

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

УДК 679.7.05:621.778.6

**МЕЛЬНИК**  
Екатерина Андреевна

Кинематика взаимодействия инструмента с проволокой при ультразвуковом  
плющении

**АВТОРЕФЕРАТ**  
на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-36 80 08 Инженерная геометрия и компьютерная графика

Научный руководитель  
канд. техн. наук, профессор  
**ВЫШИНСКИЙ** Николай  
Владимирович

---

Минск 2018

Работа выполнена на кафедре инженерной и компьютерной графики учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

**Вышинский Николай Владимирович,**  
кандидат технических наук, профессор кафедры инженерной и компьютерной графики учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

**Калтыгин Александр Львович,**  
кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной графики учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Защита диссертации состоится «21» июня 2018 г. года в 10<sup>00</sup> часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П.Бровки, 4, 2 уч. корп., ауд. 517, тел.: 293-89-92, e-mail: [kafei@bsuir.by](mailto:kafei@bsuir.by).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

## ВВЕДЕНИЕ

В приборостроении тугоплавкие материалы применяются для изготовления ответственных деталей рентгеновских приборов для испытания материалов (молибденовые чашки, шайбы), газотеплообменников и других конструктивных элементов магнитогидродинамических испытательных устройств (вольфрам), диафрагмы ионных ускорителей (вольфрам), электродов и эмиттеров квантовых генераторов и ионных обрабатывающих устройств (вольфрам), игл матричных печатающих устройств компьютеров (вольфрамовая проволока). Видно, что для электроники требуется большое количество разнообразных деталей (с различной формой и размерами) из тугоплавких металлов и сплавов. Однако, наряду с широким применением и комплексом 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.

Технологический процесс горячего ультразвукового плющения в вакууме обеспечивает получение прочных микроленг 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.

При взаимодействии инструмента с обрабатываемой проволокой при горячем ультразвуковом плющении в вакууме возможны режимы упругого и пластического деформирования проволоки. При реализации этих режимов в зоне контакта будут протекать различные процессы, сопровождающие взаимодействие инструмента и проволоки. Особый интерес представляет режим упругого взаимодействия обрабатываемой проволоки круглого поперечного сечения с плоскостью инструмента. Этот режим является установочным и предшествует режиму пластического деформирования проволоки. Теоретические исследования кинематики взаимодействия инструмента с проволокой при ее упругой деформации позволяет прогнозировать процессы, протекающие в зоне контактирования.

Целью данной работы являются теоретические исследования и оптимизация технологического процесса горячего ультразвукового плющения в вакууме микропроволок из тугоплавких металлов и сплавов.

Задачи исследования:

1. Получение теоретических зависимостей, описывающих кинематическое взаимодействие инструмента с обрабатываемой проволокой;
2. Оптимизация кинематического взаимодействия инструмента с обрабатываемой проволокой;
3. Компьютерная визуализация процесса взаимодействия инструмента с обрабатываемой проволокой при ультразвуковом плющении.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы диссертации:**

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. Из названных выше методов наиболее значительные трудности для практического применения представляют методы обработки давлением. 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.

**Задачи:**

1. Получение теоретических зависимостей, описывающих кинематическое взаимодействие инструмента с обрабатываемой проволокой;
2. Оптимизация кинематического взаимодействие инструмента с обрабатываемой проволокой;
3. Компьютерная визуализация процесса взаимодействие инструмента с обрабатываемой проволокой при ультразвуковом плющении.

**Объект исследования:**

Технологический процесс горячего ультразвукового плющения в вакууме из тугоплавких металлов.

**Предмет исследования:**

Кинематика взаимодействие инструмента с обрабатываемой проволокой при горячем ультразвуковом плющении в вакууме.

**Область исследования:**

Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1–36 80 08 «Инженерная геометрия и компьютерная графика».

**Теоретическая и методологическая основа исследования:**

В основу диссертации легли результаты известных исследований белорусских, российских и других зарубежных ученых в области электронных устройств и техники.

**Информационная база исследования** сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров в данной области.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Сущность способа получения лент из тугоплавких металлов и сплавов методом горячего ультразвукового плющения в вакууме;

2. Кинематика взаимодействия инструмента с проволокой при ультразвуковом плющении.

### **Апробация и внедрение результатов исследования**

Результаты исследования были представлены на 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР.

### **Опубликование результатов диссертации:**

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 3 печатных работах. Все 3 статьи в сборниках материалов научных конференций.

### **Структура и объем работы:**

Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, шести глав и заключения и библиографического списка. Общий объем диссертации – 84 страницы. Работа содержит 24 рисунка, 1 таблицу. Библиографический список включает 40 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы процесса горячего ультразвукового плющения в вакууме микропроволок из тугоплавких металлов и сплавов, определены основные направления, поставлены задачи исследования, рассмотрены объект и предмет исследования.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования, представлены положения, выносимые на защиту, приведены апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также, структура и объем диссертации.

В **первой главе** рассматриваются ультразвук и ультразвуковая обработка, существующие ультразвуковые технологические процессы. Отмечена высокая эффективность способа получения металлических лент микронных и малых сечений ультразвуковым холодным пластическим деформированием проволоки. Приведена принципиальная схема ультразвуковой обработки.

Во **второй главе** рассматривается пластическое деформирование металлов и сплавов, а именно механизм пластической деформации, наклеп, свойства пластически деформированных металлов, влияние нагрева на

структуру и свойства холоднодеформированных металлов, влияние обработки давлением на структуру и свойства металла.

Пластическое деформирование металлов и сплавов имеет очень большое значение в технике, так как подавляющую часть их, особенно стали, обрабатывают давлением. Важнейшие технологические процессы обработки металлов давлением, такие как ковка, штамповка, прокатка, прессование, волочение и др., основаны на способности металлов получать под действием внешней силы остаточные пластические деформации, обеспечивающие необходимые размеры и форму заготовок и изделий. Процесс пластической деформации также является основой обработки металлов резанием. Способность металлов пластически деформироваться имеет большое значение и для обеспечения надежности и долговечности работы изделий. Если способность металла изделий к пластической деформации мала, то в таких изделиях в процессе работы может скорее произойти хрупкое разрушение.

Одновременно с изменением размеров и формы в пластически деформируемом изделии изменяются структура и свойства. Это дает возможность использовать пластическое деформирование как технологическую операцию, изменяющую в желательном направлении структуру и свойства металлов и сплавов. Особое значение пластическое деформирование приобретает в том случае, когда металлы и сплавы не имеют фазовых превращений в твердом состоянии и путем термической обработки нельзя изменить их структуру и свойства (например, для легированных аустенитных и ферритных сталей).

Пластическая деформация протекает не только под действием внешней силы, но и под влиянием внутренних фазовых превращений, сопровождающихся объемными изменениями (внутрифазовый наклеп). Внутрифазовый наклеп оказывает влияние на структуру и существенно отражается на формировании свойств при термической обработке металлов и сплавов.

В зависимости от температурно-скоростных условий деформирования различают холодную и горячую деформацию.

Холодная деформация характеризуется изменением формы зерен, которые вытягиваются в направлении наиболее интенсивного течения металла (рисунок 2, а). При холодной деформации формоизменение сопровождается изменением механических и физико-химических свойств металла. Это явление называют упрочнением (наклепом).

Изменения, внесенные холодной деформацией в структуру и свойства металла, не необратимы. Они могут быть устранены, например, с помощью термической обработки (отжигом).

Формоизменение заготовки при температуре выше температуры рекристаллизации сопровождается одновременным протеканием упрочнения и рекристаллизации.

Горячей деформацией называют деформацию, характеризующуюся таким соотношением скоростей деформирования и рекристаллизации, при котором рекристаллизация успевает произойти во всем объеме заготовки и микроструктура после обработки давлением оказывается равноосной, без следов упрочнения (рисунок 2, б).

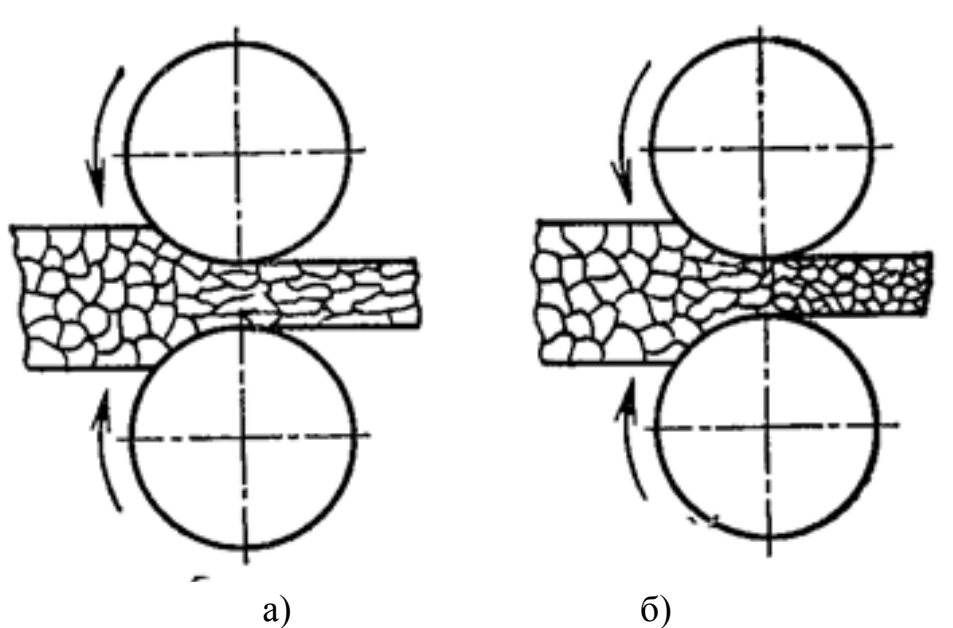


Рисунок 2 – Схема изменения микроструктуры металла при прокатке:  
а) холодная пластическая деформация; б) горячая пластическая деформация

Следует отметить, что рекристаллизация протекает не во время деформации, а сразу после ее окончания и тем быстрее, чем выше температура. При очень высокой температуре, значительно превышающей температуру рекристаллизации, она завершается в секунды и даже доли секунд.

Для каждого металла и сплава существует своя температурная область холодной и горячей обработки давлением. При горячей обработке металла, чтобы увеличить его пластичность, а также, чтобы устранить возможность наклепа, применяют температуры, значительно превосходящие минимальную температуру рекристаллизации.

В **третьей главе** описана сущность способа получения лент из тугоплавких металлов и сплавов методом горячего ультразвукового плющения в вакууме. Рассмотрен непосредственно сам способ ультразвукового плющения лент и применяемое оборудование. В основу способа горячего ультра-



звукового плющения в вакууме (ГУПВ) положена идея использования инструментов, колеблющихся с ультразвуковой частотой для двухстороннего пластического деформирования в условиях вакуума проволок, нагретых до температур начала рекристаллизации металла (рисунок 3), что соответствует оптимальным условиям обработки давлением тугоплавких металлов и сплавов. При плющении проволок микронных сечений деформирование можно осуществлять практически только за счет энергии ультразвуковых колебаний. Режим импульсного деформирования проволок позволяет решить основную проблему горячей прокатки в вакууме интенсивное адгезионное взаимодействие обрабатываемого металла с инструментами.

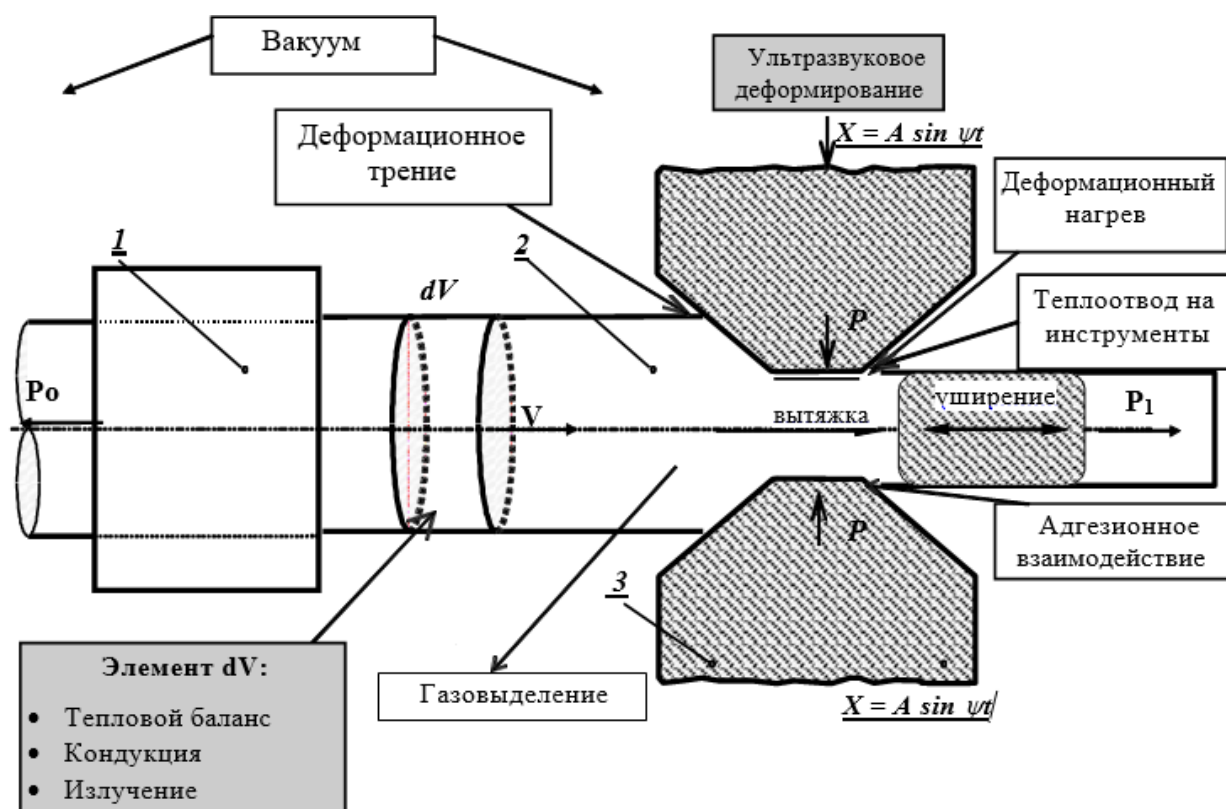


Рисунок 3 – Схема процесса горячего ультразвукового плющения в вакууме (1 – нагреватель, 2 – проволока-лента, 3 – ультразвуковые инструменты)

Проведен анализ физических процессов имеющих место при ультразвуковом плющении, что позволило разработать общую схему их моделирования и определить потоки передаваемых данных. Основными стадиями процесса являются:

- предварительный нагрев проволоки перед плющением за счет косвенного инфракрасного или прямого резистивного нагрева;
- непосредственно ультразвуковое плющение проволоки;
- охлаждение полученной ленты.

Основой математического описания физических процессов, согласно предложенной схеме, являются законы термодинамики, теплофизики, механики твердого деформируемого тела. Хотя для каждого из процессов имеются свои особенности в их применении.

**В четвертой главе** рассматривается кинематика взаимодействия инструмента с проволокой при ультразвуковом плющении.

При ультразвуковом плющении возможны два режима деформирования – импульсный и непрерывный, причем соотношение между ними определяется кинематическими параметрами установки и режимами процесса ультразвукового плющения. Импульсный режим деформирования более эффективен, чем непрерывный с точки зрения снижения энергосиловых параметров процесса и повышения качества получаемой ленты. Существуют предельные соотношения между скоростью протягивания ленты, величиной упругой деформации заготовки (большой частью проволоки небольшого диаметра), параметрами колебательной системы и углом захвата бойков, при котором обеспечивается импульсный режим упругопластического деформирования металла.

Описаны режим упругого деформирования проволоки и режим пластического деформирования проволоки. Из расчетов выяснили, что момент начала контактирования не зависит от диаметра обрабатываемой проволоки, но зависит от частоты и амплитуды ультразвуковых колебаний инструмента, угла захода и от скорости протяжки ленты. Пластическая деформация, осуществляемая калибрующей поверхностью инструмента, является причиной образования периодического рельефа поверхности ленты с шагом  $\lambda = Vt_2$ , что является отличительной особенностью метода ультразвукового плющения.

**В пятой главе** рассмотрены компьютерные технологии в научных исследованиях и в разработке технологических процессов. В настоящее время компьютерные технологии позволяют широко применять не только стандартные программы, но и комплекс специализированных компьютерных технологий. Большинство заводов применяют технологию пространственного моделирования, для некоторых она является главным инструментом разработки конструкторской документации и технологических процессов. Это способствует решению проблем взаимосвязи различных подразделений предприятия, участвующих в изготовлении продукции.

**В шестой главе** описана разработка компьютерной анимационной модели технологического процесса плющения проволок. В связи с дорогой стоимостью материалов, исследовательского и технологического оборудования, натурное изучение различных процессов в лабораторных условиях не всегда представляется возможным и во многих случаях связано со значи-

тельными затратами материальных и денежных средств. Особенно эта проблема актуальна при исследовании и разработке быстропротекающих процессов, связанных с электрофизическими методами обработки материалов в условиях высоких температур, давлений окружающей среды. Эти проблемы решаются с помощью современных методов компьютерного моделирования, которые при минимальных затратах времени и материальных средств позволяют изучать и исследовать различные процессы, проводить их оптимизацию с выходом на конкретные вопросы проектирования самих изделий, разработку технологических процессов и при соответствующей организации и техническом оснащении – на подготовку управляющих программ и автоматизированное изготовление изделий с помощью гибких производственных систем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ходе работы над магистерской диссертацией была рассмотрена кинематика взаимодействия инструмента с проволокой при ультразвуковом плющении, разработана компьютерная анимационная модель технологического процесса плющения проволок, рассмотрена математическая модель кинематики ультразвуковой плющения с учетом упругих характеристик очага деформации.

2. Проведен анализ сил, действующих на участок ленты в очаге деформации, который показал, что движение ленты происходит прерывисто. В каждом элементарном цикле плющения в момент обжатия лента стопорится в очаге деформации и продолжает свое движение после снятия нагрузки. В результате проведенного анализа выделено шесть фаз элементарного цикла ультразвукового плющения:

I фаза – упругая разгрузка неподвижной ленты;

II фаза – упругая разгрузка со скольжением ленты;

III фаза – раздельное движение инструментов и ленты (контакт отсутствует);

IV фаза – упругое сжатие со скольжением ленты;

V фаза – упругое сжатие неподвижной ленты;

VI фаза – пластическая осадка (плющение ленты).

3. Объединяя законы движения ленты на протяжении различных фаз процесса плющения, составлен обобщенный закон изменения скорости ленты на протяжении всего цикла обработки.

4. Отмечено, что при одностороннем воздействии ультразвука на деформируемый металл будут выше энергосиловые характеристики плющения в сравнении с двухсторонним воздействием и поэтому эффективность при-

менения этого режима для плющения высокопрочных проволок из труднообрабатываемых металлов ниже, чем при применении двухстороннего ультразвукового воздействия.

5. Установлено, что при разных частотах колебаний инструментов имеет место периодическая смена режимов деформирования металла (переходы из режима ультразвукового плющения в режим ультразвукового волочения и обратно), что приводит к появлению на поверхности лент дефектов в виде «насечки», а при большой разнице в частотах – в виде волнистостей. Поэтому наиболее оптимальным с точки зрения практического применения является режим плющения синфазными и одинаковыми по амплитуде ультразвуковыми колебаниями инструментов.

Так же установлено, что момент начала контактирования не зависит от диаметра обрабатываемой проволоки, но зависит от частоты и амплитуды ультразвуковых колебаний инструмента, угла захода и от скорости протяжки ленты.

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**

1. «Разработка анимационной модели процесса ультразвукового плющения» в тезисах 54 СНТК БГУИР, 26 апреля 2018, секция «Инженерная и компьютерная графики, Минск БГУИР, 2018 [1–А.].

2. «Кинематика ультразвукового плющения проволок» в тезисах 54 СНТК БГУИР, 26 апреля 2018, секция «Инженерная и компьютерная графики, Минск БГУИР, 2018 [1–А.].

3. «Определение контактных усилий при ультразвуковом плющении проволок» в тезисах 54 СНТК БГУИР, 26 апреля 2018, секция «Инженерная и компьютерная графики, Минск БГУИР, 2018 [1–А.].