

МОРОЗОВ ОЛЕГ ИГОРЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ШТАМПОВ НА ОПЕРАЦИЯХ ЛИСТОВОЙ
ШТАМПОВКИ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ**

2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2022

Работа выполнена на кафедре «Инновационные технологии в машиностроении» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Табаков Владимир Петрович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инновационные технологии в машиностроении» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Сосенушкин Евгений Николаевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы пластического деформирования», ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Федорова Лилия Владимировна
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Материаловедение» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула

Защита состоится 19 апреля 2023 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.05, созданного на базе ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, Россия, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»: https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Morozov_O_I_Povyshenie_stojkosti_shtampov.pdf

Автореферат разослан «...» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 24.2.379.05,
д.т.н., доцент

Ерисов Я.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из основных характеристик эффективности процессов обработки металлов давлением (ОМД) является стойкость инструментальной оснастки, определяющая эксплуатационный ресурс ее рабочей поверхности. Процессы ОМД характеризуются реализацией «жестких» схем напряженно-деформированного состояния (НДС), наличием ударных и знакопеременных нагрузок, высоким уровнем изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента, что обуславливает необходимость повышения эксплуатационного ресурса рабочих деталей штампового инструмента, работающего на сдвиг и удар.

Степень разработанности. Проблемам повышения стойкости штампового инструмента посвящены работы/труды таких авторов, как Моисеев В.Ф., Фукс-Рабинович Г.С., Досбаева Г.К., Я.Д. Коган, Степанкин И.Н., Поздняков Е.П., Жостик Ю.В., Левашов Е.А., Штанский Д.В., Корнеев Ф.В., Петржик М.И., Черкасова Н.И., Шеин А.А., Антоненкова Г.В., Сотова Е.С., Тарасов С.Ю., А. Хасуи, О. Моригаки, Хмара С.М., Марков А.Г., Герасименко К.С., Кисурина Н.А., Кравцова Е.А., Карачун А. Разработанные в работах данных авторов способы повышения стойкости инструмента за счет поверхностного легирования, термического и пластического упрочнения рабочей поверхности, применения износостойких материалов, сложны и не всегда обеспечивают заданный уровень свойств, зачастую требуют использования дорогостоящих материалов и специализированного оборудования.

Эффективным способом повышения стойкости инструмента является нанесение износостойких покрытий (Табаков В.П., Григорьев С.Н., Верещака А.А., Г.Н. Дубинин) методом ионно-плазменного напыления. Однако в настоящее время данная технология нашла применение лишь в процессах резания и недостаточно используется при ОМД, что существенно ограничивает технологические характеристики процессов ОМД, в частности, листовой штамповки.

В представленных выше работах отсутствуют полноценные результаты изучения и комплексного анализа механизмов изнашивания и разрушения покрытий штампового инструмента, не представлены методики и результаты математического моделирования образования дефектных зон поверхностного слоя инструмента листовой штамповки с покрытием, а также системные данные о деформационных характеристиках поверхностного слоя инструмента с покрытием. Несмотря на многочисленное количество работ зарубежных авторов (К.-D. Bouzakis, N.Michailidis, N. Lontos, A. Siganos, G. Giannopoulos, B.D. Beake и др.), посвященных изучению износа рабочей поверхности инструмента с использованием математического моделирования, данные вопросы еще недостаточно изучены и не имеют достаточного прикладного уровня применительно к инструменту ОМД. Отсутствуют способы оценки факторов, влияющих на износ рабочей поверхности штампового инструмента с использованием математического моделирования, не представлены методики и результаты математического моделирования образования дефектных зон поверхностного слоя инструмента с покрытием, отсутствуют данные о деформационных характеристиках поверхностного слоя инструмента с покрытиями.

Таким образом, **актуальность** научно-технической задачи в рамках заявленной проблемы обусловлена необходимостью повышения эксплуатационной стойкости штампового инструмента на основе разработки корректных моделей изнашивания рабочих поверхностей инструмента и применения износостойких покрытий.

Цель работы: Повышение стойкости рабочих поверхностей штампов на операциях листовой штамповки на основе моделирования НДС штампового инструмента и применения износостойких покрытий.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Проведен анализ причин изнашивания и разрушения инструмента в условиях ударных и сдвиговых нагрузок.

2. Разработаны математические модели разрушения износостойких покрытий и изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента с износостойким покрытием при реализации сдвиговых и ударных деформационных нагрузок.

3. Проведено численное моделирование процессов изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента с износостойким покрытием на операциях вырубки и вытяжки с использованием программного продукта LS-Dyna.

4. Установлено влияние межинструментального зазора на операциях вырубки на НДС, износ и разрушение в рабочей зоне деформации в зависимости от механических свойств обрабатываемого материала и режимов деформирования.

5. Экспериментально исследовано влияние состава износостойких покрытий и технологических режимов процесса деформирования на износ штампового инструмента.

6. Разработаны технологические рекомендации по применению штампового инструмента с износостойким покрытием.

7. Экспериментально показана высокая эффективность штампового инструмента с износостойким покрытием в условиях действующего производства.

Область исследования соответствует п.6 «Методы оценки напряженного и деформированного состояния и способы увеличения жесткости, прочности и стойкости деформирующего инструмента» паспорта специальности 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением.

Объектом исследования являются технологические процессы листовой штамповки. **Предметом исследования** являются процессы изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента и разрушения износостойких покрытий, закономерности связи состава износостойких покрытий и технологических режимов процесса деформирования с НДС штампового инструмента и изнашиванием его рабочих поверхностей на операциях «вытяжка с принудительным утонением» и «вырубка».

Научную новизну имеют следующие разработки:

1) математические модели образования трещин в износостойком покрытии и изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента, учитывающие особенности разрушения хрупкого материала покрытий и формирования зон разрушения в условиях ударных и сдвиговых нагрузок;

2) результаты численного моделирования процессов изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента с покрытием на операциях вырубки и вытяжки с принудительным утонением;

3) закономерности связи процессов изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента и разрушения покрытий с составом покрытий, схемой НДС и технологическими режимами листовой штамповки;

4) регрессионные зависимости оценки влияния технологических режимов листовой штамповки на НДС, износ и разрушение в рабочей зоне деформации при вырубке.

Практическую ценность имеют следующие разработки:

1) технологические рекомендации по составу и структуре износостойких покрытий инструмента операций «вырубка» и «вытяжка с принудительным утонением»;

2) технологические режимы нанесения износостойких покрытий на инструмент операций «вырубка» и «вытяжка с принудительным утонением».

Методы исследования. Исследования процессов изнашивания рабочей поверхности штампового инструмента с износостойкими покрытиями производились на основе положений теории пластичности и теории хрупкого разрушения с использованием 3D-моделирования в САПР КОМПАС и LS-Dyna. Обработку данных, полученных в ходе численного моделирования и эксперимента, производили с использованием метода планирования эксперимента и с использованием математического аппарата программных комплексов Excel и Statgraphics. Экспериментальные исследования производили в производственных условиях АО «Ульяновский патронный завод» и АО «Ульяновский НИАТ» с использованием специализированного технологического оборудования и стандартных и специализированных измерительных приборов: роторная линия модели ЛГ-207, кривошипный пресс КД2128, микротвердомер MicroWizhard НМ-200 Series, микрометры МК-50 и МК-25, растровый оптический микроскоп Olympus GX-41, универсальная испытательная машина УМ-50 и др.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) математические модели образования трещин в покрытиях и изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента, учитывающие особенности разрушения хрупкого материала покрытий и формирования зон разрушения в условиях ударных и сдвиговых нагрузок;

2) результаты численного моделирования процессов изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента с покрытием на операциях вырубки и вытяжки;

3) результаты исследования закономерности связи процессов изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента и разрушения покрытий с составом покрытия, схемой НДС и технологическими режимами листовой штамповки;

4) регрессионные зависимости оценки влияния технологических режимов листовой штамповки на НДС, износ и разрушение в рабочей зоне инструмента, работающего на срез;

5) результаты экспериментальных испытаний, свидетельствующие об эффективности использования износостойких покрытий на основе нитрида титана с целью повышения работоспособности и стойкости рабочих деталей штампового инструмента листовой штамповки;

б) технологические рекомендации по применению штампового инструмента с покрытием на формоизменяющих и разделительных операциях листовой штамповки.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность полученных результатов подтверждена корректным совпадением теоретических зависимостей с результатами экспериментов, проведенных соискателем, а также с опубликованными результатами экспериментов других авторов. Методики построения математических моделей базируются на положениях математической теории пластичности.

Основные положения и материалы работы доложены и обсуждены на 6 международных научно-технических и научно-практических конференциях, а также на научных семинарах кафедр «Инновационные технологии в машиностроении», «Материаловедение и обработка металлов давлением» и НТК Ульяновского государственного технического университета в 2020-2022 гг.

Опытно-промышленные испытания, выполненные в производственных условиях АО «Ульяновский патронный завод», а также АО «Ульяновский НИАТ» подтвердили высокую эффективность штампового инструмента с покрытием. Технологические рекомендации по нанесению покрытий и применению инструмента переданы для использования на АО «Ульяновский НИАТ» (г. Ульяновск) и АО «Ульяновский патронный завод» (г. Ульяновск). Результаты исследований использованы в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению 15.03.01 Машиностроение.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 23 статьи, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 1 статья в издании из базы цитирования Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (100 наименований) и четырех приложений (5 страниц), включает 137 страниц машинописного текста, 71 рисунок и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе анализа работ российских и зарубежных исследователей (Моисеев В.Ф., Фукс-Рабинович Г.С., Досбаева Г.К., Табаков В.П., Григорьев С.Н., Верещака А.А., Г.Н. Дубинин, Я.Д. Коган, Степанкин И.Н., Поздняков Е.П., Жостик Ю.В., Левашов Е.А., Штанский Д.В., А. Хасуи, О. Моригаки, Хмара С.М., Марков А.Г., Герасименко К.С., Кисурина Н.А., Кравцова Е.А., Карачун А., Бартенев Д.В., Павлов И.В., К.-D. Vouzakis, В.D. Veake и др.) рассмотрено современное состояние технологий листовой штамповки. Проанализированы пути повышения износостойкости рабочей поверхности штампового инструмента, выяв-

лены причины снижения его стойкости на формоизменяющих и разделительных операциях листовой штамповки, определены параметры, характеризующие износ штамповой оснастки. Показано, что эффективным путем повышения стойкости инструмента является применение износостойких покрытий. Отмечены нерешенные вопросы, связанные с отсутствием данных о применении покрытий на инструменте листовой штамповки, о механизмах изнашивания рабочих поверхностей инструмента с покрытием и разрушения самого покрытия, отсутствием математических моделей изнашивания рабочих поверхностей инструмента, учитывающих особенности разрушения хрупкого материала покрытия и формирования зон разрушения в условиях ударных и сдвиговых нагрузок. В заключение сформулирована цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены результаты по разработке математических моделей изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента на операциях «вытяжка с принудительным утонением» и «вырубка».

При разработке математических моделей (рисунок 1) использовали программные продукты КОМПАС-3D и LS-Dyna. Для уменьшения времени расчета и повышения точности конечно-элементной сетки реализована сегментная модель (90°), размер конечно-элементной сетки – 0,03x0,03 мм в виде правильных многоугольников (с целью уменьшения погрешности вычисления).

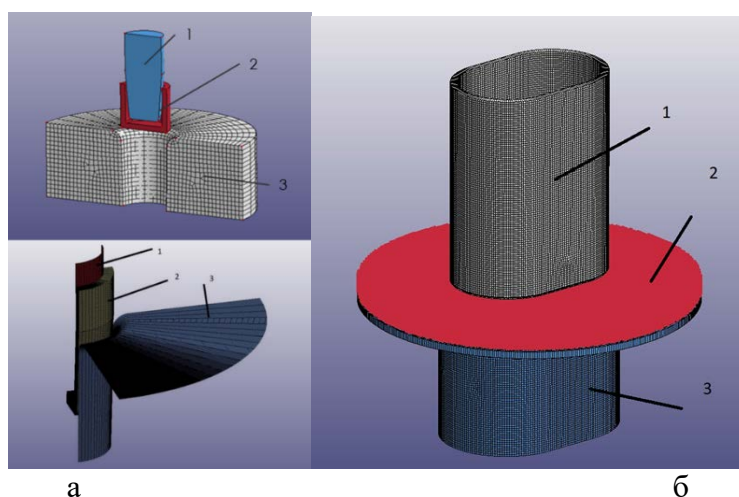


Рисунок 1 - 3D-модели процессов «вытяжка с утонением» (а) и «вырубка» (б):
1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 - матрица

Для определения величины износа ШИ воспользуемся законом Джона Ф. Арчарда, который заложен в расчетном модуле «Wear Process» пакета LS-Dyna. Тогда величину износа можно рассчитать, как:

$$Q = K * \frac{Ft * L}{H}, \quad (1)$$

где Q - объем частиц износа (мм^3), K - *безразмерный масштабный коэффициент (безразмерная эмпирическая постоянная)*, Ft – тангенциальная сила, действующая на поверхности контакта, H – твердость поверхности инструментального материала (ГПа), L – длина контакта (мм).

Неизвестную величину коэффициента K для материала покрытий определяли путем моделирования процесса изнашивания пластины с износостойким покрытием с последующей верификацией с экспериментальными данными износа

контактных площадок. Получены значения безразмерного масштабного коэффициента K для покрытий TiN ($K=1,7 \cdot 10^{-6}$) и TiZrN ($K=0,8 \cdot 10^{-7}$).

Учитывая, что хрупкий материал покрытий отличается от материала инструмента механическими свойствами и механизмом износа, при разработке математической модели его моделирование выполнялось отдельно. Для этого была выбрана модель Джонсона-Холмквиста, учитывающая образование трещин в хрупком материале; предел прочности хрупкого материала изменяется по закону:

$$\sigma = \sigma_0 - D(\sigma_0 - \sigma_f), \quad (2)$$

где $0 \leq D \leq 1$ – поврежденность материала (%), σ_0 – предел прочности исходного неповрежденного материала (МПа), σ_f – предел прочности полностью разрушенного материала (МПа).

Поврежденность хрупкого материала определяется выражением:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f}, \quad (3)$$

где $\Delta \varepsilon_p$ – накопленная условная пластическая деформация за один шаг интегрирования (%), ε_p^f – предельная условная пластическая деформация (%) при определенном гидростатическом давлении p , которая вызывает разрушение материала, и определяется как:

$$\varepsilon_p^f = D_1 \left(\frac{p}{\text{HEL}} + \frac{T^f}{\text{HEL}} \right)^{D_2}, \quad (4)$$

где HEL – предел упругости Гюгонио (ГПа), T^f – напряжение всестороннего растяжения, при котором материал разрушается (ГПа), D_1 и D_2 – константы материала.

Предел прочности поврежденного и не подвергнувшегося разрушению материала определяется выражениями:

$$\sigma_0 = A \left(\frac{p}{\text{HEL}} + \frac{T^f}{\text{HEL}} \right)^n \left(1 + C \ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right); \quad (5)$$

$$\sigma_f = B \left(\frac{p}{\text{HEL}} \right)^m \left(1 + C \ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right), \quad (6)$$

где ε – текущая скорость деформирования, ε_0 – базовая скорость деформирования. Параметры **A**, **B**, **C**, **m**, **n** – константы материала.

Гидростатическое давление определяется уравнением состояния:

$$P = K_1 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) + K_2 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^2 + K_3 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^3, \quad (7)$$

где ρ_0 – начальная плотность материала (кг/мм^3), ρ – текущая плотность материала (с учетом пористости хрупких материалов, рассчитывается автоматически) (кг/мм^3), **K1**, **K2**, **K3** – безразмерные постоянные уравнения состояния материала.

Для определения требуемых параметров разрушения материала покрытия (**A**, **B**, **C**, **m**, **n**, **K1**, **K2**, **K3**) была построена модель процесса образования трещин в покрытии, основанная на определении микротвердости материала методом индентирования пирамидой Виккерса (рисунок 2). Величины рассчитанных параметров разрушения для материалов покрытий TiN и TiZrN представлены в таблице 1.

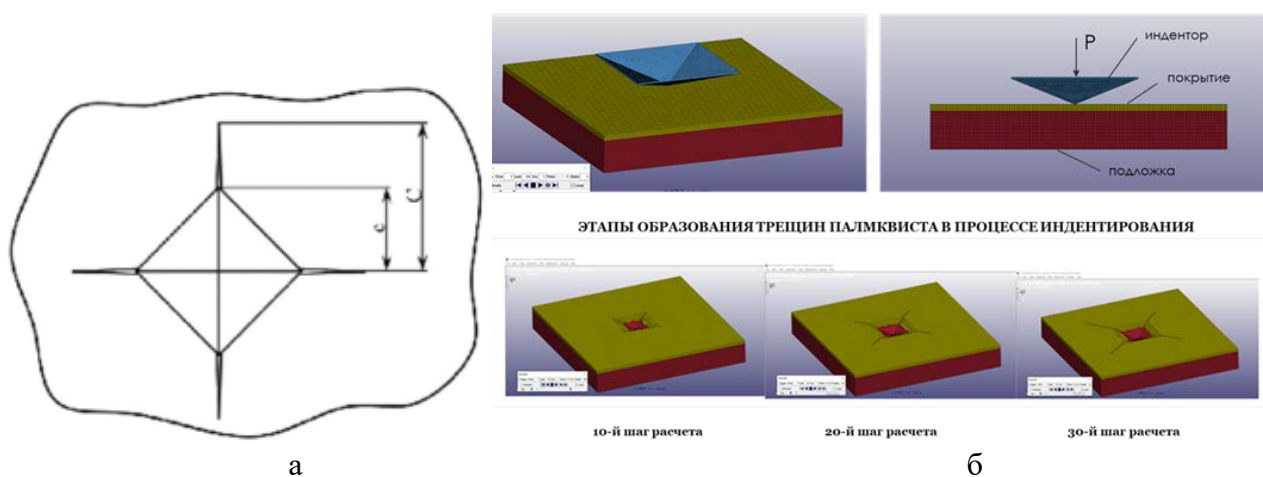


Рисунок 2 - Схема нагружения (а) и этапы образования трещин Палмквиста (б) в материале ИП

Таблица 1 - Значения параметров разрушения материалов ИП

Параметры модели	Покрытие TiN	Покрытие TiZrN	Параметры модели	Покрытие TiN	Покрытие TiZrN
ρ , кг*м ³	5,44	6,83	HEL, ГПа	9	12,38
G, ГПа	127	145	RHEL, ГПа	0	0
Константы прочности			Константы разрушения		
A	0,85	0,85	D1	0,021	0,023
B	0,3	0,4	D2	1,86	1,8
C	0,02	0,013	Константы уравнения состояния		
M	0,35	0,24	K1, ГПа	205	201
N	0,29	0,35	K2, ГПа	0	0
EPSI	1	1	K3, ГПа	0	0
T, ГПа	0,32	0,32	BETA	0	0
SFMAX, ГПа	0,8	0,8			

В процессе численного моделирования выявлено, что при переходе от покрытия TiN к покрытию TiZrN длина трещин Палмквиста уменьшается, что соответствует экспериментальным данным. При этом различие значений трещин Палмквиста с и С, полученных численным моделированием и экспериментальным путем, не превышает 5%. Полученные результаты позволяют говорить о достоверности модели материалов образования трещин в покрытии, необходимых для проведения математического моделирования процессов листовой штамповки с использованием инструмента с износостойким покрытием.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования процесса изнашивания рабочих поверхностей инструмента с износостойким покрытием на операциях «вытяжка с принудительным утонением» и «вырубка».

При численном моделировании процесса изнашивания рабочей поверхности инструмента при вытяжке с утонением исследовали влияние покрытий на износ рабочей поверхности, контактные касательные (τ_{\max}) и нормальные (σ_{\max}) напряжения на рабочей поверхности инструмента и его стойкость (N). Схема износа рабо-

чей поверхности представлена на рисунке 3, результаты исследований на рисунках 4-6.

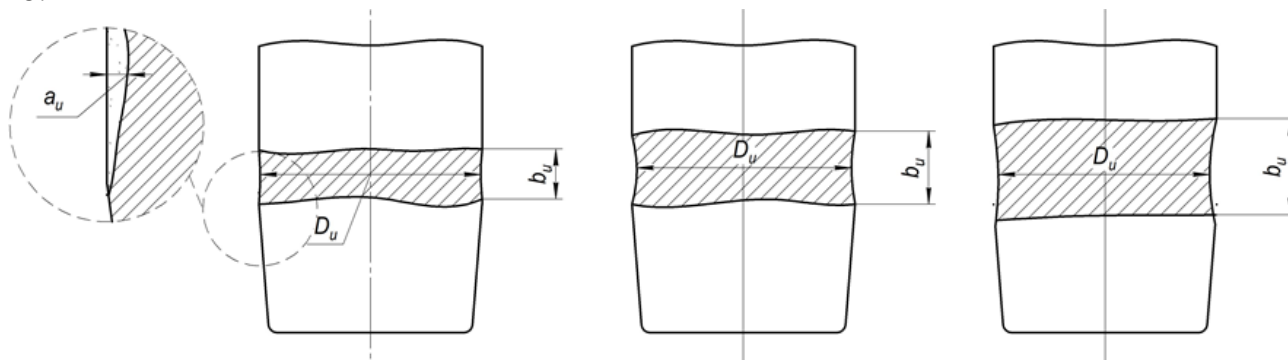


Рисунок 3 - Схема износа рабочей поверхности штампового инструмента:
 $D_{и}$ – диаметр изношенной зоны, $b_{и}$ – длина изношенной зоны,
 $a_{и}$ – максимальная глубина износа

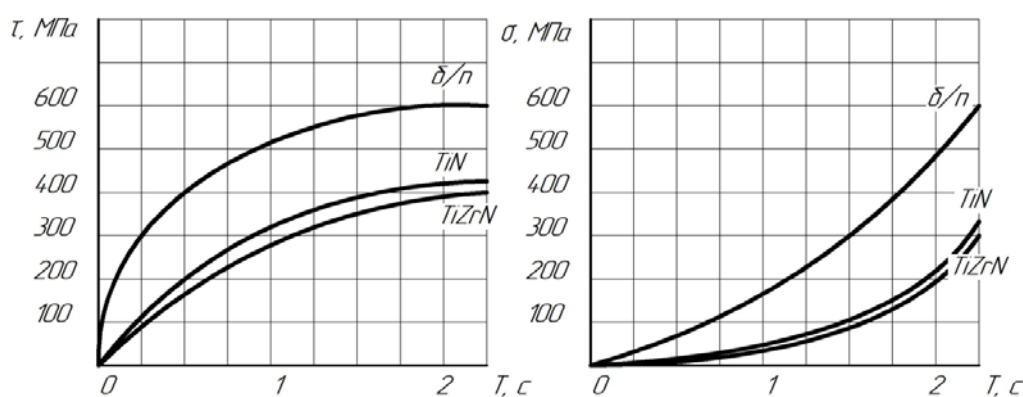


Рисунок 4 - Зависимость касательных τ_{\max} и нормальных σ_{\max} напряжений от времени рабочего хода T

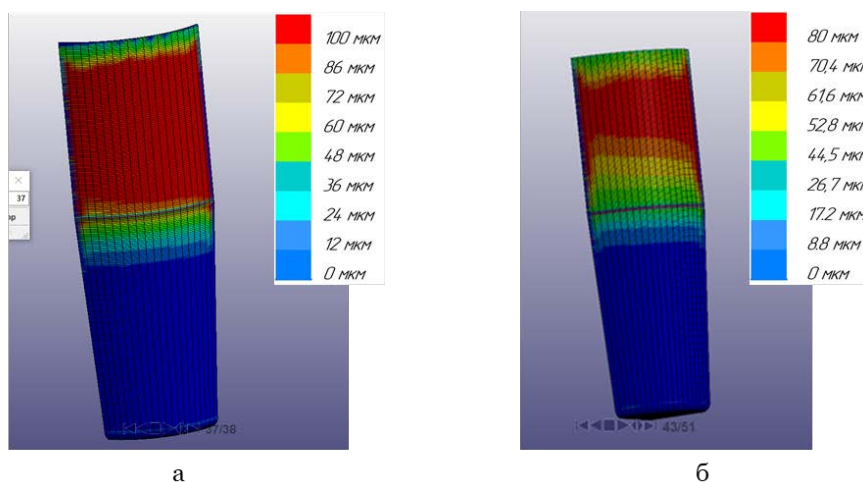


Рисунок 5 - Износ рабочей поверхности штампового инструмента после 600 000 циклов работы:
 а – без ИП, б – TiN

Установлено, что нанесение покрытий уменьшает величину контактных напряжений в 1,4-2 раза (рисунок 4). При этом большее снижение имеет место при нанесении покрытия TiZrN. По сравнению с покрытием TiN оно составило 5% и 16%, соответственно, для нормальных и касательных напряжений. Нанесение покрытий снижает длину изношенной зоны ($b_{и}$) и максимальную глубину износа ($a_{и}$).

Так после 600 000 циклов работы штампового инструмента с покрытием длина изношенной зоны меньше в 1,25 раза, а максимальная глубина износа на 30% (рисунки 5 и 6, а и в). При этом максимальное снижение износа наблюдалось при использовании покрытия TiZrN. Повышение стойкости инструмента при нанесении покрытий при глубине износа, равной 0,15 мм, составило 30%.

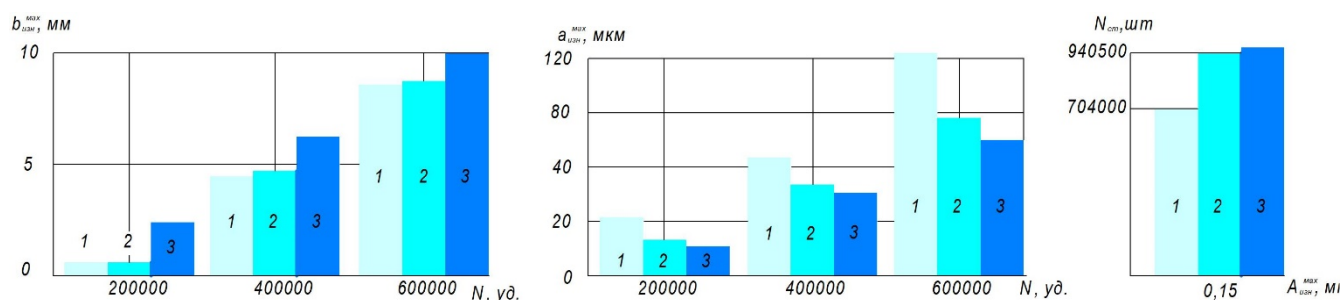


Рисунок 6 - Влияние покрытий на износ рабочей поверхности (а,б) и стойкость ШИ (в):
1 – б/п, 2 – TiN, 3 – TiZrN

При численном моделировании процесса изнашивания рабочей поверхности инструмента на операции «вырубка» исследовали влияние покрытий на стойкость (N), износ инструмента, контактные касательные (τ_{max}) и нормальные (σ_{max}) напряжения на рабочей поверхности инструмента при различной величине межинструментального зазора. Схема износа рабочей поверхности инструмента представлена на рисунке 7, результаты численного моделирования на рисунках 8-10.

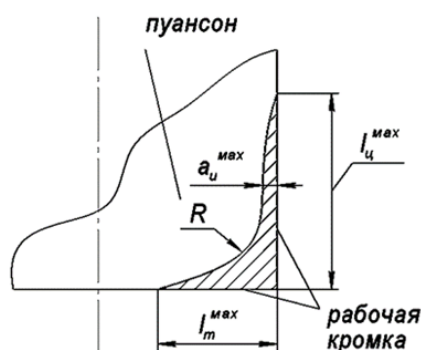


Рисунок 7 - Схема износа рабочей поверхности инструмента при вырубке ($R \leq 0,1$ мм):

l_c – длина износа по цилиндрической поверхности, l_m – длина износа по торцевой поверхности, a_u – максимальная глубина износа цилиндрической поверхности

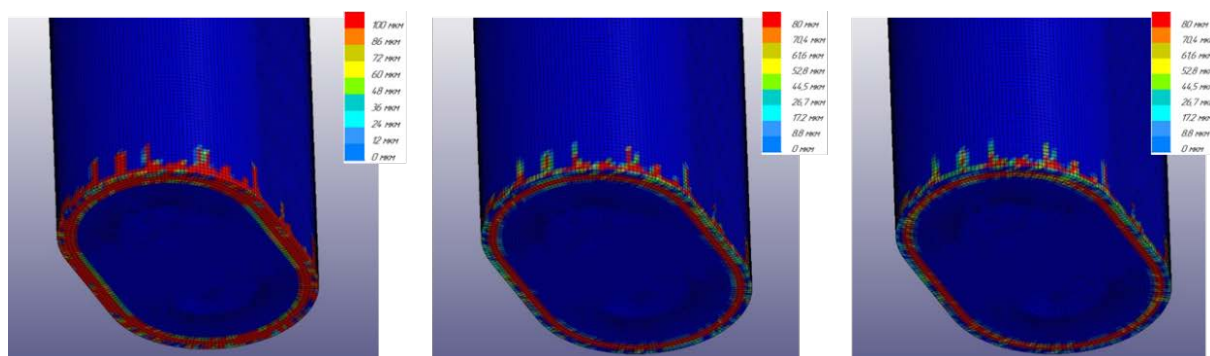


Рисунок 8 - Результаты численного моделирования износа рабочей поверхности пуансона при вырубке ($N_{шт} = const = 400000$ уд.):

а - без покрытия, б – с покрытием TiN, в – с покрытием TiZrN

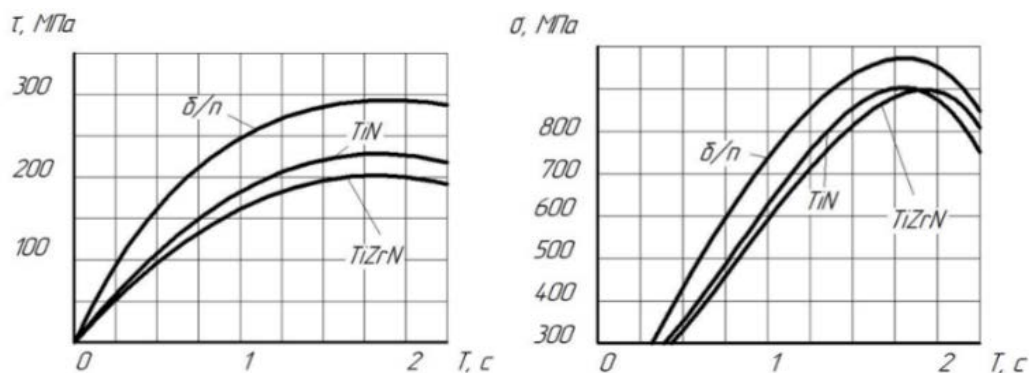


Рисунок 9 - Зависимость касательных τ_{\max} и нормальных σ_{\max} напряжений от времени рабочего хода T при максимальной величине межинструментального зазора Z

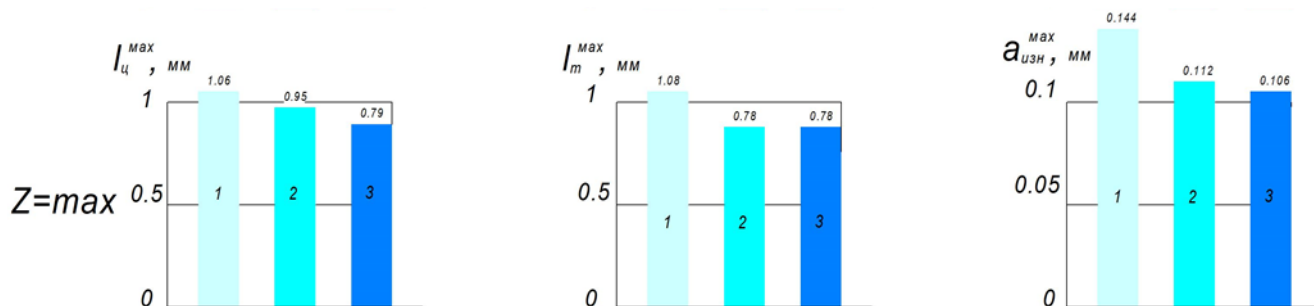


Рисунок 10 - Влияние покрытий на длину износа по цилиндрической ($l_{ц}$), по торцевой ($l_{т}$) поверхности и глубину износа цилиндрической поверхности ($a_{ц}$) при максимальной величине межинструментального зазора Z : 1 – δ/n , 2 – TiN, 3 – TiZrN

Установлено, что нанесение покрытий уменьшает величину контактных касательных напряжений на 30% и нормальных напряжений на 7% (рисунок 9), снижает износ рабочих поверхностей инструмента (рисунок 10). Так, после 400 000 циклов работы инструмента снижение износа рабочих поверхностей по цилиндрической ($l_{ц}$) и торцевой ($l_{т}$) поверхностям составило 11-28%, а глубины износа ($a_{ц}$) – 23-27%. Повышение стойкости инструмента при нанесении покрытий при глубине износа, равной 0,1 мм, составило 1,22-1,26 раза. При этом, более эффективным показало себя покрытие TiZrN.

Были получены регрессионные зависимости (таблица 3) нормальных и касательных (y) напряжений от изменения (x_1) длины износа по цилиндрической $l_{ц}$ и по торцевой поверхности $l_{т}$ и технологического параметра Z/s (x_2).

Анализ полученных в процессе численного моделирования регрессионных зависимостей показал, что отклонение величины межинструментального зазора от оптимального значения на 4-7 % вызывает рост контактных напряжений на рабочей поверхности штампового инструмента и величины их износа на 15-20%.

Таблица 2 - Уравнения регрессии износа рабочей поверхности ШИ

Функция	Уравнения регрессии		
	Без покрытия	С покрытием TiN	С покрытием TiZrN
$\sigma = f(Z/s, l_m)$	$y = 554,509 - 3129,81 * x_1 + 198,113 * x_2$	$y = 145,6 - 2208 * x_1 + 520 * x_2$	$y = -330,25 - 2145 * x_1 + 1125 * x_2$
$\tau = f(Z/s, l_m)$	$y = 194,057 + 181,132 * x_1 + 688,679 * x_2$	$y = -2304,2 + 4262,67 * x_1 + 3293,33 * x_2$	$y = -9227 + 3160 * x_1 + 12700 * x_2$
$\sigma = f(Z/s, l_{ц})$	$y = -238,923 - 121,538 * x_1 + 807,692 * x_2$	$y = 5863 - 12920 * x_1 - 3900 * x_2$	$y = 1186 - 3920 * x_1 - 500 * x_2$
$\tau = f(Z/s, l_{ц})$	$y = -3806,92 + 10638,5 * x_1 + 2807,69 * x_2$	$y = 33906 + 63580 * x_1 - 24700 * x_2$	$y = 7889,78 - 16877,8 * x_1 - 5644,44 * x_2$

Исследовано влияние межинструментального зазора на НДС материала заготовки в процессе вырубki. Для этого была построена упрощенная плоская конечно-элементная модель процесса вырубki (рисунок 11) со следующими параметрами: диаметры пуансонов – 24,5; 24,6; 24,7 мм, диаметр рабочего отверстия матрицы 24,8 мм, межинструментальный зазор соответственно 0,15; 0,1; 0,05 мм, толщина вырубаемой заготовки 1 мм. Были заданы следующие параметры процесса вырубki: тип материала – упругопластический, размер конечно-элементной сетки – 0,03x0,03 мм.

Результаты численного моделирования позволили выявить пять характерных стадий процесса вырубki, отличающихся между собой как характером деформации металла (упругая, упругопластическая, срез), так и величиной пластических напряжений в очаге деформации. Установлен «суженный» отношению к принятому - 4-16% от толщины материала - диапазон рациональных величин межинструментального зазора для сталей марок 08, 20, 45, соответствующий 5-7% от толщины материала, при котором обеспечивается повышение качества поверхности разделения, уменьшение максимальных напряжений в очаге деформации, и как следствие, повышение стойкости инструментальной оснастки. Установлено, что применение покрытий способствует снижению пиковых значений нормальных напряжений в материале заготовки на 7-11%, соответственно для покрытий TiN и TiZrN.

Экспериментальные исследования на испытательном стенде подтвердили результаты численного моделирования. Отклонение значений длины заусенца h от расчетного не превысило 2-5%.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных испытаний штампового инструмента с износостойким покрытием на формоизменяющих и разделительных операциях листовой штамповки.

В условиях производства АО «Ульяновский патронный завод» были проведены экспериментальные исследования штампового инструмента на операции вытяжка с принудительным утонением при изготовлении деталей типа «Гильза». Испытывали пуансоны из инструментальной стали марки У10А без покрытий и с покрытием TiN. Обработываемый материал – сталь, плакированная томпаком. Результаты исследований представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Стойкость инструмента с покрытием на операции «вытяжка с утонением»

№ п\п блоков	Материал инструмента	Покрытие	Частичный износ	Полный износ
			Выполненные операции, шт.	Выполненные операции, шт.
1	Углеродистая инструментальная сталь У10А	TiN	790000	895000
2		б\п	545000	699000
3		TiN	810000	986000
4		б\п	563000	709000

Установлено, что применение покрытий приводит к повышению стойкости инструмента на 39%, при этом, длина изношенной зоны рабочей поверхности уменьшилась на 18%, а максимальная глубина износа – на 23%.

Экспериментальные исследования штампового инструмента на операции вырубка были проведены в условиях производства АО «Ульяновский НИАТ». Исследовали пуансоны из стали 9ХС без покрытия и с покрытиями TiN и TiZrN при вырубке отверстий в заготовках из стали 08пс при изготовлении деталей типа «Профиль». Результаты исследований представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Стойкость инструмента с покрытием на операции «вырубка»

№ п\п блока	Материал инструмента	Покрытие	Нн,мм	Лн,мм	Нст, шт.
1	Инструментальная сталь 9ХС	б/п	0,1	0,07	420000
2		TiN			528000
3		TiZrN			554000

Результаты проведенных исследований показали, что применение покрытий на операции вырубке повышает стойкость инструмента по сравнению с инструментом без покрытия на 26% и 32% для покрытий TiN и TiZrN соответственно. Снижение износа рабочих поверхностей инструмента, при этом, составило 12% и 15,5% по величине $I_{ц}$, 18% по величине $I_{м}$, 29% и 30% по величине $a_{ц}$ соответственно для покрытий TiN и TiZrN.

Анализ представленных результатов показал, что отклонение результатов моделирования и эксперимента не превышают 4-13%. Промышленная апробация штампового инструмента с износостойким покрытием на основе нитрида титана подтвердила высокую точность и практическую значимость полученных аналитических зависимостей и всех установленных закономерностей.

В пятой главе был произведен технико-экономический анализ эффективности использования штампового инструмента листовой штамповки с покрытиями.

Переложена методика расчета изменения относительной стоимости изготовления инструмента при применении износостойких покрытий. В качестве критерия оценки относительной стоимости выбраны стоимость изготовления и стойкость инструмента. Проведенные расчеты для одного комплекта инструмента без покрытия и с покрытиями TiN и TiZrN на операциях «вытяжка с утонением» и «вырубка» показали, что использование покрытий позволит увеличить параметр оценки экономической эффективности использования инструмента на 8% для формоизменяющих операций и на 49-51% - для разделительных операций.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполненных исследований получены следующие научные результаты и выводы:

1. Выявлены причины изнашивания и разрушения штампового инструмента на операциях листовой штамповки.

2. Разработаны математические модели разрушения износостойких покрытий и изнашивания рабочих поверхностей инструмента с покрытиями на операциях вытяжки и вырубке, учитывающие особенности разрушения хрупкого материала покрытий и формирования зон разрушения в условиях ударных и сдвиговых нагрузок.

3. Проведено численное моделирование процесса изнашивания рабочих поверхностей инструмента и разрушения покрытий с использованием программных комплексов КОМПАС-3D и LS-Dyna. Результаты исследований, полученных численным моделированием, подтверждены экспериментальными данными. Отклонения результатов моделирования и эксперимента не превышают 13%.

4. На основе результатов численного моделирования установлено влияние износостойких покрытий на контактные напряжения, износ рабочих поверхностей и стойкость инструмента. Установлено, что на операции вытяжки нанесение покрытий уменьшает величину контактных напряжений в 1,4-2 раза, снижает износ рабочих поверхностей на 25-30% и повышает стойкость инструмента на 30%; на операции вырубки снижение контактных напряжений составило до 30%, износа рабочих поверхностей 11-28% и повышение стойкости инструмента в 1,22-1,26 раза. При этом, наибольшую эффективность независимо от вида операции имеет покрытие TiZrN.

5. Выявлены закономерности связи процесса изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента с составом покрытий, схемой НДС и технологическими параметрами процесса листовой штамповки.

6. Экспериментальные исследования, проведенные в условиях действующего производства, подтвердили эффективность штампового инструмента с износостойким покрытием. Показано, что применение покрытий повышает стойкость инструмента на операции вытяжка с утонением на 39 %, на операции вырубка на 26-32% в зависимости от состава покрытий.

7. Техничко-экономическими расчетами показано, что использование покрытий позволяет добиться увеличения экономической эффективности использования инструмента листовой штамповки на 8% (для формоизменяющих операций) и на 49-51% (для разделительных операций).

8. Технологические рекомендации по нанесению покрытий и применению инструмента переданы для использования на АО «Ульяновский НИАТ» (г. Ульяновск) и АО «Ульяновский патронный завод» (г. Ульяновск). Результаты исследований включены в учебный процесс подготовки бакалавров по направлению 15.03.01 Машиностроение.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Кокорин В. Н. Исследование и анализ напряженно-деформированного состояния разделительных операций листовой штамповки / В. Н. Кокорин, В. П. Табаков, **О. И. Морозов** [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. – 2021. – Т. 19. – № 11. – С. 499-509.

2. Табаков В.П. Повышение стойкости штампового инструмента с износостойким покрытием на формоизменяющих операциях / В. П. Табаков, В. Н. Кокорин, **О. И. Морозов**, Е. Л. Корняков [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 6. – С. 352-358.

3. **Морозов О.И.** Повышение стойкости рабочих поверхностей деталей штампов при использовании комплексной модификации / О. И. Морозов, В. Н. Кокорин, В. П. Табаков [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 3. – С. 317-326.

4. **Морозов О.И.** Физическая модель структурирования системы "подложка - покрытие" в процессах комплексного модифицирования поверхностного слоя рабочих частей штампов и пресс-форм / **О. И. Морозов**, В. Н. Кокорин, В. П. Табаков [и др.] // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2018. – № 11(89). – С. 35-41.

Публикации в журналах, цитируемых в Scopus:

5. Tabakov V.P. Improvement of the working surface resistance of a stamping tool with coating and SSS modeling of the preliminary mechanical activation of the surface layer of the stamp working parts, Tabakov V.P., Kokorin V.N., **Morozov O.I.**, Titov Y.A., Pyushkin M.V., Korniyakov E.L. // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 21, Technologies, Innovation, Quality. Сер. "XXI International Scientific and Research Conference on Metallurgy: Technologies, Innovation, Quality, Metallurgy 2019" 2020. С. 012049.

Публикации в других изданиях:

6. **Морозов О.И.** Моделирование процесса изнашивания штампового инструмента с износостойким покрытием на операциях листовой штамповки / **О. И. Морозов**, В. П. Табаков, В. Н. Кокорин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18. – № 6(210). – С. 246-251.

7. **Морозов О.И.** Исследование эффективности рабочего инструмента листовой штамповки с износостойкими покрытиями / **О. И. Морозов**, В. П. Табаков, В. Н. Кокорин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18. – № 7(211). – С. 302-306.

8. **Морозов О.И.** Моделирование напряженно-деформированного состояния штампового инструмента с износостойким покрытием на разделительных операциях листовой штамповки с использованием программного пакета LS-DYNA / **О. И. Морозов**, В. П. Табаков, В. Н. Кокорин [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22. – № 3. – С. 5-11.

9. Табаков В.П. Моделирование процесса предварительной механической активации подложки композиции покрытие - металл и исследование напряженного и деформированного состояния рабочих поверхностей штампового инструмента / В. П. Табаков, В. Н. Кокорин, **О. И. Морозов** [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т. 15. – № 11(179). – С. 523-528..

10. Кокорин В.Н. Моделирование напряжённо-деформированного состояния металла в очаге деформации при изменении межинструментального зазора / В. Н. Кокорин, **О. И. Морозов**, Н. В. Мишов, Н. П. Шиллер // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 55-й научно-технической конференции. В 3 ч., Ульяновск, 25–30 января 2021 года. Том Часть 1. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2021. – С. 81-84.

11. **Морозов О.И.** Модель деформационного разрушения износостойких покрытий при ударных нагрузениях / **О. И. Морозов**, В. П. Табаков, В. Н. Кокорин, М. В. Илюшкин // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 55-й научно-технической конференции. В 3 ч., Ульяновск, 25–30 января 2021 года. Том Часть 1. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2021. – С. 109-112.

12. **Морозов О.И.** Моделирование и анализ НДС разделительных операций листовой штамповки, Морозов О.И. //Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2021. № 3 (95). С. 21-26.

13. **Морозов О.И.** Моделирование напряженно-деформированного состояния материала инструментальной оснастки процессов ОМД с износостойким ионно-плазменным покрытием / Морозов О.И., Табаков В.П., Кокорин В.Н., Илюшкин М.В. // В сборнике: Инновационные технологии в машиностроении. Международная научно-практическая заочная конференция. Ульяновск, 2020. С. 227-232.

14. **Морозов О.И.** Повышение стойкости штампового инструмента с износостойким покрытием на формоизменяющих операциях, Морозов О.И., Журавлев А.С.// В сборнике: Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России. Материалы V Международной научно-производственной конференции, приуроченной ко Дню Российской науки. Ульяновск, 2020. С. 28-32.