

АО «Объединённая двигателестроительная корпорация»
«Научно-исследовательский институт технологии и организации производства
двигателей»

Деметрашвили Ирина Сергеевна

РАЗРАБОТКА НАУЧНО ОБОСНОВАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ВЫСАДКИ
ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВА ХН60ВТ

Специальность 2.5.7. «Технологии и машины обработки давлением»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., с.н.с. Бурлаков Игорь Андреевич

Москва – 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В машиностроении значительное распространение получили неразъемные соединения. Из всех известных видов таких соединений наиболее востребованы заклепочные, сварные, паяные и клеевые способы сборки.

До появления современных видов сварки заклепочные соединения были распространены повсеместно, однако и в настоящее время этот вид технологии для монтажа узлов достаточно активно применяют в некоторых областях техники, например, в авиастроении. Многолетний опыт эксплуатации летательных аппаратов продемонстрировал высокую стойкость клепаных соединений к вибрационным нагрузкам, отсутствие структурных изменений и деформаций в металле из-за нагрева, что наблюдается при сварке, относительную простоту процесса, возможность соединять заготовки из разных марок сплавов и из несвариваемых между собой материалов, легкость определения дефектов при визуальном осмотре из-за отсутствия некоторых заклепок в зонах соединения, а также остановку усталостных трещин у отверстий.

Высокие скорости летательных аппаратов, наличие герметичных швов и работающих обшивок, необходимость точного исполнения обводов внешней поверхности агрегатов и высокого качества их отделки вызывают повышенные требования к заклепочным соединениям, для создания которых применяют заклепки различной формы.

Заклепки изготавливаются из различных материалов, в том числе из жаропрочных. Формообразование заклепок из высокопрочных материалов, применяемых в авиадвигателестроении, сопровождается частым выходом из строя высадочной оснастки из-за высоких напряжений. Для повышения ее стойкости применяют составной инструмент со вставками из твердого сплава типа ВК10 и ВК15, которые для защиты от разрушительных растягивающих напряжений бандажируют стальной обоймой с натягом.

Несмотря на применение твердосплавных вставок в штамповой оснастке стойкость инструмента в ряде случаев составляет менее 1,5 тысяч заклепок до восстановления или замены инструмента.

Процесс высадки заклепок зависит от множества факторов, включая механические свойства штампуемого металла, силовые параметры процесса высадки, а также качество используемой штамповой оснастки, в том числе уровень натяга.

Значительный вклад в развитие методов повышения стойкости штампового инструмента в процессах холодной объемной штамповки и высадки внесен трудами видных ученых – представителей российских и зарубежных научных школ, среди которых Безухов Н.И., Геллер Ю.А., Зуев В.М., Кенько В.М., Крагельский И.В., Лахтин Ю.М., Смирнов-Аляев Г.А., Степанкин И.Н., Сторожев М.В., Феодосьев В.И., Шофман Л.А., Голубев О.В., Липатов Н.И., Борисов В.И., Хомяк Б.С., J. Billigmann, Altan T., Avitzur B., Mohr C., Johnson K.L. и многие другие.

Одним из ключевых факторов, влияющих на стойкость холодновысадочного инструмента, является напряженное состояние в

материалах матрицы и пуансона, создаваемое путем их запрессовки в бандаж с натягом. Теоретической основой для расчета такого состояния служат классические решения для толстостенных цилиндров (Ламе Г., Тимошенко С.П.).

В своих работах И.Н. Степанкин и В.М. Кенько экспериментально и численно доказали, что создание предварительного сжимающего напряжения за счет бандажирования является наиболее эффективным способом сдерживания развития усталостных трещин – основной причины выхода из строя деформирующего инструмента.

Однако проведенный анализ выявил, что существующие методики выбора рациональных параметров бандажирования носят общий или эмпирический характер и не учитывают напряжение текучести обрабатываемого материала. Это приводит к технически необоснованным решениям при переходе на высокопрочные сплавы и ограничивает возможности проектирования деформирующего инструмента для конкретного материала заготовки.

Поэтому повышение стойкости деформирующего инструмента для холодной высадки заклепок из высокопрочных сплавов с определением реологической модели заклепочного материала и на основе установления взаимосвязи прочности материала высаживаемых заготовок и деформирующего инструмента и определения рациональной величины натяга является актуальной научно-технической задачей.

Цель диссертационной работы

Определение путей повышения стойкости холодновысадочного деформирующего инструмента с учетом прочностных свойств деформируемых материалов.

Задачи исследования:

1. Исследовать реологические свойства никелевого сплава ХН60ВТ для скоростей деформации 0,001, 0,01 и 0,4 с⁻¹ и температур 20, 100, 200, 300, 350 и 450 °С.

2. Определить напряженно-деформированное состояние холодновысадочного деформирующего инструмента путем сопоставления энергосиловых параметров процесса, определенных моделированием, с данными, полученными в ходе натурного эксперимента.

3. Оценить влияние величины натяга в холодновысадочном деформирующем инструменте с учетом прочностных характеристик высаживаемых материалов заготовок на напряженное состояние твердосплавных вставок.

4. Разработать рекомендации по увеличению срока службы холодновысадочного деформирующего инструмента, используемого для производства заклепок, с учетом механических свойств применяемых материалов.

Объект исследования: процесс холодной высадки заготовок.

Предмет исследования: стойкость деформирующего инструмента.

Научная новизна работы:

1. Установлены зависимости напряжений текучести никелевого сплава ХН60ВТ от температуры, скорости и величины деформации.

2. Определено влияние напряженно-деформированного состояния и температуры заготовки из сплава ХН60ВТ на напряженное состояние составного инструмента.

3. Найден способ определения рациональной величины натяга для изготовления деформирующего инструмента с твердосплавными вставками из сплава ВК15 в зависимости от механических характеристик материалов высаживаемых заклепок, обоймы и вставок.

4. Выявлено влияние смазочных материалов на напряженное состояние формообразующей оснастки при холодной посадке заклепок.

Теоретическая значимость работы

1. Получена реологическая модель никелевого сплава ХН60ВТ для диапазона температур 20–450 °С, позволяющая определять напряженно-деформированное состояние материала при холодных процессах формообразования, в том числе при получении заготовок холодной посадкой, а также пополнить базу деформируемых материалов в расчетных компьютерных программах, предназначенных для моделирования процессов обработки металлов давлением.

2. Разработана расчетная модель по определению натяга, гарантирующего отсутствие сдвига вставки и пластической деформации обоймы в рабочих условиях, учитывающая параметры составного деформирующего инструмента (диаметр, натяг, материалы обоймы и вставки из твердого сплава) от прочностных характеристик материала высаживаемой заклепки.

3. Исследованы тепловые параметры процесса автоматической посадки заклепок, что подтверждено экспериментально.

Практическая значимость работы

Практическая значимость заключается в том, что результаты проведенного в рамках диссертационной работы компьютерного и физического моделирования процесса посадки с анализом напряженного состояния деформирующего инструмента и заготовки явились основой для разработки и внедрения в производство технических рекомендаций по повышению стойкости оснастки.

Методы исследования

В работе использованы апробированные методы, включая оптическую и электронную металлографию, механические испытания на сжатие, а также измерение микротвердости. Экспериментальные исследования проводились на лабораторных испытательных машинах LFM50 и LFM250 с регистрацией положения деформирующего инструмента, силы и температуры во время рабочего хода.

Теоретические исследования включали математическое моделирование с использованием метода конечных элементов. Для обработки результатов экспериментальных исследований реологического поведения изучаемого сплава расчеты выполнялись с применением программного обеспечения MATLAB и Excel. Для конечно-элементного анализа процесса формообразования заготовок применялось программное обеспечение QForm 11.

Положения, выносимые на защиту:

1. Реологическая модель материала ХН60ВТ для диапазона температур 20–450 °С, позволившая пополнить базу данных деформируемых материалов и обеспечивающая возможность анализа процессов обработки металлов давлением в холодном состоянии различных технологических процессов.

2. Расчетная модель составного инструмента, учитывающая геометрию соединения, механические свойства материалов обоймы, твердосплавной вставки и высаживаемой заклепки и величину натяга, исключая сдвиг вставки и пластическую деформацию обоймы в рабочих условиях.

Достоверность результатов. представленных в диссертационной работе, подтверждается применением современного аттестованного испытательного и металлографического оборудования, специализированных станков и методов определения температурно-скоростных параметров в процессе формообразования заготовок из никелевого сплава ХН60ВТ, а также современных конечно-элементных методов численного моделирования процессов пластического формообразования заготовок. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными данными.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы были представлены на следующих конференциях:

- Конкурс инженерных работ среди молодых сотрудников ПК «Салют» и филиалов (3 место), 2024;
- Конференция Тульского политехнического университета, 2025 г.;
- XXII научной конференции «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского»;
- XV Национальной научно-технической конференции (полуфиналист);
- QFORM ФОРУМ-2025 в МГТУ им. Баумана;
- Научно-техническая конференция «Климовские чтения – 2025. Перспективные направления развития авиадвигателестроения» (Санкт-Петербург).
- XII Международный технологический форум «Инновации. Технологии. Производство» (г. Рыбинск, Ярославская область).
- XII международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг», 17–23 мая 2026, г. Сочи.

Личный вклад автора. Диссертант принимала непосредственное участие в обсуждении и постановке цели и задач работы, в экспериментах по определению реологических свойств сплава ХН60ВТ, посадке заклепок и измерению температуры, а также в анализе, обработке и интерпретации полученных данных, включая результаты конечно-элементного моделирования.

Автором разработана расчетная модель для определения рациональной величины натяга в составном деформирующем инструменте. Диссертант участвовала в подготовке публикаций и представляла наиболее значимые результаты на российских и международных конференциях.

Реализация работы. Результаты выполненных исследований внедрены в производство филиалов АО «ОДК» «ОДК-Салют» и «МКБ «Горизонт».

Публикации. По теме диссертации опубликовано девять научных работ, в том числе три статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК по специальности 2.5.7. «Технологии и машины обработки давлением», две статьи – в журнале, включенном в международные наукометрические базы Scopus/ Web of Science.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, приложения. Текст диссертации изложен на 151 странице машинописного текста, иллюстрирован 63 рисунками, содержит 18 таблиц, 4 приложения. Библиографический список включает 126 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной работы, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимости, а также перспективы применения на промышленных предприятиях.

В первой главе рассмотрена роль заклепочных соединений в различных областях техники. Показано, что надежность заклепочных соединений в авиастроении во многом определяется инструментом для холодной высадки, поэтому рассмотрены условия его работы, основные виды выхода его из строя (износ, усталостное разрушение, пластическая деформация и схватывание) и способы повышения стойкости оснастки.

В настоящий момент заклепки изготавливают холодной высадкой на многопозиционных автоматах, что, помимо высокой производительности, обеспечивает формирование благоприятной волокнистой структуры металла заклепок, в результате чего повышаются прочность деталей и сопротивление динамическим нагрузкам.

Стойкость деформирующего инструмента при холодной высадке зависит от многих факторов: от механических характеристик материала матриц и пуансонов, используемых штампуемых материалов, влияющих на величину контактных напряжений на поверхности формообразующего инструмента, применяемых смазочных материалов и т. д.

Высокие напряжения, возникающие в деформируемой заготовке (1 400 МПа), приводят в ряде случаев к разрушению инструмента после выпуска партии в количестве менее 1,5 тысяч заклепок, что характеризует актуальность работы. По результатам анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе представлена методика выполнения работы. В качестве основного объекта исследования был выбран никелевый сплав ХН60ВТ, используемый для соединения узлов ответственного назначения. Для сравнительного анализа влияния прочностных характеристик материалов на напряженно-деформированное состояние в высадочной оснастке также исследовали сплавы БрХ0,8, АМг5, 12Х18Н10Т и медь марки М1.

Подготовку образцов для лабораторных исследований проводили методом электроэрозионной резки на станке модели ONA AF-25. Химический состав материалов определяли с помощью оптического эмиссионного спектрометра OBLF MVS1000 (Германия).

Для определения реологической модели сплава ХН60ВТ были проведены механические испытания на сжатие. Испытания осуществляли на универсальных

машинах LFM50 и LFM250. Была выполнена осадка 54 цилиндрических образцов диаметром 4 мм и высотой 5 мм со скоростями деформации 0,001, 0,01 и 0,4 с⁻¹ при температурах 20, 100, 200, 300, 350 и 450 °С. Процесс проводился на воздухе при заданной температуре без применения смазок. Постоянная скорость деформации обеспечивалась программируемым перемещением траверсы.

Для описания сопротивления деформации сплава использовали два подхода. В первом случае экспериментальные зависимости сила–ход аппроксимировали моделью Хензеля-Шпиттеля с определением девяти эмпирических коэффициентов. Во втором случае в среде Microsoft Excel выполнили преобразование кривых сила–ход в истинные напряжения и деформации и получили табличную функцию. На основе полученных данных (коэффициентов реологической модели и табличных значений) в программном комплексе QForm 11 провели моделирование холодной высадки заклепок.

Экспериментальные исследования процесса высадки заклепок осуществляли на холодновысадочном автомате мод. СН-3, а также на испытательной машине LFM250 со скоростью перемещения деформирующего инструмента 2 мм/мин с записью диаграмм «ход-сила».

Для изучения микроструктуры полученных заготовок применяли оптическую металлографию на бинокулярном микроскопе Olympus Delta (увеличения ×100, ×500, ×1000). Исследование с увеличением ×2000 выполняли на сканирующих электронных микроскопах FEI QUANTA 650 и JSM-5600. Измерение микротвердости по Виккерсу проводили на приборе DuraScan-20 с нагрузкой на индентор 1 Н.

Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния в ходе высадки заклепок, а также математическое моделирование процессов формообразования выполнены методом конечных элементов в программном комплексе QForm с использованием найденных реологических моделей.

В третьей главе представлены результаты теоретических исследований. Для корректного моделирования процесса холодной высадки заклепок были определены реологические модели исследуемого материала – никелевого сплава ХН60ВТ.

Обработка экспериментальных данных кривых «сила–ход» осуществлялась двумя способами: аппроксимацией с помощью эмпирической модели Хензеля-Шпиттеля (определены 9 коэффициентов модели, отражающие зависимость напряжения текучести от температуры (T), величины деформации (ε) и скорости деформации ($\dot{\varepsilon}$) (1)) (таблица 1, рисунок 1) и прямым пересчетом в напряжения и деформации с формированием табличной зависимости (рисунок 2).

$$\sigma_i = A \exp(m_1 T) T^{m_2} \varepsilon_i^{m_3} \exp(m_4 / \varepsilon_i) (1 + \varepsilon_i)^{m_5} \exp(m_7 \varepsilon_i) \dot{\varepsilon}^{m_3} \dot{\varepsilon}^{m_8 T}, \quad (1)$$

где:

$A, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_7, m_8, m_9$ – неизвестные коэффициенты модели сопротивления деформации.

Коэффициенты уравнения (1) были определены с помощью вычислительных программ MATLAB и EXCEL методом Левенберга-Маркардта.

Таблица 1 – Коэффициенты уравнения Хензеля–Шпиттеля для сплава ХН60ВТ

Температура деформации $T, ^\circ\text{C}$	Коэффициенты								
	A	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_7	m_8	m_9
20-200-450	1243,13	$4,70e^{-05}$	-0,09344	-0,00429	-0,10023	-0,00016	-0,13291	$9,05e^{-06}$	-0,02991

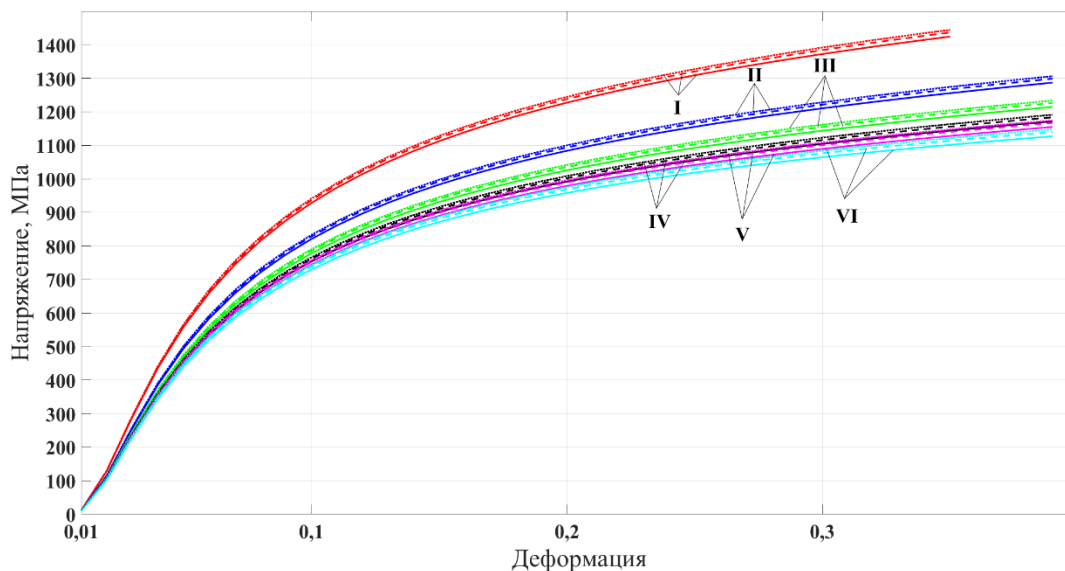
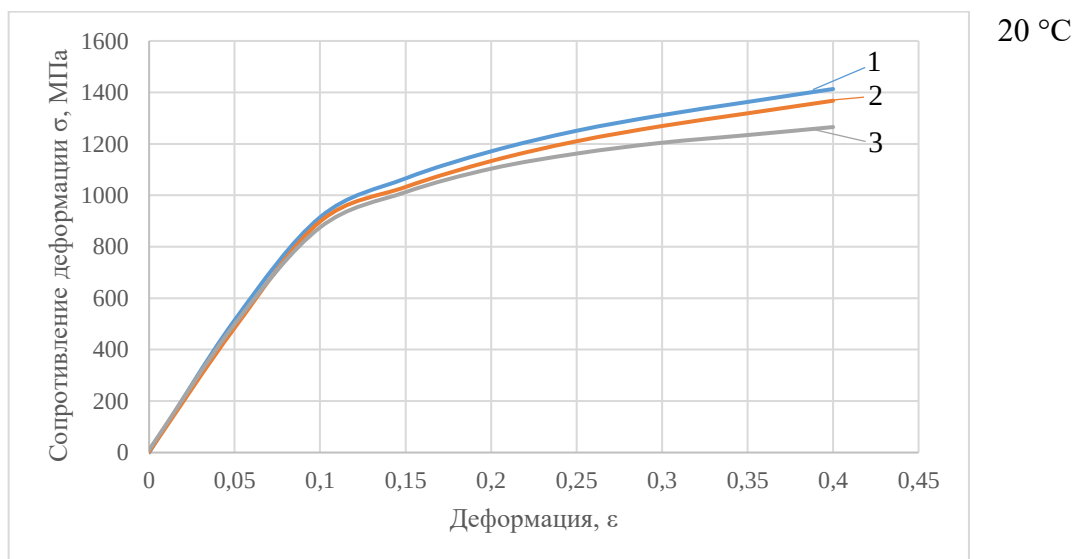


Рисунок 1 – Зависимости напряжений текучести никелевого сплава ХН60ВТ

от деформации при различных температурах и скоростях деформации

I – 20 °C; II – 100 °C; III – 200 °C; IV – 300 °C; V – 350 °C; VI – 450 °C

(цвета кривых соответствуют температуре; тип линии соответствует скорости деформации: — — — — 0,4 с⁻¹; - - - - 0,01 с⁻¹; ••••• 0,001 с⁻¹)



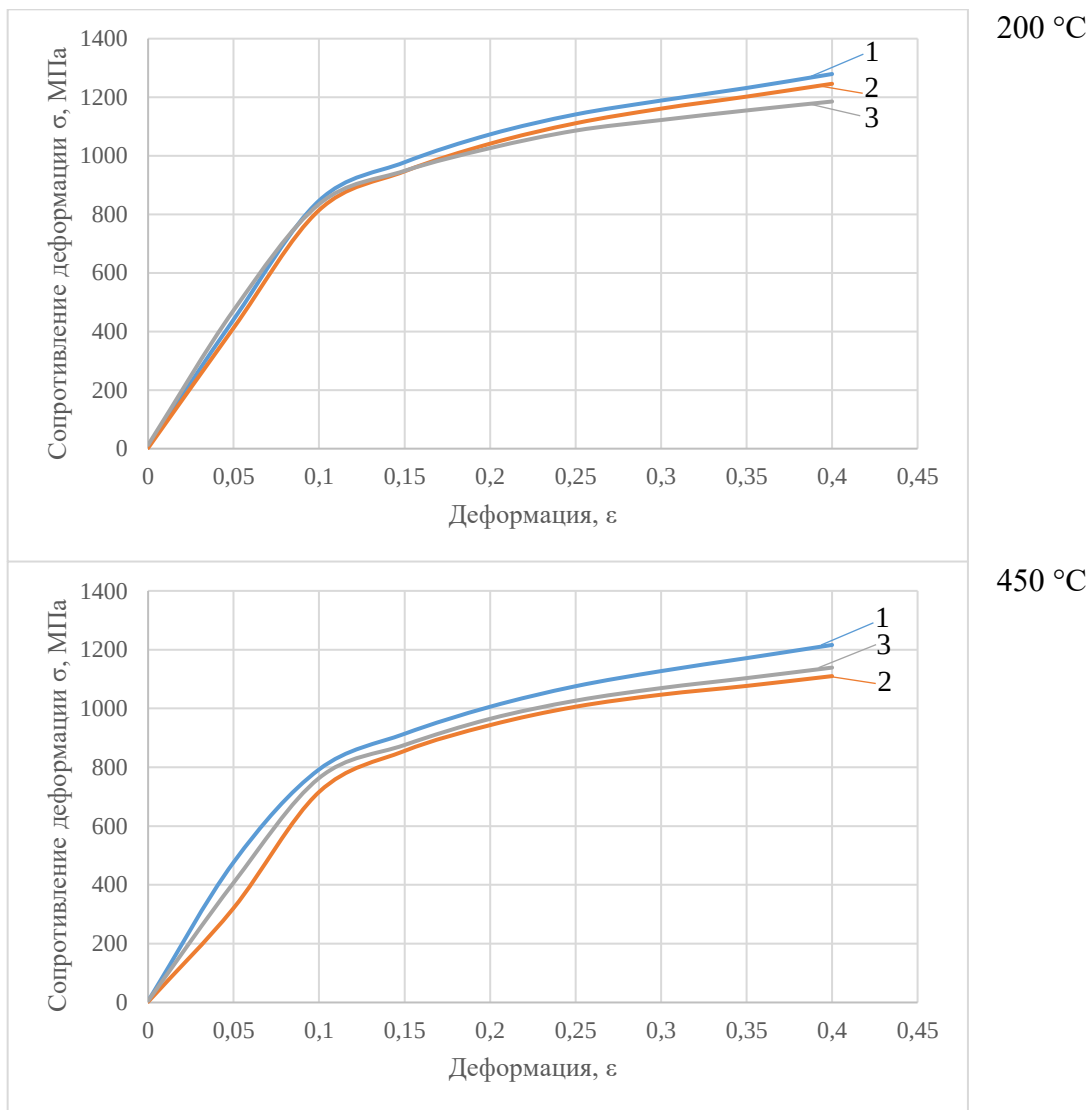


Рисунок 2 – Реологическая модель сплава ХН60ВТ в виде табличной функции

Сравнение диаграмм зависимостей силы деформации от хода инструмента, полученных моделированием процесса высадки с найденными моделями, показали их различие до 10 % в среднем (рисунок 3), дальнейшие исследования проводили с применением реологической модели в виде табличной функции.

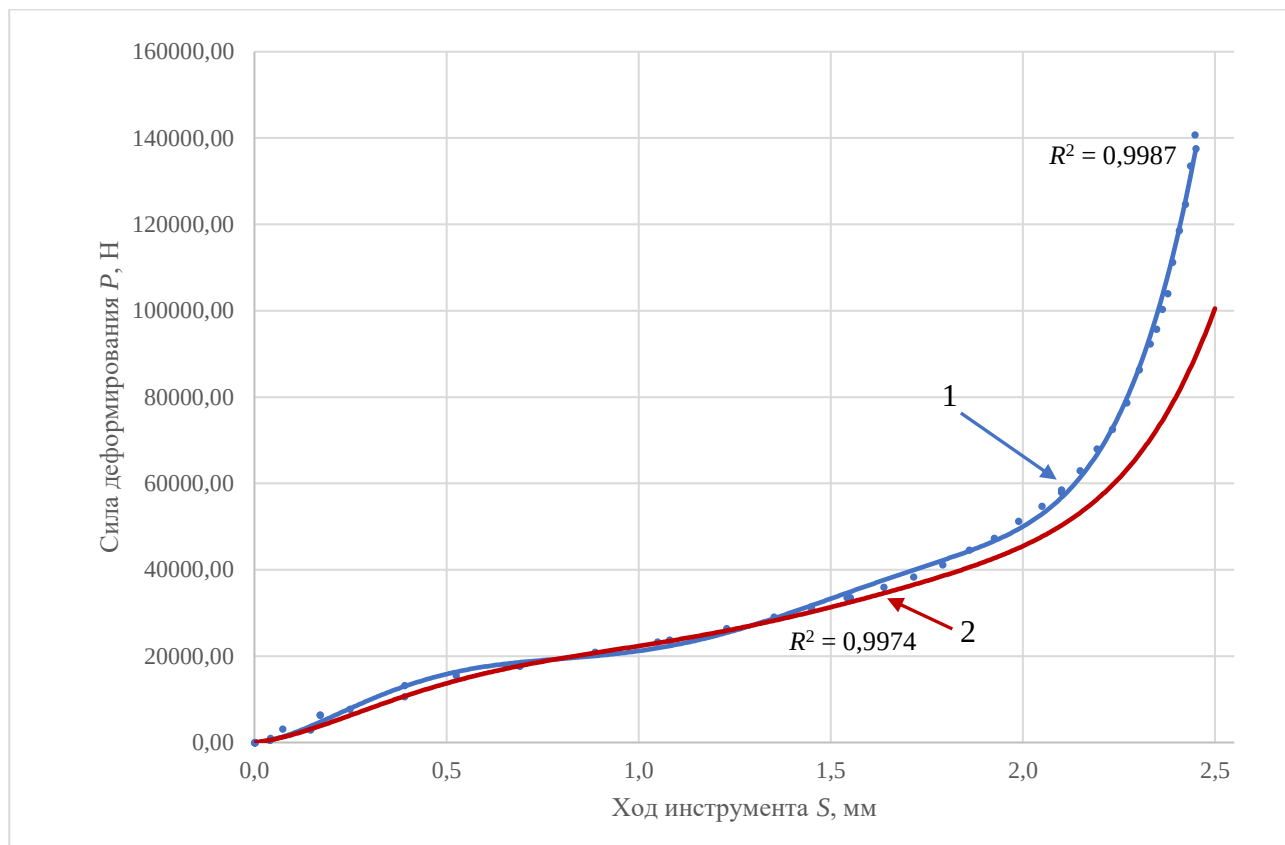


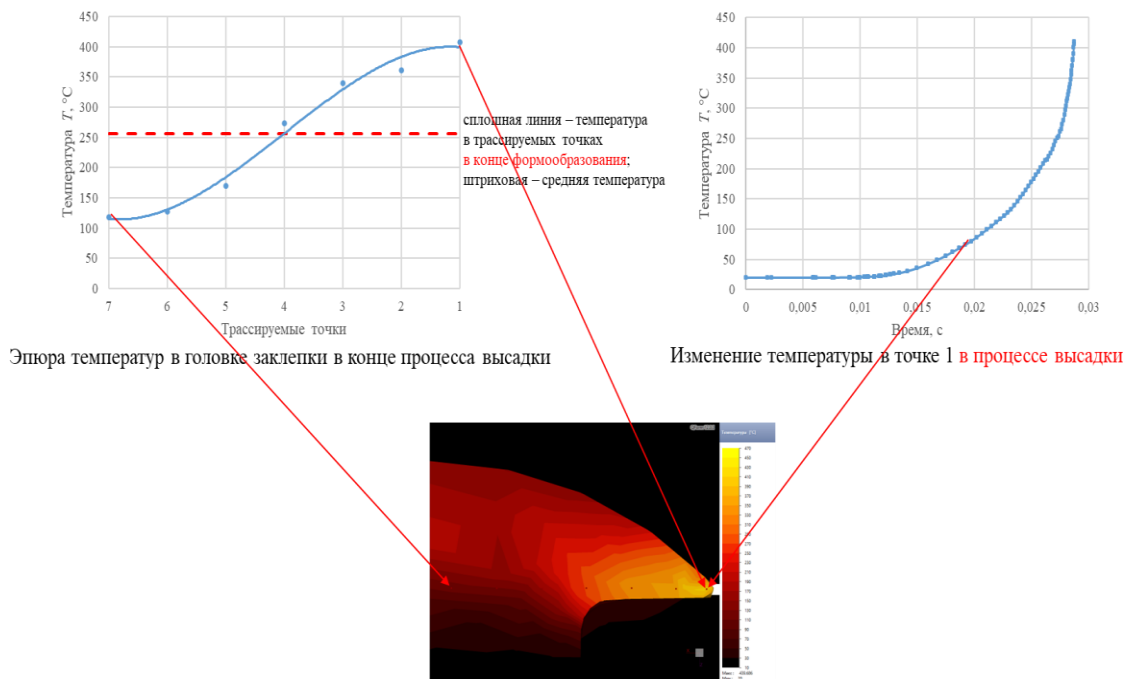
Рисунок 3 – Зависимость силы формообразования заклепки из сплава ХН60ВТ от хода деформирующего инструмента
1 – табличная функция, 2 – модель по Хензелю-Шпиттелю

Анализом влияния условий трения, выполненным путем варьирования фактором трения по закону Леванова в модели, было установлено, что сила деформирования по сравнению с идеальными условиями ($m = 0$) увеличивается на 30 %, что говорит о необходимости применения эффективных смазок для снижения силовой нагрузки на инструмент.

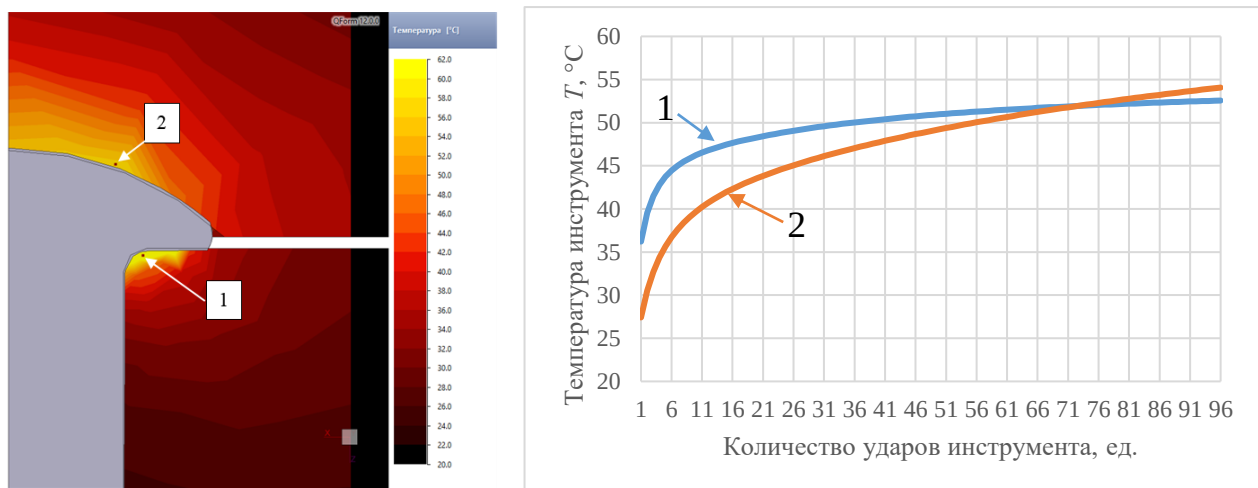
С использованием определенной реологической модели материала заготовки и материала инструмента, взятой из базы данных программы, проведено моделирование процесса высадки заклепок, что позволило исследовать напряженно-деформированное и температурное состояния системы «заготовка–инструмент».

По мнению ряда исследователей, нагрев инструмента может приводить к ослаблению или полной потере предварительного натяга, необходимого для обеспечения его работоспособности.

Моделирование методом трассируемых точек показало, что в процессе формообразования происходит неравномерный нагрев заготовки (рисунок 4). Наибольшая температура наблюдается в конечный момент деформации в зоне интенсивного пластического течения (точка 1), достигая значений порядка 400 °С. При этом средняя температура по объему деформируемого материала составляет около 250 °С. Полученные температурные поля демонстрируют динамику нагрева заготовки в ходе высадки. Выделяемое при пластической деформации тепло передается контактирующим элементам деформирующего инструмента.



Моделирование циклического процесса высадки 96 заклепок (среднее количество из одного прутка) показало, что наиболее интенсивный рост температуры в инструменте, особенно в матрице, наблюдается в начальный период работы (первые 20–30 ударов). К 50-му циклу температурные изменения стабилизируются. Усредненная температура оснастки в установившемся режиме составляет около 55 °С, что подтверждено данными натурных измерений (рисунок 5).



Проведенное исследование выявило прямую зависимость температурного режима от скорости деформирования. При низких скоростях, характерных для лабораторных условий (испытательная машина, $V = 0,033$ мм/с), нагрев заготовки незначителен ($T \approx 22$ °С). В реальных производственных условиях на холодновысадочном автомате, кинематическая схема которого показана на

рисунке 6, скорость ползуна изменяется от 131 до 0 мм/с, и наблюдается существенный расчетный рост температуры материала заклепки ($T \approx 250$ °С, см. рисунок 4).

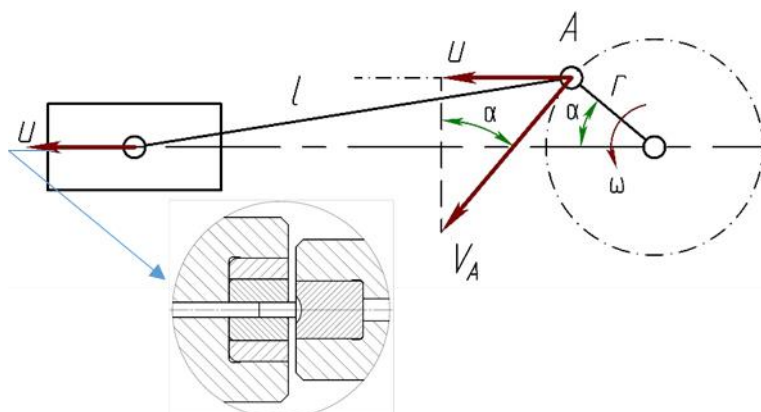


Рисунок 6 – Кинематическая схема холодновысадочного автомата, V_A – вектор скорости, касательной к окружности радиусом r , по которой вращается кривошип; ω – угловая скорость; U – осевая скорость ползуна; l – длина шатуна (600 мм); n – частота вращения (120 об/мин); α – угол поворота кривошипа

Осевая скорость ползуна U рассчитывается по формуле:

$$U = r \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot \sin \alpha.$$

Поскольку рабочее производственное оборудование для автоматической холодной высадки недоступно для экспериментов в промышленных условиях, дальнейшие исследования процесса формообразования заклепок проводили со скоростью испытательной машины с анализом возможностей использования полученных результатов для высадки на холодновысадочном автомате.

Моделирование данного процесса показало, что в ходе формообразования заклепки деформация составляет от 0,4 до 1,4, а средние напряжения находятся в пределах от -1500 до -3200 МПа, которые существенно влияют на распределение напряжений в инструменте.

Анализ напряженного состояния в деформирующем инструменте при натяге 0,1 мм показал, что сжимающие напряжения как во вставке пуансона, так и матрицы наименьшее значение имеют на границе с обоймой (рисунок 7, трассируемые точки 12 и 32), на основании чего дальнейший анализ напряжений проводился в этих зонах деформирующего инструмента, в которых наиболее вероятно появление разрушающих дефектов.

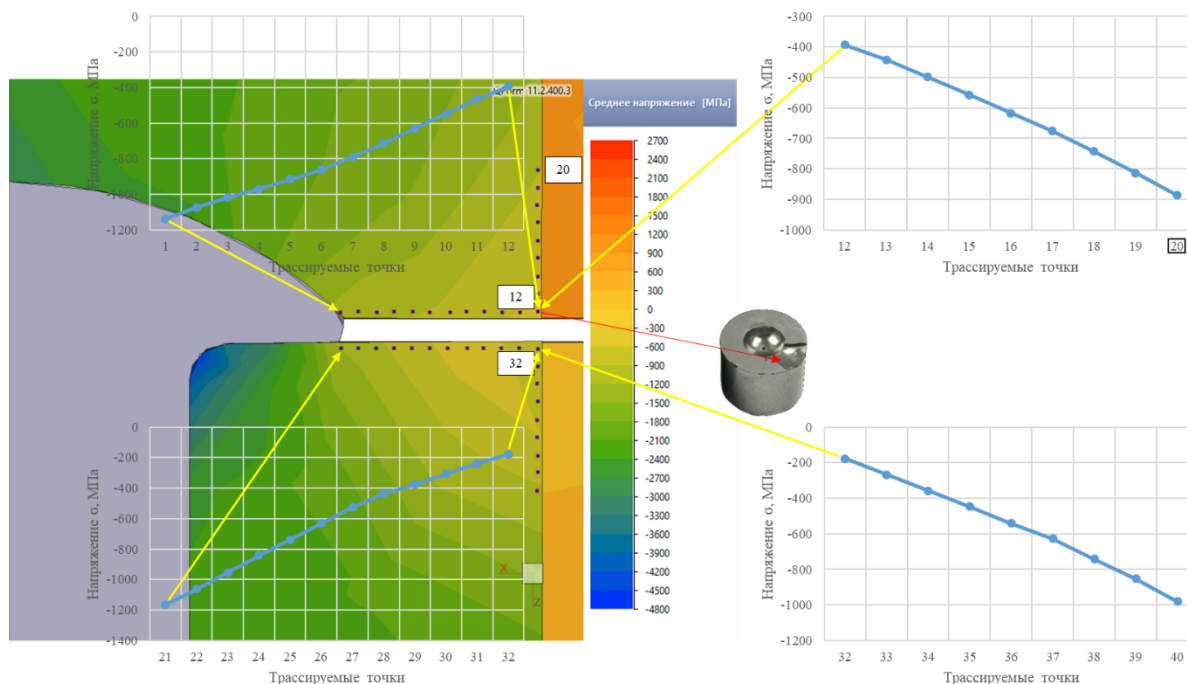
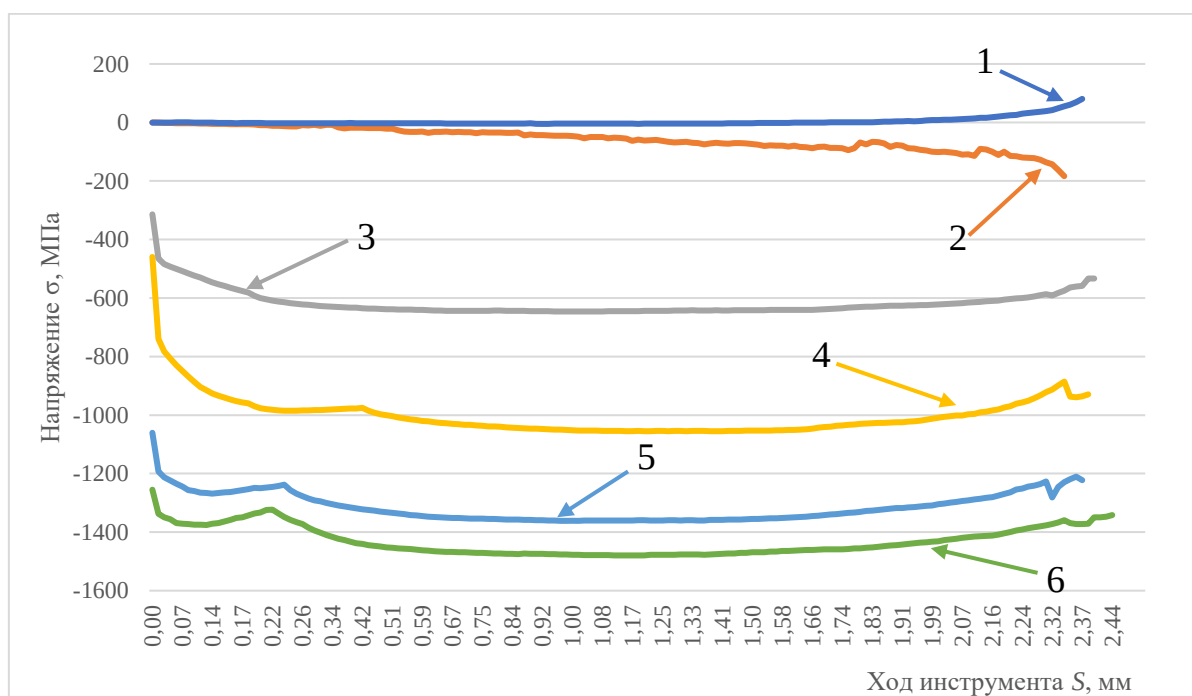
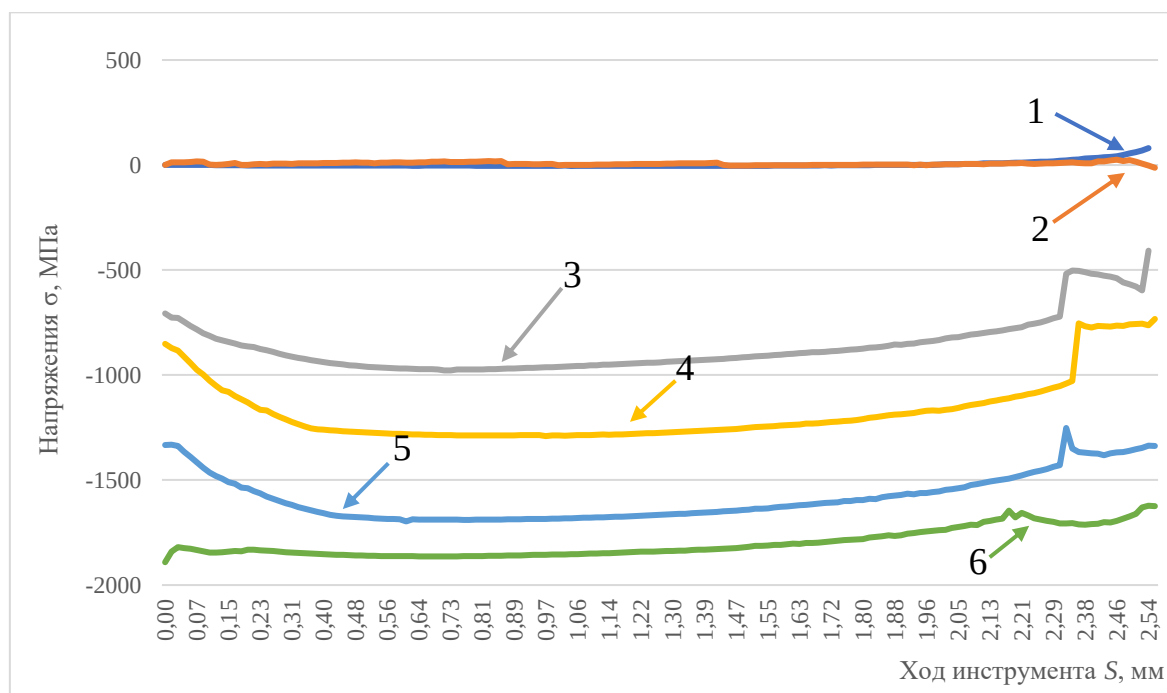


Рисунок 7 – Распределение средних напряжений в твердосплавной вставке (моделирование) в конечный момент формообразования заклепки при натяге 0,1 мм

Поскольку значительное влияние на стойкость твердосплавных вставок оказывает амплитуда циклических колебаний напряжений был выполнен анализ изменения напряжений в матрице и пуансоне в процессе формообразования заготовки в зависимости от величин натяга между твердосплавной вставкой и обоймой (рисунок 8).



а



б

Рисунок 8 – Динамика напряженного состояния в оснастке в зависимости от величины натяга

1 – без бандажа; 2 – натяг равен 0; 3 – натяг равен 0,05; 4 – натяг равен 0,10; 5 – натяг равен 0,15; 6 – натяг равен 0,20

Изучение динамики средних напряжений при разных натягах показало, что оснастка без бандажа подвергается нежелательным растягивающим напряжениям (рисунок 8, кривые 1). Натяг в диапазоне 0,05–0,15 мм (кривые 2–4) преобразует их в сжимающие, снижает амплитуду циклической нагрузки и предотвращает усталостное разрушение деформирующего инструмента. При натягах свыше 0,15 мм (кривые 5 и 6) дополнительного снижения амплитуды не происходит, что определяет границу применения.

Полученные ранее данные позволили определить минимальные напряжения во вставках в зависимости от натяга в деформирующем инструменте и прочностных характеристик материала высаживаемых заготовок (рисунок 9).

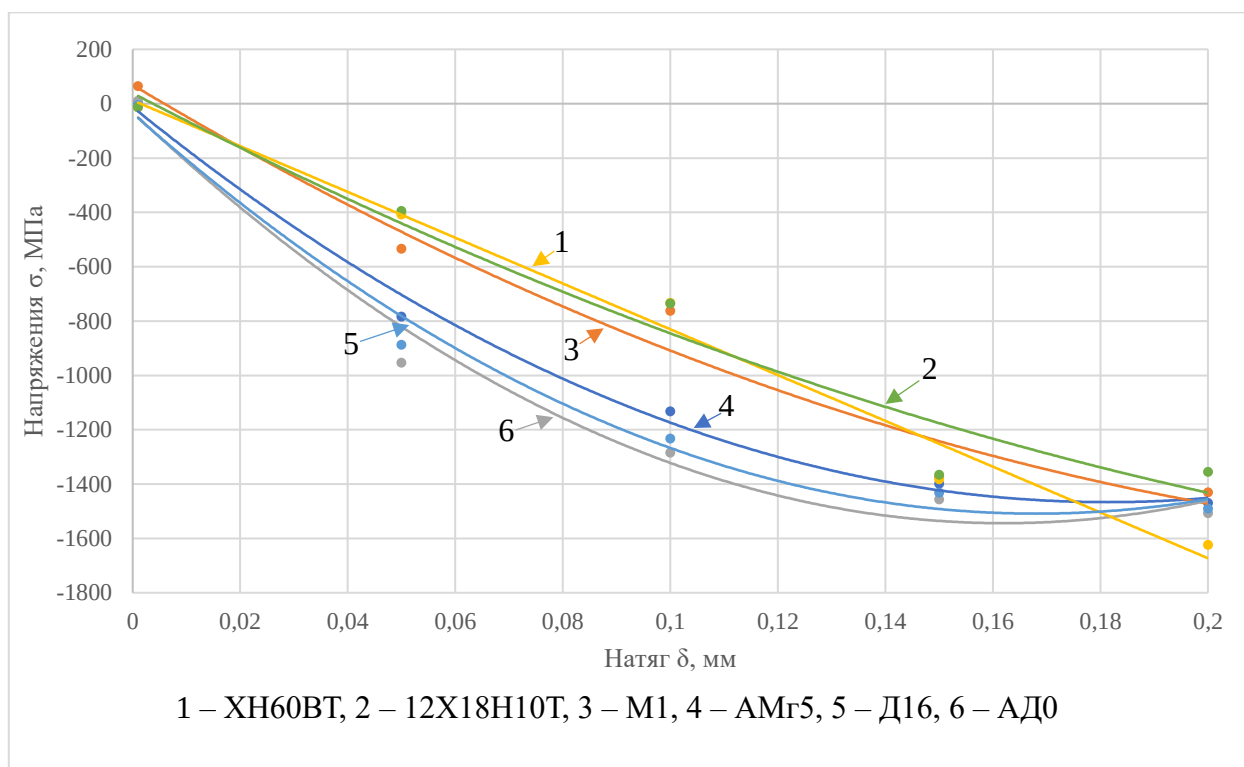


Рисунок 9 – Изменение величины сжимающих напряжений во вставке в зависимости от прочности материала заклепки

Для материалов с низкой и средней прочностью (алюминиевые сплавы, медь марки М1, медный сплав БрХ0,8) натяг инструмента величиной 0,05–0,10 мм достаточен для полной компенсации растягивающих сил. Однако для высокопрочных сплавов (12Х18Н10Т, ХН60ВТ) даже при данном натяге уровень сжимающих напряжений в оснастке остается относительно низким. Это объясняет наблюдаемые на практике преждевременные разрушения инструмента при высадке заклепок из жаропрочных никелевых сплавов и указывает на необходимость применения для них натягов 0,10–0,15 мм.

Из представленных ранее результатов видно, что напряжения и деформации, как в заготовке, так и в деформирующем инструменте, имеют сложный статический и динамический характер. Поэтому была разработана расчетная модель для составной холодновысадочной оснастки (рисунок 10).

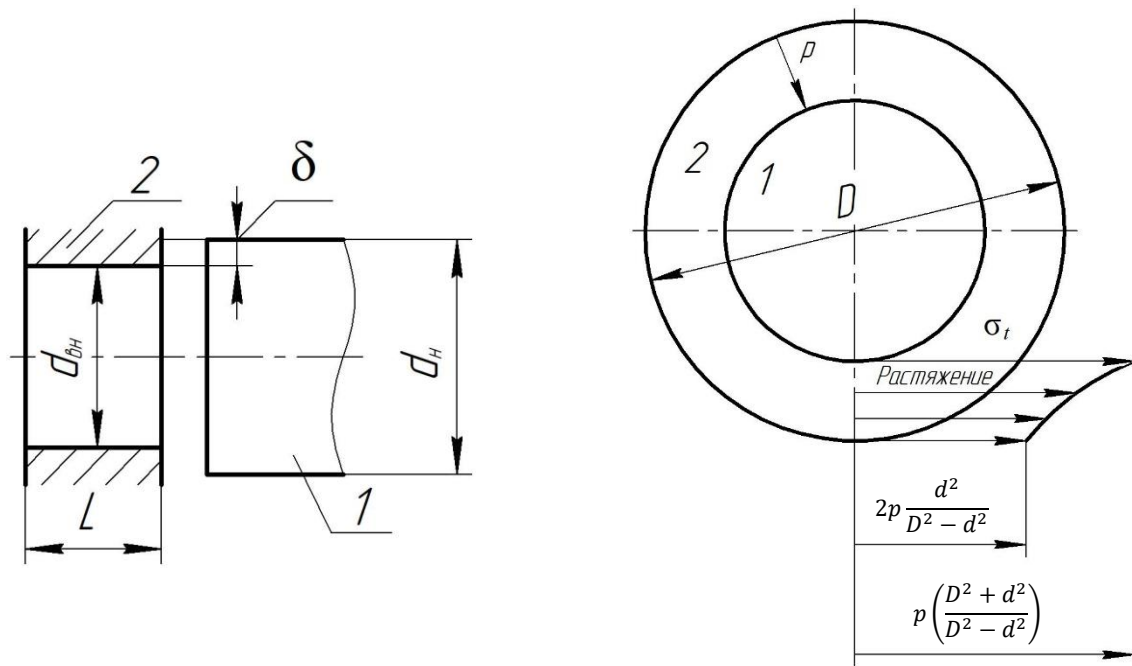


Рисунок 10 – Соединение с гарантированным натягом
 1 – вставка; 2 – обойма; d_n – диаметр вставки; $d_{вн}$ – диаметр обоймы;
 δ – натяг, $d_{вн} - d_n$; L – посадочная длина контактной поверхности;
 D – наружный диаметр обоймы; σ_t – напряжение растяжения;
 p – давление на поверхности контакта

1. Исходные данные:

Вставка (вал):

Материал: твердый сплав ВК15
 ГОСТ 10284-84.

Наружный диаметр: $d = 15,6^{+0,115}_{+0,080}$ мм.

Модуль упругости: $E_1 = 600 \cdot 10^3$ МПа.

Коэффициент Пуассона: $\mu_1 = 0,22$.

Обойма (отверстие):

Материал: сталь 4Х5МФС
 ГОСТ 5950-2000.

Внутренний диаметр: $d = 15,6^{+0,035}$ мм.

Модуль упругости: $E_2 = 210 \cdot 10^3$ МПа.

Коэффициент Пуассона: $\mu_2 = 0,3$.

2. Расчет давления на поверхности соединения:

$$p = \frac{\delta}{\left(\frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right) d}, \quad (2)$$

где:

δ – расчетный натяг, мм,

c_1 и c_2 – коэффициенты, зависящие от геометрии и материала.

Для сплошного вала:

$$c_1 = 1 - \mu_1 = 0,78.$$

Для обоймы с внешним диаметром $D = 25$ мм:

$$c_2 = \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2 = 2,58.$$

После подстановки в (2) получается упрощенная зависимость:

$$p = \frac{\delta}{2,11 \cdot 10^{-4}}, \text{ МПа.}$$

3. Результаты расчета для различных натягов (0,05–0,20 мм для обоймы $D = 25$ мм):

$\delta = 0,05$ мм: $p \approx 236,3$ МПа;

$\delta = 0,10$ мм: $p \approx 472,6$ МПа;

$\delta = 0,15$ мм: $p \approx 708,9$ МПа;

$\delta = 0,20$ мм: $p \approx 945,2$ МПа.

Приведенные ниже данные позволяют определить параметры деформирующего инструмента (материал и диаметр обоймы, величину натяга) в зависимости от механических характеристик материала высаживаемых заклепок.

Представленные формулы позволяют определять допустимый диапазон натягов ($\delta_{\text{мин}}$, $\delta_{\text{макс}}$) в составном холодновысадочном деформирующем инструменте, состоящим из вставки и обоймы:

- минимальный натяг, предотвращающий проскальзывание, рассчитывается из условия отсутствия сдвига вставки под действием осевой силы высадки. Условие: сила трения $\geq$ силе высадки:

$$\delta_{\text{мин}} = \frac{(\sigma_{\text{т закл}} kd)}{(4Lf)} d \left(\frac{\left(1 - \frac{\mu_1}{E_1}\right) + \left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2\right)}{E_2} \right).$$

- максимальный натяг, исключаяющий пластическое течение обоймы, рассчитывается из условия отсутствия перехода материала обоймы в состояние полной пластичности:

$$\delta_{\text{макс}} = \sigma_{\text{т об}} \left(\frac{D^2 - d^2}{D^2 + d^2} \right) d \left(\frac{\left(1 - \frac{\mu_1}{E_1}\right) + \left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2\right)}{E_2} \right),$$

где:

$\sigma_{\text{Т закл}}$, $\sigma_{\text{Т об}}$ – пределы текучести материалов вставки и обоймы,
 f – коэффициент трения покоя в паре «обойма-вставка»,
 k – коэффициент, учитывающий влияние формы инструмента, $k = 1,8$,
 L – посадочная длина контактной поверхности.

Выбранный рабочий натяг должен удовлетворять условию:

$$\delta_{\text{мин}} < \delta < \delta_{\text{макс}}.$$

Предложенная модель на основе приведенных формул позволяет определить натяг, обеспечивающий требуемую несущую способность соединения без риска повреждения деформирующего инструмента. Она связывает в единую систему все основные параметры, что дает возможность проектировать деформирующий инструмент для конкретных технологических условий.

На рисунке 11 приведены зависимости давления на поверхности контакта обоймы и вставки от диаметра обоймы, позволяющие определить минимальный натяг для посадки заклепок с конкретными механическими свойствами.

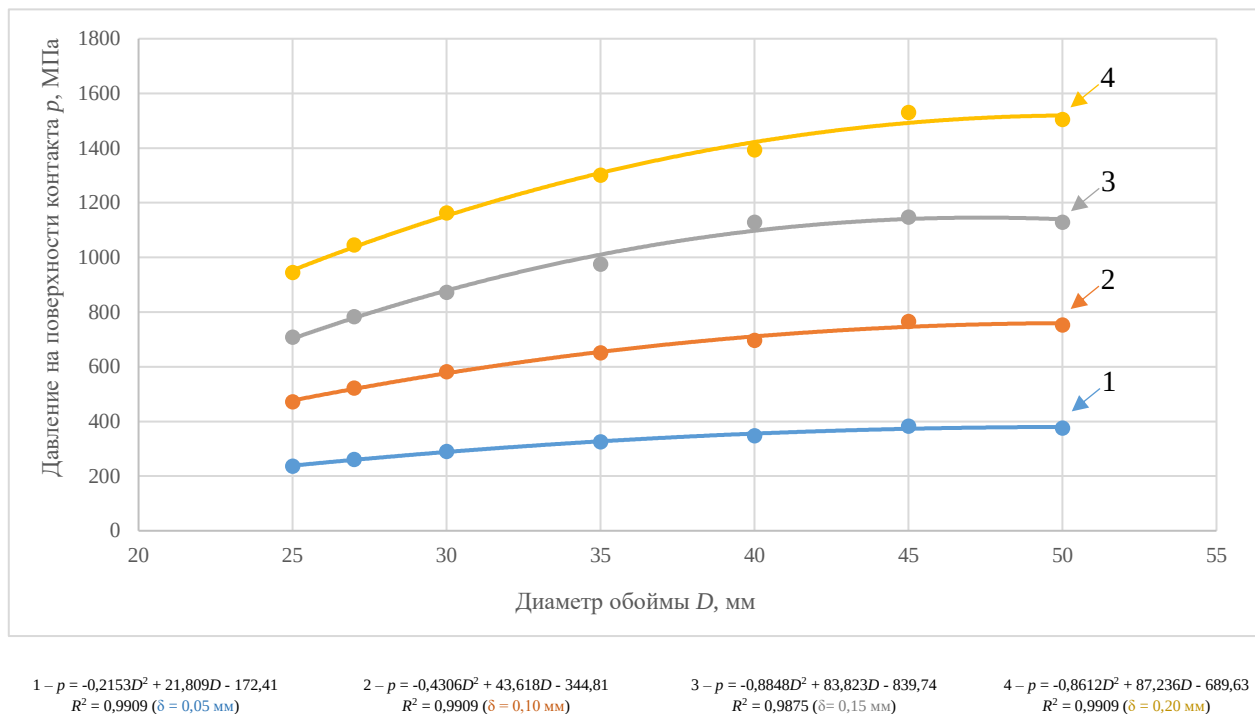


Рисунок 11 – Зависимость давления на поверхности контакта от диаметра обоймы из стали 4X5МФС

Зависимость для расчета диаметра обоймы D при заданных давлениях и напряжении растяжения $\sigma_{\text{Т об}}$:

$$D = d \sqrt{\frac{1 + 2p}{\sigma_{\text{Т об}}}}.$$

Как известно из классических работ, например, Ландау и Лифшица, величина давления на поверхности p определяется, как среднее скалярное значение нормальных напряжений. Кривые средних напряжений, найденные конечно-элементным моделированием в программе QForm для обоймы диаметром 25 мм при натягах от 0,05 до 0,20 мм, показали хорошее совпадение с результатами, полученными с применением разработанной расчетной модели (рисунок 11), что подтверждает ее корректность (рисунок 12).

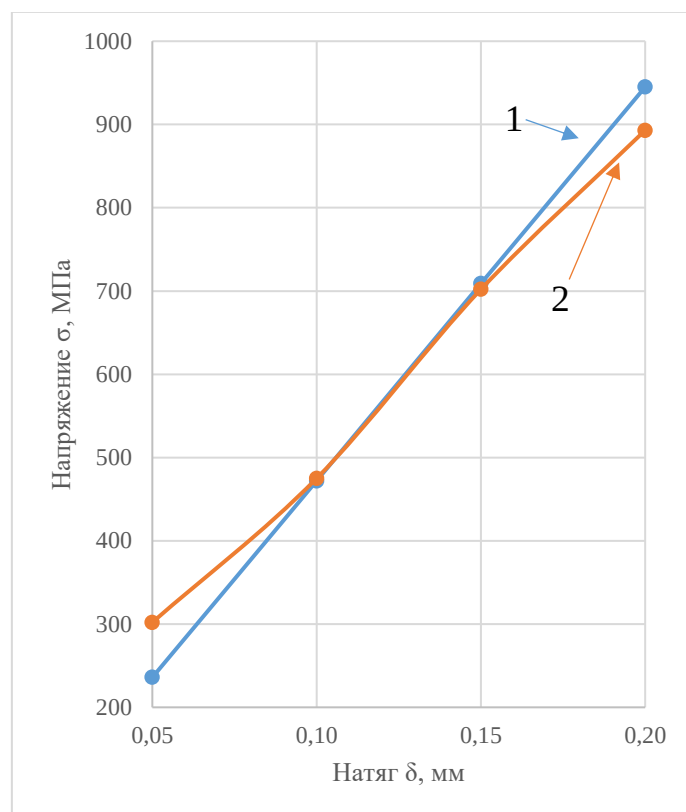


Рисунок 12 – Сравнение расчетных зависимостей
1 – формулы (см. рис. 11); 2 – моделирование

В четвертой главе представлены результаты проведенных экспериментов.

Высадку деталей осуществили с применением серийной оснастки на испытательной машине мод. LFM250 со скоростью 2 мм/мин с записью диаграмм «сила–ход» (рисунок 13).

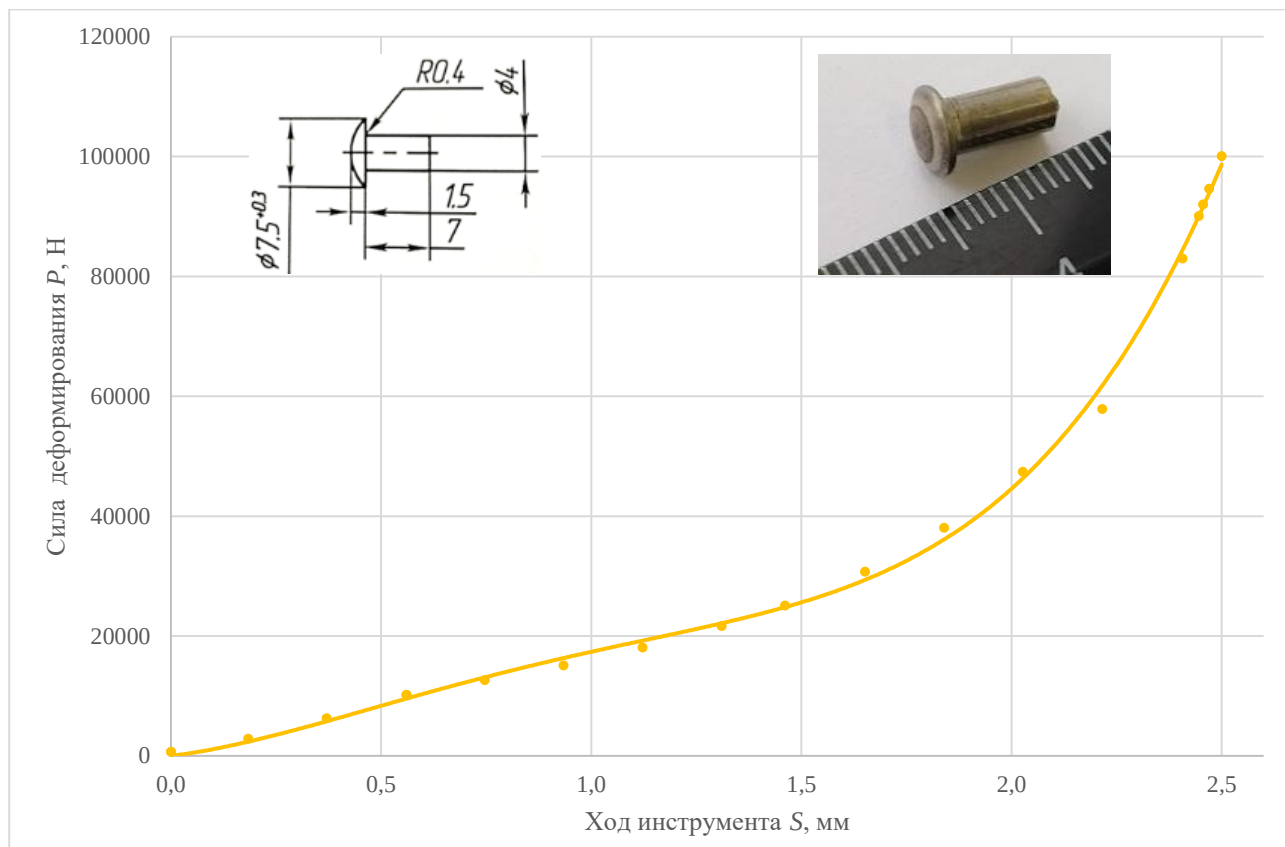


Рисунок 13 – Зависимость силы формообразования заклепки из сплава ХН60ВТ от хода деформирующего инструмента

Влияние смазок на силовые параметры процесса высадки заклепок оценили по данным экспериментов с записью зависимостей силы от хода деформирующего инструмента (рисунок 14). Исследовали два режима контактного взаимодействия – со смазкой ONV120 (кривая 1), со смазкой CUT165 (кривая 2) – в сравнении с моделированием процесса с фактором трения $m = 0,3$.

Как видно из графика, максимальная сила деформирования при применении двух смазочных материалов отличается на 10–12 %.

Сравнение результатов натурного эксперимента с данными компьютерного моделирования, выполненного в программе QForm, позволило уточнить граничные условия трения. Установлено, что наиболее корректное совпадение расчетных и экспериментальных кривых «сила-ход инструмента» достигается при факторе трения, равном 0,3.

С точки зрения снижения сил формообразования заклепок из жаропрочного сплава ХН60ВТ и, как следствие, уменьшения контактных напряжений, действующих на твердосплавную вставку оснастки, смазка марки ONV120 является более предпочтительной по сравнению с составом CUT 165.

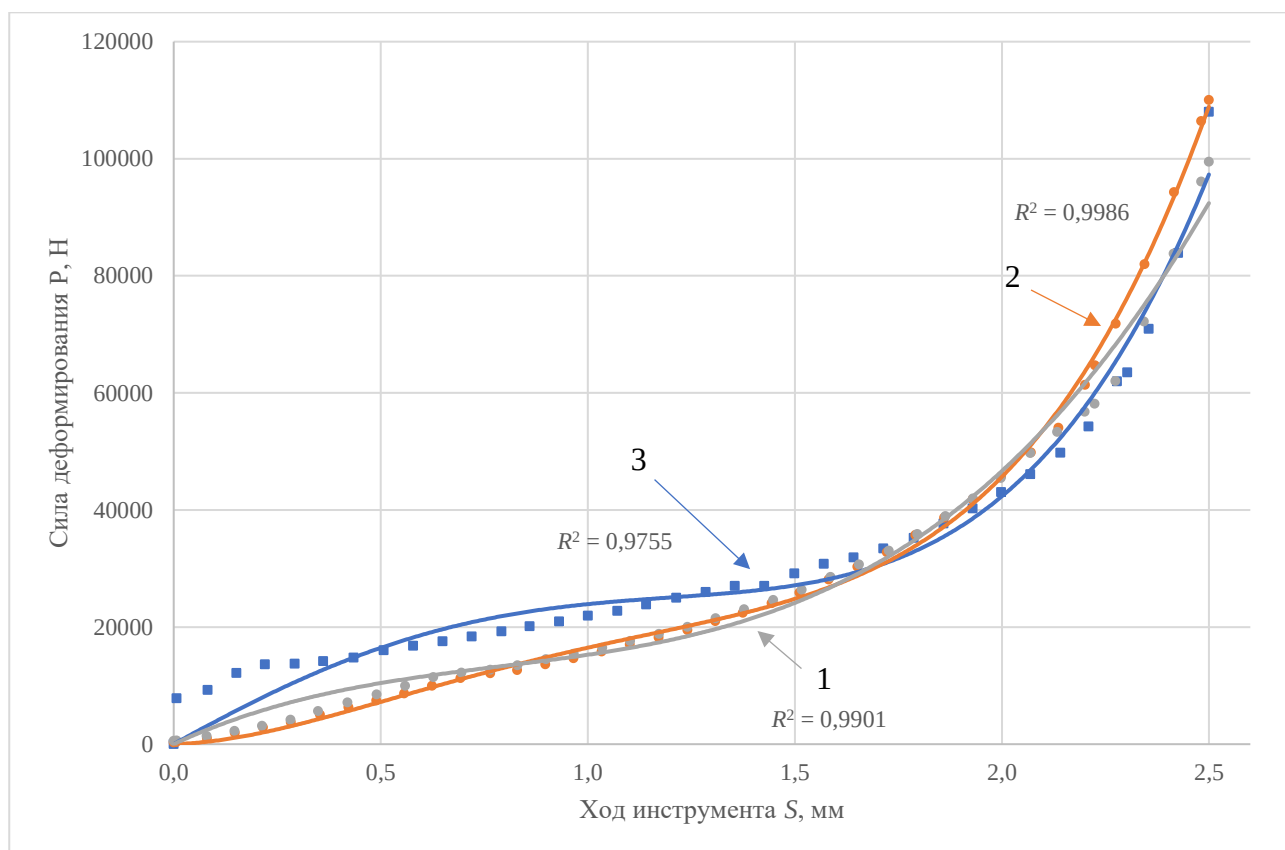


Рисунок 14 – Влияние трения на силу холодной высадки заклепок из ХН60ВТ на испытательной машине. Сравнение с расчетом
1 – смазка ONV120; 2 – смазка CUT165; 3 – моделирование

Пятая глава посвящена анализу результатов проведенных расчетных и экспериментальных исследований. В частности, подтверждена адекватность полученных реологических моделей путем сопоставления расчетных данных с экспериментом. Их расхождение, как показано на рисунке 15, не превышает 10 %.

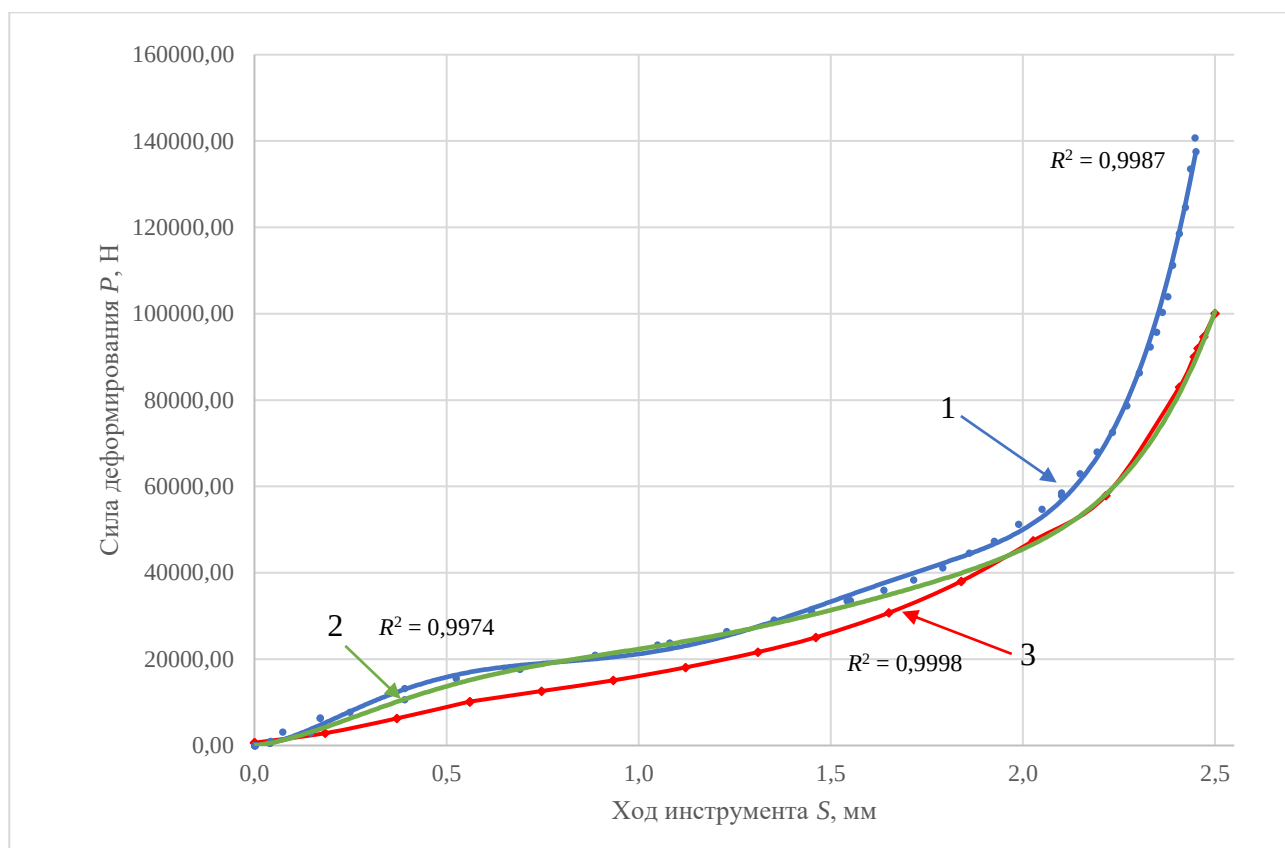


Рисунок 15 – Зависимость силы формообразования заклепки из сплава ХН60ВТ от хода деформирующего инструмента

1 – расчетная (модель по Хензелю-Шпиттелю), 2 – расчетная (табличная функция), 3 – экспериментальная кривая

Это позволяет использовать обе модели для анализа процессов обработки металлов давлением, а также подтверждает достоверность выполненных в работе расчетов напряженного состояния инструмента и напряженно-деформированного состояния заготовки и их тепловых полей.

Результаты работы внедрены в производство на двух предприятиях, филиале АО «ОДК-Салют» и филиале АО «ОДК» «МКБ «Горизонт».

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В процессе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные результаты и сделаны выводы:

1. Впервые получены данные о поведении жаропрочного никелевого сплава ХН60ВТ при деформации. Экспериментальным путем, методом осадки образцов на электромеханических испытательных машинах, установлены точные зависимости напряжения течения от основных параметров: температуры (в диапазоне 20–450 °С), скорости деформации (0,001–0,4 с⁻¹) и величины деформации. Полученные данные были систематизированы и представлены двумя способами: в табличном виде и в виде эмпирической модели Хензеля-Шпиттеля. Сравнение полученных зависимостей показало, что модели имеют хорошую сходимость. Расхождение между ними на большей части графика составляет 5–7 %. Однако табличная функция дает более точные значения силы формообразования заготовок по сравнению с моделью, полученной по методу

Хензеля–Шпиттеля, так как она основана на экспериментальных данных и точнее отражает реальное поведение материала. Табличная функция рекомендована в качестве основного источника реологических данных сплава ХН60ВТ.

2. Установлено методом конечно-элементного анализа, что при холодной высадке заклепок возникает существенная неравномерность распределения напряжений и деформаций в головках. Показано, что в твердосплавных вставках наиболее опасной зоной с точки зрения вероятности зарождения дефектов является граница контакта с обоймой, где уровень сжимающих напряжений минимален. Найдено, что деформация материала высаживаемых деталей из сплава ХН60ВТ достигает значительных пластических деформаций (до $\varepsilon = 1,4$), что повышает напряжение текучести деформируемого сплава до 1400 МПа. Доказано, что бандажирование и рациональный натяг позволяют не только сместить напряженное состояние в область сжатия, но и значительно снизить амплитуду колебаний напряжений, минимизируя риск усталостного разрушения. Для сплава ХН60ВТ наиболее эффективным с точки зрения повышения стойкости оснастки признан диапазон натяга 0,10–0,15 мм; дальнейшее его увеличение не приводит к пропорциональному росту сжимающих напряжений. Показано, что в отличие от квазистатических лабораторных испытаний, где нагрев незначителен, в реальном процессе скорость деформации является доминирующим фактором, вызывающим разогрев заготовки. Установлено, что локальная температура в головке заклепки может достигать $\sim 400^\circ\text{C}$, а средняя по объему головки – 250°C . Эти данные согласуются с натурными измерениями и задают необходимый верхний предел (450°C) при определении реологических моделей материалов для холодной высадки. Анализ силовых кривых (расчетных и экспериментальных) показал их качественную и количественную сходимость, что подтверждает адекватность найденной реологической модели.

3. Дана оценка влияния прочности высаживаемого материала и величины натяга в составном формообразующем инструменте на уровень напряженного состояния с использованием метода трассируемых точек в программе QForm. Установлено, что для исключения опасных растягивающих напряжений в деформирующем инструменте величина натяга должна находиться в диапазоне 0,05–0,15 мм. Показано, что для достижения безопасного уровня сжимающих напряжений (порядка 800 МПа) минимальная величина натяга для высокопрочного сплава ХН60ВТ составляет 0,10 мм, тогда как для менее прочного сплава АМг5 достаточен натяг 0,06 мм. Анализ напряженного состояния обойм и вставок пуансона и матрицы в процессе формообразования партии из 96 заготовок показал, что напряжения в процессе циклической деформации увеличиваются незначительно и не приводят к пластической деформации обойм. Полученные результаты позволяют определять геометрические параметры и величину натяга в строгой зависимости от механических свойств конкретного материала заготовки с учетом циклического характера нагружения.

4. Разработана и научно обоснована на основе анализа известных решений теории упругости для толстостенных цилиндров (формула Ламе) и собственных экспериментальных данных по энергосиловым параметрам процесса высадки

расчетная модель для определения рациональных параметров составного деформирующего инструмента. Модель учитывает прочностные свойства высаживаемого материала через установленный технологический коэффициент $k = 1,8$ и включает два ключевых критерия работоспособности: отсутствие сдвига твердосплавной вставки, определяющее минимально допустимый натяг $\delta_{\text{мин}}$, и предотвращение пластической деформации бандажирующей обоймы, определяющее максимально допустимый натяг $\delta_{\text{макс}}$. Предложены аналитические зависимости для расчета величины натяга δ и наружного диаметра обоймы D , что позволяет проектировать оснастку для различных материалов заготовок. Подтверждено хорошее совпадение зависимостей средних напряжений, найденных конечно-элементным моделированием в программе QForm, с результатами, полученными с применением разработанной расчетной модели, что подтверждает ее корректность.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Деметрашвили И.С.** Определение реологической модели меди М1 / А.Д. Куликов, П.А. Петров, И.А. Бурлаков, Нгуен Х.Т., И.С. Деметрашвили // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 9. – С. 722–731. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-9-722-723.

2. **Деметрашвили И.С.** Формообразование листовых заготовок из меди М1 полимерным инструментом из полилактида PLA / А.Д. Куликов, И.А. Бурлаков, П.А. Петров, П.А. Полшков, И.С. Деметрашвили // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2024. – Т. 22, № 4. – С. 163–170. – DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-163-170.

3. **Деметрашвили И.С.** Исследование напряженно-деформированного состояния инструмента при посадке заклепок из сплава ВЖ98 / И.С. Деметрашвили, И.А. Бурлаков // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2025. – № 4. – С. 9–16.

Demetrashvili I.S. Study of the Stress–Strain State of a Tool During Upsetting of Rivets from the VZh98 Alloy / I.S. Demetrashvili, I.A. Burlakov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2025. – Vol. 54, № 4. – P. 355–362.

4. **Demetrashvili I.S.** Study on the influence of lubricants on the technological process of cold heading of heat-resistant alloy rivets / Vu Trong Bach, I.S. Demetrashvili, A.N. Petrov, I.A. Burlakov, S.A. Kharitonov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2026. – Vol. 55, № 2. – P. 193–198.

5. **Деметрашвили И.С.** Анализ напряженно-деформированного состояния инструмента при посадке заклепок из никелевых сплавов // Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации : сборник тезисов Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2025. – С. 3–4.

6. **Деметрашвили И.С.** Исследование напряженно-деформированного состояния при холодной посадке заклепок / И.С. Деметрашвили, А.В. Македонов, И.А. Бурлаков // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского : сборник докладов XXII научной конференции. – М. : Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2025.

7. **Деметрашвили И.С.** Исследование процесса холодной высадки заклепок с целью повышения стойкости оснастки / И.С. Деметрашвили, А.В. Македонов, И.А. Бурлаков // Климовские чтения – 2025: перспективные направления развития авиадвигателестроения : сборник статей научно-технической конференции. – Санкт-Петербург : Скифия-принт, 2025. – С. 214–221.