

621.9

К 26

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.9.025

КАРПОВИЧ ДМИТРИЙ СЕМЁНОВИЧ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ КАЧЕСТВА  
ТВЁРДОСПЛАВНОГО ПАЯНОГО ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

05.21.05 – Дреvesиновeдeниe, тeхнoлoгия и oбoрyдoвaниe  
дeрeвooбpaбoтки

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Минск 2002

Работа выполнена в Белорусском государственном технологическом университете на кафедре автоматизации производственных процессов и электротехники

Научный руководитель	кандидат технических наук, доцент Кузьмицкий И.Ф. (БГТУ, кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники)
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, Алифанов А.В. (ФТИ НАНБ, заведующий отделом объёмных гетерогенных систем);  кандидат технических наук, доцент Клубков А.П. (БГТУ, кафедра деревянообрабатывающих станков и инструментов)
Опонирующая организация	ОАО «Минскпроектмебель»

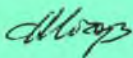
Защита состоится «27» декабря 2002 г. в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.06 в Белорусском государственном технологическом университете по адресу: *220050, г. Минск, ул. Свердлова, БГТУ, 13а.*

Телефон учёного секретаря совета: 227-83-41

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского государственного технологического университета.

Автореферат разослан «26» ноября 2002 г.

Учёный секретарь совета  
по защите диссертаций



С.П. Мохов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Механическая технология обработки древесины и особенно материалов на её основе связана с непрерывным совершенствованием как конструкции дереворежущего инструмента, так и технологии его изготовления, модернизацией и обновлением станочного парка. Особенно значимо это проявляется при механической обработке древесных материалов, что обусловило необходимость применения твёрдосплавного инструмента в деревообработке. Увеличение стойкости инструмента, особенно массового и в технологическом плане достаточно сложного, обеспечивает технологические удобства и значительный экономический эффект. К классу такого инструмента относятся твёрдосплавные круглые пилы, их работоспособность обеспечивается в основном тремя позициями: корпус инструмента – паяный шов – режущие элементы. В процессе изготовления пил технологические параметры пайки формируют будущее качество инструмента непосредственно через механические показатели паяного шва и температурного влияния, как на материал корпуса, так и на материал режущих элементов. Для многолезвийного паяного инструмента большое значение приобретает стабильность качества пайки, а это требует не только разработки оптимальных режимов пайки, но и обеспечения жёсткого их контроля в процессе проведения операции пайки каждого режущего элемента, что требует дополнительной разработки систем активного контроля всех технологических параметров процесса пайки. В связи с этим тема диссертационной работы является актуальной.

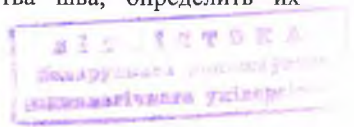
**Связь работы с научными программами, темами.** Исследования выполнялись в рамках программы ГНТП «Станки и инструменты» № СИ6.21-01 и соответствует одному из научных направлений кафедры «Автоматизации производственных процессов и электротехники» Белорусского государственного технологического университета.

**Цель и задачи исследований.** Целью работы является повышение стабильности качества паяных твёрдосплавных пил, их надёжности и износостойкости, оптимизация технологических параметров изготовления.

Задачи исследований

- изучить микроскопическое строение паяного шва и установить влияние параметров режимов пайки на свойства шва, определить их оптимальное значение.

443ар



- определить механические показатели паяного соединения на образцах сталей и твёрдого сплава, применяемых для изготовления дереворежущего инструмента.

- произвести экспериментальную проверку работоспособности твёрдосплавного инструмента в производственных условиях.

- разработать математическую модель и методику моделирования процессов теплообмена и диффузии в процессе пайки.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является твёрдосплавной паяный дереворежущий инструмент, а предметом исследований – процессы, протекающие при его изготовлении.

**Методология и методы проведённого исследования.** Общая методология работы предусматривала сочетание теоретических и экспериментальных исследований, которые базировались на математическом аппарате решения дифференциальных уравнений с частными производными и на статистическом анализе результатов экспериментов.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.** Впервые разработана математическая модель и методика моделирования процессов теплообмена и диффузии в зоне шва применительно к материалам, применяемым для изготовления паяного деревообрабатывающего инструмента. Получены данные, качественно и количественно характеризующие химический состав паяного шва по его сечению и влияние строения шва на механические показатели соединения. Установлены оптимальные параметры режимов пайки дереворежущего инструмента.

**Практическая значимость полученных результатов.** По опытной технологии, с соблюдением рекомендуемых параметров режимов пайки изготовлены экспериментальные образцы твёрдосплавных пил, испытания которых в производственных условиях на раскрое древесины хвойных пород показали, что их износостойкость минимум на 10-15% выше серийного инструмента. Использование предложенных параметров повысит производительность и качество процессов деревообработки. Выполненные исследования обосновывают необходимость автоматизации процесса пайки и в первую очередь для многолезвийного, серийного инструмента, каким являются твёрдосплавные дереворежущие круглые пилы. Предложенные аналитические решения уравнений теплопроводности при пайке позволяют прогнозировать зону термического влияния как на корпус инструмента, так и на материал режущего элемента. Разработана программа для решения на ЭВМ градиента температурного поля с заданным шагом.

Экономическая значимость полученных результатов. Применение экспериментальных пил на АП «Агроташ» показало их более высокую

износостойкость на 10-15% в сравнении с применяемыми круглыми пилами, экономический эффект составил 2681680руб. С учётом массовости применения твёрдосплавных круглых пил суммарный экономический эффект будет составлять значительные суммы. Коммерческую ценность имеет программное обеспечение, позволяющее упростить прогнозирование свойств паяного соединения при разработке технологии пайки дереворежущего инструмента.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

- математическая модель и методика моделирования процессов теплообмена и диффузии в зоне шва;
- результаты исследования влияния режимов нагрева и охлаждения при пайке на свойства инструмента;
- результаты исследования процессов массо- и теплообмена, проходящих в процессе пайки изделий;
- параметры пайки многолезвийного составного дереворежущего инструмента, позволяющие улучшить качество получаемого изделия.

**Личный вклад соискателя.** Диссертация является результатом личной работы соискателя, им разработаны методики проводимых исследований, обобщён опыт, накопленный в области пайки на кафедре материаловедения и технологии металлов технологического университета. Разработана методика решения задач теплопроводности в зоне пайки, составлены программы решения задач теплообмена и диффузионных процессов в зоне пайки на ЭВМ.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на Международных научно-технических конференциях «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов» в 1998 и 2000 годах, «Ресурсосберегающие технологии в лесном хозяйстве, лесной и деревообрабатывающей промышленности» в 1999 году, а также на университетских научно-технических конференциях БГТУ в 1997-2002 годах.

**Опубликованность результатов.** Основные положения диссертации опубликованы в 6 печатных работах, из них три статьи в научных сборниках (8 стр.), 3 тезиса докладов на научных конференциях (8 стр.), а также имеется 1 акт внедрения.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 6 глав, заключения, списка использованных источников и приложений.

Объём диссертации составляет 188 страниц машинописного текста. Диссертация содержит 80 рисунков, 11 таблиц, 89 использованных источников и 23 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** исследована актуальность и общие пути развития проблемы изготовления дереворежущего инструмента и повышения его стойкости. Рассматривается значение и роль твёрдосплавного инструмента на современном этапе развития деревообработки. Анализируются возможные пути увеличения его работоспособности, в том числе и за счёт оптимизации технологических факторов.

**Первая глава. Состояние вопроса и задачи исследований.** Содержит обзор литературных источников, связанных с изучением особенностей конструкции, технологии изготовления и эксплуатации дереворежущего твёрдосплавного инструмента, в первую очередь круглых пил, как одного из самых массовых инструментов. Вопросами изучения пайки, в том числе и пайки дереворежущего инструмента посвящено большое количество работ, в том числе работы И.Е. Петрунина, К.П. Имшенника, В.В. Малышева, Н.Е. Будникова, Н.Ф. Лашко, С.В. Лашко, В.Ф. Фонкина, А.Э. Грубэ, В.С. Рыбалко, Ю.М. Стахиева, И.М. Куриса, А.Ф. Янишевского, Э.М. Балаховского, Н.К. Якунина, В.И. Санева, и других исследователей, в том числе сотрудников технологического университета М.М. Козела, А.В. Моисеева, В.А. Кириченко, А.П. Клубкова, А.А. Клубкова, которые внесли свой вклад в применение твёрдосплавного дереворежущего инструмента на предприятиях Беларуси.

В материалах главы рассмотрены следующие вопросы:

- конструктивные особенности дереворежущего инструмента
- особенности его изготовления и эксплуатации
- материалы для изготовления составного дереворежущего инструмента
- флюсы
- припои
- характер смачивания твёрдого тела жидкостью
- возможные способы пайки инструмента
- основные технологические параметры пайки
- влияние способов и режимов пайки, толщины шва, его пористости на механические показатели паяных соединений.

В изученных литературных источниках отсутствуют материалы, касающиеся влияния термического воздействия на прочностные характеристики сталей, применяемых для каркасов дереворежущего

инструмента, противоречивы сведения о влиянии термообработки на свойства твёрдого сплава, существует проблема полноценной замены серебряных припоев на более доступные и дешёвые. Проблемы изготовления паяного твёрдосплавного инструмента усложняются, при разработке технологии пайки маложёстких, многолезвийных инструментов, таких как круглые пилы.

**Вторая глава. Влияние режимов нагрева и охлаждения при пайке на свойства инструментального материала и материала каркаса.** В данной главе проводится исследование влияния температуры и времени на структуру и свойства материалов, применяемых при изготовлении паяного дереворежущего инструмента. Установка для проведения экспериментов включает в себя самописец ЛКД-2, датчик ФД-3, стабилизатор напряжения, генератор пилообразного напряжения, контактор, трансформатор. Опытная установка проектировалась таким образом, чтобы её технические возможности перекрывали температурные параметры пайки дереворежущего инструмента.

Выбрана классическая методика планирования экспериментов, результаты обрабатывались в соответствии с методами вариационной статистики.

Особенностью нагрева материалов при пайке является то, что он происходит не на воздухе, а в присутствии расплавленных флюса и припоя. Эти условия учитывались при постановке эксперимента.

Результаты эксперимента приведены на рис. 1,2,3.

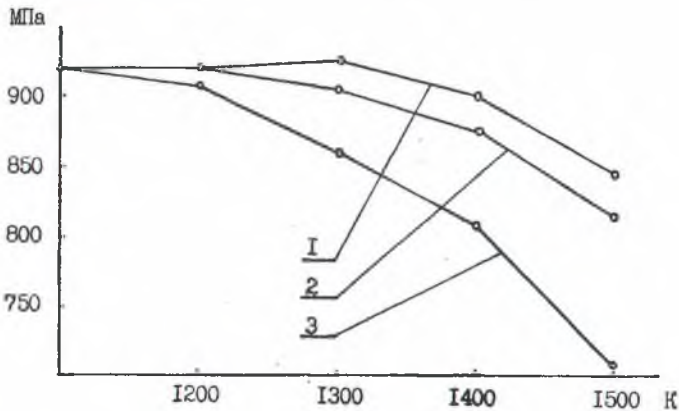


Рис. 1. Влияние тепловой обработки твёрдого сплава (воздух) на его прочность 1 - 100 К/с; 2 - 200 К/с; 3 - 50 К/с.

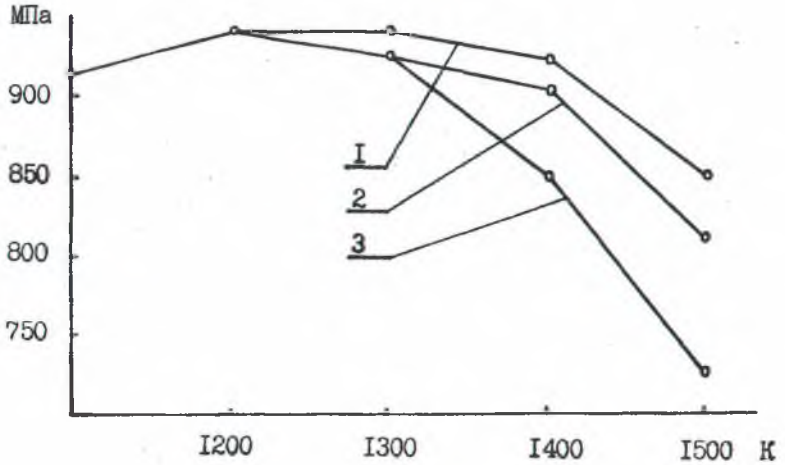


Рис. 2. Влияние тепловой обработки твёрдого сплава (воздух, флюс) на его прочность  
1 - 100 К/с; 2 - 200 К/с; 3 - 50 К/с.

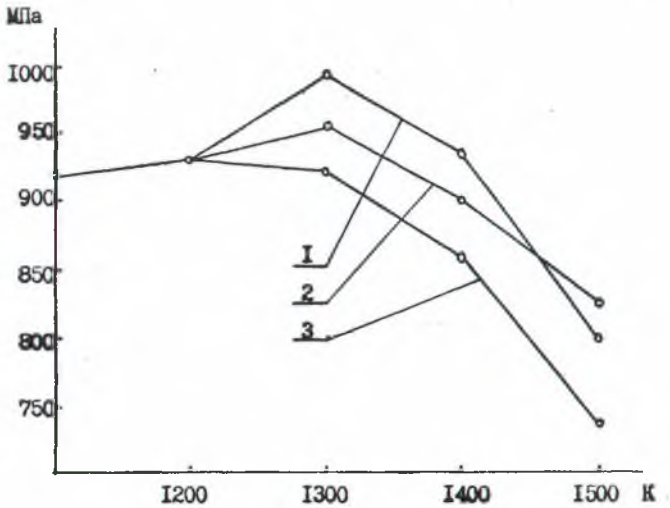


Рис. 3. Влияние тепловой обработки твёрдого сплава (воздух, флюс, припой) на его прочность  
1 - 100 К/с; 2 - 200 К/с; 3 - 50 К/с.



Нагрев до температур, соответствующих температурам плавления медно-цинковых припоев, прочности твёрдого сплава практически не снижает. Напротив, покрытие поверхности твёрдосплавной пластинки расплавом припоя несколько увеличивает его прочность. Очевидно, это объясняется тем, что припой проникает в имеющиеся в поверхностном слое материала поры, заполняет их и снижает степень дефектности этого слоя (эффект "залечивания" микродефектов).

Нагрев до более высоких температур 1400-1500 К вызывает значительное снижение прочности инструментального материала. Наиболее сильное снижение прочности (20-25 %) наблюдается при медленном нагреве, при скорости нагрева 50 К/с время нагрева до 1500 К составляет около 24 с. За это время на поверхности пластинки образуется значительный по величине слой окалины, кислород неизбежно проникает по границам зёрен сплава, увеличивается степень их разобшённости, что не может не сказаться на прочности.

Наиболее приемлемой скоростью нагрева необходимо считать скорость около 150 К/с. Как видно из номограмм, при условии отсутствия перегрева эта скорость нагрева обеспечивает максимальную прочность твёрдого сплава.

Влияние температуры и скорости нагрева на структуру и механические свойства сталей проводилось на примере хромо-ванадиевой стали 9ХФ, применяемой для изготовления полотен круглых пил. Известно, что на механические свойства инструментальных сталей чрезвычайно большое влияние оказывает температурный фактор. Например, сталь 9ХФ при оптимальной температуре закалки 1100 К имеет предел прочности 2250 МПа, при закалке от температуры 1200 К предел прочности этой стали на разрыв снижается до 1200 МПа.

Результаты испытаний образцов из стали 9ХФ приведены на рис. 4.

Из проведённых исследований следует, что нагрев стали каркаса отрицательно влияет на её механические свойства (рис. 4). Однако при нагреве до температур 1200 К это влияние невелико. Плавающие на поверхности металла флюс и припой несколько блокируют вредное влияние нагрева. Как и в случае с твёрдым сплавом это мы объясняем эффектом "залечивания" дефектов поверхности. Причиной снижения прочности стали каркаса следует считать увеличение размеров её зерна. Об этом же свидетельствуют и фрактограммы излома образцов, из которых следует, что на не перегретых образцах структура стали более мелкозернистая, чем на образцах подвергнутых перегреву. Безусловно, необходим отпуск зубьев пил после напайки твёрдого сплава, об этом

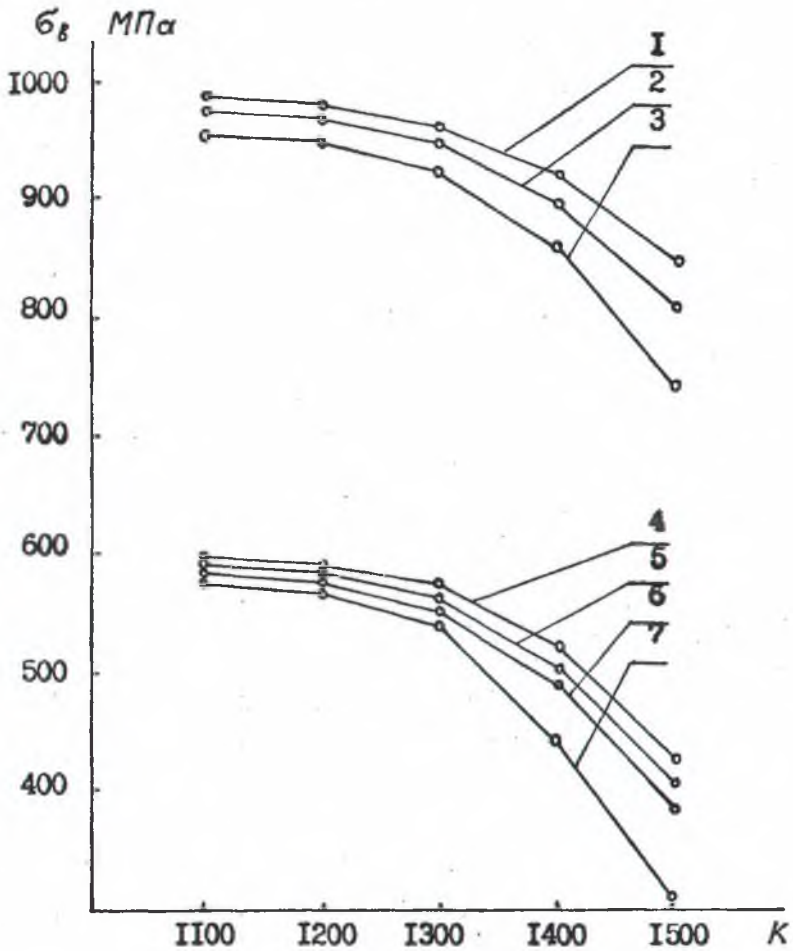


Рис. 4. Зависимость прочности стали 9ХФ от температуры нагрева и отпуска

- |                                |              |               |
|--------------------------------|--------------|---------------|
| 1 - нагрев с флюсом и припоем, | $V=100$ К/с, | отпуск 570 К; |
| 2 - нагрев с флюсом,           | $V=100$ К/с, | отпуск 570 К; |
| 3 - нагрев на воздухе,         | $V=100$ К/с, | отпуск 570 К; |
| 4 - нагрев с флюсом и припоем, | $V=100$ К/с, | без отпуска;  |
| 5 - нагрев с флюсом,           | $V=100$ К/с, | без отпуска;  |
| 6 - нагрев на воздухе,         | $V=100$ К/с, | без отпуска;  |
| 7 - нагрев на воздухе,         | $V= 50$ К/с, | без отпуска.  |

свидетельствует весьма значительное повышение механических свойств стали, которое описывается кривыми 1, 2 и 3 на рис. 4. Безусловно, отрицательно влияет на прочность стали длительная выдержка при высоких температурах.

**Третья глава. Микроскопические и электронно-микроскопические исследования паяных соединений и их прочность.** В главе приводятся методики и результаты исследований паяных соединений. Диффузионные процессы, протекающие в твёрдых телах, имеют очень сложную природу, в процессе пайки это ещё более усложняется присутствием в зоне нагрева припоя и флюса.

Пайка проводилась на образцах, изготовленных из стали 10. Были проведены исследования по определению влияния флюсов и припоя на свойства паяного шва при пайке твёрдого сплава на сталь 10 и инструментальную сталь 9ХФ. Во всех проведенных исследованиях скорость нагрева при пайке составляла около 100 К/с, температура пайки 1230 К.

В качестве припоя применялась латунь Л63, и флюсы следующего состава:

1. Бура - 100 % (прокалённая).
2. Бура - 35 %, борная кислота - 50 %, фтористый натрий — 15%
3. Бура - 65 %, борный ангидрид - 15 %, фтористый натрий — 10 %, фтористый литий - 10 % (флюс, разработанный в БТИ им. С. М. Кирова).

Процесс пайки образцов осуществлялся в специальном приспособлении, состоящем из асбоцементной опорной плиты 1, с направляющим пазом и прижимом, позволяющим создать заданное усилие прижима ( $P = 100 \text{ Н}$ ) в зоне пайки при плавлении и кристаллизации припоя. В направляющий паз устанавливается одна половинка образца, подготовленной к пайке поверхностью вверх. В зону пайки помещается припой и флюс, затем укладывается вторая половинка образца так, чтобы длина нахлёстки была равна толщине образца. После этого, подготовленный к пайке образец фиксировался прижимом и приспособление устанавливалось в индуктор ТВЧ.

Находящийся в направляющем пазу образец должен располагаться симметрично петли 7 индуктора ТВЧ, что обуславливает равномерный нагрев образца с обеих сторон. После осуществления процессов пайки и кристаллизации припоя образцы охлаждались на спокойном воздухе.

Паяные по вышеприведенной методике образцы испытывались на срез на разрывной машине Р10. Скорость нагружения составляла 2 мм/мин. Поскольку методика изготовления образцов предопределяет приложение срезающего усилия по оси паяного шва - последний работает на чистый срез.

Среднее значение срезающего усилия при испытании образцов

Флюс	Припой	Температура пайки, К	Тип паяного соединения	$R_{ср}$ , МПа
1	Л63	1230	сталь 10- сталь 10	260
2				270
3				320
1	Л63	1230	сталь 10 - ВК15	160
2				260
3				460
1	Л63	1230	9ХФ - ВК15	220
2				300
3				480
1	Л63	1230	9ХФ - ВК8	220
2				280
3				470
3	ПСр40	950	9ХФ - Р6М5	150
	Л63	1230		350
	медно-никелевый	1500		370
	ферромарганцевый	1500		380
	медно-никелевый	1570		200

Из таблицы следует, что различия в прочности паяного соединения образцов из стали 10, при условии применения различных по активности флюсов, относительно невелики и объясняются, по всей вероятности, практически бездиффузионной пайкой, т.к. диффузии железа в припой и компонентов припоя в основной металл не наблюдается, а также отсутствием труднорастворимых окислов легирующих элементов. Это даёт возможность применения для пайки углеродистых сталей дешёвых, малоактивных флюсов. Повышение активности флюсов за счёт введения в их состав борной кислоты и фторидов щелочных металлов способствует увеличению прочности паяного шва на 20-23 %. По всей вероятности, это объясняется более полным удалением оксидной плёнки и лучшим смачиванием поверхности паяемых сталей.

Недопустимость пайки твёрдого сплава малоактивными флюсами совершенно очевидна. Введение борной кислоты или борного ангидрида и фтористого натрия приводит к увеличению прочности соединения в 1,6 раза.

Добавка в состав флюса фтористого лития (по сравнению с флюсом №2) увеличивает прочность примерно в 1,8 раза.

Были проведены электронно-микроскопические исследования паяного шва, проведённые на микроанализаторе ХМА-5В для разных паяемых материалов, припоев и флюсов. Результаты исследований для пайки стали 9ХФ и твёрдого сплава ВК8 припоем Л63 и флюсом №3 приведены на рис. 5.

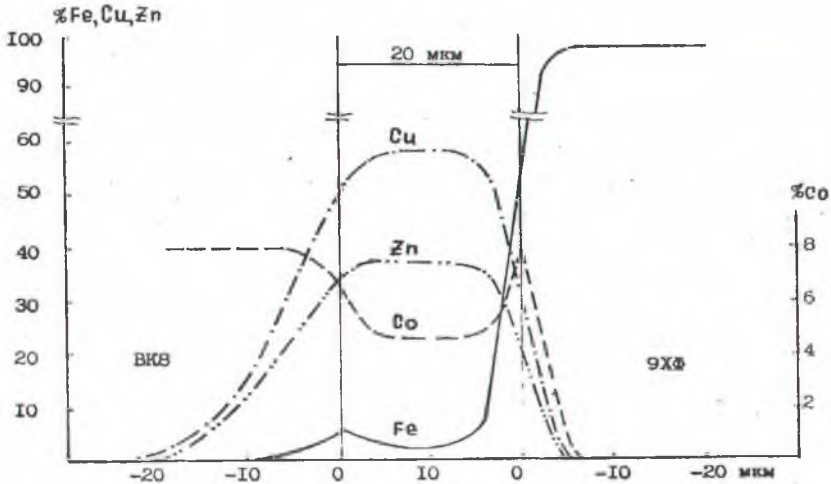


Рис. 5. Распределение элементов в паяном соединении.  
Температура пайки - 1230 К; припой Л63; флюс №3

На рис.5 видно, что железо диффундирует в припой на небольшую глубину 10-12 мкм, что обеспечивает образование переходной диффузионной зоны между припоем и сталью 9ХФ. Весьма интересно взаимодействие с припоем кобальта. Из рис. 5 можно заключить вывод, что в этом случае имеет место интенсивный массоперенос кобальта через жидкую прослойку припоя и на противоположной стороне, на границе со сталью, образуется пик его содержания. Поверхность твёрдого сплава, контактирующая с припоем, обедняется кобальтом, но обогащается медью, которая диффундирует между зёрнами карбида вольфрама, также образуя диффузионную зону. Причём такая замена кобальта на медь особенно четко заметна при пайке наиболее активным флюсом №3.

По результатам электронно-микроскопических исследований можно сделать следующие выводы: при пайке углеродистых сталей состав флюса не имеет существенного значения, поскольку в этих сталях отсутствуют элементы, образующие трудно удаляемые оксиды; пайка легированных

сталей, а также пайка легированных сталей с твёрдым сплавом, должна производиться с применением активных флюсов; активные флюсы способствуют уменьшению толщины паяного шва, что в свою очередь повышают механические показатели паяного шва; в процессе пайки медно-цинковыми припоями кобальт из твёрдого сплава мигрирует через слой расплавленного припоя и на границе припой - сталь возникает пик его содержания, в пограничном слое твёрдого сплава кобальт частично замещается медью, что способствует образованию переходной зоны, увеличивающей прочность соединения; перегрев при пайке приводит к интенсивному растворению в припое компонентов стали, к образованию крупных блоков карбидов, газовых пор, что резко снижает прочность соединения.

Четвёртая глава. Выбор и обоснование методов пайки дереворежущего инструмента. В этой главе проведено обоснование выбора метода пайки пил. Из рассмотренных вариантов выбран электроконтактный способ, обеспечивающий высокую степень автоматизации процесса пайки и контроль за параметрами. Экспериментальная установка для выбора оптимальных режимов пайки была создана на основе твёрдомера ТШ-2. Установка позволила изменять в широких пределах давление в зоне пайки от 0 до 30 кН. Напряжение на контактах электродов изменялось от 0,5 до 5 В. Токковые параметры пайки фиксировались с помощью самопишущих вольтметра и амперметра. Результаты измерений приведены на рис. 6.

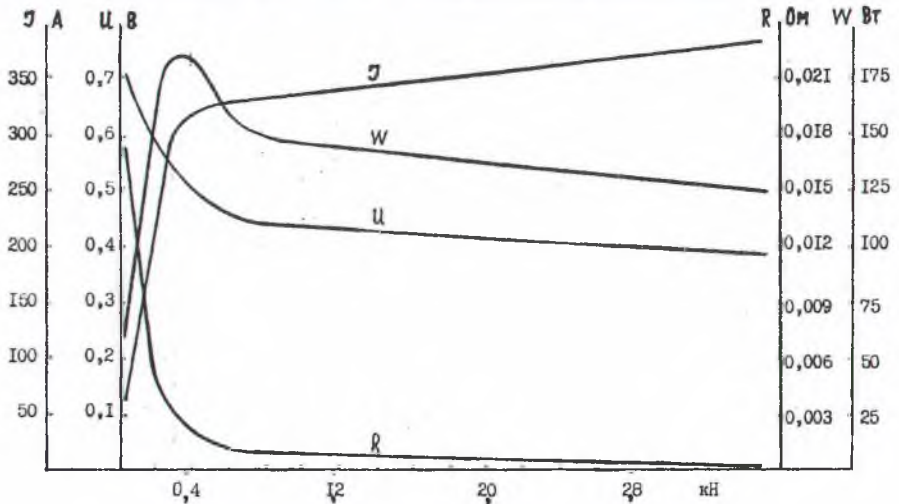


Рис. 6. Номограммы зависимостей электрических параметров пайки от усилия прижима

При величине давления, приближающемся к нулю, сопротивление в цепи пайки имеет максимальное значение. При давлении в пределах 0-200 Н наблюдается наиболее значительное падение сопротивления. При давлении 200-500 Н сопротивление изменяется менее резко и при давлении более 600 Н наблюдается очень медленное падение сопротивления, асимптотически приближающееся к минимальному значению, которое должно быть равно сопротивлению участвующих в процессе проводников. Естественно, что разность потенциалов на электродах в цепи пайки зависит от сопротивления. Падение сопротивления приводит к снижению доли напряжения на электродах, по отношению к действующему на обмотках трансформатора. До давления равного 600 Н напряжение существенно снижается. На участке 600-3600 Н напряжение медленно приближается к минимуму. Характер изменения силы тока в цепи пайки подчиняется той же закономерности, но при увеличении давления до 300 Н ток быстро растёт. От давления 600 Н имеет место медленное повышение величины тока до максимума. Как видно из номограммы, максимальная мощность выделяется в зоне нагрева при давлении около 400 Н (напряжение в цепи составляет 0,65 В, сила тока равна 350 А).

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы: показатели паяного соединения могут быть значительно улучшены путем применения активных флюсов; величина давления в зоне пайки оказывает значительное влияние на выделяющуюся там электрическую мощность (а, соответственно, и на количество выделяющегося тепла). Максимальная мощность выделяется при давлении около 20 Н/мм<sup>2</sup>.

**Пятая глава. Моделирование процессов массо- и теплопереноса при пайке.** В данной главе рассматриваются моделирование процессов, связанных с теплообменом и диффузией, протекающих при пайке.

Рассмотрим решение уравнения теплообмена:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $t$  – температура,  $\tau$  – время,  $x$  – длина шва,  $a$  – коэффициент температуропроводности.

Это уравнение описывает изменение температуры с течением времени только по одной координате –  $x$ .

В результате проведения аналитических преобразований решение такого уравнения может быть записано в виде:

$$\vartheta = \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{\vartheta_0 2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cos \left( \mu_n \frac{x}{\delta} \right) e^{-\mu_n^2 \frac{a \tau}{\delta^2}}, \quad (2)$$

где  $\vartheta$  - превышение температуры над температурой окружающей среды,  $\vartheta_0$  - начальное превышение температуры над температурой окружающей среды,  $\mu_n$  - корни характеристического уравнения,  $\delta$  - длина шва.

Однако такое аналитическое решение чрезвычайно сложно с точки зрения вычислений. Численное решение по сравнению с аналитическим гораздо проще, и вследствие этого в качестве метода решения дифференциальных уравнений в частных производных выбираем численный метод.

Формула для решения таким методом уравнения теплопроводности будет иметь вид:

$$T_{m,k+1} = \frac{a\delta_\tau}{\delta_x^2} (T_{m+1,k} + T_{m-1,k}) - \left( \frac{2a\delta_\tau}{\delta_x^2} - 1 \right) T_{m,k}, \quad (3)$$

где  $T_{m,k+1}, T_{m,k}, T_{m+1,k}, T_{m-1,k}$  - значение температуры в точках  $(m, k+1), (m, k), (m+1, k), (m-1, k)$ ,  $\delta_x$  и  $\delta_\tau$  - шаг изменения по оси длины и оси времени соответственно.

При моделировании теплового поля в стали и в твёрдом сплаве воспользоваться формулой (3) не всегда возможно, и поэтому была предложена следующая формула для расчётов:

$$T_{m,k+1} = \frac{a\delta_\tau}{\delta_x^2} (T_{m,k} + T_{m-2,k}) - \left( \frac{2a\delta_\tau}{\delta_x^2} - 1 \right) T_{m-1,k}, \quad (4)$$

Уравнение диффузии имеет вид, подобный (1):

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (5)$$

где  $c$  - концентрация вещества,  $D$  - коэффициент диффузии.

Для моделирования процессов диффузии делаются аналогичные выводы и выводятся следующие формулы:

$$c_{m,k+1} = \frac{D\delta_\tau}{\delta_x^2} (c_{m+1,k} + c_{m-1,k}) - \left( \frac{2D\delta_\tau}{\delta_x^2} - 1 \right) c_{m,k}, \quad (6)$$

$$c_{m,k+1} = \frac{D\delta_\tau}{\delta_x^2} (c_{m,k} + c_{m-2,k}) - \left( \frac{2D\delta_\tau}{\delta_x^2} - 1 \right) c_{m-1,k}, \quad (7)$$

где  $c_{m,k+1}, c_{m,k}, c_{m+1,k}, c_{m-1,k}$  - концентрация вещества в точках  $(m, k+1), (m, k), (m+1, k), (m-1, k)$ .

Результаты моделирования уравнения (3) приведены на рис. 7.



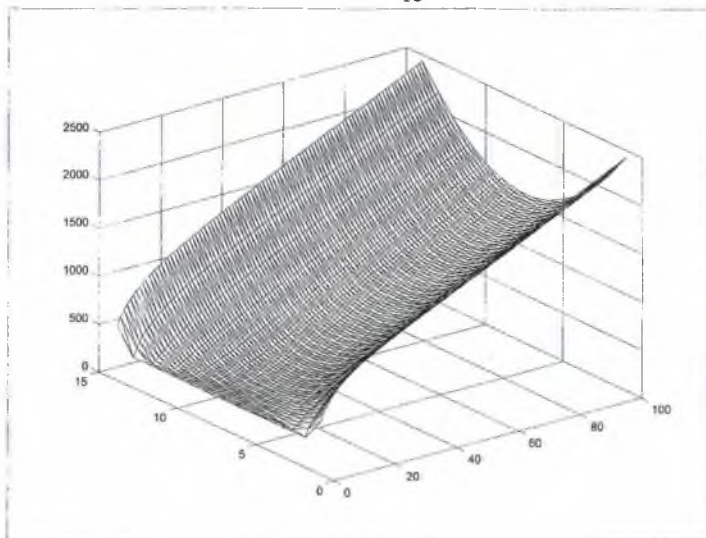


Рис. 7. Распределение температуры по длине паяного шва с течением времени

На основании этих решений можно сделать вывод о том, что выбранные нами в предыдущих главах параметры пайки обеспечивают оптимальный температурный режим и наилучшее проникновение химических элементов в зоне паяного шва с точки зрения качества изготовления инструмента.

**Глава 6. Расчёт экономического эффекта от применения рекомендованной технологии изготовления дереворежущего инструмента на АП «АГРОМАШ».** В главе 6 приводятся результаты сравнительных испытаний работоспособности опытных пил в производственных условиях на круглопильном станке ЦМР-3 при обработке натуральной древесины хвойных пород, со скоростью резания  $V_{рез} = 73 \text{ м/с}$ , и подачи на зуб  $U_2 = 0,16 \text{ мм}$ . В результате производственных испытаний установлено:

- режимы пайки обеспечивают качественную напайку зубьев пил как из металлокерамического твёрдого сплава, так и литого;

- износостойкость дисковых пил, оснащённых твёрдосплавными пластинками на 10-15% выше серийных пил при раскрое натуральной древесины за счёт отсутствия перегрева пластинки ТС и стабилизации процесса пайки.

Экономический эффект от внедрения составил 2681680 рублей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате экспериментальных исследований установлено влияние температуры, скорости нагрева и окружающей среды на свойства инструментального материала и стального каркаса. Установлено, что температура нагрева твёрдого сплава до 1350 К оказывает незначительное влияние на его прочность; температура и скорость нагрева стали ведёт к постепенному уменьшению прочности при нагреве до 1250 К. Более высокий нагрев стали существенно снижает прочность стали 9ХФ [2,3].

2. Нагрев твёрдого сплава и стали при нанесении на их поверхность флюса и припоя в меньшей степени снижает их механические показатели [2,3].

3. В результате проведения микроскопических и электронно-микроскопических исследований паяных соединений получены данные распределения химических элементов в зоне пайки, позволяющие изучить характер распределения отдельных элементов по сечению паяного шва и установить взаимосвязь между строением шва и его механическими показателями при пайке различными припоями и флюсами [5].

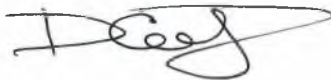
4. При оптимизации режимов пайки твёрдосплавных круглых пил медно-цинковыми припоями, например латунью Л63 с применением активных флюсов установлена оптимальная величина давления в зоне пайки, которая составляет 20 Н/мм<sup>2</sup>. В результате комплексных мер стойкость экспериментальных пил при лабораторных и заводских испытаниях увеличилась на 10 – 15% [6].

5. Разработанная математическая модель позволяет имитировать процессы, протекающие при пайке. Адекватность модели подтверждена экспериментальными исследованиями. Совместное решение уравнений теплопроводности и диффузии обеспечивают теоретическую базу для построения алгоритмов кинетики диффузионных процессов, протекающих в зоне пайки [4,5].

6. Созданное программное обеспечение даёт возможность моделирования процессов теплообмена и диффузии и обеспечивает расчёт оптимальных параметров режимов пайки. При переходе деревообрабатывающей промышленности к системам автоматического управления технологическими процессами, полученные программы могут быть использованы для управления качеством инструмента [1].

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ

1. Карпович Д.С. Расчёт робастного регулятора для электромеханических систем // Труды БГТУ. Серия 4. Физико-математические науки и информатика. – Минск, 1997, Вып. 5. - 78-81 с.
2. Антонишин Ю.Т., Карпович Д.С. Исследование влияния условий пайки на механические свойства паяных швов // Сварка и родственные технологии: Республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2000. – 167 -170 с.
3. Кириченко В.Л., Карпович Д.С. Влияние условий нагрева при пайке на свойства твёрдого сплава и стальной основы инструмента // Сварка и родственные технологии: Республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск, 2000. – 180 -183 с.
4. Карпович Д.С. Автоматизация процессов пайки инструмента деревообрабатывающего оборудования // Международная научно-техническая конференция «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов». – Минск, 1998. – 83 с.
5. Карпович Д.С. Исследование массо- и теплопереноса в процессе пайки режущего инструмента // Международная научно-техническая конференция «Ресурсосберегающие технологии в лесном хозяйстве, лесной и деревообрабатывающей промышленности». - Минск, 1999. - 320-322 с.
6. Карпович Д.С. Системы управления процессом пайки круглых пил // Международная научно-техническая конференция «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов». - Минск, 2000. - 92-95 с.



КАРПОВІЧ ДЗМІТРЫЙ СЯМЁНАВІЧ

ТЭХНАЛАГІЧНАЕ ЗАБЕСПЯЧЭННЕ СТАБІЛЬНАСЦІ ЯКАСЦІ  
ПАЯНАГА ЦВЕРДАСПЛАЎНАГА ДРЭВАРЭЖУЧАГА ІНСТРУМЕНТА

Ключавыя словы: пайка, рэжымы пайкі, дрэварэжучы інструмент, цвёрды сплаў, прыпоі, флюсы, якасць інструмента, дыфузійныя працэсы, трываласць, працаздольнасць, дыскавыя пілы.

Аб'ект даследавання: цвердасплаўныя пілы для раскрою драўніны. Аптымізацыя рэжымаў пайкі цвердасплаўнага дрэварэжучага інструмента, вывучэнне дыфузійных працэсаў у зоне пайкі з мэтай забеспячэння высокай працаздольнасці піл, стабільнасць якасці цвердасплаўнага інструмента.

Метад даследавання і апаратура. Мікраскапічныя і электронна-мікраскапічныя даследаванні зоны пайкі дрэварэжучага інструмента, мадэляванне працэсаў маса- і цеплапераносу пры пайцы, усталяваны ўплыў размеркавання элементаў у паяным злучэнні на якасць шва. Даследаванні праводзіліся на мікрааналізатары ХМА-5В, атрыманыя даныя апрацоўваліся на ЭВМ. Эксперыментальныя даследаванні праводзіліся на ўстаноўцы, якая была выраблена на базе цвердамера ТШ-2, мікрацвердамера ПМТ-3, спецыяльных прыстасаванняў, вымяральных прыбораў і стэндаў.

Атрыманыя вынікі і навізна. Устаноўлены ўплыў тэмпературы пайкі, часу, намаганняў прыціску, флюсу, на характар дыфузійных працэсаў у зоне пайкі, на якасць цвёрдага сплаву і металу каркаса інструмента, прааналізавана аналітычнае рашэнне дыферэнцыяльнага ўраўнення цеплаправоднасці, распрацавана асабістая метадыка рашэння задачы цеплаправоднасці, складзены праграмы рашэння ўраўненняў на ЭВМ у прыватных вытворных для цеплаабмену і дыфузіі прымяняльна да тэхналогіі вырабу цвердасплаўнага дрэварэжучага інструмента.

Рэкамендацыі па выкарыстанню і галіна прымянення. Вынікі працы могуць быць выкарыстаны пры стварэнні цвердасплаўнага дрэварэжучага інструмента. Прапанаваныя матэматычныя мадэлі дыфузійных працэсаў у зоне пайкі дазваляюць прагназаваць якасць шва і працаздольнасць цвердасплаўнага інструмента.

КАРПОВИЧ ДМИТРИЙ СЕМЁНОВИЧ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ  
КАЧЕСТВА ПАЯНОГО ТВЁРДОСПЛАВНОГО ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО  
ИНСТРУМЕНТА

Ключевые слова: пайка, режимы пайки, дереворежущий инструмент, твёрдый сплав, припой, флюсы, качество инструмента, диффузионные процессы, прочность, работоспособность, дисковые пилы.

Объект исследования: твёрдосплавные пилы для раскроя древесины. Оптимизация режимов пайки твёрдосплавного дереворежущего инструмента, изучение диффузионных процессов в зоне пайки с целью обеспечения высокой работоспособности пил, стабильности качества твёрдосплавного инструмента.

Метод исследований и аппаратура. Микроскопические и электронно-микроскопические исследования зоны пайки дереворежущего инструмента, моделирование процессов массо- и теплопереноса при пайке, установление влияния распределения элементов в паяном соединении на свойства шва. Исследования проводились на микроанализаторе ХМА-5В, полученные данные обрабатывались на ЭВМ. Экспериментальные исследования проводились на установке, изготовленной на базе твёрдомера ТШ-2, микротвёрдомера ПМТ-3, специальных приспособлений, измерительных приборов и стендов.

Полученные результаты и новизна. Установлено влияние температуры пайки, времени, усилия прижима, флюса на характер диффузионных процессов в зоне пайки, на свойства твёрдого сплава и металла каркаса инструмента, проанализировано аналитическое решение дифференциального уравнения теплопроводности, разработана собственная методика решения задачи теплопроводности, составлены программы на ЭВМ решения уравнений в частных производных для теплообмена и диффузии применительно к технологии изготовления твёрдосплавного дереворежущего инструмента.

Рекомендации по использованию и область применения. Результаты работы могут быть использованы при изготовлении твёрдосплавного дереворежущего инструмента. Предложенные математические модели диффузионных процессов в зоне пайки позволяют прогнозировать свойства шва и работоспособность твёрдосплавного инструмента.

KARPOVICH DZMITRY SEMENOVICH

TECHNOLOGICAL SECURITY OF THE STABILITY AND QUALITY  
SOLDERING TUNGSTEN CARBIDE TIPPED WOODCUTTED TOOLS

The key words: the soldering, conditions of the soldering, woodcutter the instrument, hard-facing alloy, welding alloys, fluxes, quality of the instrument, diffusion processes, strength, serviceability, peripheral saws.

Plant of examination: hard-alloy saws for uncovering wood. Optimization of conditions of the soldering hard-alloy woodcutter of the instrument, study of diffusion processes in a band of the soldering with the purpose of security of high serviceability of saws, stability of quality of the hard-alloy instrument.

Method of examinations both instrumentation. Microscopic and electronic - microscopic examinations of a band of the soldering woodcutter tools, model operation of processes mass- and heat- transposition at the soldering, ascertaining of influence of allocation of devices in a soldered connection on properties of a seam. The examinations were spent on the micro analyzer XMA-5B, the obtained dates were treated on the computer. The experimental examinations were spent on installation manufactured on the basis of a hardness gauge TИИ-2, micro hardness gauge ПИМТ-3, express accommodating, measuring apparatuses and stands.

The obtained outcomes and novelty. The temperature effect of the soldering, time, gain pressure, flux on character of diffusion processes in a band of the soldering, on properties of a hard-facing alloy and metal of a frame of the instrument is established, the analytical solution of a differential heat conduction equation is analyzed, the natural procedure of a solution of a problem of a thermal conduction designed, the programs on the computer of a solution of partial equations for heat exchange and diffusion with reference to a process engineering of manufacture hard-alloy woodcutter of the instrument composed.

The recommendations for use and range of application. The outcomes of job can be utilized at manufacture hard-alloy woodcutter of the instrument. The offered mathematical models of diffusion processes in a band of the soldering allow to predict properties of a seam and serviceability of the hard-alloy instrument.

КАРПОВИЧ ДМИТРИЙ СЕМЁНОВИЧ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ КАЧЕСТВА  
ТВЁРДОСПЛАВНОГО ПАЯНОГО ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Подписано в печать 26.11.2002. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Усл. кр.-отт. 1,4. Уч.-изд.л. 1,2.

Тираж 100 экз. Заказ № 549.

Учреждение образования

«Белорусский государственный технологический университет».

Лицензия ЛВ №276 от 15.04.98. 220050, Минск, Свердлова, 13а.

Отпечатано на ротапринте Белорусского государственного  
технологического университета.  
220050, Минск, Свердлова, 13.