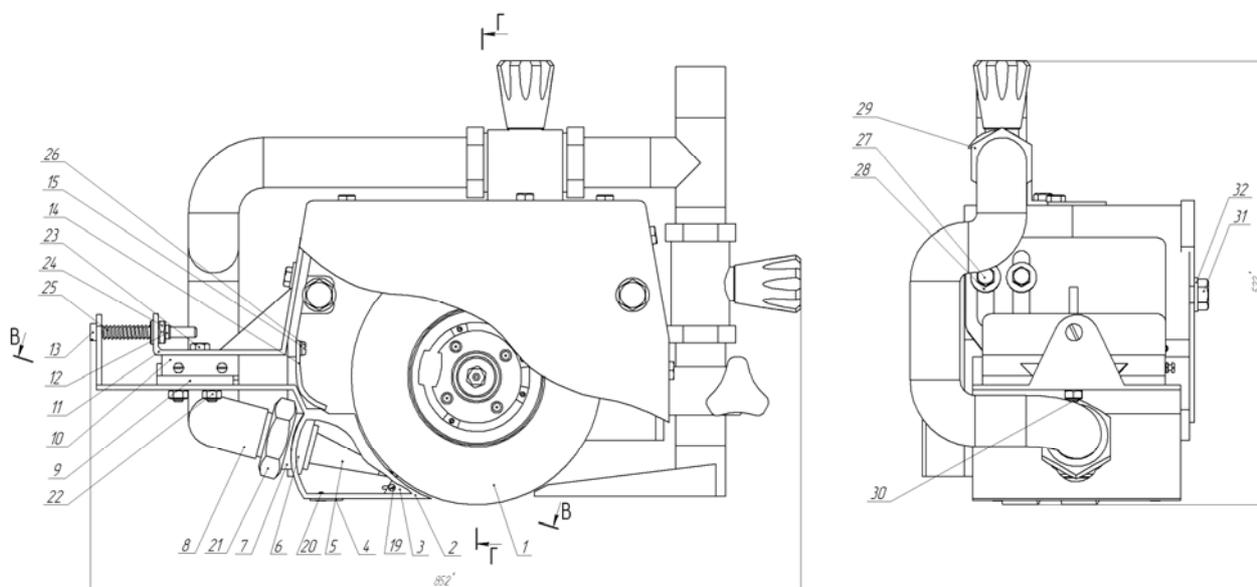


Рисунок 7 - Эскиз модернизации станка 3Е710В с применением установки внезонной комбинированной подачи СОЖ

вертикальном и горизонтальном направлениях при помощи направляющих 9 и 10 типа «ласточки хвоста», что необходимо для обеспечения плавной настройки положения корпуса установки после правки круга. Для точной установки зазора между башмачком 3 и кругом 1 предназначен винт микрометрической подачи 13, вращающийся во ввертыше 12. Дополнительный натяг в системе с целью выборки зазоров обеспечивается при помощи пружины 25.

В дне корпуса установки расположено щелевое отверстие, толщина которого регулируется планкой прижимной 4 на винтах 20. Отверстие предназначено для отвода отработавшей СОЖ из корпуса установки и образования заградительной шторы из технологической жидкости.

Установка работает следующим образом, как показано на (рис. 8). Башмачок 1 установлен в корпусе установки 8, обеспечивая зазор с периферийной поверхностью круга 2. Оптимальный размер зазора настраивается так, чтобы с одной стороны, отсечь корпусом башмачка периферийные воздушные потоки, генерируемые кругом, а с другой стороны, обеспечить эффективное многократное взаимодействие СОЖ с поверхностью инструмента. В клиновой полости

зазора, при попадании струи СОЖ из сопла 3 на круг 2, образуется зона разрежения, что способствует возникновению эффекта кавитации, в результате которой увеличивается моющее действие жидкости и охлаждение инструмента. Увеличению моющего действия также способствует последовательное многократное отражение струи СОЖ от поверхностей круга и башмачка.

После многократного взаимодействия с поверхностью круга, технологическая жидкость теряет первоначальную энергию, выносится кругом из клиновидного зазора в полость корпуса установки и распыляется там в виде брызг и тумана 6. Воздушно-капельная смесь конденсируется на внутренней

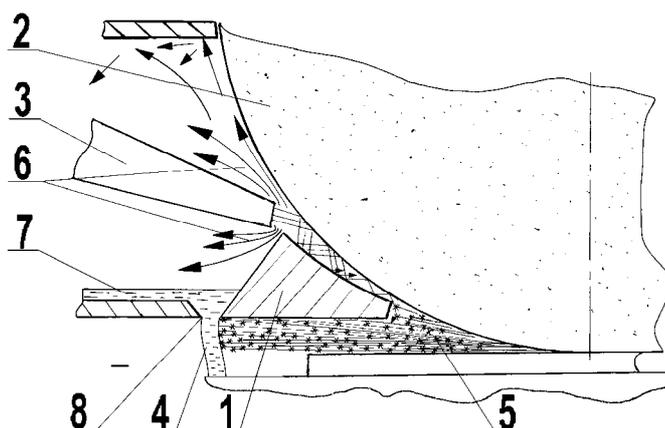


Рисунок 8 – Схема работы установки внезонной комбинированной подачи СОЖ

поверхности корпуса и образовавшаяся жидкость 7 вытекает из установки через щелевое отверстие 8, образуя заградительную шторку 4, которая улавливает факел шлифования 5, движущийся из зоны резания. Затем СОЖ частично попадает на обрабатываемую поверхность детали, дополнительно охлаждая и смазывая ее.

За счет такой конструкции и месторасположения установки, обеспечивается эффективная очистка и интенсивное охлаждение шлифовального круга, что ведет к повышению качества обработки. Эффективность действия установки зависит от формы и размера зазора между башмачком и шлифовальным кругом, количества и скорости подачи СОЖ, параметров водяной шторы.

#### *Литература:*

1. Степанов Ю.С., Подзолков М.Г. Обеспечение качества поверхностного слоя при обработке кругами с продольно-прерывистым аксиально-смещенным режущим слоем // Актуальные проблемы машиностроения: Матер. 1-ой междунар. науч.-техн. конф. – Владимир: Владимирский гос. ун-т, 2001. – С. 124-127.

2. Степанов Ю.С., Подзолков М.Г. Исследование процесса абразивной обработки продольно-прерывистыми кругами с аксиально-смещенным режущим слоем // нетрадиционные методы обработки // сб. Научн. Тр. Междунар. Конф. Ч. 1. – Воронеж: Воронежский Гос. Унив. 2002. – с. 84-89.

3. Пат. 2162787 РФ, мки 7 в 24 в 55/02. Способ осциллирующей подачи смазочно-охлаждающей жидкости патент / Степанов Ю.С., Афонасьев Б.И.,

Подзолков М.Г., Бородин В.В. (РФ). - Заявл. 07.04.1999; Оpubл.10.02.2001, Бюл. № 4. – 6 с.

4. Василенко Ю. В. Современное состояние техники подачи СОТЖ при плоском шлифовании периферией круга // СТИН, 2005. - №5. - С. 19-23.

5. Василенко Ю. В. Прогрессивная технологическая оснастка для подачи СОТС при абразивной обработке // Орловский государственный технический университет // Известия ОрелГТУ, серия «Машиностроение. Приборостроение». – №1–2. – Орел: ОрелГТУ, 2003. – С. 13-15.

## СПОСОБЫ БАЗИРОВАНИЯ И ЗАКРЕПЛЕНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

И.В. Кузин, аспирант

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия

им. П.А. Соловьёва

152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, тел.(0855) 52-00-91

## METHODS OF T.BLADES LOCATION AND FIXING FOR MACHINING

I.V. Kuzin, post-graduate student

Rybinsk state academy of aviation technology

Rybinsk, ph.(0855) 52-00-91

*In the article the following methodes for blades location and fixing are specified: within three points, in the assembly and with fusible alloy in briquette. The advantages and disadvantages of each method are defined.*

Одним из самых распространенных способов базирования рабочих лопаток турбины при механической обработке является базирование в 3-х центрах. При этом заготовка выполняется методом точного литья по выплавляемым моделям с окончательным обеспечением всей профильной части лопатки. С точки зрения работоспособности и надежности работы пера лопаток при высоких температурах литая поверхность с минимальной механической обработкой является благоприятной. Заготовка может иметь литейные базы в виде центровых отверстий или обратных центров. На рис. 1 представлена схема расположения баз в виде обратных центров с параллельными осями на заготовке рабочей лопатки турбины. Каждый из трех центров лопатки лишает ее двух степеней свободы, поэтому при установке заготовки на эти центры ее положение определено однозначно.

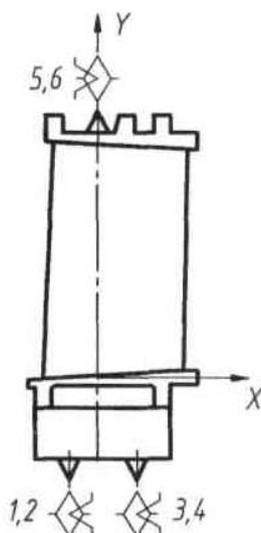


Рис. 1. Схема расположения баз в виде обратных центров с параллельными осями на заготовке лопатки

Полученные в отливке технологические базы в виде обратных центров в дальнейшем используются для создания развитых технологических баз в виде плоских поверхностей. Данный переход необходим для надежного и жесткого закрепления заготовки при ее последующей механической обработке. Кроме того, развитые технологические базы позволяют помещать деталь на установочные поверхности приспособлений, которые имеют необходимую площадь опорной поверхности. Такие поверхности имеют значительный срок службы, т. е. не деформируются при закреплении детали и практически не изнашиваются.

Однако рабочие лопатки турбины имеют разнообразные конструкции, причем далеко не все типы лопаток позволяют осуществлять переход от центров к плоским поверхностям на хвостовике и бандажной полке. Существует большое количество лопаток, имеющих тонкий профиль проточной части. При установке таких лопаток на заготовительные базы в виде фасок происходит деформация базовых поверхностей как при закреплении, так и при обработке. В этом случае технологически целесообразно за счет оснастки создать развитые базовые поверхности. Данная проблема решается при установке и закреплении лопатки в кассетах (рис.2).

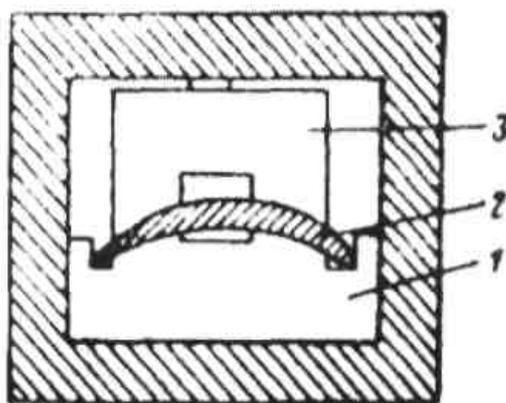


Рис. 2. Кассета для установки и закрепления рабочих лопаток турбины: 1–базовый неподвижный ложемент; 2–лопатка; 3–зажимной ложемент.

Лопатка турбины закрепляется в данной кассете за проточную часть лопатки. Установка осуществляется на установочные и прижимные элементы, выполненные в виде профильных ложементов тех сечений лопатки, в которых расположены ее литейные базы. При установке добиваются полного совпадения установочного элемента приспособления с профилем лопатки в устанавливаемом сечении. После установки деталь закрепляется.

В дальнейшем лопатка переставляется с операции на операцию в этой кассете, устанавливаясь в различных приспособлениях на технологические базы кассеты. Таким образом, один раз установленная и закрепленная деталь из кассеты не вынимается до завершения механической обработки лопатки. Однако у данного способа базирования рабочих лопаток существует множество недостатков:

- в результате износа установочных элементов приспособлений лопатки по профилю пера устанавливаются на площадки, а не точки. В результате нарушается точность ориентирования пера, что в последующем может привести к чрезмерным пространственным отклонениям пера лопатки в рабочем колесе;

- при закреплении на поверхности пера создаются локальные очаги контактных напряжений, что также может привести к нежелательным явлениям;

- использование кассет с механическим креплением детали требует

создания некоторого парка (обменного фонда) приспособлений абсолютно идентичных друг другу. При этом каждая из этих кассет должна обеспечивать полную повторяемость условий закрепления детали по сравнению с предыдущим приспособлением.

На ОАО "НПО"Сатурн" разработана технология изготовления рабочих лопаток турбины, исключая данные недостатки. При этом закрепление детали производится с помощью легкоплавких сплавов в брикет. Лопатка устанавливается в приспособление хвостовиком вверх (рис.3). Установка производится на литейные базы заготовки: три точки проточной части (1, 2 и 3); две точки на входной кромке (4 и 5); и точку на хвостовике со стороны проточной части (6). После базирования деталь прижимают к установочным элементам приспособления винтом, при этом образуется заливочная камера, открытая только сверху (со стороны хвостовика). Совпадение каждого установочного элемента приспособления с базовой точкой на детали подтверждается загоранием соответствующей лампочки.

После подтверждения совпадения всех установочных поверхностей приспособления с базовыми точками заготовки, осуществляется заливка брикета. При этом осуществляется переход от литейных баз к технологическим базам в виде плоскостей брикета: установочной базе в виде наиболее развитой плоскости брикета; направляющей базе в виде боковой поверхности брикета; опорной базе в виде торца.

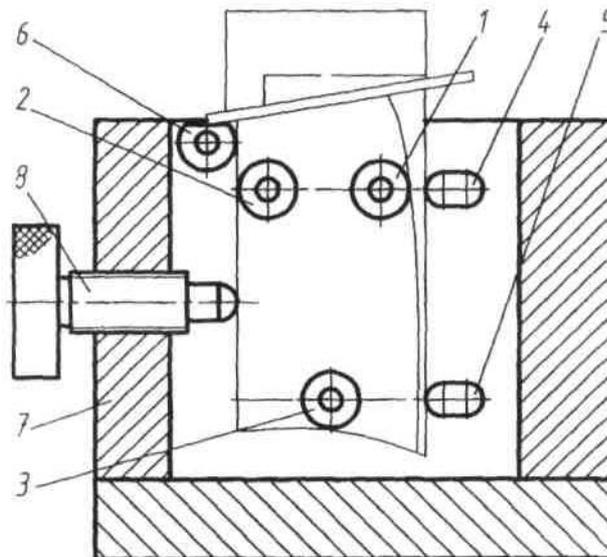


Рис.3. Приспособление для закрепления (заливки) детали в брикет:  
 1...6—установочные элементы приспособления; 7—корпус заливочной камеры;  
 8—винт для прижима направляющей базы детали к установочным элементам 4, 5.

В качестве легкоплавких сплавов рекомендуется использовать следующие:

3. Вi - 50%, Sn 12,5%, Pb - 25%, Cd 12,5%; температура плавления - 68 С, предполагаемая прочность - 2,2 кгс/мм<sup>2</sup>;

4. Вi - 52%, Sn - 48%; температура плавления - 139°С, предполагаемая прочность - 3,4 кгс/мм<sup>2</sup>.

В производстве предпочтение отдается легкоплавкому сплаву №1, известному под названием сплава Вуда. Достоинством сплава №1 по сравнению со сплавом № 2, известным под названием сплава Cerrotu, является то, что он плавится в кипящей воде, а также отсутствие усадки при затвердевании, что присуще и сплаву № 2.

Таким образом, при механической обработке рабочих лопаток турбины, имеющих тонкий профиль проточной части, целесообразно применять заливку лопаток легкоплавким сплавом в брикет. При этом осуществляется переход от литейных баз лопатки к технологическим базам в виде плоскостей брикета.

УДК 621.91

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

С. А. Урядов, аспирант

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

Рыбинск, ул. Пушкина, 57, e-mail: [root@rgata.ru](mailto:root@rgata.ru) (0855) 21-53-03

## **THEORETICAL METHOD OF FATIGUE STRENGTH CALCULATION IN GRINDING**

S. A. Uryadov

Rybinsk State Academy of Aviation Technology

Rybinsk, Pushkina st, 57, e-mail: [root@rgata.ru](mailto:root@rgata.ru) (0855) 21-53-03

*The technological conditions of the machining such as type of a machining, of a tools characteristic, of an allowance and others, in a considerable degree influenced on the fatigue of a parts. In this article the author made a review one of the methods of fatigue strength calculation .*

Механическая обработка (точение, фрезерование, шлифование, полирование и т.д.) вызывает пластическую деформацию, нагрев и структурные превращения поверхностных слоев и сопровождается появлением неравномерных по глубине остаточных деформаций и напряжений. В зависимости от того, какое явление преобладает (пластическая деформация, нагрев или структурные превращения), поверхностный слой может отличаться различными глубиной и степенью наклепа, величиной и знаком остаточных напряжений. Эти параметры, а также шероховатость поверхности, в основном характеризуют качество поверхностного слоя и оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин.

Вопросам механической обработки высокопрочных авиационных материалов посвящено много исследований, на основании которых составлены нормативы оптимальных режимов и геометрических параметров режущего инструмента, но в этих нормативах, как правило, не учено влияние технологических факторов на сопротивление деталей машин усталостному разрушению. В инженерной практике чаще всего регламентируются лишь высотные параметры шероховатости  $Ra(Rz)$ .

Возрастающие требования к качеству выпускаемой продукции, особенно к ответственным деталям ГТД, ставят проблему обеспечения эксплуатационных свойств на основе нормирования параметров качества поверхностного слоя. В связи с этим перспективным представляется подход, при котором на стадии конструкторско-технологической подготовки производства производится нормирование параметров поверхностного слоя, обеспечивающих заданное значение предела выносливости детали. Управляя процессом

обработки, можно получить требуемые значения параметра шероховатости, глубины и степени наклепа, остаточных напряжений, необходимые для обеспечения прогнозируемого значения предела выносливости.

Автором была выведена формула по расчетному определению предела выносливости детали,

$$\sigma_{-1} = \tilde{N} \cdot \frac{\sigma_{-1\dot{E}\tilde{N}\ddot{O}}}{E_{\dot{E}\tilde{N}\ddot{O}}} \cdot \left[ 0,885 \cdot \sqrt{\tilde{A}} \cdot (1 + \sqrt{\tilde{A}} + 0,565\sqrt{\tilde{A}} \cdot \ddot{A}) \right]^k$$

где  $\tilde{N} = \tilde{N}_1^{k_2}$  и  $k = k_1 \cdot k_2$  - коэффициенты, зависящие от вида материала и метода обработки;

$\sigma_{-1\dot{E}\tilde{N}\ddot{O}}$  - предел выносливости заготовки;

$E_{\dot{E}\tilde{N}\ddot{O}}$  - модуль упругости заготовки;

$\tilde{A} = \frac{v_{\tilde{A}}^l}{a_{\tilde{A}}}$  - критерии Пекле, отражающий влияние режимных условий

( $v_{\tilde{A}}^l$ ) и теплофизических свойств обрабатываемого материала ( $a_d$ ) на характер протекания процессов шлифования;

$\tilde{A} = \frac{(\lambda_{\tilde{n}\ddot{O}})_e}{(\lambda_{\tilde{n}\ddot{O}})_{\tilde{A}}}$  - критерий, учитывающий теплофизические свойства

детали и круга;

$\ddot{A} = \frac{t \cdot s}{lB}$  - критерий, учитывающий геометрию зоны

шлифования.

Зависимость (1) позволяет определить предел выносливости обработанной детали в зависимости от принятых режимов обработки, параметров режущего инструмента, характеристик обрабатываемого материала и т. п., так как величины, входящие в формулу, являются или паспортными данными материала, или могут быть рассчитаны без проведения экспериментов. На основании этого возможно составление нормативов по определению технологических условий обработки с целью обеспечения заданного значения предела выносливости

Расчет коэффициентов  $C_i$  и  $k_i$  присутствующих в формуле (1), производится по разработанной автором методике .

Определение коэффициентов  $C_1$  и  $k_1$  производится по алгоритму, приведенному на рисунке 1. В качестве исходных данных служат свойства обрабатываемого материала ( $\tau_\rho, \lambda_{\tilde{A}}, c\rho, HRC_y$  и др.), свойства абразивного

инструмента (геометрические размеры, тип абразива, структура, вид связки, твердость и др.), геометрические параметры зоны обработки, другие технологические параметры обработки (тип применяемой СОТС, наличие правки инструмента и др.). В соответствии с исходными данными по существующим зависимостям или рекомендациям, например [1], назначаются режимы обработки ( $V_k, V_{\dot{A}}, S, t$ ). По имеющимся зависимостям определяются необходимые критерии подобия (Б, Г, Д). Определяется составляющая сил резания  $P_z$ . Далее, в соответствии с формулой (7) определяется максимальная поверхностная температура  $\Theta_m$ . По формуле, приведенной на схеме, рассчитываются коэффициенты  $C_1$  и  $k_1$ .

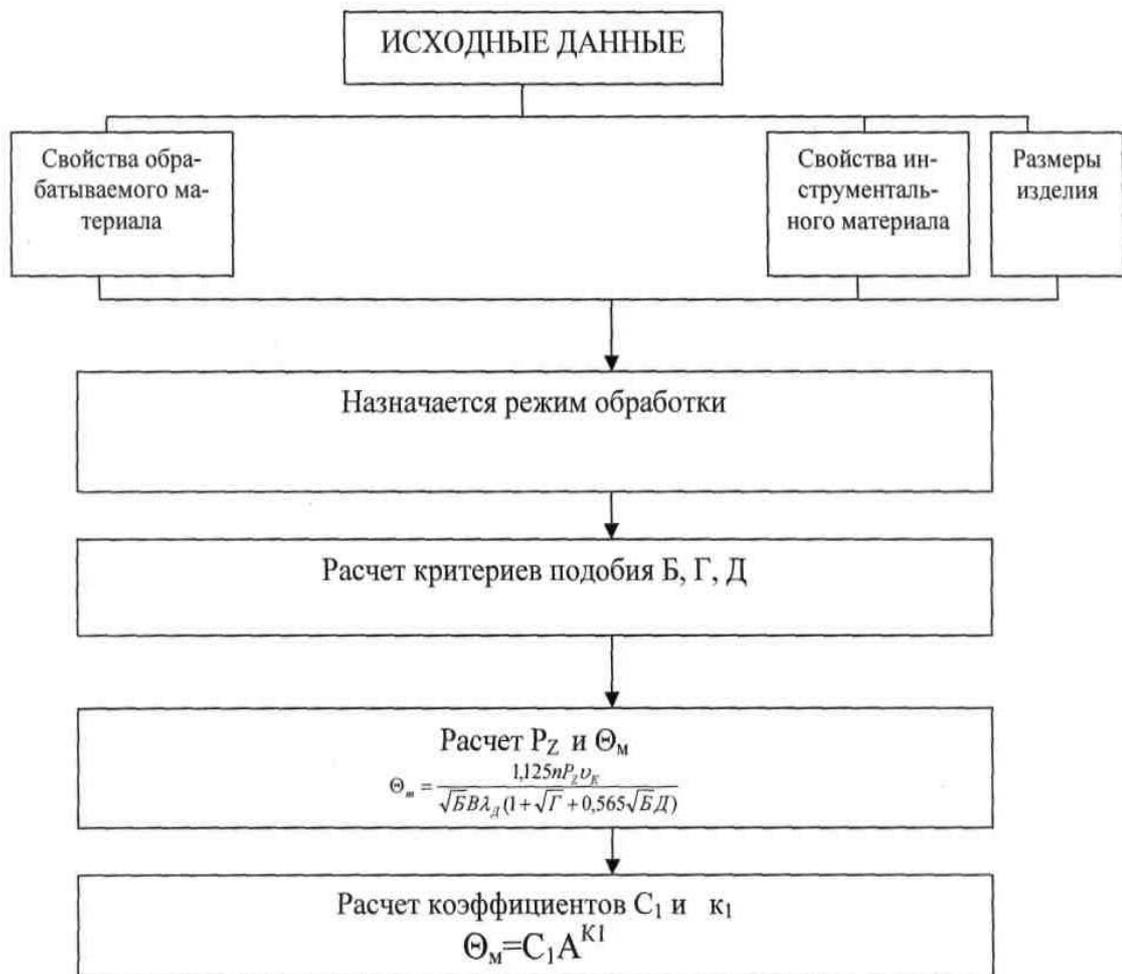


Рисунок 1 – Алгоритм расчета коэффициентов  $C_1$  и  $k_1$

Коэффициенты  $C_2$  и  $k_2$  характеризуют зависимость между модулем упругости  $E$  и температурой в зоне обработки:

$$E_{IAD} = C_2 \cdot \Theta_{DAG}^{k_2}$$

Установлено, что для различных материалов в одной группе данная взаимосвязь имеет идентичный характер [2].

При обработке полученных результатов были установлены математические зависимости модуля упругости  $E$  от температуры в зоне обработки.

Коэффициенты обобщенных зависимостей для материалов разных групп приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Коэффициенты обобщенных зависимостей вида (2) модуля упругости от температуры в зоне обработки

Группа материалов	Коэффициенты	
	$C_2 \cdot 10^3$	$K_2$
Жаропрочные никелевые сплавы	452	-0,15
Титановые сплавы	449	-0,24
Конструкционные стали	612	-0,21

После проведения математической обработки полученных расчетно-экспериментальных данных могут быть установлены зависимости вида (1) между модулем упругости обрабатываемого материала и величиной предела выносливости материала изделия.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. - М.: Машиностроение, 1986. Т.2 - 496 с.
4. Справочник по авиационным материалам / Под ред. А.Т. Туманова. М.: Гос. изд. оборонной промышленности, 1958.

УДК 621.99

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВКИ ПРИ НАКАТЫВАНИИ  
КРУГЛЫХ РЕЗЬБ**

А.Н. Афонин, к.т.н., доц.

Орловский государственный технический университет

Орел, тел. (4862)555524, fax (4862) 416684

**MODELLING STRESS-STRAIN CONDITIONS OF THE TOOL AND  
WORKPIECE AT ROLLING ROUND GROOVES**

A.N. Afonin

Oryol State Technical University

Oryol, tel (+7 4862)555524, fax (+7 4862) 416684

*Researches is stress-strain conditions of the tool and workpiece are made at rolling external round grooves by a method of finite elements.*

Круглые резьбы нашли достаточно широкое применение в промышленности. Они используются как в качестве ходовых (например, в шарико-винтовых передачах), так и в качестве крепежных (например, резьбы по ГОСТ13536-68). Однако, изготовление круглых резьб вызывает существенно большие технологические трудности по сравнению с треугольными или трапецеидальными. В частности, резьбонакатывание, являющееся наиболее перспективным методом обработки резьб, обеспечивающим высокое качество получаемой резьбы при высокой производительности, не нашло широкого применения для получения круглых резьб. Причиной этого является специфическая форма профиля круглой резьбы, создающая неблагоприятны условия для течения металла, что приводит к возникновению значительных сил накатывания и разрушению витков накатываемой резьбы из-за переупрочнения.

Для расширения области применения резьбонакатывания необходимо совершенствования его технологии и конструкции резьбонакатного инструмента. Одним из основных направлений развития резьбонакатывания является совершенствование схемы деформирования, для чего, в свою очередь, необходимо исследование напряженно-деформированного состояния инструмента и заготовки.

Исследования напряженно-деформированного состояния инструмента и заготовки при накатывании круглых резьб до настоящего времени практически не производились. Существующие рекомендации [1] по схеме деформирования при накатывании круглых резьб основаны на производственном опыте. Поскольку экспериментальные исследования локальной пластической деформации при резьбонакатывании весьма трудоемки и дорогостоящи, приоритет должен принадлежать теоретическим методам.

Для исследования напряженно-деформированного состояния заготовки при накатывании треугольных и трапецеидальных резьб в настоящее время наибольшее применение нашел метод линий скольжения [4]. Существенным

недостатком данного способа является то, что он позволяет определять только контактные давления и не имеет возможности выявить распределение полей напряжений и деформаций по всему объему тела. Кроме того, ввиду криволинейной формы поверхности контакта, получение точных формул для определения напряжений при накатывании круглых резьб методом линий скольжения затруднительно.

В последнее время, в связи с развитием вычислительной техники широкое применение для расчета напряженно-деформированного состояния тел нашел метод конечных элементов (МКЭ) [2], разработанный на основе матричных методов расчета механических конструкций. МКЭ несомненно является одним из наиболее перспективных способов исследования пластической деформации при резьбонакатывании [3]. Наиболее важными преимуществами МКЭ, благодаря которым он может быть использован для исследования полей напряжений и деформаций при резьбонакатывании, являются следующие:

- Свойства материалов смежных элементов могут быть различны.

- Криволинейная область может быть аппроксимирована с помощью прямолинейных элементов или описана точно с помощью криволинейных элементов.

- Размеры элементов могут быть переменными.

Однако, он обладает рядом недостатков, свойственных всем численным методам. Одним из наиболее существенных недостатков МКЭ как численного метода является то, что он позволяет получать лишь частные решения для конкретных условий деформации [2]. В то же время, для определения рациональной схемы деформации при накатывании круглых резьб необходимо выявить закономерности влияния параметров процесса накатывания на поля напряжений и деформаций в инструменте и заготовке.

Решить данную проблему можно с помощью построения регрессионных математических моделей напряжений и деформаций в инструменте и заготовке при резьбонакатывании. Для получения массива экспериментальных данных необходимо провести спланированный вычислительный эксперимент по моделированию накатывания круглых резьб с помощью МКЭ, варьируя основные параметры процесса: механические характеристики материала заготовки, геометрию контактирующих тел, текущие и накопленные радиальные обжатия в диапазоне, установленном планом эксперимента. Замена натурального эксперимента вычислительным позволит значительно снизить трудоемкость и стоимость исследований. Адекватность результатов вычислительного эксперимента в некоторых характерных точках факторного пространства необходимо проверить натурными экспериментами по накатыванию круглых резьб и при необходимости скорректировать полученные регрессионные математические модели.

Примером подобных моделей являются математические модели распределения эквивалентных напряжений в инструменте (1) и заготовке (2) по глубине  $H$  соответственно в выступе и во впадине в зависимости от радиального обжатия  $h$  (при варьировании его в пределах 0,05...0,25 мм, материал заготовки – сталь 45, радиус профиля витка 1 мм).

$$\sigma = 470 - 74,4H + 4932,3h - 20389,4h^2 + 33988,3h^3 \quad (1)$$

$$\sigma = 622,8 + 3584,4h - 335,2H - 8828,7h^2 + 29474,6h^3 \quad (2)$$

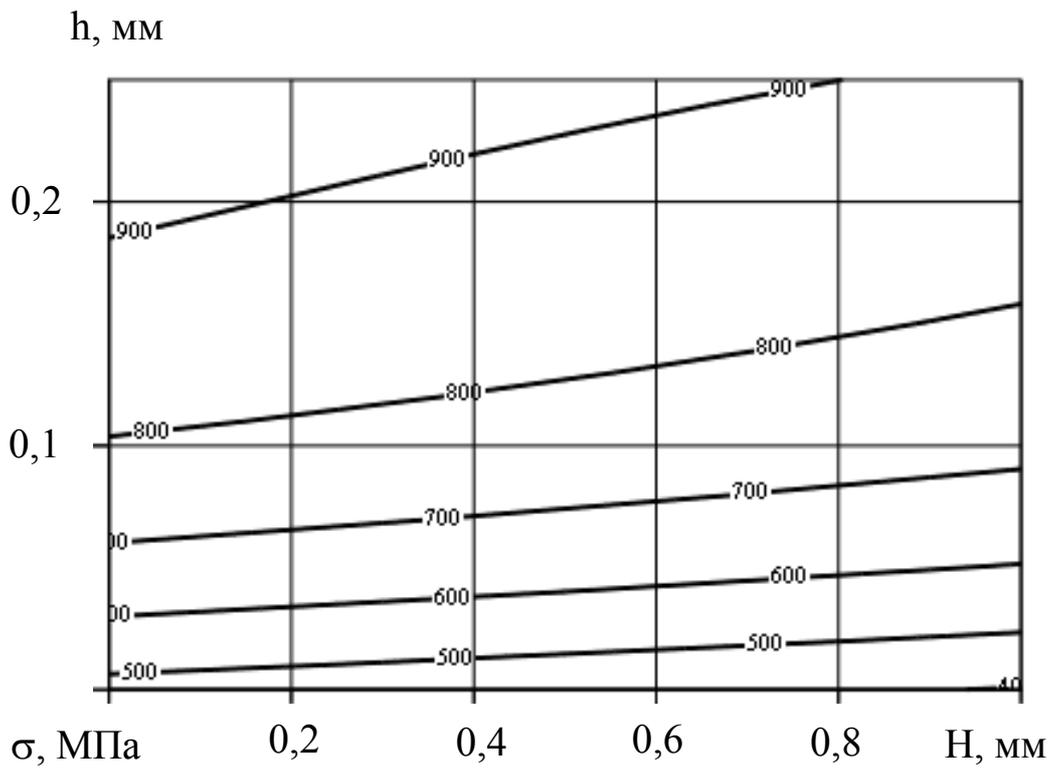
Графики зависимости эквивалентных напряжений в инструменте и заготовке при накатывании круглых резьб от радиального обжатия и глубины рассматриваемого слоя, полученные при расчете по формулам (1) и (2) соответственно, приведены на рисунке 1.

Из данных зависимостей можно сделать вывод о том, что вершина витка инструмента является максимально нагруженной только в начальный момент внедрения его в заготовку. При увеличении радиального обжатия максимум напряжений в инструменте смещается в направлении боковой стороны профиля.

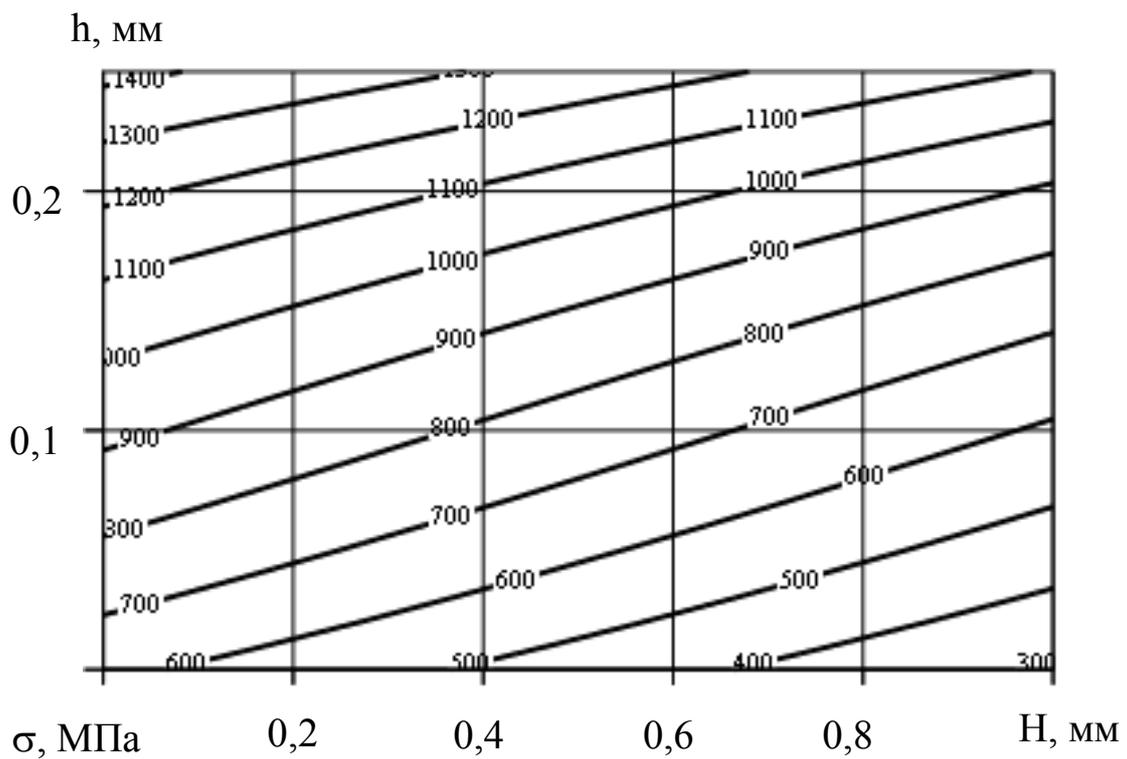
На основании регрессионных математических моделей напряженно-деформированного состояния предполагается создать методику определения рациональной схемы деформации при резьбонакатывании, дающую возможность обеспечить возможность накатывания круглых резьб. Исследования проводятся при поддержке гранта президента Российской Федерации МК-2575.2005.8.

#### Литература

5. Васильчиков М.В., Волков М.М. Поперечно-винтовая прокатка изделий с винтовой поверхностью. - М.: Машиностроение, 1968. - 142 с.
6. Воронцов А.Л. Сопоставление применения метода конечных элементов и аналитических методов решения задач обработки давлением. // Вестник машиностроения, 2003, №4. – С.67-71.
7. Киричек А.В., Афонин А.Н. Перспективы применения методов теоретического расчета пластической деформации для исследования накатывания резьб. // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. 2004, № 1. - С. 32-33.
8. Кузьменко А.Ф. Закономерности распределения контактных напряжений при накатывании резьбы.// Автомобильная промышленность, 2004, №2. – С. 25-28.



а



б

а – инструмент; б - заготовка

Рис. 1. – Зависимость распределения эквивалентных напряжений по глубине от накопленно-го радиального обжатия при накатывании круглых резцов.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ПАР ТРЕНИЯ ЗЕМЛЕРОЙНОЙ ТЕХНИКИ

В.В. Белых, к.т.н., доц.

Ставропольский государственный аграрный университет  
Ставрополь, тел. (8652) 349867, fax (8652) 347345, E-mail:  
[belih@iskra.stavropol.ru](mailto:belih@iskra.stavropol.ru)

## THE TECHNOLOGICAL RELIABILITY CONTROL OF TRIBOLOGICAL SITUATION OF EXCAVATION TECHNICS

V.V. Belih, associate professor, Candidate of Technical Sciences  
Stavropol State Agrarian University  
Stavropol, tel. (8652) 349867, fax (8652) 347345, E-mail: [belih@iskra.stavropol.ru](mailto:belih@iskra.stavropol.ru)

*Few abrasive testers for determination of wear of applying and promising materials with different coatings of dipper teeth have been developed in StGAU. A research result determines, that any previous rubbing of steely primary part, which has different hardness index, with appointed materials chosen for experiments (copper, aluminum, babbitt, fluoroplastic 4), exerted positive influence on wear hardness for the initial period of run.*

Для более точного моделирования процессов, реально происходящих с ковшом и зубьями экскаватора на практике, были спроектированы стенды таким образом, чтобы одновременно можно было бы исследовать максимально до шести одинаковых или различных вариантов, как с точки зрения применяемых материалов, так и с точки зрения их первоначального упрочнения с целью проверки эффективности технических решений.

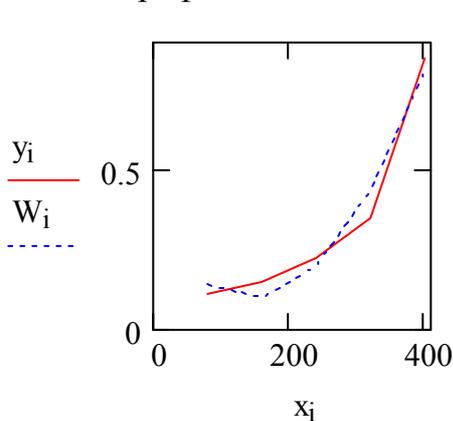
Целью настоящей работы является выбор и исследование эффективного технологического способа повышения надёжности материала [1], используемого для изготовления зубьев ковшей экскаваторов, в частности, на начальном периоде эксплуатации, то есть в период приработки.

Здесь представлены статистические данные об износах исследуемых сталей в различных абразивных средах, а также с натиранием до опытов рабочих поверхностей более мягкими материалами. Математическая обработка выполнялась в программе mathcad [2, 3] для чётного и нечётного числа точек наблюдения. Несмотря на то, что эксперименты были выполнены в лабораторных условиях, их результаты будут полезны для дальнейшего совершенствования технологии изготовления пар трения и не только для землеройной техники, а и для иного механического оборудования. Итоговая числовая информация представлена через косую черту: слева – итоговые результаты с натиркой поверхно-

сти конкретной стали более мягкими компонентами, а справа – без использования такого технологического приёма.

В качестве примера, приводим данные по бейнитной стали (с натиранием медью/без натирания).

Для наработки 80, 160, 240, 320 и 400 часов имеем следующие величины износа: 0,11/0,18; 0,15/0,30; 0,22/0,42; 0,35/0,69; 0,85/0,80. Программа обработки данных и графики показаны на Рисунке 1 и 2



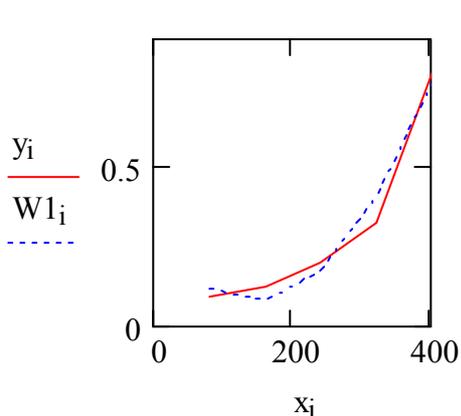
$Y_i =$

0.11
0.15
0.22
0.35
0.85

$W_i =$

0.14
0.098
0.196
0.434
0.812

Рисунок 1 – Износ бейнитной стали с предварительной натиркой её медью; абразивный материал – морской песок.



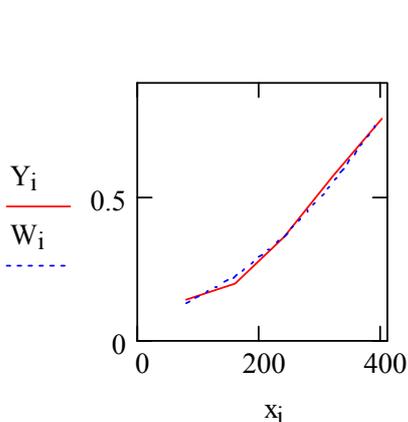
$Y_i =$

0.09
0.12
0.2
0.32
0.8

$W1_i =$

0.116
0.077
0.172
0.401
0.764

Рисунок 2 – износ бейнитной стали, натёртой медью; абразивный материал- песок с водой



$Y_i =$

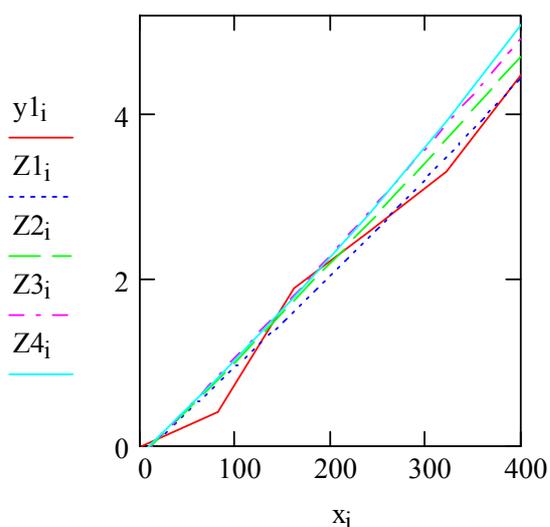
0.14
0.2
0.36
0.57
0.77

$W_i =$

0.129
0.221
0.361
0.547
0.781

РИСУНОК 3 – ИЗНОС БЕЙНИТНОЙ СТАЛИ БЕЗ НАТИРАНИЯ МЕДЬЮ; АБРАЗИВНЫЙ МАТЕРИАЛ- МОРСКОЙ ПЕСОК С ВОДОЙ

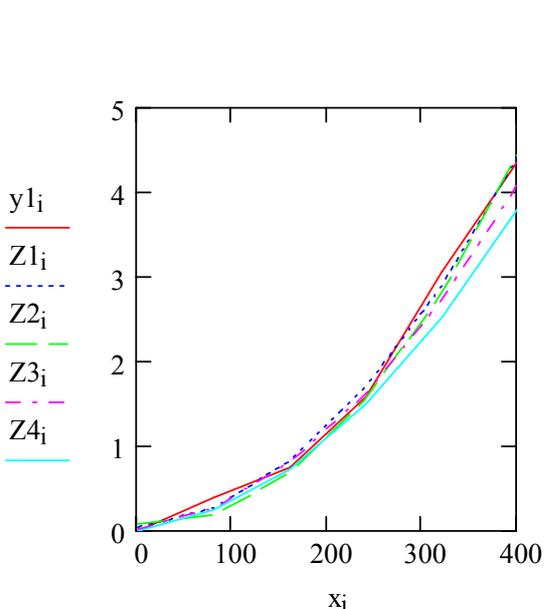
Теперь представим обобщённые данные по износу стали марки 35 с натиранием её алюминием ад1м и без натирания а1 в разных абразивных средах.



$Z1_i =$	$y1_i =$	$Z4_i =$	$Z3_i =$
-0.114	0	-0.102	-0.135
0.74	0.4	0.804	0.83
1.623	1.9	1.777	1.82
2.534	2.6	2.816	2.833
3.474	3.3	3.922	3.87
4.443	4.5	5.094	4.932

Рисунок 4 – Положение кривых износа по экспериментальным значениям в абразивных средах с песком  $Z1_i$  и  $Z2_i$  (с натиранием Al и без натирания), а также с добавлением воды ( $Z3_i$  – с Al и  $Z4_i$  – без натирания Al)

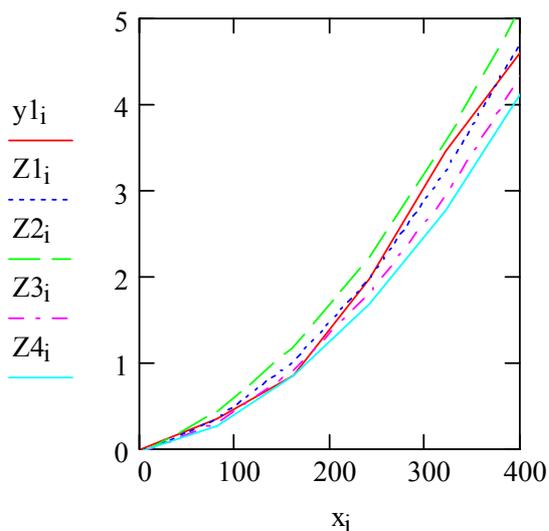
Аналогичные сведения по результатам проведённых экспериментов приводятся ниже для стали марки 50 также с натиранием Б16; абразивная среда – песок и песок с водой.



$Z1_i =$	$y1_i =$	$Z4_i =$	$Z3_i =$
0.038	0	$-1.071 \cdot 10^{-3}$	0.016
0.265	0.38	0.231	0.263
0.817	0.75	0.727	0.794
1.693	1.58	1.486	1.611
2.895	3.05	2.51	2.714
4.422	4.37	3.798	4.102

Рисунок 5 – Кривые износа стали марки 50 с натиранием Б16 (позиции 1 и 2, последняя не только в песке, но и с водой); без натирания Б16- позиции Z2 и Z4 (последнее, кроме морского песка, ещё и с водой)

Теперь приведём данные по результатам испытаний выбранных материалов с натиранием их свинцовооловянистым баббитом марки Б16. Сперва для стали марки 35.

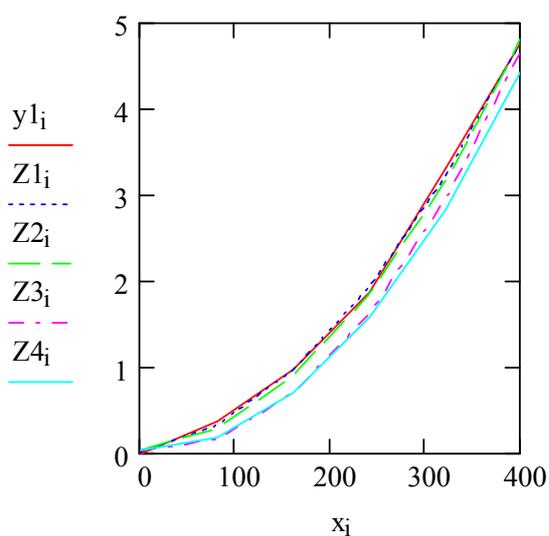


$Z1_i =$	$y1_i =$	$Z3_i =$	$Z4_i =$
-0.042	0	-0.045	-0.028
0.34	0.35	0.303	0.271
1.009	0.85	0.916	0.836
1.967	1.96	1.794	1.667
3.212	3.45	2.937	2.765
4.745	4.62	4.345	4.129

Рисунок 6 – Кривые износа стали марки 35 с натиранием Б16 (позиции 1 и 2, последняя не только в песке, но и с водой); без натирания Б16-позиции Z2 и Z4 (последнее, кроме морского песка, ещё и с водой)

Последняя серия опытов была сделана при натирании образцов сталей с помощью фторопласта 4.

Итоговые данные получены следующие.



$Z1_i =$	$y1_i =$	$Z4_i =$	$Z3_i =$
$8.571 \cdot 10^{-3}$	0	0.04	0.029
0.332	0.36	0.181	0.164
0.973	0.97	0.692	0.695
1.934	1.86	1.572	1.623
3.213	3.3	2.822	2.949
4.81	4.78	4.442	4.67

Рисунок 7 – Кривые износа стали марки 35 с натиранием фторопластом 4 (позиции 1 и 2, последняя не только в песке, но и с водой); без натирания - позиции Z2 и Z4 (последнее, кроме морского песка, ещё и с водой)

Из приведённой обширной информации можно заключить следующее.

Практически, любое предварительное натирание исходных стальных заготовок, имеющих различную твёрдость, с помощью выбранных для экспериментов проверок оказывает положительное влияние на износостойкость. Этот

эффект сохраняется только до тех пор, пока не будет полностью изношен нанесённый слой. Очевидно, что повторное нанесение компонентов мягких материалов также могло бы способствовать большей надёжности работы деталей в последующей эксплуатации. Износостойкость медного покрытия и алюминиевого дают близкие по износу результаты, также как и покрытия свинцовооловянистым баббитом и фторопластом 4. При длительной эксплуатации доминирующей останется структура из более твёрдого материала с позиции износостойкости. Практически во всех случаях отмечена позитивная роль наличия воды в абразивной среде, снижающей величины наблюдаемых износов у исследованных марок сталей.

#### Литература

4. Зорин В.А. Основы работоспособности технических систем: Учебник для вузов / В.А. Зорин. М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005. – 536 с.
5. Плис А.И., Сливина Н.А. MathCad 2000 математический практикум для экономистов и инженеров. М., «Финансы и статистика», 2000. – 656 с.
6. Дьяконов В. Mathcad 8/2000. Специальный справочник. СПб-Москва-Харьков-Минск, «Питер», 2001. – 592 с.

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ТЕЛАХ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДИСКОМ ТРЕНИЯ

Е.Н. Бологов, к.т.н., доцент, В.Н. Сокотущенко, А.С. Азаров  
Орловский государственный технический университет

Орел, тел. (4862) 555524, E-mail: [ebologov@yandex.ru](mailto:ebologov@yandex.ru)

## CALCULATION OF TEMPERATURE FIELDS IN BODIES OF ROTATION AT PROCESSING BY THE DISK OF FRICTION

E.N.Bologov, V.N.Sokotushchenko, A.S.Azarov  
Oryol state technical university  
Oryol, tel. (4862) 555524, E-mail: [ebologov@yandex.ru](mailto:ebologov@yandex.ru)

*In clause calculation of temperature fields in bodies of rotation is considered at processing by a disk of friction. The three-dimensional problem is solved Green's by method.*

Фрикционно-упрочняющая обработка (ФРУО) является новым видом технологии упрочнения, обеспечивающим заданные параметры качества поверхностного слоя. При обработке дисками трения происходит поверхностная закалка обрабатываемой детали. Глубина и степень поверхностной закалки зависят от распространения тепловых полей в поверхностном слое детали, которые в свою очередь зависят от технологических режимов обработки.

Рассмотрим процесс обработки детали диском трения (рис. 1). Цилиндр-деталь длиной  $l$ , радиуса  $R$  вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . При этом тело  $A$  – диск трения перемещается по образующей цилиндра с постоянной скоростью  $V$ .

Относительно неподвижной системы координат  $Oz$ , скорость движения детали по оси  $Oz$  равна нулю (происходит только вращение). Для учета движения тела  $A$ , необходимо ввести подвижную систему координат  $O'rz'$ , связанную с телом  $A$  (рис. 1). Тогда  $z = z' + Vt$  и  $\dot{z} = \dot{z}' + V$ . Но скорость детали  $\dot{z} = v_z$  относительно неподвижной системы координат  $Oz$  равна нулю, поэтому  $\dot{z}' = -V$ . При этом, поскольку  $V = \text{const}$ , то можно считать, что происходит движение детали со скоростью  $V$ , а тело  $A$  неподвижно относительно  $Oz$ . Тогда связывая с движущимся цилиндром систему координат  $Ox$  ( $0 \leq x \leq l$ ), имеем  $z = x + Vt$ , (рис. 1), следовательно  $z' = x$ .

Уравнение теплопроводности в неподвижной системе координат  $O'rz'$  имеет вид:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{1}{\tau_r} \frac{\partial T}{\partial t} = V_\tau^2 \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z'^2} \right] + \frac{1}{\lambda \tau_r} \left( 1 + \tau_r \frac{\partial}{\partial t} \right)^2 (q_r v_r + q_\varphi v_\varphi + q_z v_z) \quad (1)$$

Используя преобразование координат  $z' = x$ :

$$v_{z'} = \dot{z}' = -V,$$

$$T(r, \varphi, z', t) = T(r, \varphi, x, t),$$

уравнение теплопроводности примет вид:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{1}{\tau_r} \frac{\partial T}{\partial t} = V_\tau^2 \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] + \Phi(r, \varphi, x, t), \quad (2)$$

где

$$\Phi(r, \varphi, x, t) = \frac{1}{\lambda \tau_r} \left( 1 + \tau_r \frac{\partial}{\partial t} \right)^2 (V_r q_r + \omega R q_\varphi - V q_x),$$

$V$ ,  $\omega$  – соответственно скорость движения обрабатывающего инструмента (тела А) и угловая скорость движения обрабатываемой детали.

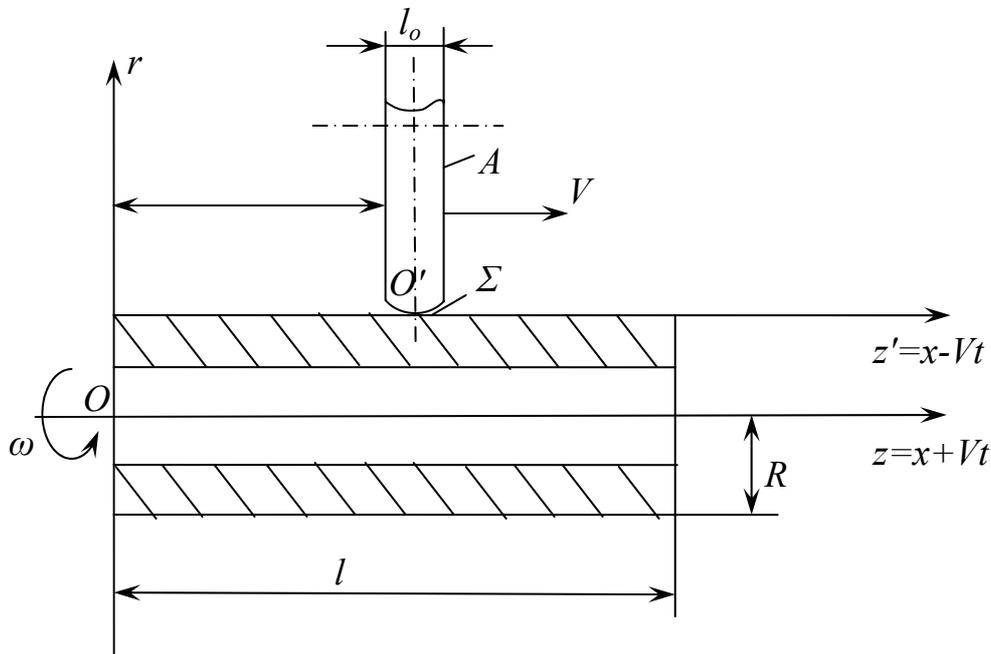


Рис. 1 Схема движения инструмента по обрабатываемой детали

Если учесть величину деформации поверхностного слоя, то скорость  $V_r$  можно вычислить и считать известной.

Далее зададим компоненты плотности вектора потока тепла  $q_{r,\varphi,x} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$  в

зоне контакта тела А с движущейся втулкой (рис. 2).

Для упрощения решения форму пятна контакта в виде эллипса заменяем на прямоугольную, причем большая ось эллипса своей длины не меняет. Тогда площадь пятна контакта равна:  $\Delta\Sigma = R\varphi_0 l_0$ , где  $\varphi_0$ ,  $l_0$  – соответственно угловой и линейный размеры пятна контакта. Если известны размеры обрабатываемого инструмента (тела А), то  $l_0$  и  $\varphi_0$  можно также считать известными.

Компоненты теплового потока на границе втулки  $\Sigma$  ( $r = R$ ) задаются в виде:

$$q_{r,\varphi,x} = \frac{N_{r,\varphi,x}(\varphi, x, t)}{R\varphi_0 l_0} \left[ 1 - H\left(\varphi - \frac{\varphi_0}{2}\right) + H\left(\varphi - 2\pi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \right] \times \\ \times \left[ H\left(x - l_1 + \frac{l_0}{2} + vt_0\right) - H\left(x - l_1 - \frac{l_0}{2} + vt_0\right) \right] [1 - H(t - t_0)], \quad (3)$$

где  $H(c) = \begin{cases} 0, & c < 0 \\ 1/2, & c = 0 \\ 1, & c > 0 \end{cases}$ , - функция Хевисайда;

где  $N_{r,\varphi,x}$ , [Вт] – мощность теплового потока в зоне контакта,

$\varphi_0, l_0, t_0$  - соответствующие размеры зоны контакта и время контакта;

$v$  - скорость движения контактирующего тела (диска трения) вдоль детали.



Рисунок 2 - Элемент цилиндра в зоне поверхностного контакта

Таким образом, решается смешанная краевая задача для неоднородного уравнения теплопроводности гиперболического типа:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{1}{\tau_r} \frac{\partial T}{\partial t} = V_\tau^2 \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] + \Phi(r, \varphi, x, t) \quad (4)$$

$T = T_0$  при  $t = 0$  (начальное условие)

$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$  при  $t = 0$  (начальное условие)

$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{1}{\lambda} \left( q_r + \tau_r \frac{\partial q_r}{\partial t} \right)$  при  $r = R$  (граничное условие)

$T$  – ограничена при  $r = 0$  (граничное условие)

$T = T_0$  при  $x = 0$  (граничное условие)

$T = T_0$  при  $x = 1$  (граничное условие),

где  $\Phi(r, \varphi, x, t) = \frac{1}{\lambda \tau_r} \left( 1 + \tau_r \frac{\partial}{\partial t} \right)^2 (V_r q_r + \omega R q_\varphi - V q_x)$ ,

Далее, для практического расчета считаем, что  $N_{r, \varphi, x}(\varphi, x, t)$  - известна из соответствующего трибологического расчета.

Применим для данного уравнения процедуру представления решения через функцию Грина, а решение поставленной задачи, представим в виде функции Грина.

Преобразование  $T(r, \varphi, x, t) = \Theta(r, \varphi, x, t) e^{-\frac{t}{2\tau}}$ , приводит к уравнению гиперболического типа, не содержащего первую производную:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} = V_\tau^2 \Delta \Theta + \frac{1}{4\tau^2} \Theta + \psi(r, \varphi, x, t) \text{ (уравнение Клейна – Гордона)} \quad (5)$$

где  $\psi(r, \varphi, x, t) = \Phi(r, \varphi, x, t) e^{\frac{t}{2\tau}}$ ;

и следующим краевым уравнениям:

$\Theta = T_0$  при  $t = 0$

$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{T_0}{2\tau}$  при  $t = 0$

$\frac{\partial \Theta}{\partial r} = -\frac{1}{\lambda} \left( q_r + \frac{\partial q_r}{\partial t} \right) e^{\frac{t}{2\tau}} = 0$

$\Theta$  - ограничена при  $r = 0$

$\Theta = T_0 e^{\frac{t}{2\tau}}$  при  $x = 0$

Решение:

$$\begin{aligned}
\Theta(r, \varphi, x, t) &= \frac{\partial}{\partial t} \int_0^l \int_0^{2\pi} \int_0^R \varepsilon T_0 G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t) d\varepsilon d\eta d\zeta + \\
&+ \int_0^l \int_0^{2\pi} \int_0^R \varepsilon \frac{T_0}{2\tau_r} G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t) d\varepsilon d\eta d\zeta + \\
&+ V_\tau^2 R \int_0^t \int_0^l \int_0^{2\pi} \left( -\frac{e^{\frac{\tau}{2\tau_r}}}{\lambda} \right) \left( 1 + \frac{\partial}{\partial t} \right) q_{r, \varphi, x}(\eta, \zeta, \tau)_{t=\tau} G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t - \tau) d\eta d\zeta d\tau + \\
&+ V_\tau^2 \int_0^t \int_0^{2\pi} \int_0^R \varepsilon T_0 e^{\frac{\tau}{2\tau_r}} \left[ \frac{\partial}{\partial \zeta} G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t - \tau) \right]_{\zeta=0} d\varepsilon d\eta d\tau - \\
&- V_\tau^2 \int_0^t \int_0^{2\pi} \int_0^R \varepsilon T_0 e^{\frac{\tau}{2\tau_r}} \left[ \frac{\partial}{\partial \zeta} G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t - \tau) \right]_{\zeta=1} d\varepsilon d\eta d\tau + \\
&+ \int_0^t \int_0^l \int_0^{2\pi} \int_0^R \varepsilon e^{\frac{\tau}{2\tau_r}} \Phi(\varepsilon, \eta, \zeta, \tau) G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t - \tau) \varepsilon d\varepsilon d\eta d\zeta d\tau
\end{aligned}$$

(6)

Функция Грина имеет вид:

$$\begin{aligned}
G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t) &= \frac{2}{\pi^2 V_\tau R^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\beta_k}} \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right) \sin\left(\frac{k\pi \zeta}{l}\right) \sin(t\sqrt{\beta_k}) + \\
&+ \frac{2}{\pi l} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A_n \mu_{nm}^2 J_n(\mu_{nm} r) J(\mu_{nm} \varepsilon)}{(\mu_{nm}^2 R^2 - n^2) [J_n(\mu_{nm} R)]^2 \sqrt{\lambda_{nmk}}} * \\
&* \cos[n(\varphi - \eta)] \sin\left(\frac{k\pi x}{l}\right) \sin\left(\frac{k\pi \zeta}{l}\right) \sin(t\sqrt{\lambda_{nmk}})
\end{aligned}$$

(7)

$$\text{где } \beta_k = \frac{V_\tau^2 k^2 \pi^2}{l^2} + \frac{1}{4\tau_r^2}, \quad \lambda_{n,m,k} = V_\tau^2 \mu_{n,m} + \frac{V_\tau^2 k^2 \pi^2}{l^2} - \frac{1}{4\tau_r^2},$$

$$A_n = \begin{cases} 1 & \text{при } n = 0; \\ 2 & \text{при } n > 0. \end{cases}$$

$J_n(\varepsilon)$  - функция Бесселя первого рода,  $\mu_{nm}$  - положительные корни трансцендентного уравнения  $J_n(\varepsilon) = 0$  при  $\varepsilon = \mu R$ .

$$J_n(\varepsilon) = \sum_{S=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^{S+2n}}{S! \Gamma(n+S+1)}, \Gamma(n+S+1) = \int_0^{\infty} e^{-\alpha} \alpha^{n+S} d\alpha,$$

$$J_n(\varepsilon) = \sum_{S=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^{S+2n}}{S! \int_0^{\infty} e^{-\alpha} \alpha^{n+S} d\alpha} \quad (8)$$

здесь  $G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t)$ - функция Грина, которая удовлетворяет однородному уравнению:

$$\frac{\partial^2 G}{\partial t^2} + \frac{1}{\tau_v} \frac{\partial G}{\partial t} - a \Delta G = 0,$$

(9)

полуоднородным начальным условиям:

$$G = 0 \quad \text{при } t = \tau,$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} = \delta(r - \varepsilon, \varphi - \eta, x - \zeta) \text{ при } t = \tau,$$

и однородным граничным условиям.

Поскольку коэффициенты в уравнении относительно  $G$  и граничные условия не зависят от времени  $t$ , то функция Грина  $G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t) = G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t - \tau)$ . В этом случае при получении решения

для  $T(r, \varphi, x, t)$  положили  $\frac{\partial}{\partial \tau} G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, \tau) \Big|_{\tau=0} = -\frac{\partial}{\partial \tau} G(r, \varphi, x, \varepsilon, \eta, \zeta, t)$ .

После того как решена краевая задача относительно  $\Theta$ , распределение температуры в детали вычисляется по формуле:  $T = \Theta e^{-\frac{t}{2\tau}}$ .

### Литература

3. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики. А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. Издание четвертое, исправленное. Учебное пособие для университетов. Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, М., 1972 г.

4. Корн Г. Справочник по математике. Г. Корн, Т. Корн / Для научных работников и инженеров. – М., 1973 г., 832 с.

УДК 631.3.004.5/.67

## ОРГАНИЗАЦИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИКИ

В.Н. Хромов, д.т.н., проф., Т.В. Гущина, д.т.н., проф., Волкова И.  
Орловский государственный аграрный университет  
Орел, тел. (4862) 431979, e-mail: chrom@orel.ru

## THE ORGANIZATION OF SAFE OPERATION OF TECHNICAL EQUIPMENT

V.N.Khromov, Dr.Sci.Tech., Prof., T.V.Guschin, Dr.Sci.Tech., Prof.,  
I. Wolkova And.  
Oryol State Agrarian University  
Orel, ph. (4862) 431979, e-mail: chrom@orel.ru

### *Annotation*

*Questions of a labour safety are considered at operation of mobile technics(technical equipment) and load-lifting machines and necessity of increase of a learning efficiency in the field of a labour safety and the safety precautions of students of educational institutions and the personnel of the enterprises.*

В АПК России занято около 35 % всех работников сферы материального производства. Предприятия агропромышленного комплекса являются стратегической отраслью экономики, на долю которых приходится 25% производственных фондов и более 14 % валового внутреннего продукта. Производственный травматизм и профессиональная заболеваемость являются актуальной социально-трудовой проблемой. На долю АПК приходится около 42% производственных травм в России и 20 % профессиональных поражений.

По данным Госкомстата России профессия механизатора является самой травмоопасной. На каждые 10000 работающих механизаторов ежегодно в сельском хозяйстве погибает от 7 до 8 человек, в то время как в целом по сельскому хозяйству эта цифра не превышает - 2,3 человек.

Происходит неуклонный рост травматизма в т.ч. со смертельным и тяжелым исходом при эксплуатации грузоподъемных сооружений на предприятиях, поднадзорных Ростехнадзору РФ.

Анализ обстоятельств и причин аварий и несчастных случаев, показывает, что все они произошли вследствие:

- грубых нарушений правил безопасности вследствие невыполнения инженерно-техническими работниками своих прямых обязанностей по созданию безопасных условий эксплуатации мобильной техники и грузоподъемных машин, обеспечению их исправного состояния;

- низкой производственной дисциплины обслуживающего персонала;
- невыполнения мероприятий по техническому надзору и (или) отсутствия контроля за их выполнением;
- недостаточного (формального) обследования условий эксплуатации специалистами мобильной техники и грузоподъемных машин;
- отсутствие своевременных мероприятий к устранению имеющихся нарушений.

Достаточно сложной в техническом отношении и требующей высокой квалификации работников является эксплуатация грузоподъемных машин. Причинами травматизма в данном случае является нарушение требований технических условий по устройству и содержанию крановых путей:

- балластный слой не обеспечивает равномерной посадки путей;
- уклоны путей превышают допустимые значения;
- используются тупиковые упоры несовершенной конструкции;
- схемы строповки грузов не охватывают всей номенклатуры перемещаемых грузов;
- к обслуживанию грузоподъемных кранов и строповке грузов допускается персонал, не прошедший специализированное обучение и не аттестованный.

За критерий безопасности техносферы при травмоопасных ситуациях и авариях принята допустимая вероятность (риск) возникновения угрожающего события.

Источники опасностей в современной техносфере давно классифицированы. Производственная среда, в которой обитает работник, является источником опасных и вредных факторов (физических, химических, биологических и психофизиологических).

Поражение человека рассматривается как поток случайных событий, который описывается законом Пуассона. Риск – это вероятность практической реализации отрицательного воздействия в зоне пребывания работника.

Из анализа статистических данных установлено, что вероятность возникновения  $R$  (риск) чрезвычайных ситуаций при эксплуатации производственного оборудования и функционирования технологического процесса описывается формулой:

$$R = \frac{N_{\text{чс}}}{N_o} \leq R_{\text{доп}},$$

где  $N_{\text{чс}}$  – число чрезвычайных событий за год;  $N_o$  – общее число событий за год;  $R_{\text{доп}}$  – допустимый риск.

Условием безопасного стабильного функционирования систем «человек – производственная среда» при воздействии вредных и опасных факторов производственной среды являются следующие принципы защиты:

- увеличение расстояния между работником и источником опасности;
- уменьшение времени воздействия опасности;
- экранирование и совершенствование технических систем;
- пропаганда мер безопасности и обучение профессиональным знаниям;

- организационные и технические решения в области безопасности жизнедеятельности.

Безопасность человека на производстве зависит от вероятности поражения при воздействии вредных и опасных факторов. Критерий безопасности системы «человек - производственная среда» определяется безопасностью всех составляющих производства: оборудования, применяемых технологий и режимов работы и т.д. На предприятии не должно возникать источников травматизма и профессиональных заболеваний, необходимо уменьшать негативное воздействие существующих.

Значения вредных и опасных производственных факторов не должны превышать нормативных величин, которые устанавливаются законодательно.

Согласно требованиям ГОСТ 12.3.002 безопасность производственных процессов достигается упреждением опасной аварийной ситуации и возникновения несчастного случая в течение всего времени их функционирования и обеспечивается применением безопасных технологических процессов и производственного оборудования.

Анализ причин травматизма на предприятиях всех отраслей экономики выводит на первое место организационные и технические (машинные) причины. Эффективность мероприятий, направленных на повышение безопасности труда, предполагает:

- включение требований безопасности в нормативно-техническую, проектно-конструкторскую и технологическую документацию, соблюдение этих требований, а также требований соответствующих правил безопасности и других документов по охране труда;

- профессиональный отбор, обучение работающих, проверка их знаний и навыков безопасности труда.

Система управления охраной труда в организациях и на предприятиях к одним из основных направлений своей работы относит профессиональное обучение, повышение квалификации и компетентности персонала. В процессе обучения работников и проверки их знаний по охране труда необходимо принимать во внимание различные уровни ответственности, требуемой ответственности и риска на рабочих местах. Работники организаций должны:

- соблюдать свои обязанности в области охраны труда в соответствии с действующим законодательством;

- осознавать ответственность за соответствие своих действий политике организации в области охраны труда, требованиям технике безопасности;

- понимать последствия воздействия фактических или потенциальных последствий их деятельности на безопасность труда;

- исключать возможные негативные последствия несоблюдения технологических инструкций.

Работники должны обучаться с учетом специфики выполняемых работ, иметь соответствующую квалификацию и компетентность, необходимые для выполнения рабочих заданий, которые могут оказывать влияние на охрану труда на рабочих местах.

Организация должна выявлять потребности в обучении персонала для компетентного выполнения работ, включая обучение по охране труда и безопасности персонала.

#### ВЫВОДЫ:

1. В целях снижения уровня травматизма при эксплуатации мобильной техники и грузоподъемных машин необходимо повысить эффективность организационных, технических и организационно-технических мероприятий по повышению промышленной безопасности предприятий.

2. Следует повысить качество обучения будущих специалистов ИТР всех отраслей экономики в области охраны труда и техники безопасности при одновременном увеличении объема изучаемой дисциплины и повышении ее престижа.

3. Необходимо привлекать специалистов предприятий машиностроения и других отраслей экономики к получению второго профессионального образования в области охраны труда и техники безопасности на основе базового технического.

#### Литература:

1. Федеральный закон «Об основах охраны труда в Российской Федерации» от 17.07.99 № 181-ФЗ.

2. ГОСТ Р 12.0.006-2002 ССБТ. Общие требования к управлению охраной труда в организации.

УДК

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО  
УПРОЧНЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
НАГРУЖЕНИЕМ ПРОЛОНГИРОВАННЫМИ УДАРНЫМИ  
ИМПУЛЬСАМИ**

А.В. КИРИЧЕК, Д.Т.Н., ПРОФ., Д.Л. СОЛОВЬЕВ, Д.Т.Н., ПРОФ.  
ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Г. ОРЕЛ, ТЕЛ (4862) 5555524, E-MAIL: [TI@OSTU.RU](mailto:ti@ostu.ru)

**INCREASE OF EFFICIENCY OF DEFORMATION HARDENING OF IN-  
TERNAL CYLINDRICAL SURFACES TO LOAD PROLONGED SHOCK  
PULSES**

A.V.Kirichek, Dr. Sci. Tech., Prof., D.L.Solovjov, Dr. Sci. Tech., Prof.  
Oryol State Technical University  
Orel, Ph. (4862) 5555524, e-mail: [ti@ostu.ru](mailto:ti@ostu.ru)

*Annotation*

*In article the question of increase of efficiency of deformation hardening of internal cylindrical surfaces is analyzed*

В настоящее время в машиностроении широкое применение находят детали типа гильз и втулок. В зависимости от длины, диаметра отверстия, точности и шероховатости поверхности обработка отверстий производится в несколько операций режущими, абразивными и калибрующими инструментами. При этом в зависимости от точности исходной заготовки в стружку уходит от 20 до 35 % металла, а трудоемкость обработки отверстий составляет 40...90 % всей трудоемкости механической обработки.

В связи с этим для обработки внутренних цилиндрических поверхностей большое распространение получили методы поверхностного пластического деформирования (ППД). Внедрение методов ППД взамен резания исключает предварительную механическую обработку, что снижает расход металла; в два-четыре раза уменьшает трудоемкость обработки; снижает на 30...50 % затраты по инструменту, электроэнергии, вспомогательным материалам, амортизационным отчислениям. После ППД в поверхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения, что наряду с повышением твердости и улучшением микрогеометрии поверхности упрочненного отверстия приводит к значительному повышению износостойкости и долговечности деталей в различных условиях эксплуатации. За счет использования в технологических процессах операции упрочнения GG в большинстве случаев удается исключить термообработку, а также уменьшить сечение несущих деталей, что также является дополнительным резервом экономии [1, 2].

Эффективность способов ППД будет зависеть от того, на сколько получаемые показатели качества поверхностного слоя соответствуют условиям эксплуатации. В этой связи все более значительной становится возможность точного обеспечения способами ппд эпюр распределения твердости и остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя, а также микрогеометрии поверхности.

Известно, что энергетически динамическое воздействие на материал более выгодно, по сравнению со статическим, необходимым для достижения аналогичных результатов. Однако предсказать результаты пластического деформирования динамической энергией гораздо сложнее.

Исследованиями ударных процессов [3] установлено, что наибольшее количество энергии передается ударными импульсами прямоугольной (трапециидальной) или близкой к ней пролонгированной формы. Для генерирования пролонгированных ударных импульсов необходимо в качестве рабочих элементов вместо шаров или роликов использовать бойки вытянутой цилиндрической формы, длина которых удовлетворяет условию  $L_1 > 0,05 \dots 0,08$  м. Более рациональное использование энергии удара при упругопластической деформации позволяет создавать глубоко упрочненные поверхностные слои материала, расширяя возможности ППД.

В результате разработано ряд ранее не использовавшихся схем осуществляющих пролонгированное импульсное нагружение при ппд. Схемы основываются на базе известных способов обработки внутренних цилиндрических поверхностей, использующих для нагружения динамическую энергию [2].

При центробежной обработке бойковым инструментом (рис. 1) на упрочняемую поверхность наносят последовательные удары рабочими элементами – бойками, свободно сидящими в радиальных отверстиях вращающегося диска. Под действием центробежных сил рабочие элементы в радиальных отверстиях занимают крайнее положение, а при ударе об обрабатываемую поверхность опускаются на глубину, равную натягу, отдавая энергию, создаваемую центробежной силой.

При ударном раскатывании (рис. 2) рабочие элементы – бойки, установленные в сепараторе, вращаются между поверхностью обрабатываемого отверстия и поверхностью кулачковой оправки, совершая переносное или планетарное движение. Кулачковая оправка представляет собой цилиндр, на котором равномерно по окружности выполнено несколько равных площадок (лысок) или профильных канавок. Обкатывая выступающие участки кулачковой оправки, бойки совершают быстрые радиальные перемещения, ударяя с большой частотой по обрабатываемой поверхности в момент заклинивания, при этом натяг максимален. При перемещении бойка на цилиндрическом участке кулачковой оправки происходит обкатывание. При прохождении бойком лыски натяг минимален или равен нулю. Натяг изменяется от минимального до максимального в течение примерно  $10^3 \dots 10^4$  с. Число таких импульсов за один оборот раскатника равно произведению числа лысок на число инструментов.

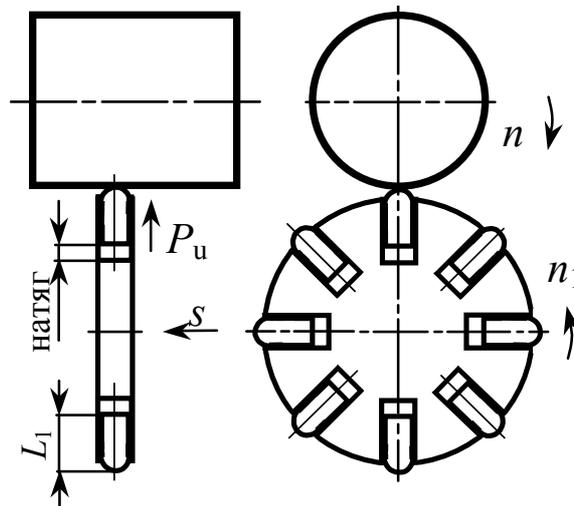


РИС. 1. ЦЕНТРОБЕЖНАЯ ОБРАБОТКА БОЙКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Реализовать пролонгированное ударное воздействие в очаге деформации за счет рекуперации отраженных волн деформации, формирующих хвостовую часть ударного импульса, позволяет ударная система боек-волновод [4]. Нагружение ударными импульсами должно происходить в условиях предварительного статического поджатия инструмента к очагу деформации, которое не позволяет прерывать его контакт после действия головной части импульса, давая возможность для повторного воздействия отраженных волн деформации после удара.

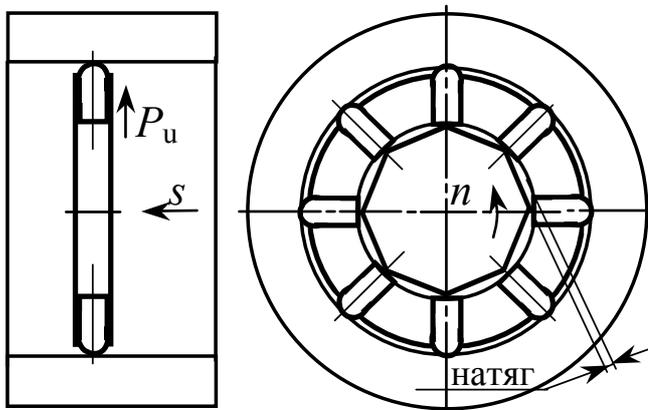


РИС. 2. УДАРНОЕ РАСКАТЫВАНИЕ БОЙКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

В результате предложена схема статико-импульсной обработки (СИО) при ударном раскатывании (рис. 3). Устройство для нагружения содержит вращающийся диск с радиальными отверстиями, в которых размещается ударная система боек-волновод. Отверстия имеют две ступени. В первой (меньшего диаметра) свободно размещается боек и частично волновод, а во второй (большого диаметра) оставшаяся часть волновода и пружина, расположенная между пояском волновода и торцевой частью второй ступени отверстия.

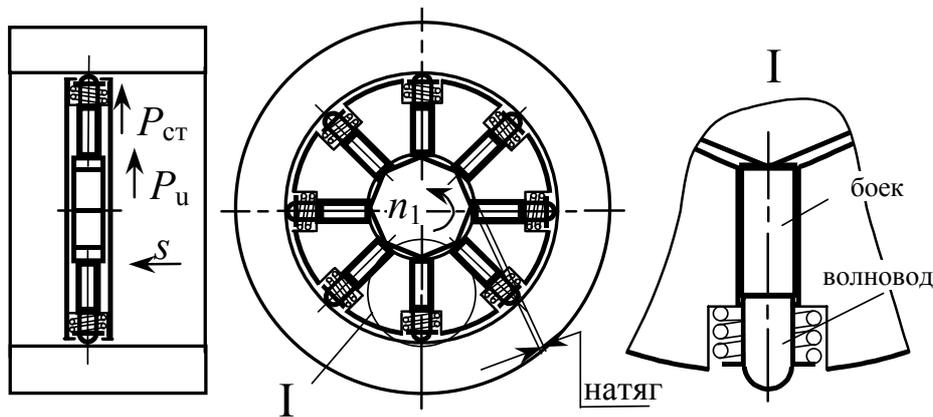


РИС. 3. СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЕ РАСКАТЫВАНИЕ

При размещении устройства внутри обрабатываемого отверстия волновод упирается в нагружаемую поверхность, сжимая пружину. В результате волновод воздействует на очаг деформации под действием силы упругости сжатой пружины. Обкатывая, выступающие участки кулачковой оправки совершают быстрые радиальные перемещения, ударяя с большой частотой по статически поджатому волноводу в момент заклинивания.

Достоинством такой схемы является увеличение энергии удара, генерируемой бойком, за счет увеличения массы рабочих элементов и увеличение количества энергии удара расходуемой на пластическую деформацию за счет увеличения длительности ударных импульсов. Коэффициент передачи энергии удара упрочняемому материалу может достигать до 86 %.

Предлагаемые схемы могут использоваться для обработки внутренних отверстий больших диаметров: центробежная обработка бойковым инструментом и ударное раскатывание бойковым инструментом – для диаметров более 35 мм, статико-импульсное раскатывание – для диаметров более 50 мм. В результате их применения может быть получена высокая степень упрочнения до 60...100 % и повышена глубина упрочнения в 1,5...2 раза, достигая 3 мм и более.

#### Список используемой литературы

5. Монченко В.П., Белотелов В.В. Деформирующая обработка отверстий втулок и гильз гидропневмоцилиндров. М.: НИИМаш. 1976. 91 с.
6. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справ. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
7. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э. Удар. Распространение волн деформации в ударных системах. М.: Наука, 1985. 357 с.
8. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога. М.: Машиностроение. 2004. 288 с.

УДК 621.81+621.9.02

## **ВОССТАНОВЛЕНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТА**

В.Н. Хромов, д.т.н., профессор, Е.А. Антипова, аспирант, А.А. Мошкин, аспирант, Д.Н. Храпоничев, аспирант, Д.Н. Трошин, аспирант, В.В. Гончаренко, аспирант

Орловский государственный аграрный университет  
Орел, тел. (4862) 431979, 430741, факс: (4862) 454079, E-mail: chrom@orel.ru, servise1@orelsau.orel.ru, servise2@orelsau.orel.ru, khraponichev@rambler.ru

## **RESTORATION AND HARDENING OF THE MACHINE ELEMENT AND THE TOOL**

V.N. Khromov, Prof., Dr., E.A. Antipova, the post-graduate student, A.A. Moshkin, the post-graduate student, D.N. Hraponichev, post-graduate student, D.N. Troshin, post-graduate student, V.V. Goncharenko, post-graduate student

Orel State Agrarian University  
Orel, tel.: (4862) 431979, 430741, fax: (4862) 454079; E-mail: chrom@orel.ru, servise1@orelsau.orel.ru, servise2@orelsau.orel.ru, khraponichev@rambler.ru

*At the Oryol State Agrarian University research work on development of technology of hardening and restoration of the cutting tool by electrospark processing is conducted.*

*The basic advantage of hardening and restoration of the cutting tool by electrospark processing consists in ample opportunities of carry on a processable detail of any current-carrying materials, as refractory and high-strength metals and connections, and soft, antifrictional materials with high adhesion of a layer with a basis.*

*The article describes the technology of restoration and hardening of blade and front part of slice share in the plow body by means of hard alloys welding in electrolizers.*

Восстановление и упрочнение деталей термоупруго-пластическим деформированием. В настоящее время в мировой практике широкое распространение получили методы завершающей обработки сталей и сплавов, совмещающие термическое воздействие на металл с его пластической деформацией.

Сущность предложенного метода заключается в том, что путем создания градиента температуры в деталях типа «полый цилиндр» по сечению или вдоль оси, можно получать остаточные деформации достаточные для компенсации изношенных поверхностей. При этом физико-механические свойства деталей, восстановленных термоупруго-пластическим деформированием, не только не уступают новым, но превосходят их.

Явление термоупруго-пластического деформирования (ТПД), связанное с быстрым нагревом и охлаждением материала деталей, обладает рядом преимуществ и может быть использовано для их восстановления и упрочнения. Однако при этом остаются открытыми вопросы о возможностях этого метода восстановления деталей; до настоящего времени не развиты достаточно точные модели (например, конечно-элементные), учитывающие специфику термомеханических процессов при восстановлении деталей ТПД.

Установление закономерностей и взаимосвязей процесса с возникающими при ТПД явлениями и прогнозирование свойств деталей, представляет собой сложную научную задачу, заключающуюся в разработке программного обеспечения математических моделей восстановления деталей и обосновании оптимальных параметров ТПД как метода восстановления.

Одной из важнейших составляющих моделирования восстановления деталей методом ТПД является анализ термомеханического состояния.

Нелинейный анализ таких процессов предусматривает решения двух основных задач.

Сущность первой из них состоит в математической формулировке задачи и конкретизации определяющих уравнений материала, способных адекватно описывать эффекты пластичности и ползучести при соответствующих историях температуры и деформации.

Вторая задача состоит в разработке эффективных численных подходов к решению соответствующих задач термомеханики.

Ключевым вопросом в математической постановке задачи является формулировка определяющих уравнений, описывающих поведение материала под действием механического напряжения с учетом температурных факторов.

В настоящее время в теории и технологических процессах широко используется три основных подхода к описанию термовязкопластических процессов деформирования элементов твердого тела.

Анализ последних результатов в этом направлении обнаруживает тенденцию к наиболее интенсивному развитию третьего подхода, сущность третьего подхода составляют так называемые обобщенные теории вязкопластического течения.

Вторым основным вопросом моделирования технологии восстановления деталей методом ТПД является разработка методов численной реализации задачи.

Современные ЭВМ дают возможность широкого использования численных методов определения напряжений и деформаций в элементах конструкций сложной формы. Метод конечных элементов (МКЭ), разработанный и усовершенствованный в последние годы – один из основных методов решения задач теплопроводности и механики деформируемого твердого тела. Идея метода заключается в аппроксимации сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы совокупностью простых элементов, имеющих конечное число степеней свободы и связанных между собой в узловых точках.

В общем случае полная деформация материального элемента состоит из упругой, вязкопластической, термической и связанной с фазовыми и структурными превращениями

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^{vp} + \varepsilon_{ij}^{th} + \varepsilon_{ij}^{ph} + \varepsilon_{ij}^c$$

где  $\varepsilon_{ij}$  – тензор полной деформации;  $\varepsilon_{ij}^e$  – упругая деформация;  $\varepsilon_{ij}^{vp}$  – вязкопластическая деформация;  $\varepsilon_{ij}^{th}$  – термическая деформация;  $\varepsilon_{ij}^{ph}$  – деформация фазового превращения;  $\varepsilon_{ij}^c$  – деформация ползучести.

Разработана структурная схема математического моделирования восстановления деталей ТПД, представленная на рисунке. Структурная схема определяет последовательность выполнения расчетных этапов моделирования восстанавливаемых деталей ТПД. Математическая модель предполагает наличие входных и выходных параметров связанных между собой детерминистическим образом.

Выявлено влияние многих факторов на величину остаточной деформаций при восстановлении деталей ТПД: геометрические параметры деталей; материал (химический состав; физико-механические свойства:  $\sigma_B$ ,  $E$ ,  $\lambda$ , ...); вид химико-термической обработки; температура нагрева; скорость нагрева; скорость охлаждения; форма распределения температурного поля по радиусу и вдоль оси восстанавливаемой детали; свойства охлаждающей среды и ряд других.

Вначале входные параметры разделяют на заданные и управляющие. Затем определяют выходные параметры и устанавливают взаимосвязь их с входными.

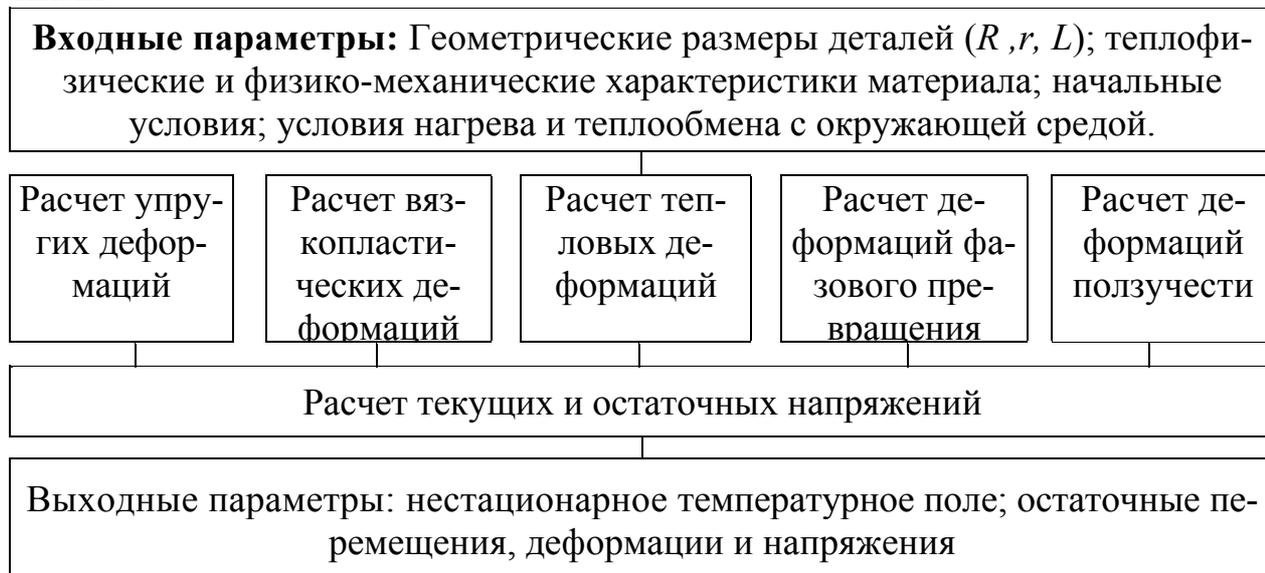


Рис. 1. Структурная схема математического моделирования восстановления деталей ТПД

Восстановление и упрочнение режущего инструмента электроискровой обработкой. В настоящее время в Орловском государственном аграрном университете ведется научно-исследовательская работа по разработке технологии

упрочнения и восстановления режущего инструмента электроискровой обработкой (легированием).

Одним из перспективных способов, находящих все более широкое применение в ремонтной практике, являются способы, основанные на явлении электрической эрозии металлов при прохождении между ними электрических разрядов. Во время электроискрового разряда через электроды проходит мощный импульс тока. Движущийся с огромной скоростью поток электронов приводит к нагреву поверхности анода и межэлектродного зазора до  $11000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , плавлению металла анода, переносу металла с анода на катод и оплавлению его на поверхности детали. Вследствие его кратковременности (до  $10\text{ мкс}$ ) и локальности нагретые микрообъемы переносимого металла на деталь мгновенно охлаждаются. При определенных режимах обработки происходит сверхскоростная закалка поверхностного слоя детали до высокой твердости.

Электроискровая обработка заключается в легировании поверхностного слоя металла детали материалом электрода-инструмента. В результате высоких температур, химических реакций легирующего металла с диссоциированным атомарным азотом и углеродом воздуха, а также с материалом детали в поверхностных слоях образуются закалочные структуры и сложные химические соединения, возникает диффузионный износостойкий упрочненный слой, имеющий высокую микротвердость.

Принцип работы установок электроискрового наращивания и упрочнения легированием (ЭИНУЛ) с RC-генераторами основан на периодических разрядах накопительных конденсаторов "С" при касании вибрирующим электродом 2 поверхности обрабатываемой детали 1 (рисунок 1). При отходе вибрирующего электрода от детали происходит заряд и накопление энергии в конденсаторах "С" зарядным током, регулируемым резистором "R".

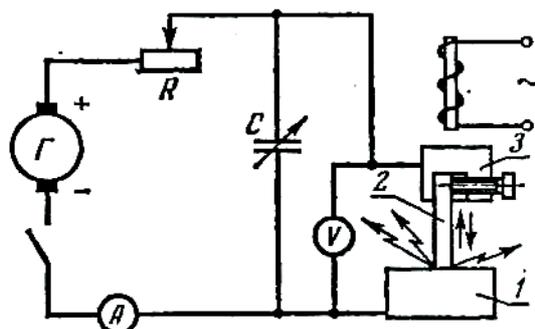


Рис. 2. – Принципиальная электрическая схема электроискровой установки: 1 – деталь; 2 – электрод; 3 – электромагнитный вибратор.

Основное достоинство упрочнения и восстановления режущего инструмента электроискровым легированием заключается в широких возможностях переноса на обрабатываемую деталь любых токопроводящих материалов, как тугоплавких и высокопрочных металлов и соединений, так и мягких, антифрикционных материалов с высокой адгезией слоя с основой. Электроискровое наращивание и упрочнение легированием обеспечивает значительное повыше-

ние износостойкости при абразивном износе, сухом трении, а так же воздействию высоких температур и нагрузок.

При восстановлении поверхностей, участвующих в трении, можно наносить покрытия толщиной до 0,25 мм, а поверхностей неподвижных соединений – до 1,5 мм. Для упрочнения режущих кромок инструмента наносят покрытия толщиной до 0,1 мм. Шероховатость и сплошность покрытия регулируются.

Глубина термического влияния на материал детали составляет 0,8-1,0 мм. Предел выносливости детали практически не изменяется.

Формирование микрогеометрии и несущей способности покрытий при ЭИНУЛ имеет особенности.

Исходная шероховатость восстанавливаемой поверхности не должна превышать  $R_z=10$  мкм. Поверхность после электроискрового наращивания существенно отличается от поверхностей, полученных другими способами.

После снятия случайно прилипших частиц распыленного металла на поверхности остаются равномерно расположенные скругленные сферические выступы и впадины. Микрорельеф имеет практически одинаковые характеристики по всем направлениям и не содержит острых гребешков, как после механической обработки. Однако с увеличением толщины покрытий средняя высота  $R_z$ , радиус закруглений и средний шаг неровностей непрерывно растут.

При обработке ЭИНУЛ инструментов и штампов применяют электроды из различных токопроводящих материалов, в том числе металлокерамические твердые сплавы групп ТК, ВК, ТТК, сплавы типа СТИМ, безвольфрамовые твердые сплавы, мелкодисперсные графиты марок МПГ-6, -7, -8, ЭЭПГ, хром и высокохромистые сплавы, медь и сплавы на ее основе, другие материалы. При выборе материала электрода надо исходить из того, что формируемый поверхностный слой должен отвечать ряду требований:

- быть твердым и противостоять реальным давлениям на контакте;
- хорошо отводить тепло от локальных зон тепловых вспышек либо надежно изолировать от локальных высоких температур контактные поверхности инструмента;
- площадь опорной поверхности должна соответствовать силовому нагружению во избежание продавливания слоя в основной металл или металл сопряженной детали;
- противостоять схватыванию с материалом сопряженной детали;
- быть химически неактивным по отношению к окружающей среде в контактной зоне.

Для проведения исследований процесса упрочнения и восстановления режущего инструмента электроискровым легированием нами используется установка UR-121 (рис. 3), находящаяся на кафедре «Надежность и ремонт машин» ОрелГАУ.

Установка (рис. 3) состоит из генератора 1, вибратора 2, пластины 3 и кабеля 4 для подключения генератора к пластине, на которой размещают обрабатываемую деталь.



Рис. 3 – Установка электроискрового легирования UR-121:  
1 – генератор; 2 – вибратор; 3 – пластина; 4 – кабеля.

Восстановление сферической поверхности шарового пальца наконечника рулевой тяги трактора МТЗ методом газопламенного напыления с применением водородно-кислородного пламени. Одним из перспективных методов повышения долговечности металлоконструкций и деталей машин является создание на их поверхности защитных покрытий, препятствующих ее повреждению в результате коррозии, изнашивания и воздействия агрессивных сред.

Существует множество способов нанесения защитных покрытий: хромирование; железнение; наплавка и т.д. Наиболее рациональным является способ газопламенного напыления.

Этот способ в силу своей простоты и экономичности нашел наиболее широкое применение в практике. Важная особенность этого метода – низкое термическое воздействие на восстанавливаемую поверхность. В этой связи исключаются деформации, а несущая способность детали не снижается. Покрытия, нанесенные этим способом, выдерживают обычные статистические и знакопеременные нагрузки.

Процесс газопламенного напыления состоит в расплавлении с помощью какого-либо источника теплоты материала, подлежащего нанесению на предварительно подготовленную поверхность, с его последующим распылением газовой струей и перемещением расплавленных частиц до соударения с обрабатываемой поверхностью.

В качестве источника теплоты предлагаем использовать водородно-кислородное пламя, вырабатываемое электролизером «Москва - 20», температура которого не превышает 3000 °С. А в качестве поверхности напыления изношенную сферическую поверхность шарового пальца наконечника рулевой тяги трактора МТЗ.

В процессе работы сферическая поверхность шарового пальца изнашивается до предельной величины. Также характерным дефектом шарового пальца

является повреждение резьбы. Этот дефект встречается редко (4%). Замер диаметра изношенной сферической поверхности шарового пальца предлагаем проводить в двух плоскостях (А-А, Б-Б) и двух сечениях (I-I, II-II) как показано на рис. 4.

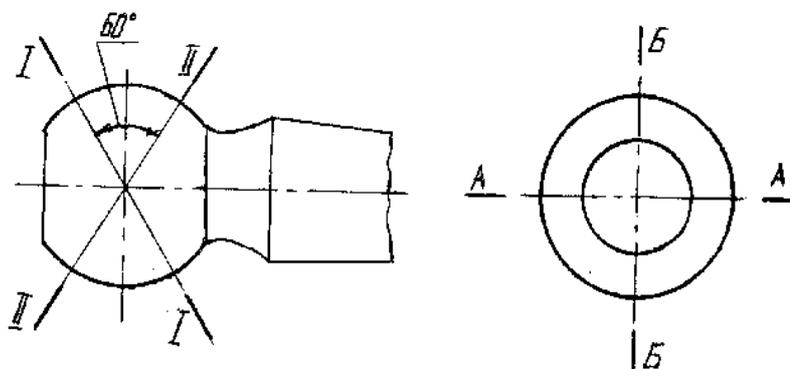


Рис. 4. Схема проведения замеров диаметра изношенной сферической поверхности шарового пальца

Измерения диаметра сферической поверхности детали предлагаем проводить при помощи микрометра МК50-1 ГОСТ 6507-88 с ценой деления 0,01 мм.

При напылении распыляемый материал, попадая в факел водородно-кислородного пламени горелок, разогревается до температуры, близкой к температуре плавления, и разгоняется до скорости 20-30 м/с [3]. При соударении с изделием, разогретые частицы соединяются с поверхностью (рис. 5) и между собой, образуя достаточно плотное и равномерное покрытие, толщина которого может изменяться в широких пределах. С помощью газопламенных пистолетов (горелок) производят напыление как легкоплавких (алюминий, бронза, баббит) материалов, так и относительно тугоплавких керамических соединений (окись титана, окись алюминия и др.).

Распыляемый материал подается в водородно-кислородное пламя горелки в виде порошка.

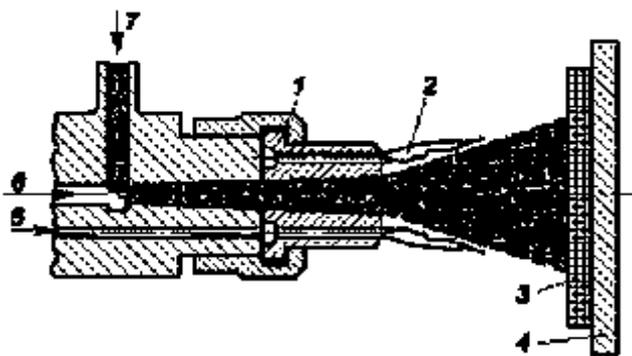


Рис. 5. Схема порошкового распылителя: 1 - газовое сопло; 2 - кольцевое пламя; 3 - покрытие; 4 - подложка; 5 - горючий газ; 6 - кислород; 7 - порошок.

Данный способ напыления, однако, не позволяет получать качественные высокоизносостойкие покрытия при использовании в качестве горючей смеси водородно-кислородного пламени. Предлагаем последующую термическую обработку для упрочнения в виде оплавления.

Технология газодинамического нанесения металлических покрытий. Технология нанесения порошковых материалов (покрытий) на поверхность деталей и изделий, реализуемая оборудованием ДИМЕТ, использует газодинамическое нанесение покрытий. Способ разработан на основе, открытого в 80-х годах прошлого столетия, эффекта закрепления твердых частиц, движущихся со сверхзвуковой скоростью, на поверхности при соударении с ней. Нанесение покрытий включает в себя нагрев сжатого газа (воздуха), подачу его в сверхзвуковое сопло и формирование в этом сопле сверхзвукового воздушного потока, подачу в этот поток порошкового материала, ускорение этого материала в сопле сверхзвуковым потоком воздуха и направление его на поверхность обрабатываемого изделия.

Технология газодинамического нанесения покрытий оборудованием ДИМЕТ – один из наиболее эффективных способов восстановления поврежденных участков и нанесения новых поверхностей на различные детали и изделия. В большей степени это обусловлено тем, что из-за низкого тепловложения устранение дефекта не приводит к деформации изделия, возникновению внутренних напряжений, структурным превращениям в металле изделия. При этом конструкция оборудования обеспечивает локальное воздействие на обрабатываемую деталь, не затрагивающее бездефектных участков. Однако эта технология пригодна только в тех случаях, когда не предъявляют высоких требований к твердости и износостойкости наносимых



Рис. 6 – Нижняя головка шатуна до нанесения алюминиевого слоя.

покрытий. С этим ограничением такие покрытия могут быть использованы для устранения дефектов не только деталей из алюминиевых сплавов, но и других металлов. Важно отметить, что низкая энергетика процесса позволяет устранять дефекты и повреждения тонкостенных деталей, восстановление которых другими способами (например, наплавкой) просто невозможно.

Одним из примеров данной технологии является нанесение алюминиевого покрытия, играющего роль подшипника скольжения, на нижнюю головку ша-

туна компрессора. В процессе эксплуатации компрессора геометрические размеры посадочного места шатуна увеличиваются, что, несомненно, требует либо восстановления, либо его замены.

При восстановлении геометрических размеров напыление производится непосредственно на изношенную поверхность без предварительной подготовки и обработки посадочного места.



Рис. 7 – Нижняя головка шатуна после нанесения алюминиевого слоя.

Покрытия оборудованием ДИМЕТ можно наносить на любые металлы тех деталей, которые испытывают незначительные нагрузки, иначе при их возникновении возможно разрушение, отрыв нанесенного слоя от основания и выход узла из строя.

Восстановление и упрочнение лемехов плугов пайкой металлокерамическими пластинками с использованием водородно-кислородного пламени. Лемех плуга изготавливают из высококачественных марок сталей л65, л53, лемеха быстро изнашиваются лезвия затупляются.

Лемеха используемые для восстановления необходимо: очистить от загрязнений до состояния, обеспечивающего возможность осмотра и выявления дефектов; определить толщину основы изношенного лемеха.

Лемеха могут иметь обломы и затупления лезвия, а также трещины.

Работоспособность лемеха зависит от скорости затупления и прочности лезвия. Затылочная сторона фаски на лезвии лемеха является главной причиной преждевременной его выбраковки (при ширине фаски менее 2,5 мм лемех выбраковывается).

В засушливые годы на тяжелых почвах закаленные лемеха часто ломаются, а наплавленные сормайтом, гнутся в месте перехода носка в остов.

В настоящее время для обработки почвы в большинстве случаев используются рабочие органы, конструктивные параметры которых были разработаны 30 – 40 лет назад. Их технический уровень и качество не удовлетворяют требо-

ваниям, предъявляемых к ним по таким параметрам как прочность, износостойкость, выполнение агротехнических требований.

В последние годы за рубежом большое внимание уделяется применению технической керамики для повышения износостойкости рабочих органов сельхозмашин. Керамика – многокомпонентный, гетерогенный материал, получаемый спеканием высокодисперстных минеральных частиц (глин, оксидов, карбидов, нитридов и др.). Если в состав керамики входят металлы, то этот вид керамики называют керментами.

Так как в современном инструментальном производстве при механической обработке деталей выбраковывается большое количество резцов с металлокерамическими пластинками марок ТН-20, Т5К10, Т15К6 и др., то целесообразно вместо утилизации этих пластин использовать их для восстановления и упрочнения лезвия лемехов сельскохозяйственных машин.

Известно несколько способов упрочнения и восстановления почвообрабатывающих рабочих органов: оттяжка, заточка, закалка, наплавка сормайтотом, газопламенная наплавка износостойкими порошками и в настоящее время разработаны современные технологии режущей кромки почвообрабатывающих машин, металлокерамическими пластинками.

В Орловском государственном аграрном университете ведется научно-исследовательская работа по восстановлению лемеха плуга металлокерамикой с применением водородно-кислородного пламени. Сущность процесса восстановления заключается в том, что с тыльной стороны лезвия лемеха припаивают твердосплавные пластины сплошного и прерывистого расположения позволяющие получить самозатачивающийся лемех. Также металлокерамические пластины можно припаивать и на культиваторные лапы с лицевой и с тыльной стороны, что повысит их износостойкость и срок службы.

Для подготовки лемеха, к водородно-кислородной пайке металлокерамических пластин, применяли фрезерный станок с помощью которого снимали 1,5-2 мм слой с поверхности лемеха (рис. 8).



Рис. 8 – Лемех, подготовленный к восстановлению

Для пайки технической керамики используют водородно-кислородное пламя, воздействие которого не оказывают негативного влияние на использование припоя, флюса, металлокерамические пластины и металл лемеха.

Лемех, на данную глубину припаиваем металлокерамические пластины с использованием водородно-кислородного пламени (рис. 9). Используя при этом

установки имеющиеся на кафедре «Надежность и ремонт машин» ОрелГАУ электролизеры Энергия-1,5 УХЛ4 и МБВ-500.



Рис. 9. Лемех с лицевой стороны напаянный металлокерамическими пластинами с использованием водородно-кислородного пламени



Рис. 10. Лемех после эксплуатационных испытаний

После чего, нами была разработана программа и методика экспериментальных исследований, включающая: определение смачивания по краевому углу и площадки растекания; определение заполнения зазора припоем; контроль прочности сцепления покрытия; ультразвуковой контроль; радиографический контроль; коррозионные испытания; испытания на усилие отрыва; металлографические исследования; эксплуатационные испытания (рис. 10).

### Литература

9. Хромов В.Н., Сенченков И.К. Термоупругопластическое деформирование металла: Восстановление деталей машин. Орел.: ОрелГТУ, 2002.- 219 с.
10. Полевой Г.В. Газопламенная обработка металлов: Учебник для студ. учреждений сред. проф. образования/ Г.В. Полевой, Г.К. Сухинин. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 336с.
11. Храпоничев Д.Н. Восстановление деталей методом газопламенного напыления водородно-кислородным пламенем, например шарового пальца наконечника рулевой тяги трактора типа МТЗ. Производство и ремонт машин: Сборник материалов Международной научно-практической конференции.-Ставрополь: Издательство СтГАУ «АГРУС», 2005.-288с., с.134-138.
12. Патент РФ № 2211096. Способ газопламенного напыления и горелка для его осуществления / Хромов В.Н., Плетнев Э.П., Абашев Н.Г., Верцов В.Г., Корвин А.Я., Барабаш В.В. Оpubл. бюл. №24 от 27.08.2003. Патентообладатель - Орел ГАУ.
13. Беликов И.А. Повышение долговечности рабочих органов плуга керамическими материалами: Автореф. дис... канд. техн. наук – М.: 2002. – 20с.

14. Хромов В.Н., Семешин А.Л., Гончаренко В.В., Зайцев С.А. Упрочнение и восстановление лап при производстве и ремонте культиваторов. Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении: Материалы 4-го Международного научно-технического семинара, 24-26 февраля 2004 г., г.Свялява. – Киев: АТМ Украины, 2004. – 260 с., с.222-224.
15. Устройство для газопламенной обработки материалов. Патент РФ 216774. / В.Н. Хромов, А.Л. Семешин. – Б.И. – 2001. – №4.
16. Хромов В.Н., Семешин А.Л., Гончаренко В.В. Анализ конструкций электролизеров водородно-кислородной газовой смеси. Качество, стандартизация, контроль: теория и практика.: Материалы 3-й Международной научно-практической конференции, 23-26 сентября 2003 г., Крым, г.Ялта. – Киев: АТМ Украины, 2003., с.196-200.

УДК

## СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ТОРЦОВЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

ЗАГРЯДЦКИЙ В.И., д.т.н., проф., СВИДЧЕНКО С.Ю., к.т.н., доц.  
Орловский государственный технический университет  
тел.(4862) 419830, E-mail :zagr@ostu.ru

## SYSTEMS OF THE ELECTRIC DRIVE WITH FACE ELECTRIC MOTORS

Zagryadsky W. I., Dr.Sci.Tech., Professor,  
Swydchenko S. J., Cand.Tech.Sci., Senior lecturer  
Oryol State Technical University  
Ph. (4862) 419830, E-mail:zagr@ostu.ru

### *Annotation*

*The electric drive with disc (axial) asynchronous electric motors is considered. It has reduced angular velocity in comparison with usual asynchronous electric motors.*

В настоящее время выпускаемые асинхронные электродвигатели (АД) традиционной цилиндрической конструкции общепромышленных серий 4А, 5А, 6А, РА, АИ [1] максимальное число пар полюсов не более 6 (см. таблицу). Это означает, что синхронная частота вращения при частоте питания 50 Гц не может быть меньше 500 об/мин.

### Таблица.

Максимальное число пар полюсов АД общепромышленных серий

Серии электродвигателей	4А	5А	6А	Р	А
				А	И
Число пар полюсов	6	4	4	4	4

Для низкоскоростных (< 400 об/мин) производственных процессов такое ограничение приводит к усложнению системы электропривода.

Использование кольцевой обмотки [2] однодискового статора торцового асинхронного электродвигателя (ТАД) (см. рис. 1) позволяет получить двигатели с большим количеством полюсов. Понижение частоты вращения, возникающее при этом, позволяет обойтись в приводе без понижающего редуктора, снизив общие габариты и вес.

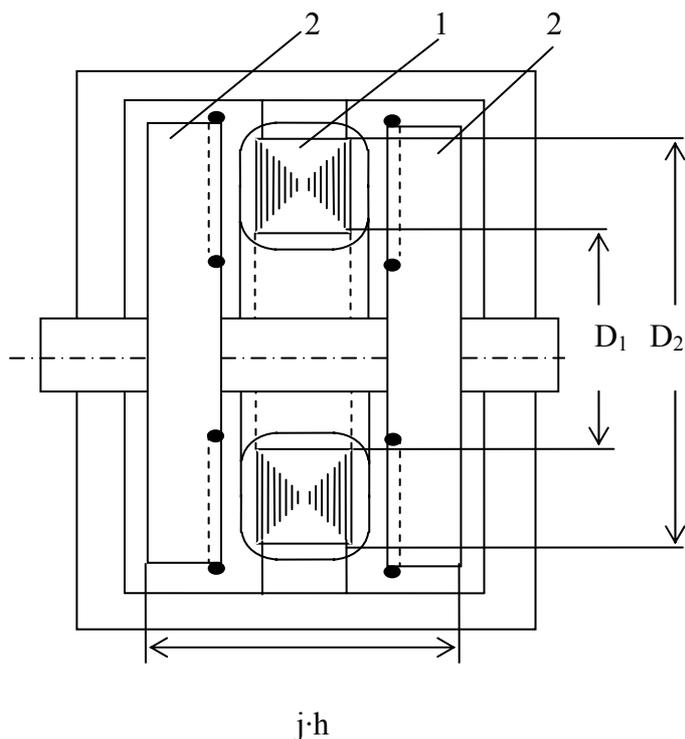


Рисунок 1. Эскиз торцового асинхронного ТАД может электродвигателя с двумя дисками ротора жением:

- 1 – статор с кольцевой обмоткой ;
- 2 – диски ротора.

$$S_2 = j \cdot 0,25 \cdot k \cdot n \cdot A_{\text{макс}} \cdot B_{\delta} \cdot D_2^3 \cdot \varphi(d^*), \quad (2)$$

где помимо аналогичных с формулой (1) по смыслу величин, относящихся к ТАД, применяются :

- j – число элементарных пар «статор-ротор» (j = 2 на рис. 1);
- вспомогательный коэффициент  $\varphi(d^*)$ , учитывающий конструктивную специфику расположения магнитной системы:  $\varphi(d^*) = d^* \cdot (1 - d^{*2})$ , причем  $d^* = D_1 / D_2$  (см. рис. 1). В [4] рекомендованы значения  $d^* = 0,4..0,6$ . Используемая в формуле (2) линейная нагрузка  $A_{\text{макс}}$  определяется на длине окружности  $D_1$  ТАД. Учитывая необходимость дальнейшего сопоставления ТАД с цилиндрическим АД, целесообразно в формуле (2) перейти к линейной нагрузке A, определяемой по среднему (расчетному) диаметру  $D_p = (D_1 + D_2) / 2$  :

$$A_{\text{макс}} = A \cdot \frac{D_p}{D_1} = A \cdot \frac{d^* + 1}{2 \cdot d^*}$$

Вместе с тем представляют проектировочный интерес условия, при которых подобное снижение частоты вращения не приведет к снижению мощности.

Как известно [3], полную мощность АД традиционной конструкции можно выразить следующей формулой:

$$S_1 = k_d \cdot n_d \cdot A_d \cdot B_{\delta\delta} \cdot \lambda \cdot D^3, \quad (1)$$

где:

$k_d$ - коэффициент, учитывающий форму обмотки и распределения кривой индукции  $B_{\delta\delta}$ - по окружности статора;  $n_d$ - синхронная частота вращения;  $A_d$ - линейная токовая нагрузка;  $B_{\delta\delta}$ - амплитуда первой гармоники индукции вращающегося магнитного поля статора;  $\lambda = \ell / D$ , где  $\ell$  -расчетная длина магнитопровода, D - внутренний диаметр статора.

Согласно [4] мощность

быть представлена выра-

По этой же причине диаметр  $D_2$  в формуле (2) представим через  $D_p$ :

$$D_2 = D_p \cdot \frac{2}{d^* + 1}.$$

После подстановки этих формул в (2) она приобретает следующий вид :

$$S_2 = j \cdot k \cdot n \cdot A \cdot B_\delta \cdot D_p^3 \cdot \frac{1 - d^*}{1 + d^*}. \quad (3)$$

### Сопоставление АД и ТАД по мощности.

При этом будем считать, что  $n_d = n$ ;  $j = 1$ . Деля  $S_2$  на  $S_1$ , получим:

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{k \cdot n \cdot A \cdot B_\delta \cdot D_p^3 \cdot d^*}{k_d \cdot n_d \cdot A_d \cdot B_{d\delta} \cdot \lambda \cdot D^3} \cdot \frac{1 - d^*}{1 + d^*}.$$

Если, кроме того, считать, что  $k_d \approx k$ , а  $B_{d\delta} = B_\delta / b$ ,  $A_d = A/a$ , то

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{a \cdot b}{\lambda} \cdot \frac{1 - d^*}{1 + d^*} \cdot \left( \frac{D_p}{D} \right)^3. \quad (4)$$

Преимущества ТАД по мощности проявляются при  $\frac{S_2}{S_1} > 1$  или

$$\frac{a \cdot b}{\lambda} \cdot \frac{1 - d^*}{1 + d^*} \cdot \left( \frac{D_p}{D} \right)^3 > 1.$$

Последнее неравенство преобразуется в следующее:

$$\frac{D_p}{D} > \sqrt[3]{\frac{1 + d^*}{1 - d^*} \cdot \frac{\lambda}{a \cdot b}}. \quad (5)$$

Первый множитель, стоящий под знаком радикала представлен графически на рисунке 2.

По нему видно, что для возможных значений  $d^*$  кривая располагается выше 2. Поскольку коэффициенты  $\lambda$ ,  $a$ ,  $b$  имеют значения близкие 1, то это означает, что в большинстве случаев расчетный диаметр ТАД должен быть по крайней мере в  $\sqrt[3]{2} = 1,26$  раз больше диаметра статора  $D$  заменяемого АД. Например, при  $\lambda = 0,9$ ;  $d^* = 0,4$ ;  $a = 0,8$ ,  $b = 1$ ,  $D_p/D > 1,38$ . Если принять  $D_p/D = 1,6$ , то

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{a \cdot b}{\lambda} \cdot \frac{1 - d^*}{1 + d^*} \cdot \left( \frac{D_p}{D} \right)^3 = \frac{0,8 \cdot 1}{0,9} \cdot \frac{1 - 0,4}{1 + 0,4} \cdot (1,6)^3 = 1,56.$$

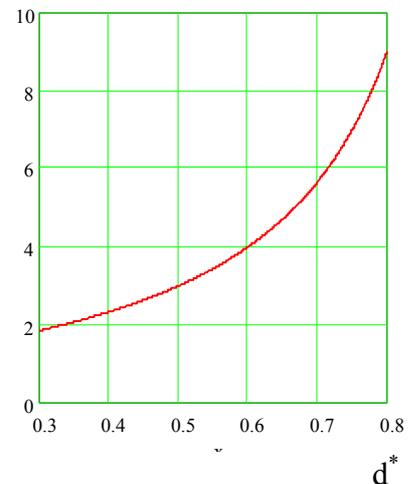


Рисунок 2. Вспомогательный множитель в неравенстве (5)

Если параметр  $d^*$  фиксирован, то кубическая степень в формуле (4) обеспечивает существенное увеличение мощности  $S_2/S_1$  при росте  $D_p/D$ .

Вместе с тем увеличение  $d^*$  (при выполнении условия (5)) приводит к снижению выигрыша по мощности ТАД независимо от того, какими конструктивными путями обеспечивается рост  $d^*$ . Если фиксируется  $D_p/D$ , то увеличение  $d^*$  приводит к снижению  $D_2$  ТАД. Пусть  $d^* = 0,5$ ;  $a = 0,8$ ;  $b = 1$ ;  $\lambda = 0,9$ ;  $D_p/D = 1,6$ , тогда

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{0,8 \cdot 1}{0,9} \cdot \frac{1-0,5}{1+0,5} \cdot (1,6)^3 = 1,21.$$

Фиксация  $D_2$  при увеличении  $d^*$  приводит к некоторому увеличению расчетного диаметра

$$\left(\frac{D_p}{D}\right)_{d^*=0,5} = \left(\frac{D_p}{D}\right)_{d^*=0,4} \cdot \frac{0,5+1}{0,4+1} = 1,6 \cdot \frac{0,5+1}{0,4+1} = 1,714,$$

однако и здесь наблюдается снижение прироста мощности ТАД по сравнению со случаем  $d^* = 0,4$ :

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{0,8 \cdot 1}{0,9} \cdot \frac{1-0,5}{1+0,5} \cdot (1,714)^3 = 1,49,$$

что связано с уменьшением активной длины статора ТАД при увеличении  $d^*$ . Рассмотренные эффекты увеличения мощности ТАД тем сильнее, чем короче сопоставляемый АД ( $\lambda < 0,6$ ).

### Сопоставление АД и ТАД по частоте вращения.

При этом будем считать  $S_2 = S_1$ ,  $j = 1$ . Получим, деля  $n$  на  $n_d$ :

$$\frac{n}{n_d} = \frac{k_d \cdot A_d \cdot B_{\delta\delta} \cdot D^3 \cdot \lambda}{k \cdot A \cdot B_\delta \cdot D_p^3} \cdot \frac{1+d^*}{1-d^*} \quad (6)$$

Если как и в предыдущем случае принять, что параметры сопоставляемых двигателей близки, т.е.  $k_d \approx k$ , а  $B_{\delta\delta} = B_\delta / b$ ,  $A_d = A/a$ , то формула (6) упрощается до

$$\frac{n}{n_d} = \frac{\lambda}{a \cdot b} \cdot \frac{1+d^*}{1-d^*} \cdot \left(\frac{D}{D_p}\right)^3 \quad (7)$$

Скоростное преимущество ТАД по сравнению с цилиндрическими АД соответствует таким сочетаниям геометрических параметров, при которых  $n/n_d < 1$ , т.е.

$\frac{\lambda}{a \cdot b} \cdot \frac{1+d^*}{1-d^*} \cdot \left(\frac{D}{D_p}\right)^3 < 1$ . Это неравенство соответствует условию

$$\frac{D}{D_p} < \sqrt[3]{\frac{a \cdot b}{\lambda} \cdot \frac{1-d^*}{1+d^*}} \quad (8)$$

являющемуся дуально тождественным ранее полученному (5). Идентичность формул (4) и (7) и условий (5) и (8) позволяет считать, что снижение частоты вращения ТАД при постоянстве мощности будет обратной величиной увеличения мощности, достигаемого при постоянстве частоты вращения ТАД и АД.

Уже рассмотренный при сопоставлении мощностей набор параметров  $\lambda=0,9$ ;  $d^*=0,4$ ;  $D_p/D = 1,6$ ;  $a = 0,8$ ;  $b = 1$  дает следующее снижение частоты вращения ТАД:

$$\frac{n}{n_d} = \frac{0,9}{0,8 \cdot 1} \cdot \frac{1+0,4}{1-0,4} \cdot (0,625)^3 = 0,641 \quad \left( = \frac{1}{1,56} \right)$$

Иными словами, если АД будет иметь  $p = 6$  ( $n_1 = 500$  об/мин), то у ТАД такой же расчетной мощности возможно получить  $p=9$  ( $n_1 = 333$  об/мин). Как и в предыдущем случае замена на ТАД «коротких» АД ( $\lambda < 0,6$ ) дает более существенный положительный эффект. Так при  $\lambda=0,5$ ;  $d^*=0,4$ ;  $D/D_p = 0,625$

$$\frac{n}{n_d} = \frac{0,5}{0,8 \cdot 1} \cdot \frac{1+0,4}{1-0,4} \cdot (0,625)^3 = 0,356$$

При этом число пар полюсов у ТАД можно увеличить до  $p = 6/0,356 \approx 17$ , а синхронную частоту вращения снизить до  $n_1 = 176$  об/мин.

Вместе с тем путь замены «коротких» АД на ТАД приводит к уменьшению величины среднего зубцового деления  $t_z$ , что может не только затруднить изготовление обмотки, но и увеличит магнитные нагрузки на зубцы. Для того, чтобы этого не допустить, следует придерживаться ограничений на  $\lambda$ , возникающих на основе уже полученных соотношений.

Для ТАД

$$t_z = \frac{\pi \cdot D_p}{Z} = \frac{\pi \cdot D_p}{6 \cdot p \cdot q} = \frac{\pi \cdot D_p \cdot n}{360 \cdot f \cdot q} \quad (9)$$

для АД

$$t_{zd} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_d}{360 \cdot f \cdot q_d} \quad (10)$$

Деление (9) на (10) дает

$$\frac{t_z}{t_{zd}} = \frac{q_d \cdot D_p \cdot n}{q \cdot D \cdot n_d} \quad (11)$$

Подставив в (11) соотношение (7), получим

$$\frac{t_z}{t_{zd}} = \frac{q_d}{q} \cdot \frac{\lambda}{a \cdot b} \cdot \frac{1+d^*}{1-d^*} \cdot \left( \frac{D}{D_p} \right)^2 \quad (\text{при } S_2 = S_1) \quad (12)$$

Условие  $\frac{t_z}{t_{zd}} > 1$  приводит к следующему ограничению

$$\lambda > \frac{q}{q_d} \cdot a \cdot b \cdot \frac{1-d^*}{1+d^*} \cdot \left( \frac{D_p}{D} \right)^2 \quad (13)$$

Если не прибегать к изменению числа зубцов на полюс и фазу  $q$ , то для последнего примера это условие не выполняется, т.к. в примере  $\lambda=0,5$ , а граничное значение

в (13) требует, чтобы  $\lambda$  было не менее

$$a \cdot b \cdot \frac{1-d^*}{1+d^*} \cdot \left( \frac{D_p}{D} \right)^2 = 0,8 \cdot 1 \cdot \frac{1-0,4}{1+0,4} \cdot (1,6)^2 = 0,877$$

Вариант с заменой более «длинного» АД ( $\lambda=0,9$ ) на ТАД с параметрами  $d^*=0,4$ ;  $D_p/D = 1,6$  при  $a = 0,8$ ;  $b = 1$  более успешен, т.к. для него не только выполняется условие (13)

$$a \cdot b \cdot \frac{1-d^*}{1+d^*} \cdot \left(\frac{D_p}{D}\right)^2 = 0,8 \cdot 1 \cdot \frac{1-0,4}{1+0,4} \cdot (1,6)^2 = 0,88, \text{ но и достигается небольшое увеличение}$$

среднего зубцового деления ТАД по сравнению с АД:

$$\frac{t_z}{t_{zd}} = \frac{\lambda}{a \cdot b} \cdot \frac{1+d^*}{1-d^*} \cdot \left(\frac{D}{D_p}\right)^2 = \frac{0,9}{0,8 \cdot 1} \cdot \frac{1+0,4}{1-0,4} \cdot \left(\frac{1}{1,6}\right)^2 = 1,03.$$

### Сопоставление АД и ТАД по удельным массам

Оценка двигателя по массе активных частей, приходящейся на единицу выходной мощности является важной в решении вопроса о его широком применении в электроприводе [3, 5]. Удельная масса может быть определена по формуле

$$m' = \frac{m}{P} = \frac{\gamma \cdot V \cdot k_E}{S \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad (14)$$

Если допустить, что средняя плотность активных частей двигателей одинакова  $\gamma_d = \gamma$ , то для определения соотношения удельных масс ТАД и АД можно применить формулу

$$\frac{m'}{m'_d} = \frac{V \cdot S_1 \cdot k_E \cdot \eta_d \cdot \cos \varphi_d}{V_d \cdot S_2 \cdot k_{Ed} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad (15)$$

Формула (4) сопоставления по мощностям  $S$  уже получена (при условии  $n = n_d$ ). Объем активных частей ТАД можно выразить через средний диаметр  $D_p$  и осевой размер  $h$  так:  $V = \pi \cdot h \cdot D_p^2 \cdot \frac{1-d^*}{1+d^*}$ . Объем активных частей

АД:  $V_d = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot l \cdot (1+k^*)^2$ , где  $k^* = 2h_{az}/D$  – относительная величина двойного слоя статора, сформированного высотой зубца и спинкой. Подставив  $V$ ,  $V_d$  и выражение обратное (4) в (15), получим

$$\frac{m'}{m'_d} = \frac{4 \cdot h \cdot k_E \cdot \cos \varphi_d \cdot \eta_d}{a \cdot b \cdot D \cdot k_{Ed} \cdot \cos \varphi \cdot \eta \cdot (1+k^*)^2} \cdot \frac{D}{D_p} \quad (16)$$

Если при замене АД на ТАД в первом приближении пренебречь изменениями режимных параметров  $\cos \varphi$ ,  $\eta$ ; считать, что  $k_E \approx k_{Ed}$ , то для соотношения удельных масс останется зависимость только от конструктивных параметров:

$$\frac{m'}{m'_d} = \frac{4 \cdot h}{a \cdot b \cdot D \cdot (1+k^*)^2} \cdot \left(\frac{D}{D_p}\right) \quad (17)$$

В этой формуле фигурирует осевая длина  $h$  только одной элементарной пары «статор-ротор» - число таких пар на отношение удельных масс не влияет. Из формулы (17) следует, что снижение удельной массы ТАД по отношению к удельной массе АД может быть достигнуто увеличением  $D_p/D$ . Уже было по-

казано, что этот путь приводит к уменьшению роста мощности ТАД по сравнению с АД и поэтому нецелесообразен. Выигрыш ТАД по удельным массам произойдет при выполнении неравенства

$$\frac{4 \cdot h}{a \cdot b \cdot D \cdot (1+k^*)^2} \cdot \left(\frac{D}{D_p}\right) \leq 1, \text{ что соответствует}$$

$$\frac{h}{D} \leq \frac{a \cdot b}{4} \cdot (1+k^*)^2 \cdot \left(\frac{D_p}{D}\right) \quad (18)$$

Последнее неравенство может быть использовано как рекомендация при оптимальном проектировании ТАД в виде (18) или в абсолютных значениях осевой длины  $h$ :

$$h \leq \frac{a \cdot b}{4} \cdot (1+k^*)^2 \cdot D_p.$$

Пример. АД мощностью 75 кВт имеет  $D_H = 393$  мм;  $D = 211$  мм;  $\lambda = 0,9$  ( $S_1 = 88$  кВА)

$$k^* = (D_H - D) / D = (393-211) / 211 = 0.863.$$

Если предпринять замену этого двигателя на ТАД с  $a = 0,8$ ;  $b = 1$ ;  $D_p / D = 1,6$ , то

$$\frac{h}{D} \leq \frac{a \cdot b}{4} \cdot (1+k^*)^2 \cdot \left(\frac{D_p}{D}\right) = \frac{0,8 \cdot 1}{4} \cdot (1+0,863)^2 \cdot (1,6) = 1,11.$$

Т.е. для рассмотренного двигателя снижение удельной массы при его замене на ТАД наступит лишь тогда, когда  $h$  будет меньше  $211 \cdot 1,11 = 235$  мм. Расчетный диаметр

$D_p = 1,6 \cdot 211 = 338$  мм, что при  $d^* = 0,4$  даст  $D_2 = 483$  мм. Согласно ранее произведенным оценкам мощность  $S_2$  такого ТАД будет в 1,56 раза больше исходного АД, т.е.  $\approx 183$  кВА.

### Оценка увеличения намагничивающего тока

Увеличение диаметра и числа полюсов асинхронного двигателя приводит к

увеличению намагничивающего тока и, как следствие, к снижению коэффициента мощности [1]. Поскольку массовое проявление этого процесса негативно сказывается на электроснабжении электропривода, представляет интерес, насколько сильным он будет при замене АД на ТАД. Оценить намагничивающие токи позволяют формулы:

$$I_{\mu d} = \frac{p_d \cdot F_d}{0,9 \cdot m \cdot w_{1d} \cdot k_{обд}} \quad \text{ - для АД} \quad \text{ и } \quad I_{\mu} = \frac{p \cdot F}{0,9 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{об}} \quad \text{ - для ТАД,}$$

где:  $m$ - число фаз обмотки статора;  $w_{1d}$ ,  $w_1$ - числа витков обмотки статора;  $F_d$ ,  $F$ - намагничивающие силы;  $k_{обд}$ ,  $k_{об}$  – обмоточные коэффициенты обмоток статора;

$p_d$ ,  $p$  – число пар полюсов обмоток статора АД и ТАД соответственно.

Если индукции в воздушном зазоре считать одинаковыми:  $B_{\delta d} = B_{\delta}$ , то при одинаковых коэффициентах насыщения и величинах воздушного зазора  $F_d = F$ , и отношение токов намагничивания может быть представлено формулой

$$\frac{I_{\mu}}{I_{\mu d}} = \frac{p \cdot w_{1d}}{p_d \cdot w_1} \quad (19)$$

При одинаковых величинах напряжения и частоты питания, коэффициентах формы поля и отношений э.д.с. обмотки к номинальным напряжениям

$$\frac{p}{p_d} = \frac{n_d}{n}, \quad \text{а} \quad \frac{w_{1d}}{w_1} = \frac{\Phi}{\Phi_d} \quad (20)$$

Отношение магнитных потоков можно получить, приравнявая в первом приближении выражения индукции в воздушном зазоре:

$$\text{-для АД} \quad B_{\delta d} = \frac{p_d \cdot \Phi_d}{D \cdot l} = \frac{p_d \cdot \Phi_d}{D^2 \cdot \lambda};$$

-для ТАД

$$B_{\delta} = \frac{p \cdot \Phi}{D_p \cdot l_p} = \frac{p \cdot \Phi \cdot (1 + d^*)}{D_p^2 \cdot (1 - d^*)}$$

После приравнивания и необходимых преобразований получим:

$$\frac{\Phi}{\Phi_d} = \frac{p_d \cdot (1 - d^*)}{p \cdot \lambda \cdot (1 + d^*)} \cdot \left( \frac{D_p}{D} \right)^2 \quad (21)$$

Подставляя (21) в (20), а затем в (19), получим окончательно:

$$\frac{I_{\mu}}{I_{\mu d}} = \frac{(1 - d^*)}{\lambda \cdot (1 + d^*)} \cdot \left( \frac{D_p}{D} \right)^2 \quad (22)$$

Отсутствие соотношений частот вращения в формуле (22) и сопутствующих допущений о равенстве мощностей или частот вращения позволяет считать эту формулу более универсальной, чем (4), (7), (12) и (15). Согласно этой формуле замена «коротких» АД на ТАД и увеличение расчетного диаметра  $D_p$  дадут большее значение намагничивающего тока, большее снижение коэффициента мощности, и следовательно таких шагов следует избегать. Для примера, при  $d^* = 0,4$ ;  $\lambda = 0,9$ ;  $D_p/D = 1,6$

$$\frac{I_{\mu}}{I_{\mu d}} = \frac{(1 - d^*)}{\lambda \cdot (1 + d^*)} \cdot \left( \frac{D_p}{D} \right)^2 = \frac{(1 - 0,4)}{0,9 \cdot (1 + 0,4)} \cdot (1,6)^2 = 1,22.$$

Если же избежать этих шагов не удастся, то для увеличения  $\cos\varphi$  ТАД необходимо снабдить батареей конденсаторов, разумеется, уменьшая в целом эффективность его использования. Таким образом, замена «коротких» АД на ТАД дает не столь однозначные результаты, как это могло бы быть при сопоставлении этих двигателей только по их мощности и частоте вращения.

### **Выводы.**

Использование ТАД позволяет получить электропривод с уменьшенной частотой вращения по сравнению с электроприводом на двигателях общепромышленных серий и, в ряде случаев, либо полностью отказаться от использования редукторов, либо перейти на редукторы с меньшим передаточным числом.

Наиболее целесообразной конструкцией ТАД, имеющего минимальную частоту вращения, следует считать конструкцию с одним диском статора и двумя дисками ротора.

### **Литература**

1. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию. 5-е издание  
- Ростов н/Д: Феникс, 2004.- 480 с.
2. Загрядцкий В.И., Кобяков Е.Т., Степанов Ю.С. Торцовые асинхронные электро-  
двигатели и совмещенные электромеханические агрегаты.-М.: Машиностроение – 1, 2003.- 287 с.
3. Бут Д.А. Основы электромеханики. - М.: Изд-во МАИ, 1996.- 468 с.
4. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. - М.: Высшая школа, 1985.- 252 с.
5. Свечарник Д.В. Электрические машины непосредственного привода: Безредукторный электропривод.- М.: Энергоатомиздат, 1988.- 208 с.

УДК 664. 143/.149; 664, 858; 663. 91

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ ШТАМПОВАНИЯ КРУГЛОЙ ЗАГОТОВКИ С УЧЕТОМ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ЗАГОТОВКИ**

В.П. Корячкин, д.т.н., проф  
Ю.М. Масютин, инженер  
Орловский государственный технический университет  
Орел, тел. (4862) 551187, fax (4862) 551187, E-mail: mapp@ostu.ru

## **DEFINITION OF EFFORT STAMP OF ROUND PREPARATION WITH AC- COUNT REOLOGICAL OF PROPERTIES MATERIAL OF PREPARATION**

V.P.Korjachkin, Dr.Sci.Tech., Professor, J.M.Masjutin, Engineer  
Oryol State Technical University  
Orel, ph. (4862) 551187, fax (4862551187, E-mail: mapp@ostu.ru

### *Annotation*

*In orelstu is created the system of measurement reological properties of food materials with use of a personal computer and the environment of graphic programming labview.*

*Reological properties of food materials are applied to creation of effective technologies and the equipment of the food-processing industry.*

*The analysis of flow curves of wide range continuous plasticity mediums made it possible to offer characteristic and basic different the reological state equations which give the opportunity to estimate the relationship of elastic and plastic properties of subjects inquiry.*

*Parameters of the reological equations can be applied in engineer calculations for perfecting technologies and equipment in new kinds production of confectionery goods.*

Современное создание эффективного технологического оборудования предприятий пищевых производств, в частности оборудования для формования пищевых материалов, необходимо основывать на знании реологических свойств объектов переработки.

Без учета реологических свойств пищевых материалов невозможен выбор геометрических размеров и определение оптимальных усилий рабочих органов разрабатываемого технологического оборудования. Знание реологических или физико-химических свойств объектов переработки позволит научно обоснованно производить инженерные расчеты разрабатываемого или модернизируемого оборудования, что на практике позволит обеспечить его эф-

фективную работу и будет способствовать организации производства продукции при минимальном механическом воздействии на формируемый материал, что в целом минимизирует затраты на выпуск качественных изделий.

Физическая картина формирования штампованием имеет общий характер функционирования всех штампующих устройств. Это - сдавливание объекта формирования до получения заданной формы, размеров и требуемой массы.

Для выбора геометрических размеров и определения усилий при формировании штампованием рассмотрим процесс сжатия между двумя круглыми пластинами продукта, относящегося к наиболее сложному реологическому классу, а именно к упруго - вязко - пластичным материалам.

На рис. 1 приведена схема формирования штампованием слоя материала между двумя параллельными круглыми пластинами, при этом верхняя пластина движется вниз со скоростью  $u$ , а нижняя пластина неподвижна.

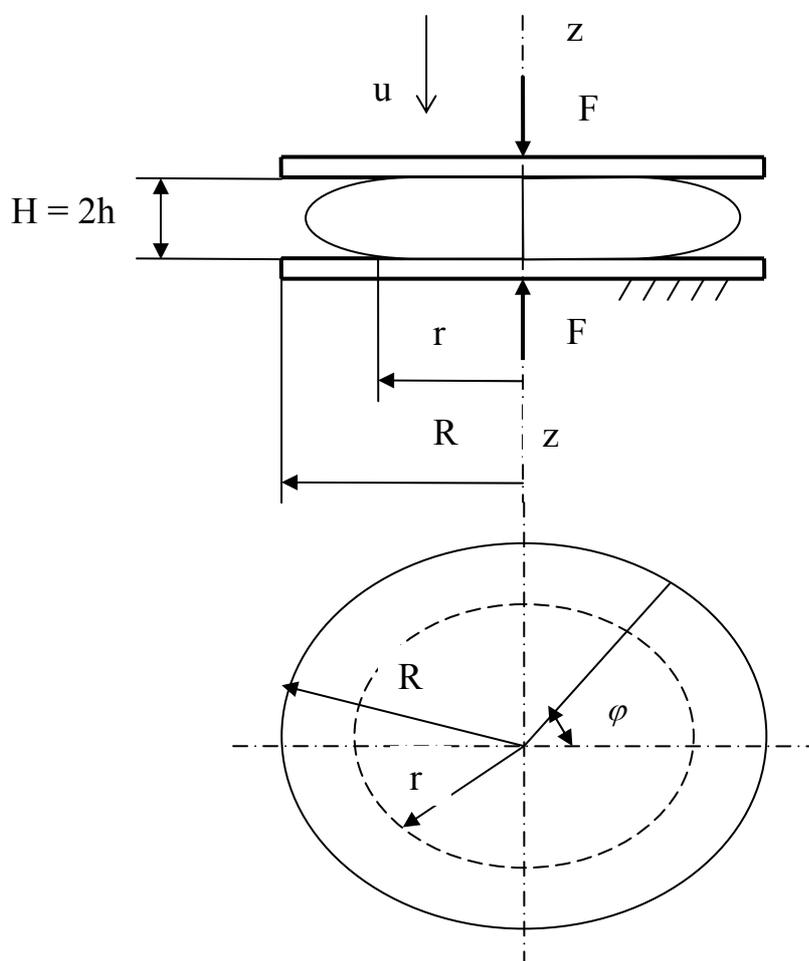


Рисунок 1 Схема сжатия слоя материала между круглыми дисками.

Для решения данной задачи целесообразно выбрать цилиндрическую систему координат с координатами  $r$ ,  $\varphi$ ,  $z$ . Заметим, что процесс течения материала между штампующими пластинами симметричен относительно оси  $z$ . Поэто-

му можно принять окружную скорость  $v_\varphi = 0$ , как и все ее производные по координате  $\varphi$ .

В первом приближении можно считать, что продукт в условиях изотермического режима несжимаем и нестационарное течение происходит в радиальном направлении,

Реологическое уравнение состояния упруго – вязко - пластичного материала, представим в виде:

$$\theta = \frac{(\pm \theta_0)^2}{\theta} + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

где  $\theta_0$  - предельное напряжение сдвига, Па;

$\eta$  - вязкость, Па с;

$\dot{\gamma}$  - скорость сдвига,  $\text{с}^{-1}$ .

Это уравнение было получено при исследовании стационарного течения пряничного теста и некоторых новых видов песочного теста фундаментальными методами ротационной и капиллярной вискозиметрии. Анализ результатов экспериментальных исследований широкого ассортимента объектов дисперсных материалов, показал, что нелинейные графики зависимости касательного напряжения от скорости сдвига  $\lg \Theta = \lg \Theta(\lg \dot{\gamma})$  исследованных образцов имеют точку перегиба, делящую графики на участки, кривизна которых с ростом скорости сдвига изменяется на противоположное направление. Так если у предельного напряжения сдвига стоят знаки  $\pm \theta_0$  или  $\mp \theta_0$ , то это означает, что кривизна выпуклости графика меняется с направления к оси  $\lg \dot{\gamma}$  на направление к оси  $\lg \Theta$  или наоборот - с направления к оси  $\lg \Theta$  на направление к оси  $\lg \dot{\gamma}$  соответственно.

Для радиального течения материала между дисками можно записать:

$$\frac{\partial u_z}{\partial y} \ll \frac{\partial u_r}{\partial z}, \quad (2)$$

где  $u_z$ ,  $u_r$  – компоненты скорости по осям  $z$  и  $r$  соответственно.

Скорость сдвига при сдавливании материала между двумя круглыми дисками выразится зависимостью:

$$\dot{\gamma} = \frac{du_r}{dz}. \quad (3)$$

Величину касательного напряжения  $\theta$  выразим через градиент давления  $\frac{\partial p}{\partial z}$ :

$$\theta = \frac{\partial p}{\partial r} z. \quad (4)$$

Преобразовав (1), (3) и (4), получим дифференциальное уравнение течения упруго – вязко - пластичного между сжимающими дисками круглой формы:

$$du_r = \left( \frac{\partial p}{\partial r} z - \theta_\Delta \right) \eta dz. \quad (5)$$

где  $\theta_{\Delta} = \frac{(\pm \theta_0)^2}{\theta}$

Решением (5) при граничных условиях  $z = h$ ,  $u_r = 0$  будет:

$$u_r = \left[ \frac{\partial p}{\partial r} \cdot \frac{z^2 - h^2}{2} - \theta_{\Delta} (z - h) \right] \eta, \quad (6)$$

где  $H = 2h$  – расстояние между пластинами.

Полагаем, что объект несжимаем. Это условие представим уравнением:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

Уравнение (7) интегрируем от 0 до  $h$  с учетом того, что при  $z = h$   $u_z = -u$ . Тогда скорость сдавливания будет:

$$u = \eta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( -\frac{h^3}{3} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} r + \theta_{\Delta} \frac{rh^2}{2} \right). \quad (8)$$

Из уравнения (8) определим величину давления в материале при сжатии его круглыми дисками:

$$p = \frac{3u(R^2 - r^2)}{4h^3\eta} + \frac{3}{2h} \theta_{\Delta} (R - r), \quad (9)$$

где  $R$  – радиус сжимающих дисков.

Уравнение (9) получено при условии, что при  $r = R$   $p = 0$ .

Усилие сдавливания объекта формования штампованием определяют зависимостью:

$$F = 2\pi \int_0^R p r dr. \quad (10)$$

Проинтегрировав (10) с учетом значения  $p$  из (9), получим:

$$F = \frac{\pi R^3}{2h} \left( \frac{3uR}{4h^2\eta} + \frac{(\pm \theta_0)^2}{\theta} \right). \quad (11)$$

Уравнение (11) позволяет учесть реологические свойства объекта формования штампованием в инженерных расчетах известного совершенствуемого или нового создаваемого технологического оборудования для упруго – вязко – пластичных материалов и научно обосновывать геометрические размеры, усилия, а также кинематику рабочих органов оборудования, непосредственно взаимодействующих с объектами формования.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ ГРАНИЦЫ ДЕЙСТВИЯ СТРУИ ПРИ ГИДРОАБРАЗИВНОМ РЕЗАНИИ

*Ю.С. Степанов, д.т.н., проф.; Г. В. Барсуков, к.т.н., доц.;*

*А.В. Михеев, аспирант*

*Орловский государственный технический университет*

*Орел, Россия, тел.: (4862) 419818, факс: (4862) 416684, E-mail: upk@ostu.ru*

## SIMULATION OF THE ACTIVE BOUNDARY AN OPERATION JET AT ABRASIVE WATERJET CUTTING

*Yu.S. Stepanov, Prof., Dr., G.V. Barsukov, ass. prof., c.t.s.,*

*A.V. Miheev, the post-graduate student*

*Oryol State Technical University*

*Oryol, Russia, tel.: (4862) 419818, fax: (4862) 416684, E-mail [upk@ostu.ru](mailto:upk@ostu.ru)*

*In a paper the dimensions of an active jet edge, defining character of an exposure abrasive waterjet stream on the surface stratum, influencing on the gear and speed of collapse of a material, and, hence, shaping width of handling and a finishing condition of the surface stratum work piece are modelled.*

Скорость подачи сопла относительно материала, давление истечения и количество активных абразивных зерен на границе струи, обусловленных развитостью периферийной зоны, будут определять напряженно-деформационное состояние поверхностного слоя обрабатываемой детали. Меньшая скорость подачи, характеризуется интенсивностью подвода в зону резания энергии, что увеличивает область критических значений напряженного состояния. Таким образом, размеры активной границы струи  $x$  определяют характер внешнего воздействия гидроабразивного потока на поверхностный слой, влияют на механизм и скорость разрушения материала, а, следовательно, формируют ширину реза и финишное состояние поверхностного слоя обрабатываемой детали (рис. 1).

Рассмотрим действие гидроабразивной струи на клин, толщина которого равна единице (рис. 2). На поверхность клина действует распределенная нагрузка  $q(r)$ .

Данная задача может быть сведена к определению функции напряжений  $\Phi(r, \theta)$  при данном способе нагружения клина и полученное решение будет справедливо для  $0 < \beta < 2\pi$ .

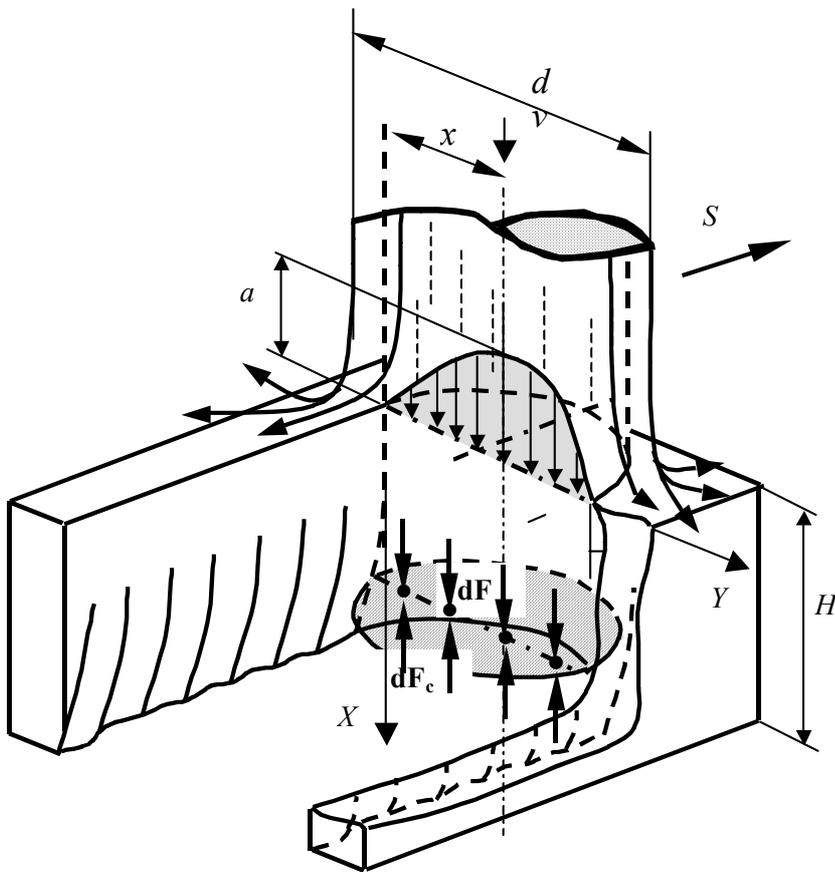


Рис. 1. Схема напряженного состояния материала под действием гидроабразивной струи

При указанном нагружении клина, граничные условия имеют вид:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta\theta}|_{\theta=0} = -q(r)\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \\ \sigma_{\theta\theta}|_{\theta=\alpha} = q(r)\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \\ \sigma_{r\theta}|_{\theta=0} = \sigma_{r\theta}|_{\theta=\alpha} = q(r)\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right). \end{cases} \quad (1)$$

Представим функцию Эри в виде:

$$\Phi(r, \theta) = f(r) \varphi(\theta). \quad (2)$$

Напряжения в полярной системе координат определяются равенствами:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2}, \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2}, \\ \sigma_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right). \end{cases} \quad (3)$$

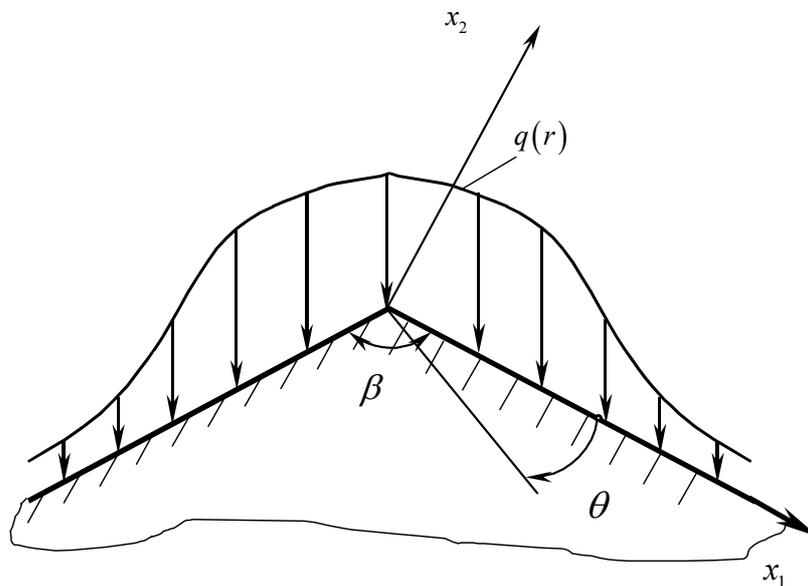


Рис. 2. Расчетная схема к определению напряженного состояния материала под действием гидроабразивной струи

С учетом зависимости (2), запишем (3) в виде:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{\varphi(\theta)}{r} \frac{\partial f(r)}{\partial r} + \frac{f(r)}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi(\theta)}{\partial \theta^2}, \\ \sigma_{\theta\theta} = \varphi(\theta) \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2}, \\ \sigma_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{f(r)}{r} \frac{\partial \varphi(\theta)}{\partial \theta} \right). \end{cases} \quad (4)$$

Подставив граничные условия (3.42) в (4) и опуская знаки, получим:

$$\begin{cases} q(r)\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \varphi(\theta)\frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2}, \\ q(r)\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = -\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{f(r)}{r}\frac{\partial\varphi(\theta)}{\partial\theta}\right). \end{cases} \quad (5)$$

Так как на поверхности клина значения  $\varphi(\theta)$  постоянны, то можно записать что:

$$\varphi(\theta)\Big|_{\theta=0}^{\theta=\alpha} = const. \quad (6)$$

Учитывая (6), второе уравнение в системе (5) не определено, а первое, опуская  $\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ , можно переписать в виде:

$$f(r) = \int\left[\int q(r)dr\right]dr. \quad (7)$$

Тогда с учетом (7) функция напряжений принимает вид:

$$\Phi(r,\theta) = \varphi(\theta)\int\left[\int q(r)dr\right]dr. \quad (8)$$

Представим  $f(r)$  в виде степенного ряда:

$$f(r) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n r^n,$$

тогда:

$$\Phi(r,\theta) = \varphi(\theta)\sum_{n=0}^{\infty} a_n r^n. \quad (9)$$

Используя общее выражение функции Эри:

$$\begin{aligned} \Phi(r,\theta) = & A\theta + A_0 r^2 \ln r + B_0 r^2 + C_0 \ln r + D_0 r^2 \theta + \\ & + (A_1 r^3 + B_1 r \ln r + C_1 r^{-1}) \cos(\theta) + Br\theta \sin(\theta) + \\ & + (A_1' r^3 + B_1' r \ln r + C_1' r^{-1}) \sin(\theta) + B'r\theta \cos(\theta) + \\ & + \sum_{n=2}^{\infty} (C_{1n} r^n + C_{2n} r^{n+2} + C_{3n} r^{-n+2}) \cos(n\theta) + \\ & + \sum_{n=2}^{\infty} (D_{1n} r^n + D_{2n} r^{n+2} + D_{3n} r^{-n+2}) \sin(n\theta). \end{aligned} \quad (10)$$

выбираем слагаемые, удовлетворяющие условию (9):

$$\begin{aligned} \Phi(r,\theta) = & B_0 r^2 + D_0 r^2 \theta + A_1 r^3 \cos(\theta) + A_1' r^3 \sin(\theta) + \\ & + \sum_{n=2}^{\infty} (D_{1n} r^n + D_{2n} r^{n+2}) \sin(n\theta) + \sum_{n=2}^{\infty} (C_{1n} r^n + C_{2n} r^{n+2}) \cos(n\theta). \end{aligned} \quad (11)$$

Легко убедиться, что полученная функция напряжений подчиняется бигармоническому уравнению

$$\nabla^2 \nabla^2 \Phi(r,\theta) = 0. \quad (12)$$

Подставляя (11) в (3), с учетом граничных условий (1), приходим к формулам для напряжений, возникающих в пластине. Также используя зависимости

теории упругости, можно определить деформации и перемещения в любой точке данного тела.

Рассмотрим пример.

На поверхность материала действует распределенная нагрузка по закону (рис. 3):

$$q(r) = q_0 r, \quad (13)$$

ГДЕ  $q_0$  - МАКСИМАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ НАГРУЗКИ,  $q_0 = \frac{F}{2/3\pi d^2}$ .

$F$  - СИЛА ВОЗДЕЙСТВИЯ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУИ НА МАТЕРИАЛ.

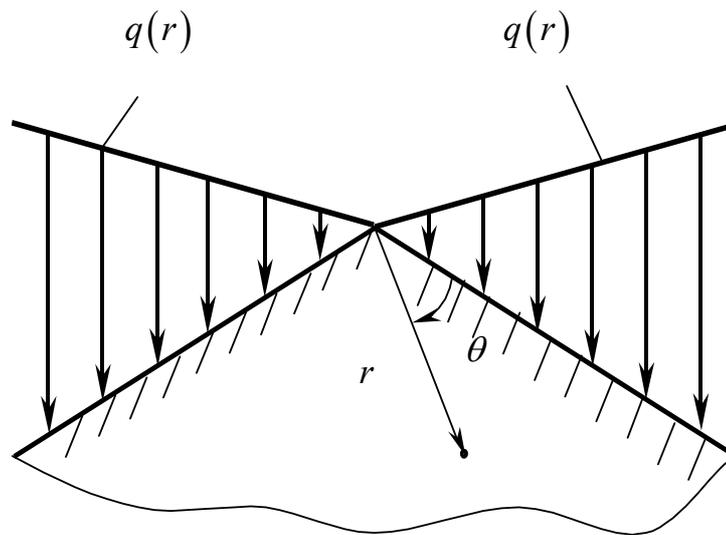


Рис. 3. Расчетная схема к определению напряженного состояния материала под действием гидроабразивной струи

Граничные условия при заданном законе нагружения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta\theta} \Big|_{\theta=0} &= -q_0 r \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \\ \sigma_{\theta\theta} \Big|_{\theta=\alpha} &= q_0 r \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \\ \sigma_{r\theta} \Big|_{\theta=0} &= \sigma_{r\theta} \Big|_{\theta=\alpha} = q_0 r \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right). \end{aligned} \quad (14)$$

Используя (7), получим:

$$f(r) = \frac{1}{3} r^3. \quad (15)$$

Тогда функция напряжений в общем виде принимает вид:

$$\Phi(r, \theta) = a_k r^3 \varphi(\theta). \quad (16)$$

С помощью (6) определим  $\varphi(\theta)$  и запишем функцию Эри для заданной распределённой нагрузки (13):

$$\Phi(r, \theta) = a_1 r^3 \sin(\theta) + a_2 r^3 \cos(\theta) + a_3 r^3 \sin(3\theta) + a_4 r^3 \cos(3\theta). \quad (17)$$

Этой функции соответствуют напряжения:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = 2a_1 r \sin(\theta) + 2a_2 r \cos(\theta) - 6a_3 r \sin(3\theta) - 6a_4 r \cos(3\theta) \\ \sigma_{\theta\theta} = 6a_1 r \sin(\theta) + 6a_2 r \cos(\theta) + 6a_3 r \sin(3\theta) + 6a_4 r \cos(3\theta) \\ \sigma_{r\theta} = -2a_1 r \cos(\theta) + 2a_2 r \sin(\theta) - 6a_3 r \cos(3\theta) - 6a_4 r \sin(3\theta) \end{cases} \quad (18)$$

При выполнении граничных условий определяются неизвестные  $a_1, a_2, a_3, a_4$ . По полученным зависимостям проанализировано напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя (рис. 4).

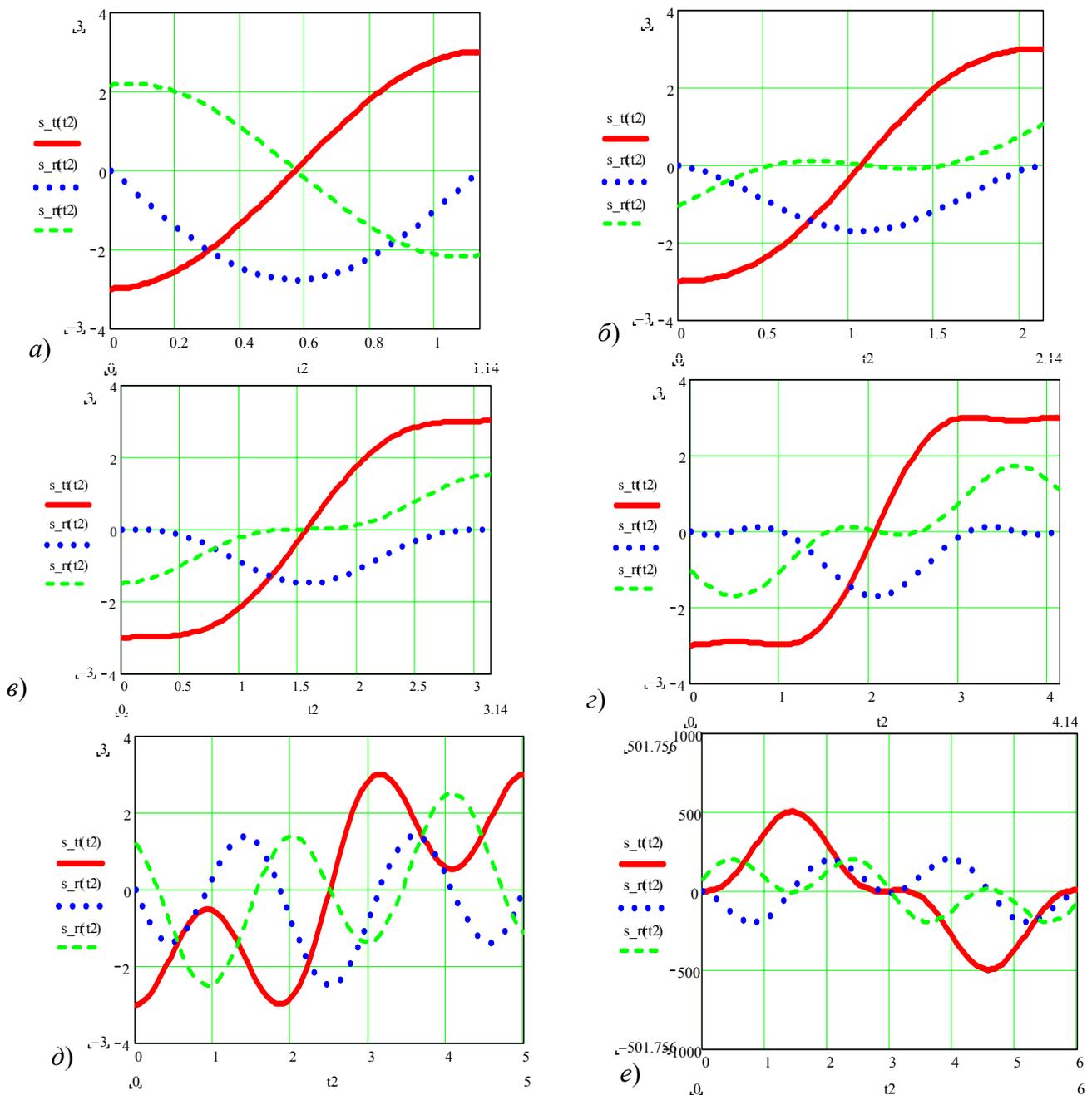


Рис. 4. Зависимости напряженно-деформированного состояния  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  поверхностного слоя от кинематического угла атаки  $\theta$ .

$a - \theta = 1,14 \text{ рад.}; b - \theta = 2,14 \text{ рад.}; в - \theta = 3,14 \text{ рад.}; г - \theta = 4,14 \text{ рад.};$   
 $\delta - \theta = 5 \text{ рад.}; e - \theta = 6 \text{ рад.}$