

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
«Донбасский государственный технический университет»

*На правах рукописи*

**Коваленко Ольга Александровна**



**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛОКАЛЬНОГО УПРОЧНЕНИЯ  
ВАНАДИЕМ И КОНСТРУКЦИИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО  
ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы  
(по отраслям)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Алчевск – 2019

Работа выполнена в ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Куберский Сергей Владимирович**  
кандидат технических наук, профессор,  
ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет», и.о. проректора по научной работе, заведующий кафедрой «Металлургия черных металлов»

Официальные оппоненты: **Витренко Владимир Алексеевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет им. В.Дала», проректор по научной работе и инновационной деятельности, заведующий кафедрой «Технология машиностроения и инженерного консалтинга»

**Снитко Сергей Александрович**  
доктор технических наук, доцент,  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», профессор кафедры «Обработка металлов давлением»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Защита состоится «06» сентября 2019 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета Д 001.007.01 на базе ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет» по адресу: г. Алчевск, пр. Ленина, 16 (главный корпус), конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ» в читальном зале по адресу: г. Алчевск, ул. Ленинградская 45-а, библиотека.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ года

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета



кандидат технических наук,  
доцент  
Смекалин Евгений Сергеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Одним из этапов металлургического передела является получение заготовок и готовых изделий холодной листовой штамповкой. Максимальная эффективность такой технологии разделения металла может быть обеспечена комплексным решением технических вопросов подготовки и реализации технологического процесса. В частности, большое внимание уделяется обеспечению надежной и безопасной эксплуатации, а также продлению ресурса механизированного штампового инструмента на всех стадиях его жизненного цикла.

Стойкость штампов существенно зависит от величины и распределения напряжений, возникающих в ходе технологического процесса и определяющих напряженно-деформированное состояние (НДС) штампуемого материала и режущих частей штампа. При этом жизненный цикл инструмента и качество деталей определяются износостойкостью режущих частей, зависящей от их свойств, характера выполняемых операций, формы пуансона и матрицы. Поэтому целесообразным является применение методов локального упрочнения разделительного инструмента, обеспечивающих снижение интенсивности изнашивания.

Интерес представляет способ упрочнения методом электроискрового легирования (ЭИЛ) с применением в качестве электрода ванадия, обеспечивающего высокую твердость, прочность, износостойкость и теплоустойчивость режущего инструмента, в сочетании с оптимальной формой режущих частей и исходной шероховатостью обработанной поверхности увеличивающих ресурс работы штампового инструмента.

В настоящее время существует многообразие конструкций разделительных штампов и методов повышения их стойкости. Однако исследование динамики взаимодействия штампового инструмента с окружающей средой, расширение его технологических возможностей и увеличение срока эксплуатации при реализации конкретных технологических процессов является актуальной научно-практической задачей.

**Степень разработанности проблемы исследования.** В литературе достаточно широко представлены вопросы, связанные со стойкостью штампового инструмента и способами ее повышения. Значительный вклад в разработку способов и методов повышения стойкости внесли Романовский В.П., Мовшович И.Я., Тимошенко В.А., Фукс-Рабинович Г.С., Михайленко Ф.П., Вишневский Н.С., Тарельник В.Б., Минкевич А.Н., Верхотуров А.Д., Маковой В.А., Алимов В.И. и другие.

Однако остаются недостаточно изученными вопросы влияния конструкции разделительного инструмента на его НДС при выполнении раз-

делительных операций, НДС упрочненных слоев инструмента на его износостойкость, а также взаимосвязь исходной шероховатости упрочняемой поверхности с ее НДС и прочностными характеристиками.

**Объект исследования** – процесс разделения металла при листовой штамповке и оборудование для его реализации.

**Предмет исследования** – факторы, влияющие на долговечность разделительного инструмента и методы ее повышения.

**Цель исследования** – повышение эффективности процесса листовой штамповки, обусловленной увеличением износостойкости рабочих поверхностей разделительных штампов, путем совершенствования конструкции и применения технологии локального упрочнения.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие основные задачи исследования:

- проанализировать условия работы и механизм изнашивания разделительных штампов для определения факторов, обеспечивающих оптимальные условия деформирования материала и повышение долговечности инструмента;

- выполнить сравнительный анализ способов и методов повышения стойкости разделительных штампов;

- разработать рекомендации по изменению конструкции разделительных штампов, применительно к конкретным технологическим процессам;

- разработать математическую модель процесса разделения металла при листовой штамповке, позволяющую оценить НДС рабочей поверхности упрочненных разделительных штампов, имеющих различную форму режущих кромок;

- выполнить экспериментальную оценку влияния предложенного метода и режимов упрочнения поверхностей разделительных штампов на физико-механические свойства режущих кромок, износостойкость разделительных штампов и качество получаемых заготовок;

- разработать рекомендации по совершенствованию методов и режимов упрочнения рабочих поверхностей разделительных штампов для повышения их стойкости.

**Научная новизна исследований:**

1. Впервые для различных форм пуансонов изучено НДС и энерго-силовые параметры при выполнении разделительных операций листовой штамповки для усовершенствования конструкции разделительного инструмента.

2. Впервые установлено, что при упрочнении разделительного инструмента ванадием методом ЭИЛ, в поверхностном слое вершины режущей кромки и на участке рабочей поверхности абсолютные значения

показателя напряженного состояния имеют меньшую величину по сравнению с традиционными неупрочненными режущими поверхностями, а на боковой поверхности упрочненного инструмента показатель напряженного состояния повышается при одновременном повышении предела прочности поверхностного слоя, что будет способствовать повышению долговечности инструмента.

3. Впервые получены зависимости микротвердости и модуля нормальной упругости от исходной шероховатости упрочненной ванадием поверхности и показано, что при величине исходной шероховатости 0,7 – 1,1 мкм обеспечиваются максимальные значения микротвердости и модуля нормальной упругости, а максимальные значения глубины упрочненного слоя получены в диапазоне исходной шероховатости экспериментальных образцов 0,78 – 1,12 мкм.

4. Впервые установлена зависимость износостойкости упрочненной ванадием поверхности инструментальной стали У8А от исходной ее шероховатости и показано, что при исходной шероховатости обрабатываемой поверхности 0,8 – 1,2 мкм на стадии интенсивного износа снижение шероховатости за счет смятия и деформирования микронеровностей происходит более плавно, не вызывая деформационного упрочнения способствующего охрупчиванию поверхности, а на стадии устойчивого трения минимальная интенсивность износа, соответствует диапазону исходной шероховатости 0,6 – 1,1 мкм.

5. Впервые использование ванадия в качестве материала анода для ЭИЛ режущих кромок разделительного инструмента при  $U = 56$  В;  $I_p = 3,0 - 3,5$  А;  $C = 300$  мкФ;  $R = 10$  Ом и исходной шероховатости упрочняемой поверхности 0,8 – 1,1 мкм позволило получить качественное упрочняющее покрытие с высоким уровнем физико-механических свойств и эксплуатационной стойкостью способствующее продлению ресурса штамповой оснастки.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Предложена математическая модель процесса разделения металла при листовой штамповке, позволяющая на основе моделирования с использованием метода конечных элементов (МКЭ), оценить НДС рабочей поверхности разделительных штампов имеющих различную форму режущих кромок с нанесенным упрочняющим слоем.

Выполнен анализ полученных в работе теоретических и экспериментальных зависимостей и установлено влияние исходной шероховатости упрочняемой ванадием методом ЭИЛ поверхности режущих кромок штампового инструмента на глубину, микротвердость, модуль нормальной упругости, показатель напряженного состояния и износостойкость упрочненного слоя.

Предложена новая конструкция инструмента для листовой штамповки, а также программные средства по определению НДС упрочненного слоя рабочих поверхностей разделительных штампов в процессе выполнения технологических операций.

Разработаны технологические рекомендации по локальному упрочнению методом ЭИЛ ванадием режущих кромок пуансона и матрицы с учетом исходной шероховатости обрабатываемой поверхности.

Разработана методика и изготовлена установка, позволяющая выполнять оценку относительной износостойкости инструмента по динамике изменения площадей нанесенных на режущие кромки отпечатков в процессе испытаний на износ.

Предложено выполнять оценку НДС упрочненной ЭИЛ поверхности режущих кромок инструмента и распределение характеристик прочности по глубине слоя с использованием значений микротвердости упрочненной поверхности, применяя эмпирическую зависимость модуля нормальной упругости от максимальной глубины проникновения индентора и остаточной глубины проникновения его после снятия нагрузки в процессе испытаний на твердость.

**Методология и методы исследования.** Основу теоретических исследований составили положения теории пластического деформирования и разрушения металлов, метод численных решений конечно-разностных схем статического равновесия выделенных элементарных объемов, а также метод имитационного моделирования и инженерные подходы.

Экспериментальные методы исследования включали определение механических свойств полученных упрочненных поверхностей, оценку качества методами микроструктурного и рентгеновского исследования, а также оценку износостойкости. При реализации экспериментальных исследований и обработке их результатов использованы элементы математической статистики.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель процесса разделения металла при листовой штамповке, учитывающая различную форму режущих кромок пуансона и наличие упрочняющего слоя, позволяющая на основе моделирования с использованием МКЭ оценить величину и распределение напряжений на наиболее изнашиваемых участках рабочей поверхности разделительных штампов, а также энергозатраты при выполнении операций вырубки и пробивки.

2. Применение ванадия в качестве упрочняющего материала при ЭИЛ и режим упрочнения с целью повышения стойкости разделительных штампов.

3. Установленные зависимости микротвердости, модуля нормальной упругости и износостойкости, упрочненных ванадием поверхностей, от исходной шероховатости режущих кромок штампового инструмента, свидетельствующие о том, что в диапазоне исходной шероховатости 0,8-1,1 мкм обеспечиваются максимальные значения микротвердости (2340 – 2370 Н<sub>μ</sub>), величины упрочненного слоя (0,137 мкм) и минимальный износ.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Основные теоретические положения и выводы диссертации рассматривались и обсуждались на заседаниях и научно-теоретических семинарах кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение», кафедры «Машины металлургического комплекса» ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ» и научно-технических конференциях: «Конференция посвященная 75-летию Донецкого государственного университета» (г. Донецк, 1996г.); «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов» (г. Харьков, 2003г.); «A Dunaújvárosi Főiskola Közleményei» (Dunaújváros (Венгрия), 2007г.); «Новые наукоемкие технологии получения материалов и изделий повышенного качества методами обработки давлением» (г. Краматорск, 2011г.); «Новые наукоемкие технологии, оборудование и оснастка для обработки материалов давлением» (г. Краматорск, 2012г.); «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии» (г. Харьков, 2012г.); «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (г. Киев, 2013г.); «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (г. Алчевск, 2018г.).

Достоверность полученных результатов подтверждается большим объемом проанализированной и систематизированной информации о разделительных операциях листовой штамповки и способах повышения стойкости штампового инструмента, корректностью применения аналитических методов, адекватностью разработанных конечно-разностных форм статического равновесия выделенных элементарных объемов, конечно-элементных моделей, достаточным уровнем соответствия результатов численного моделирования экспериментальным данным.

**Результаты исследования реализованы** в виде технологических рекомендаций по усовершенствованию конструкции разделительного инструмента для листовой штамповки и повышению их стойкости методом электроискрового легирования ванадием режущих кромок матрицы и пуансона внедрены на ООО «Луганский завод трубопроводной арматуры «МАРШАЛ».

Отдельные положения диссертации используются в учебном процессе на кафедрах «Технология и организация машиностроительного производ-

ства» и «Обработка металлов давлением и металловедение» факультета металлургического и машиностроительного производства ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет» (ДонГТУ).

**Публикации.** Основные положения исследования отображены в 17 печатных работах, среди них 10 статей, опубликованных в рецензируемых научных журналах и изданиях, утвержденных ВАК ЛНР и РФ, 6 статей в профессиональных журналах и сборниках, 1 патент на полезную модель. Результаты исследований опубликованы в материалах 8 научных конференций, из них 6 международных.

**Структура диссертации** обусловлена логикой исследования, что соответствует его цели и задачам. Работа состоит из введения, пяти разделов (16 подразделов), выводов к разделам, заключения, списка литературы из 174 позиций, 4 приложений. Общий объем диссертации – 198 страниц (155 страницы – основная часть). В разделах диссертации 63 рисунка и 22 таблицы, в том числе 15 рисунков размещены на 15 отдельных страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность направления исследования, определяется цель работы и постановка проблемы диссертации. Определены объект, предмет исследования, методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследования и формы их апробации.

**Первый раздел «Условия работы разделительных штампов, стойкость и методы её повышения»** содержит 4 подраздела. В подразделе 1.1 «**Анализ условий работы и износ разделительных штампов**» выполнен анализ условий работы штампового инструмента и отмечено, что его долговечность зависит от НДС, формирующегося в материале заготовки и режущих кромок, и определяется факторами, зависящими от внешних воздействий, физико-механических свойств материала рабочих частей штампа и изнашивающей способностью штампуемого материала, рассмотренными в подразделе 1.2 «**Механизм изнашивания инструмента и критерии стойкости**».

Подраздел 1.3 «**Анализ существующих способов и методов повышения стойкости разделительных штампов**» содержит информацию, включающую обзор различных методов повышения стойкости штампового инструмента, позволившую сформулировать цель и задачи исследований.

В подразделе 1.4 «**Направления повышения стойкости инструмента при выполнении разделительных операций листовой штамповки**» отмечено, что важной задачей является повышение износостой-

кости режущего инструмента для обеспечения оптимальных условий деформирования материала, путем создания на режущей поверхности слоя материала со структурой и комплексом свойств, обеспечивающих снижение интенсивности изнашивания.

Таким образом, в первом разделе, на основании анализа различных методов повышения стойкости, сделан вывод о приемлемости для упрочнения штампов метода ЭИЛ и необходимости совершенствования их конструкции, изменяя конфигурацию режущих кромок пуансона.

**Второй раздел «Выбор направления и методов исследования процессов повышения стойкости разделительных штампов»**, состоит из 4 подразделов. В подразделе 2.1 «Пути расширения технологических возможностей процесса разделения листовой заготовки», определено направление и выбраны методы теоретических и экспериментальных исследований для решения, поставленных в диссертационной работе задач.

Подраздел 2.2 «Методика теоретических исследований процессов разделения листовой заготовки» содержит информацию о теоретических исследованиях в которых использованы основные положения теории пластического деформирования и разрушения металлов, металловедения, метод численных решений конечно-разностных схем статического равновесия выделенных элементарных объемов, а также метод имитационного моделирования и инженерные подходы.

С целью выполнения теоретических расчетов и исследований разработана математическая модель (рисунок 1), основанная на МКЭ, позволяющая оценить НДС материала заготовки и режущих кромок штампов при различных конфигурациях пуансона. Кроме того разработанная математическая модель позволяет оценить НДС в упрочненном ЭИЛ поверхностном слое режущего инструмента.

Моделирование осуществлялось с применением формулировки Лагранжа-Эйлера на основе диаграмм пластичности и условия пластичности Губера-Мизеса. В качестве исходных параметров использованы механические свойства материала заготовки и инструмента (твердость, предел упругости и предел прочности), геометрические размеры заготовки, коэффициент трения (в соответствии с законом Кулона), различные конфигурации пуансона.

В подразделе 2.3 «Выбор оборудования и методов экспериментальных исследований» приведено описание, проведенных в работе экспериментальных исследований с использованием стандартных методик выполнения микроструктурного, рентгеноструктурного анализа и определения механических и эксплуатационных свойств материалов.

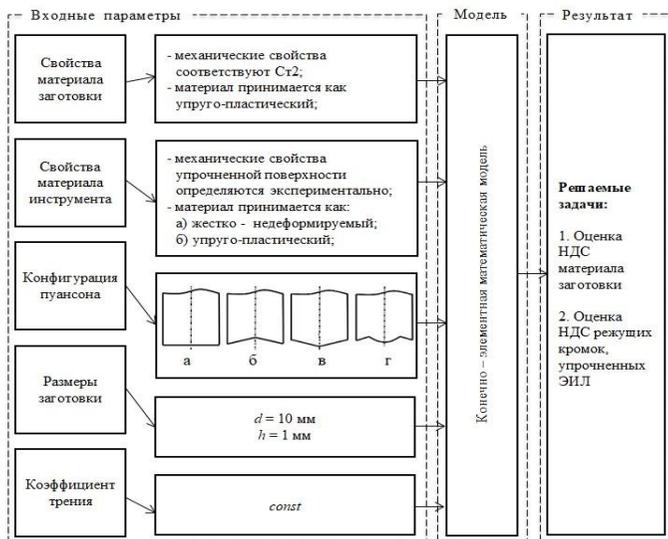


Рисунок 1 – Структура математической модели

Кроме стандартного оборудования, для определения физико-механических свойств и микроструктурного анализа, для определения износостойкости была разработана экспериментальная установка, позволяющая оценить относительную износостойкость по коэффициенту интенсивности износа, определяющемуся по изменению площади отпечатка в процессе испытаний к первоначальной площади.

Подраздел 2.4 «**Методика определения механических свойств образцов, упрочненных электроискровым легированием**» посвящен выбору методики определения характеристик прочности, необходимых для оценки НДС упрочненной ЭИЛ поверхности режущих кромок инструмента. Расчет выполнялся в соответствии с методами, в которых использовались: значения твердости и предела прочности материала покрытия; зависимости между модулем упругости и микротвердостью покрытия; эмпирическая зависимость модуля упругости от максимальной глубины проникновения индентора при определении твердости и остаточной глубины его проникновения после снятия нагрузки.

При выполнении теоретических расчетов и исследований, а также разработке математической модели, основанной на МКЭ использовался программный комплекс Abaqus.

**Третий раздел «Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния заготовки и режущих частей раздели-**

**тельных инструментов»** содержит 2 подраздела, в которых выполнены теоретические исследования по оценке напряжений формирующихся в материале штампуемой заготовки и режущих кромках инструмента при различных конфигурациях пуансона.

В подразделе 3.1 **«Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния заготовок в процессе деформации при различной конфигурации пуансона»** выполнено математическое моделирование процесса разделения материала при штамповке, которое показало, что в зависимости от формы инструмента интенсивному трению подвергаются различные участки, контактирующие с материалом заготовки, а величины напряжений на этих поверхностях отличаются как значениями, так и характером распределения. Максимальные напряжения характерны для пуансона имеющего плоскую форму режущих кромок (рисунок 2).

Контактные напряжения на режущих кромках пуансона формы (г) на 9 % превышают аналогичные значения для формы (в) и на 12 % ниже, чем для формы (б). Это позволяет предполагать, что срок службы такого пуансона будет выше, чем для формы (б).

Сила на пуансоне, имеющем форму (г), является наименьшей (рисунок 3.а) среди всех форм, что объясняется наличием дополнительных растягивающих напряжений в зоне реза за счет изгиба заготовки при заостренной форме его режущей кромки.

Затраты энергии при выполнении разделительных операций пуансоном, имеющим форму режущих кромок (г), несколько выше, чем для форм (а) и (б), что объясняется дополнительными затратами энергии на предварительную деформацию заготовки.

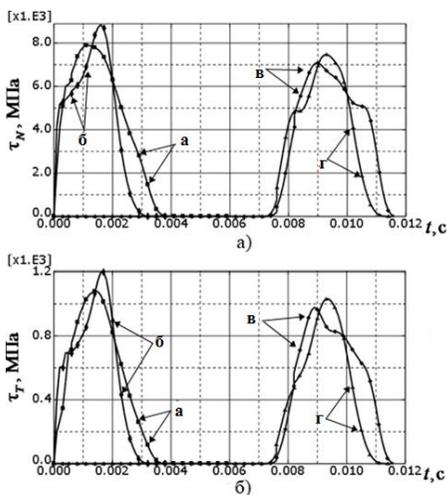


Рисунок 2 – Изменение максимальных нормальных (а) и касательных (б) контактных напряжений для различных конфигураций пуансона (рисунок 1.а-г)

Однако в сравнении с пуансоном формы (в) требуется меньше энергии на выполнение разделительной операции (рисунок 3.б).

На основании результатов математического моделирования предложена новая конфигурация пуансона, обеспечивающая оптимальное, в сравнении с существующими аналогами, сочетание величин контактных напряжений на его режущих кромках, силы на пуансоне и затрат энергии при выполнении разделительных операций и позволяющая:

- снизить силу на пуансоне за счет возникновения дополнительных растягивающих напряжений в зоне реза в результате изгиба заготовки при заостренной форме режущей кромки пуансона;
- повысить стойкость штампов и улучшить качество получаемых заготовок за счет перераспределения и снижения величины контактных напряжений, возникающих в ходе технологического процесса на этапе пластического деформирования;
- снизить энергозатраты на выполнение разделительных операций.

В подразделе 3.2 «Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния разделительного инструмента при различных параметрах листовой штамповки» для оценки НДС рабочей поверхности разделительных инструментов (пуансона и матрицы) в различных условиях использовали показатель напряженного состояния:

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_i}{\sigma_T}, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  – эквивалентное напряжение по Мизесу;

$\sigma_T$  – предел текучести материала (упрочненной поверхности).

Значения предела текучести упрочненной рабочей поверхности, состоящей преимущественно из карбидов и нитридов ванадия и железа, а

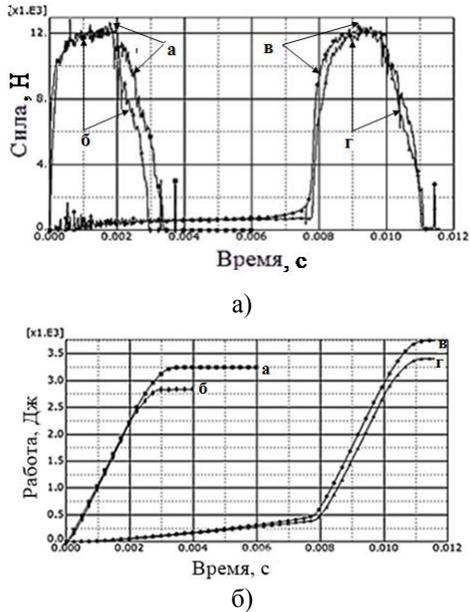


Рисунок 3 – Сила (а) и внешняя работа (б) при различных конфигурациях пуансона

также твердого раствора ванадия в железе приняты прочностные характеристики твердых сплавов типа ТК.

С использованием МКЭ установлено, что при максимальном значении силы резания наибольшая величина показателя напряженного состояния в поверхностном слое инструментов достигается в их вершинах, где имеет место сингулярное состояние, однако в случае применения упрочненного инструмента его абсолютная величина практически на 17 % меньше (рисунок 4).

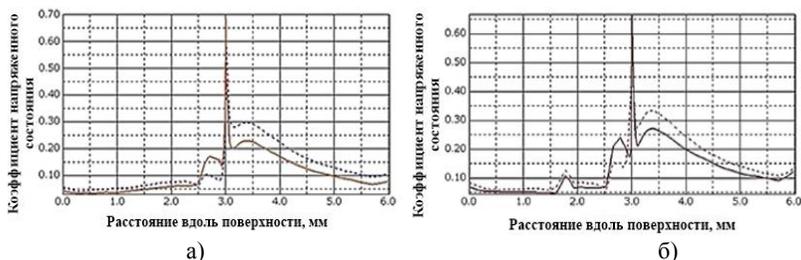


Рисунок 4 - Распределение коэффициента напряженного состояния в матрице (а) и пуансоне (б) при использовании инструментов без нанесения (сплошная линия) и с нанесением покрытия (пунктирная линия)

Кроме того, напряженное состояние в поверхностном слое сравниваемых инструментов также отличается:

- в непосредственной близости к вершине, на участке рабочей поверхности инструментов, характеризующейся наибольшими контактными напряжениями (диапазон 2,5 – 3,0 мм), для упрочненного инструмента величина показателя напряженного состояния на 30 – 45 % меньше, что обеспечивает более щадящие условия его работы;

- на боковой поверхности инструментов (диапазон свыше 3,0 мм) наблюдается увеличение показателя напряженного состояния в поверхностном упрочненном слое в среднем на 20 %, однако при этом предел прочности материала поверхностного слоя возрастает на 30 %, что в совокупности обеспечивает улучшение условий эксплуатации инструмента и будет способствовать повышению его долговечности.

**Четвертый раздел «Исследование параметров электроискрового легирования штампового инструмента ванадием и свойств упрочненного слоя»** содержит 3 подраздела, в которых представлены результаты экспериментальных исследований процесса локального упрочнения режущих кромок инструмента методом ЭИЛ, обработки и анализа полученных экспериментальных данных.

В подразделе 4.1 **«Выбор материалов и режимов нанесения упрочняющего покрытия»** с целью выбора наиболее эффективного мате-

риала для упрочнения методом ЭИЛ режущих кромок разделительного инструмента были проведены исследования с использованием в качестве электрода тугоплавких металлов (V, Ti, W), сплава сормайт и графита, образующих на обрабатываемой поверхности слой с высоким содержанием карбидов, обеспечивающий высокую износостойкость инструмента.

Анализ результатов проведенных исследований показал, что применение V в качестве материала анода позволяет получить упрочненный слой с оптимальным сочетанием физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик (глубина слоя, мелкозернистое строение, высокая твердость, сплошность и плотность покрытия, высокая теплостойкость).

Комплекс исследований, проведенный с целью отработки наиболее эффективных режимов ЭИЛ ванадием рабочей поверхности инструмента, изготовленного из стали У8А позволил подобрать оптимальные параметры напряжения зарядного тока, силы тока и емкости конденсатора обеспечивающих получение качественного соединения материала электрода с основным металлом, что способствует повышению прочности и износостойкости его поверхности.

Контроль твердости до и после упрочняющей термообработки, измерение микротвердости, исследование микроструктуры упрочненного «белого» нетравящегося слоя и определение его глубины при различных режимах нанесения покрытий методом ЭИЛ ванадием позволили установить, что оптимальное сочетание отмеченных параметров имеет место при  $U = 56$  В;  $I_p = 3,0 - 3,5$  А;  $C = 300$  мкФ;  $R = 10$  Ом и расходе электрода  $0,0079-0,0086$  г/см<sup>2</sup>.

В ходе дальнейших экспериментальных исследований в подразделе 4.2 **«Исследование фазового состава, микроструктуры и механических свойств упрочненного слоя»** в результате выполненного рентгеноструктурного анализа установлено, что предложенный режим ЭИЛ инструментальной углеродистой стали У8А ванадием обеспечивает образование в поверхностном слое высококонцентрированного твердого раствора ванадия в железе, а также мелкозернистые нитридные и карбонитридные фазы, сосредоточенные на глубине 5 – 17 мкм от поверхности и обеспечивающие высокую твердость. Причем твердый раствор ванадия в феррите, влияющий на прочностные характеристики и теплостойкость, распространяется на значительно большую глубину в сравнении с нитридными и карбонитридными фазами.

В подразделе 4.3 **«Исследование влияние исходной шероховатости поверхности на износостойкость и напряженно-деформированное состояние упрочненного слоя»** при проведении исследований по упрочнению поверхности стали У8А методом ЭИЛ ванадием было установлено, что при различной исходной шероховатости обрабатываемой поверхности

также различной получается структура полученного слоя.

В процессе изучения микроструктуры слоев с различной шероховатостью поверхности установлено, что при исходной шероховатости 0,78 – 1,12 мкм упрочненная поверхность отличается более равномерным распределением «белого» слоя имеющего плотную структуру и высокой микротвердостью, которая, в свою очередь, влияет на формирование НДС рабочей поверхности инструмента в процессе выполнения разделительных операций.

При проведении экспериментальных исследований установлено, что на определенную металлографически величину упрочненного слоя, которая в среднем составила 15 – 17 мкм, приходится максимальные значения твердости. В соответствии с установленной зависимостью величина микротвердости для разных значений шероховатости существенно отличается друг от друга и имеет максимальные значения (2340 – 2370 Нц) при исходной шероховатости 0,7 – 1,1 мкм (рисунок 5).

Диапазон исследуемых шероховатостей можно разделить на три участка, указанных на рисунке 6. Следует отметить, что максимальные значения глубины слоя с высокими значениями микротвердости, определенные в соответствии с уравнениями регрессии соответствуют интервалу исходной шероховатости 0,78 – 1,12 мкм.

Расчет модуля нормальной упругости по различным методикам показал, что наиболее достоверные данные, сопоставимые с экспериментальными результатами металлографических исследований и определения микротвердости, получены при использовании зависимости предела прочности от микротвердости и эмпирической зависимости модуля нормальной упругости от максимальной глубины проникновения индентора и остаточной глубины проникновения его после снятия нагрузки в процессе испытаний на твердость.

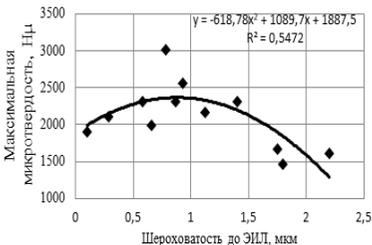


Рисунок 5 – Значения максимальной микротвердости упрочненного слоя при различной исходной шероховатости

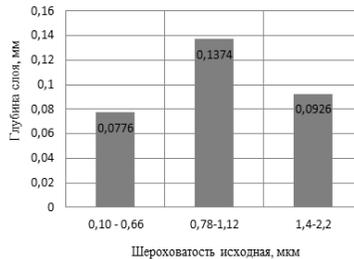


Рисунок 6 – Глубина слоя с высокими значениями микротвердости при различной исходной шероховатости

В результате обработки экспериментальных данных получено распределение значений модуля нормальной упругости по глубине упрочненного слоя и зависимость этой величины от исходной шероховатости упрочняемой поверхности (рисунок 7).

Показано, что максимальные расчетные значения модуля нормальной упругости (308 – 323 МПа) и экспериментально установленной глубины упрочненного слоя (0,137 мм) имеют место при исходной шероховатости 0,7 – 1,1 мкм и 0,78 – 1,12 мкм соответственно.

В результате испытаний на износостойкость установлено, что при исходной шероховатости обрабатываемой поверхности экспериментальных образцов 0,78 – 1,12 мкм, а в соответствии с установленной зависимостью 0,8 – 1,2 мкм на стадии интенсивного износа снижение шероховатости за счет смятия и деформирования микронеровностей происходит более плавно, не вызывая деформационного упрочнения и не приводя к повышению хрупкости поверхности, а на стадии устойчивого трения минимальная интенсивность износа, соответствует диапазону исходной шероховатости экспериментальных образцов 0,78 – 1,12 мкм, а в соответствии с установленной зависимостью 0,6 – 1,1 мкм (рисунок 8).

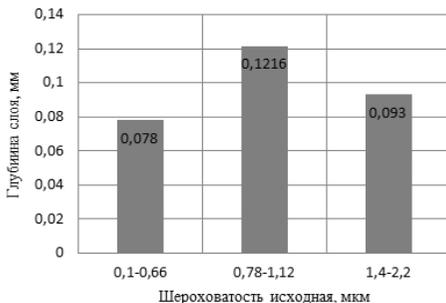


Рисунок 7 – Величина глубины слоя с высокими значениями модуля Юнга при различной исходной шероховатости

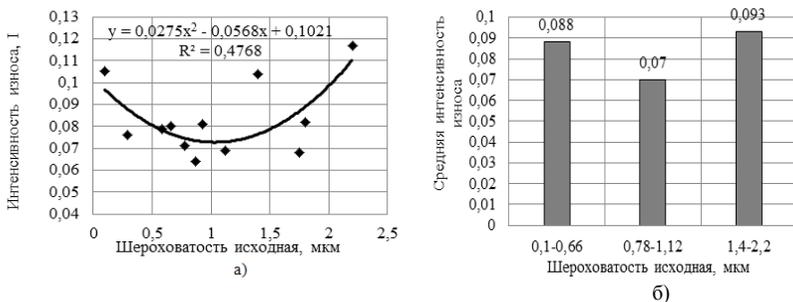


Рисунок 8 - Изменение интенсивности износа (а) и среднее ее значение (б) при различной исходной шероховатости поверхности

Оценку НДС рабочей поверхности разделительных инструментов выполняли, используя показатель напряженного состояния (формула 1).

По результатам оценки НДС инструмента, с нанесенным упрочняющим покрытием, выполненной при применении разработанной математической модели с использованием МКЭ, установлено, что минимальные значения показателя напряженного состояния ( $K_\sigma < 1$ ) на поверхности упрочненного слоя соответствуют исходной шероховатости 0,66 – 1,12 мкм, что хорошо согласуется с другими характеристиками поверхностного слоя именно в указанном диапазоне исходной шероховатости (рисунок 9).

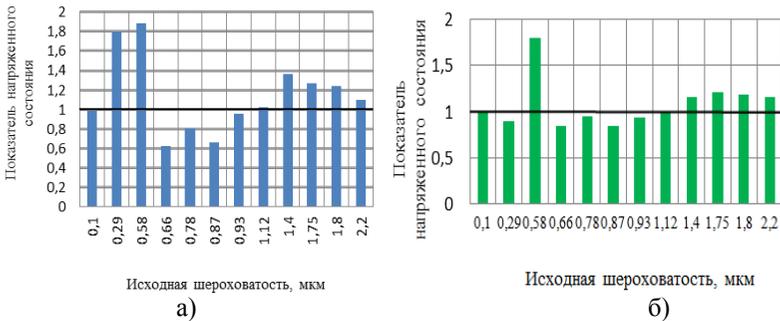


Рисунок 9 - Значения  $K_\sigma$  при различной шероховатости пуансона (а) и матрицы (б)

На основании полученных результатов экспериментальных и теоретических исследований установлено, что при подготовке поверхности к упрочнению ванадием методом ЭИЛ для рабочих поверхностей пуансона и матрицы целесообразно рекомендовать обработку до значений шероховатости в диапазоне 0,8 – 1,1 мкм. Указанный диапазон исходной шероховатости обеспечивает необходимый комплекс механических и эксплуатационных характеристик для повышения долговечности инструмента.

Пятый раздел «Разработка рекомендаций по повышению стойкости разделительных штампов» содержит 3 подраздела. В подразделе 3.1 «Разработка рекомендаций по усовершенствованию конфигурации типового штампа и его упрочнению» представлены рекомендации по повышению долговечности штампового инструмента при выполнении разделительных операций листовой штамповки на примере типового штампа. В подразделе 3.2 «Разработка технологии упрочнения разделительных штампов» на основании проведенных исследований разработана технология локального упрочнения ванадием и новая конструкция разделительного инструмента для листовой штамповки (рисунок 10), обеспечивающие повышение ресурса штамповой оснастки

в 3 – 6 раз при высоком качестве получаемых заготовок и предусматривающие изменение формы режущих кромок пуансона, типовую термическую обработку для обеспечения максимальной твердости, поверхностную обработку перед упрочнением до значений шероховатости 0,8 – 1,1 мкм, нанесение упрочняющего ванадиевого покрытия методом ЭИЛ на рабочие поверхности пуансона и матрицы при  $U = 56 \text{ В}$ ,  $I_p = 3,0 - 3,5 \text{ А}$ ,  $C = 300 \text{ мкФ}$ ,  $R = 10 \text{ Ом}$  и среднем расходе электрода  $0,0083 \text{ г/см}^2$ .

В подразделе 5.3 «Оценка технико-экономической эффективности результатов выполненных исследований» выполнен расчет экономической эффективности предложенных рекомендаций по усовершенствованию конструкции разделительных штампов листовой штамповки и повышению их стойкости методом ЭИЛ ванадием режущих кромок матрицы и пуансона, реализованных в условиях ООО «Луганский завод трубопроводной арматуры «МАРШАЛ» и позволивших повысить срок эксплуатации штамповой оснастки в 3 раза. При этом фактический экономический эффект составил 32366,5 руб, а ожидаемый годовой экономический эффект – 193698,5 руб.

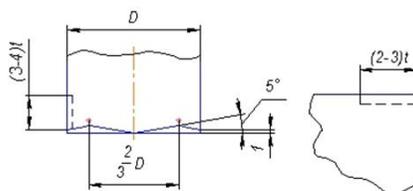


Рисунок 10 - Конфигурация и геометрические и размеры упрочненных зон пуансона в зависимости от  $t$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в повышении эффективности процесса листовой штамповки и увеличении износостойкости рабочих поверхностей разделительных штампов, за счет совершенствования конструкции и методов упрочнения разделительных штампов, при условии обеспечения требуемого качества готовой продукции.

Основные научные и практические результаты работы:

1. На основании анализа литературно-патентных источников определены основные факторы, влияющие на долговечность штампового инструмента и качество получаемых заготовок к которым относятся прочность режущих кромок, зависящая от характера внешних воздействий и

уровня возникающих напряжений, физико-механические свойства материала рабочих частей штампа и штампующего материала.

2. В результате сравнительного анализа различных методов упрочнения установлено, что достаточно эффективным направлением повышения стойкости разделительного инструмента является метод ЭИЛ, позволяющий создавать на локальных участках поверхности твердые, износостойкие слои из различных материалов.

3. Разработана математическая модель, основанная на МКЭ и выполнено комплексное сравнительное исследование НДС контактирующих поверхностей при использовании разделительного инструмента с различной конфигурацией пуансонов, позволившее получить новые сведения о распределении и величине возникающих контактных напряжений, силе на пуансоне и затратах энергии, а также предложить новую конфигурацию пуансона обеспечивающую оптимальное, в сравнении с существующими аналогами, сочетание комплекса основных технологических параметров.

4. Произведена сравнительная оценка величины и распределения напряжений, возникающих при выполнении разделительных операций на поверхности режущих кромок традиционного разделительного инструмента и упрочненного ванадием методом ЭИЛ и установлено, что в поверхностном слое вершины и на участке рабочей поверхности упрочненного инструмента имеет место на 17-45 % меньшее значение величины показателя напряженного состояния и обеспечиваются более щадящие условия эксплуатации инструмента, а также повышение его износостойкости и долговечности.

5. Исследования, проведенные с целью выбора наиболее эффективного материала для упрочнения методом ЭИЛ режущих кромок разделительного инструмента и технологических параметров процесса, показали, что наиболее оптимальное сочетание глубины полученного упрочненного слоя, его твердости, величины зерна образующихся карбидов, схватываемости с поверхностью и теплостойкости имеют место при использовании ванадия в качестве расходуемого электрода, а получение качественного упрочняющего покрытия с высоким уровнем физико-механических свойств обеспечивается при  $U = 56 \text{ В}$ ;  $I_p = 3,0 - 3,5 \text{ А}$ ;  $C = 300 \text{ мкФ}$ ;  $R = 10 \text{ Ом}$ .

6. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что максимальные средние значения глубины упрочненного слоя (0,137 мм) соответствуют диапазону исходной шероховатости поверхности 0,78 – 1,12 мкм, а максимальные расчетные значения микротвердости упрочненной поверхности (2340 – 2370 Нц) и модуля нормальной

упругости (308 – 323 МПа) полученные по установленным зависимостям находятся в диапазоне исходной шероховатости 0,7 – 1,1 мкм.

7. Показано, что для расчета модуля нормальной упругости наиболее целесообразно использовать методику, основанную на зависимости предела прочности от микротвердости, обеспечивающую получение достоверных данных, сопоставимых с экспериментальными результатами металлографических исследований и определения микротвердости.

8. Разработана установка и предложена новая методика оценки относительной износостойкости упрочняющих покрытий, предусматривающая использование в качестве основного показателя коэффициента интенсивности износа, определяющегося отношением площади отпечатка после испытания к первоначальной его площади.

9. В результате испытаний на износостойкость установлено, что при исходной шероховатости обрабатываемой поверхности 0,8 – 1,2 мкм на стадии интенсивного износа снижение шероховатости за счет смятия и деформирования микронеровностей происходит более плавно, не вызывая деформационного упрочнения и не приводя к повышению хрупкости поверхности, а на стадии устойчивого трения минимальная интенсивность износа, соответствует диапазону исходной шероховатости 0,6 – 1,1 мкм.

10. Показано, что минимальные значения показателя напряженного состояния ( $K_\sigma < 1$ ) на поверхности упрочненного слоя соответствуют исходной шероховатости экспериментальных образцов 0,66 – 1,12 мкм.

11. Разработана технология локального упрочнения ванадием и новая конструкция разделительного инструмента для листовой штамповки, обеспечивающие повышение ресурса штамповой оснастки в 3 – 6 раз при высоком качестве получаемых заготовок и предусматривающие изменение формы режущих кромок пуансона, типовую термическую обработку для обеспечения максимальной твердости, поверхностную обработку перед упрочнением до значений шероховатости 0,8 – 1,1 мкм, нанесение упрочняющего ванадиевого покрытия методом ЭИЛ на рабочие поверхности пуансона и матрицы.

12. Внедрение разработанной технологии в условиях ООО «Луганский завод трубопроводной арматуры «МАРШАЛ» позволило повысить срок эксплуатации штамповой оснастки в 3 раза и получить экономический эффект 32366,5 руб.

Отдельные положения диссертации используются в учебном процессе на кафедрах «Технология и организация машиностроительного производства» и «Обработка металлов давлением и металловедение» факультета металлургического и машиностроительного производства ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ».

**Основные научные публикации по теме  
диссертационного исследования**

***Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Луганской Народной Республики***

1. Коваленко, О.А. Исследование процесса ванадирования стали У8А/ В.М. Ершов, О.А. Коваленко // Сб. научн. тр. Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2005. – Вып.20. – С. 271–278.
2. Коваленко, О.А. Выбор метода упрочнения разделительных штампов / В.А. Луценко, О.А. Коваленко, В.М. Ершов // Сб. научн. тр. Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2008. – Вып.27. – С. 171–179.
3. Коваленко, О.А. Исследование влияния исходной шероховатости инструмента, упрочняемого электроискровым легированием на износостойкость штампового инструмента / О.А. Коваленко // Сб. научн. тр. Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2011. – Вып.35. – С. 228–234.
4. Коваленко, О.А. Анализ напряженного состояния поверхности разделительного инструмента после упрочнения электроискровым легированием / В.А. Луценко, О.А. Коваленко, П.В. Боровик // Обработка материалов давлением: сб. научн. тр. – Краматорск: ДГМА, 2011. – Вып.1 (26). – С. 227–231.
5. Коваленко, О.А. Конечно-элементное моделирование разделительных операций листовой штамповки / В.А. Луценко, О.А. Коваленко, П.В. Боровик // Обработка материалов давлением: сб. научн. тр. – Краматорск: ДГМА, 2011. – Вып.3 (24). – С. 15–19.
6. Коваленко, О.А. Оценка механических свойств упрочненного слоя для исследования напряженно-деформированного состояния рабочей поверхности разделительных штампов / П.В. Боровик, О.А. Коваленко // Обработка материалов давлением: Сб. научн. тр. – Краматорск: ДГМА, 2011. – Вып.4 (29). – С. 192–197.
7. Коваленко, О.А. Анализ процесса листовой штамповки при различной конфигурации разделительных штампов / П.В. Боровик, О.А. Коваленко // Обработка материалов давлением: Сб. научн. тр. – Краматорск: ДГМА, 2012. – Вып.1 (30). – С. 276–279.
8. Коваленко, О.А. Анализ исходной шероховатости рабочей поверхности инструмента при упрочнении ванадием методом электроискрового легирования / О.А. Коваленко, П.В. Боровик // Вестник Национального технического университета «ХПИ», серия: «Новые решения в современных технологиях»: Сб. научн. тр. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – Вып.46 (952). – С. 66–71.

9. Коваленко, О.А. Разработка рекомендаций по повышению стойкости разделительных штампов / О.А. Коваленко, С.В. Куберский, А.М. Новохатский // Сб. научн. тр. Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2018. – Вып.53. – С. 121–126.

10. Коваленко, О.А. Усовершенствование конструкции разделительного инструмента кузнечно-прессовых агрегатов / О. А. Коваленко, А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.Е. Бизянов, Н.В. Коваленко // Черная металлургия: бюл. науч.-тех. и эконом. инф., 2018. – № 12. – С. 89–96.

***Статьи в профессиональных журналах и научных сборниках***

11. Патент № 17858 Украина, МПК (2006) B23H 9/00, опубл. 16.10.2006, Бюл. № 10. Способ электроискрового легирования ванадием / Коваленко О.А. –заявл.18.04.2006; номер заявки и 2006 04335.

12. Коваленко, О.А. Повышение стойкости штампов из углеродистой стали диффузионным ванадированием / В.М. Ершов, О.А. Коваленко // Проблемы металловедения и обработки легированных сталей: сб. научн. тр. – К.: Знание, 1994. – С. 31–34.

13. Коваленко, О.А. Структурный эффект упрочнения стали У8 при ванадировании / В.М. Ершов, О.А. Коваленко // Металловедение и обработка металлов: сб. научн. тр. – К.: Знание, 1996. – С.76–79.

***Доклады на научных конференциях и другие научные публикации***

14. Коваленко, О.А. Фазовый состав слоев электроискрового ванадирования / В.М. Ершов, О.А. Коваленко // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов: материалы 5 межд. науч.-техн. конф., 2003г., Харьков. –Харьков: ХФТИ, 2003. – С.123–126.

15. Коваленко, О.А. Research of vanadium alloy process for high-carbon steel / В.М. Ершов, О.А. Коваленко // Dunaújváros «A Dunaújvárosi Főiskola Közleményei», 2007. – P. 105–110.

16. Коваленко, О.А. Методика испытаний износостойких покрытий на машине трения М-22 / О.А. Коваленко, В.А. Маковой // «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти»: матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції г. Київ. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – С. 113-116.

17. Коваленко, О.А. Повышение стойкости разделительного инструмента при использовании методов локального упрочнения / О.А. Коваленко, С.В. Куберский, Н.В. Коваленко, Е.Е. Бизянов // «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства»: сборник тезисов докладов III международной научно-технической конференции, г. Алчевск: ДонГТУ, 2018. – С. 95–97.

## АННОТАЦИЯ

**Коваленко О. А. Разработка технологии локального упрочнения ванадием и конструкции разделительного инструмента для листовой штамповки.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) – ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет». – Алчевск, 2019.

В диссертационной работе изложены результаты исследований по разработке метода локального упрочнения режущих кромок и совершенствованию конструкции разделительного инструмента при выполнении операций листовой штамповки.

Определено влияние наиболее значимых факторов, влияющих на долговечность штампового инструмента и на основные технико-эксплуатационные параметры процесса разделения металла при листовой штамповке. Предложена новая конструкция инструмента для листовой штамповки, а также программные средства по определению НДС упрочненного поверхностного слоя рабочих поверхностей разделительных штампов в процессе выполнения технологических операций.

Разработаны технологические рекомендации по локальному упрочнению методом ЭИЛ ванадием режущих кромок пуансона и матрицы с учетом исходного состояния обрабатываемой поверхности (шероховатость). Изучено влияние исходной шероховатости упрочняемой ванадием методом ЭИЛ поверхности режущих кромок штампового инструмента на физико-механические свойства и износостойкость наносимого покрытия.

Разработана методика, позволяющая выполнять оценку относительной износостойкости инструмента по динамике изменения площадей поперечного сечения нанесенных на режущие кромки отпечатков в процессе испытаний на износ. В результате проведенного анализа различных методик определения Модуля Юнга предложена методика оценки НДС упрочненной ЭИЛ поверхности режущих кромок инструмента и распределения характеристик прочности по глубине слоя.

Результаты исследования изложены в 10 научных статьях.

**Ключевые слова:** листовая штамповка, разделительные штампы, напряженно-деформированное состояние, пуансон, матрица, электроискровое легирование, упрочнение, шероховатость, износ, стойкость.

## SUMMARY

**Kovalenko O.A. Developing the technology for local vanadium hardening and the design of dividing tools for sheet metal stamping.** - Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.02.13 - Machines, units and processes (by industry) - SEI HPE LPR "Donbass State Technical University". - Alchevsk, 2019.

The dissertation work explicates the researches results on developing the method of local hardening of the cutting edges and improving the design of the dividing tool when performing operations of sheet stamping.

Influence of the most significant factors is defined affecting durability of the stamping tool and the key technical and operational parameters of metal dividing process at sheet stamping. The new design of the tool for sheet stamping is offered as well as software on determining the TDS of the strengthened blanket of working surfaces of dividing stamps when performing the technological operations.

Technological recommendations about local vanadium hardening by the ESA method for the cutting edges of a punch and a matrix considering initial condition of the processed surface (roughness) are developed.

The technique has been developed allowing carrying out assessment of relative wear resistance of the tool as well as a technique on determining the Jung Module for TDS assessment of the ESA strengthened surface of the tool's cutting edges.

Research results are presented in 10 scientific papers.

**Keywords:** sheet stamping, dividing dies, stress-strain state, punch, matrix, electrospark alloying, hardening, roughness, wear, durability.