

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.778.6+621.9.048.6

Степовой  
Алексей Олегович

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ИНСТРУМЕНТОВ С ПРОВОЛОКОЙ ПРИ  
ГОРЯЧЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПЛЮЩЕНИИ В  
ВАКУУМЕ

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-36 80 08 Инженерная геометрия и компьютерная графика

---

Научный руководитель  
*Вышинский Николай Владимирович*  
Доктор технических наук,  
профессор

---

Минск 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Тугоплавкие металлы и сплавы находят в настоящее время широкое применение в электронной технике и приборостроении для изготовления ответственных конструкционных и токоведущих деталей мощных генераторных приборов, ламп бегущей и отраженной волны, упругих элементов измерительных приборов и других изделий, для которых необходимо обеспечение прочности и формоустойчивости при высоких температурах, заданных упругих характеристик, эмиссионных свойств.

Однако наряду с комплектом незаменимых во многих случаях эксплуатационных свойств эти материалы отличаются низкой технологичностью в процессах обработки различными способами. Они имеют высокие прочностные характеристики, высокую твердость, склонность к образованию трещин и расслоений при деформировании в холодном состоянии и интенсивному окислению при нагреве на воздухе.

Трудности в обработке связаны также с тем, что механические свойства тугоплавких металлов и сплавов в значительной степени зависят от структуры, чистоты по примесям внедрения, режимов термообработки. Поэтому при совершенствовании технологии обработки этих материалов большое внимание уделяется изучению возможностей повышения технологичности, низкотемпературной пластичности при одновременном улучшении эксплуатационных параметров и в особенности таких, как формоустойчивость при высоких температурах, усталостная прочность. Это достигается прежде всего подготовкой исходного полуфабриката, т.е. металлургией металлов, совершенствованием способов плавки и очистки и глубоким исследованием структуры, ее взаимосвязи с технологическими и эксплуатационными свойствами.

Для изготовления различных изделий электронной техники и приборостроения из тугоплавких металлов и сплавов в настоящее время наиболее широко применяются методы обработки давлением (волочение, прокатка, плющение, штамповка) и электрофизические методы обработки (ультразвуковое резание, электроэрозионная обработка, лазерная обработка, плазменное напыление). Из названных выше методов наиболее значительные трудности для практического применения представляют методы обработки давлением. Это связано со спецификой упомянутых выше свойств тугоплавких металлов и сплавов. Наибольшей сложностью отличается процесс изготовления лент методом плющения круглых проволок, при котором в деформируемом металле формируется неравномерное напряженно-деформируемое состояние и

на кромках лент практически всегда возникают растягивающие напряжения. Кроме того, отечественная промышленность выпускает в основном проволоку невысокой степени чистоты по примесям внедрения, что в комплексе обуславливает низкий процент выхода продукции в процессах плющения.

Проведенные в странах СНГ и дальнем зарубежье исследования показали перспективность применения ультразвука для интенсификации процессов обработки металлов давлением. Большой вклад в развитие этого направления науки и техники внесли белорусские ученые: академики В. П. Северденко, А. В. Степаненко, В. В. Клубович, Е. Г. Коновалов и др.

Исследования влияния ультразвука на процессы пластического деформирования металлов выявили особые преимущества данного метода, обусловленные улучшением обрабатываемости давлением, повышением производительности оборудования, снижением затрат энергии, возможностью обработки высокопрочных материалов, повышением качества получаемых изделий и т.п. Однако, как показали исследования последних лет, наиболее эффективным является применение ультразвука для пластического деформирования металлов в малых сечениях, когда не происходят изменение резонансных характеристик колебательных систем и интенсивное затухание амплитуды ультразвуковых колебаний. Это характерно для способа ультразвукового плющения лент, предложенного впервые в работах Е. Г. Коновалова и Е. П. Игнашева. Проведенные ими исследования показали возможность пластического деформирования проволок только за счет энергии ультразвуковых колебаний, что обеспечило повышение как производительности процесса плющения, так и качества получаемых лент.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы**

Металлические ленты с высокой точностью размеров из тугоплавких металлов и сплавов находят широкое применение в изделиях электронной техники. Наряду с высокими эксплуатационными свойствами эти материалы обладают и весьма низкой технологичностью, что значительно усложняет процесс получения ленты из них.

Тугоплавкие металлы и сплавы находят в настоящее время широкое применение в различных отраслях техники и прежде всего там, где требуется обеспечение формоустойчивости при высоких температурах, термостабильности стойкость к воздействию агрессивных сред.

Для изготовления различных изделий электронной техники и приборостроения из тугоплавких металлов и сплавов в настоящее время наиболее широко применяются методы обработки давлением (волочение, прокатка, плющение, штамповка) и электрофизические методы обработки (ультразвуковое резание, электроэрозионная обработка, лазерная обработка, плазменное напыление. В этом отношении наибольшей сложностью отличается процесс изготовления лент методом плющения круглых проволок, при котором в деформируемом металле формируется неравномерное напряженно-деформируемое состояние и на кромках лент практически всегда возникают растягивающие напряжения. Учитывая широкое применение лент из тугоплавких металлов и сплавов в электронной технике, в настоящей работе основное внимание было уделено исследованиям процесса изготовления изделий в виде лент и ленточных спиралей.

Технологический процесс горячего ультразвукового плющения в вакууме обеспечивает получение прочных микролент из тугоплавких металлов. Исследования кинематики взаимодействия инструмента с обрабатываемой проволокой и разработка компьютерной анимационной модели процесса плющения являются актуальными задачами в плане оптимизации процесса плющения, что и рассматривается в данной работе.

### **Цель и задачи исследования**

Цель работы состоит в разработке физико-механической модели контактного взаимодействия инструментов с проволокой при горячем ультразвуковом плющении в вакууме и исследовании способа получения лент из тугоплавких металлов и сплавов методом горячего ультразвукового плющения в вакууме.

Для реализации цели в работе поставлены следующие задачи:

1. Экспериментально исследовать процесс горячего ультразвукового плющения в вакууме.
2. Разработать физико-механическую модель контактного взаимодействия при ультразвуковом плющении.
3. Разработать компьютерную анимационную модель процесса ультразвукового горячего плющения в вакууме.
4. Описать сущность способа получения лент из тугоплавких металлов методом ультразвукового плющения.

## **Объект и предмет исследования**

Объектом и предметом исследований являются ленты из тугоплавких металлов, применяемые в изделиях электронной технике.

## **Область исследования**

Областью исследования является электротехника, процессы производства изделий, ультразвуковые методы обработки.

## **Структура и объем работы**

Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, и библиографического списка. Общий объем диссертации – 52 страницы. Работа содержит 14 рисунков. Библиографический список включает 20 наименований.

## **Публикации**

Результаты работы по теме диссертации были представлены на 56-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, Республика Беларусь, 2020 г.).

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность работы.

В первой главе дан анализ существующих способов и оборудования для обработки тугоплавких металлов и сплавов.

Во второй главе рассмотрена сущность способа горячего ультразвукового плющения в вакууме, рассмотрены схемы введения энергии ультразвука в зону деформирования, освещены режимы упругого и пластического деформирования проволоки.

В третьей главе разработана компьютерная анимационная модель взаимодействия инструмента с обрабатываемой проволокой при горячем ультразвуковом плющении.

В четвертой главе разработана на основе экспериментальных данных физико-механическая модель контактного взаимодействия инструмента с

проволокой из тугоплавкого металла при ее горячем ультразвуковом плющении.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе выполнения магистерской диссертации был произведён обзор технологических процессов производства изделий электронной техники, в которых используется энергия ультразвуковых колебаний. Приведено краткое описание технологических процессов ультразвуковой сварки, очистки, резки, обработки давлением, применяемые в производстве изделий электронной техники.

Описана сущность способа получения лент из тугоплавких металлов и сплавов методом горячего ультразвукового плющения в вакууме. Рассмотрен способ горячего ультразвукового плющения в вакууме проволок из тугоплавких металлов и сплавов. Приведены различные схемы введения энергии ультразвука в зону деформирования.

Разработана компьютерная анимационная модель взаимодействия инструмента с обрабатываемой проволокой при горячем ультразвуковом плющении.

Разработана физико-механическая модель контактного взаимодействия инструмента с проволокой из тугоплавкого металла при горячем ультразвуковом плющении в вакууме.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**

1. Кашпар А.А., Степовой А.О. Генератор наложения графической информации на видеосигнал / Кашпар А.А., Степовой А. // материалы 54-й научной конференции аспирантов ,магистрантов и студентов, УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» Минск, БГУИР ,2018. С.55
2. Степовой А.О., Кашпар А.А. Контроллеры заряда для солнечных батарей/ Степовой А.О., Кашпар А.А. // материалы 54-й научной конференции аспирантов ,магистрантов и студентов, УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» Минск, БГУИР ,2018. С.112
3. Степовой А.О. Физико-механические процессы в зоне контакта инструмента и изделия при горячем ультразвуковом плющении в вакууме/ Степовой А.О.// материалы 56-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» Минск, БГУИР ,2020.