УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Уфимский университет
науки и технологий»,
доктор физико-математических наук, доцент

_____ Шарафуллин И.Ф.
«06» 10 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»
на диссертационную работу Деметрашвили Ирины Сергеевны на тему «Разработка научно обоснованных технических решений повышения стойкости штампового инструмента для высадки заготовок из сплава ХН60ВТ», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

Актуальность темы диссертации

В современном машиностроении, и особенно в авиа- и двигателестроении, неразъемные соединения играют важную роль в обеспечении надежности и ресурса конструкций. Среди них заклепочные соединения, несмотря на широкое распространение сварки, остаются преобладающим видом сборки ответственных узлов планера и газотурбинных двигателей. Количество заклепок в летательных аппаратах достигает 2 млн единиц, а трудоемкость сборочно-клепальных работ составляет до 35 % от общей трудоемкости изготовления планера. При изготовлении авиационных двигателей в значительных количествах применяют клепаные узлы типа корпусов и панелей. Так, например, на один средний газотурбинный двигатель требуется более 6 тысяч заклепок из жаропрочных сплавов, высадка которых сопровождается высокими контактными напряжениями, что приводит к частому преждевременному выходу из строя формообразующей оснастки (менее 1,5 тыс. заклепок).

Для повышения стойкости инструмента применяют составной инструмент с твердосплавными вставками, однако существующие методики выбора величины натяга между твердосплавной вставкой и обоймой носят эмпирический характер и не учитывают прочностные свойства конкретного деформируемого материала. Кроме того, в литературе отсутствуют данные о реологических свойствах сплава ХН60ВТ в диапазоне температур и скоростей деформации, характерных для процесса холодной высадки.

Таким образом, задача повышения стойкости деформирующего инструмента для холодной высадки заклепок из высокопрочных сплавов на основе установления взаимосвязи прочности материала заготовки и параметров оснастки является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное значение для обеспечения эффективности производства крепежных изделий для авиационного двигателестроения.

Структура и основное содержание диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка основных сокращений и условных обозначений, библиографического списка и приложений, изложена на 151 странице машинописного текста, включает 63 рисунка, 18 таблиц, 4 приложения. Библиографический список включает 126 наименований российских и зарубежных авторов.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, показана степень ее научной разработанности, сформулированы цель и задачи работы, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту, а также сведения о достоверности, апробации результатов и публикациях автора по теме диссертации.

В первой главе выполнен аналитический обзор литературы, посвященный применению заклепочных соединений в машиностроении, условиям работы холодновысадочного инструмента, основным видам его выхода из строя (абразивный износ, усталостное разрушение, пластическая деформация, схватывание) и способам повышения стойкости оснастки. Показано, что для снижения растягивающих напряжений и повышения ресурса твердосплавных вставок широко применяется метод бандажирования составного инструмента с натягом. Установлено, что существующие методики выбора рациональных параметров бандажирования носят общий или эмпирический характер и не учитывают прочностные характеристики обрабатываемого материала заготовок, что ограничивает возможности проектирования специализированного инструмента для высадки высокопрочных никелевых сплавов. Показано, что для моделирования процесса холодной высадки заклепок из сплава ХН60ВТ необходимы данные о реологических свойствах материала в диапазоне температур 20–450 °С, которые в настоящее время отсутствуют. По результатам анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе представлена методика выполнения работы. В качестве основного объекта исследования выбран никелевый жаропрочный сплав ХН60ВТ, широко применяемый в авиационном двигателестроении. Приведены сведения о химическом составе, механических и физических свойствах сплава, его микроструктуре. Описаны методы исследования микроструктуры и микротвердости, методика определения реологических свойств сплава при испытаниях на сжатие на машинах LFM250 и LFM50, методика вычислительного эксперимента (конечно-элементное моделирование в программном комплексе QForm 3D), а также методика натурного эксперимента по холодной высадке заклепок на испытательной машине LFM250 и холодновысадочном автомате СН-3. Представлена методика расчета рациональной величины натяга в составном инструменте, основанная на классических решениях задачи Ламе для толстостенных цилиндров с учетом условий отсутствия сдвига вставки и предотвращения пластической деформации обоймы.

В третьей главе представлены результаты теоретических исследований. Для корректного моделирования процесса холодной высадки заклепок 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, величины и скорости деформации) и прямым пересчетом в напряжения и деформации с формированием табличной зависимости. С использованием найденной реологической модели и материала инструмента, взятого из базы данных программы, проведено моделирование процесса высадки заклепок, что позволило исследовать напряженно-деформированное и температурное состояние системы «заготовка–инструмент». Установлено, что при высадке возникает существенная неравномерность распределения напряжений и деформаций, а в твердосплавных вставках наиболее опасной зоной с точки зрения вероятности зарождения дефектов является граница контакта с обоймой, где уровень сжимающих напряжений минимален. Показано, 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. Разработана расчетная модель для определения рациональных параметров составного деформирующего инструмента, учитывающая прочностные свойства высаживаемого материала и включающая два ключевых критерия работоспособности: отсутствие сдвига твердосплавной вставки ($\delta_{мин}$) и предотвращение пластической деформации бандажирующей обоймы ($\delta_{макс}$). Предложены аналитические зависимости для расчета величины натяга δ и наружного диаметра обоймы D. Подтверждено хорошее совпадение зависимостей средних напряжений, найденных конечно-элементным моделированием в программе QForm, с результатами, полученными с применением разработанной расчетной модели.

В четвертой главе представлены результаты проведенных экспериментов. Методом металлографического анализа подтверждено соответствие микроструктуры материала оснастки (сталь 4Х5МФС – троостит отпуска) и твердосплавной вставки (ВК15 – смесь α-фазы карбида вольфрама и связующей β-фазы кобальта) нормативно-техническим требованиям. Твердость обоймы составила HRC 49,0, твердость вставки – HRA 84,0, что отвечает требованиям ГОСТ 3882-74. Исследование микроструктуры образцов сплава ХН60ВТ, деформированных в диапазоне температур 20–450 °С при скоростях деформации 0,001–0,4 $с^{-1}$, показало, что структура характеризуется наличием субзерен размерами от 2 до 10 мкм. Экспериментально подтверждена возможность использования испытательной машины LFM250 для высадки заклепок из сплава ХН60ВТ. Получены зависимости силы деформирования от хода инструмента. На основе испытаний 19 образцов, осаженных с логарифмическими деформациями от 0,10 до 1,63, определена тарировочная зависимость микротвердости от величины деформации для сплава ХН60ВТ. Получены аналитические выражения, связывающие деформацию с микротвердостью и напряжение текучести с деформацией. На основе данных зависимостей построены диаграммы распределения деформаций и напряжений по меридиональному сечению высаженной заклепки. Экспериментально установлено влияние смазочных материалов на силовой режим высадки. Показано, что применение смазки ONV120 обеспечивает наибольшее снижение силы деформирования по сравнению с высадкой без смазки и смазкой Zetcut 165. Установлено, что после трех циклов высадки партий объемом 96–103 заклепок температура пуансона находилась в интервале от 43 до 54 °С. Практически подтверждена эффективность селективной сборки составного инструмента: подбор пар «вставка–обойма» с натягом в узком интервале 0,02–0,05 мм обеспечил повышение стойкости оснастки с 1 600 до более чем 60 000 высаженных заклепок.

В пятой главе представлены результаты анализа полученных данных. Подтверждена адекватность полученных реологических моделей путем сопоставления расчетных данных с экспериментом: расхождение не превышает 10 %. Установлено, что разработанная математическая модель соответствует эксперименту с коэффициентом детерминации $R^2 = 0{,}962$, средняя абсолютная ошибка не превышает 5 % от максимальной силы. Показана сходимость результатов аналитического расчета с данными конечно-элементного моделирования, что подтверждает корректность заложенных в модель допущений теории упругости (задача Ламе) и возможность ее применения для назначения рациональной величины натяга в производственных условиях. Выявлены количественные различия путем сравнения расчетных и экспериментальных данных по распределению деформаций и напряжений в сечении головки заклепки с использованием метода микротвердости и обоснована целесообразность применения способа определения деформации по величине зерна при анализе напряженно-деформированного состояния заготовок в процессе холодной высадки. Показана удовлетворительная сходимость (расхождение не более 12 %) между расчетными и измеренными с помощью пирометра значениями температуры пуансона при циклической высадке.

В выводах по работе обобщены результаты выполненных исследований. В приложениях приведены технические рекомендации по расчету натяга при изготовлении холодновысадочного инструмента и акты внедрения результатов диссертационной работы на предприятиях ПАО «ОДК».

В целом рассмотренная диссертация представляет собой самостоятельную, законченную научно-квалификационную работу. По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 2 статьи в журналах, индексируемых Scopus/Web of Science, и 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Научная новизна исследования и полученных результатов

Научную новизну представляют следующие результаты диссертации:

1. Установлены зависимости напряжений текучести никелевого сплава ХН60ВТ от температуры, скорости и величины деформации, *впервые* полученные для диапазона температур 20–450 °С и скоростей деформации 0,001–0,4 $с^{-1}$.

2. Определено влияние напряженно-деформированного состояния и температуры заготовки из сплава ХН60ВТ на напряженное состояние составного инструмента, *отличающееся* расширением температурного диапазона и скоростей деформации.

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 высадке заклепок, что позволило выбрать смазку для реализации технологии обработки металлов давлением на выбранном классе машин.

Степень достоверности полученных результатов

Основные результаты исследования широко опубликованы в научных изданиях. Результаты исследований были доложены и обсуждены на конференциях различного уровня, в том числе международных: «Климовские чтения» (2025), QFORM ФОРУМ-2025, XII Международный технологический форум (2026), XII международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (2026) и других.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, научную новизну, выводы и другие ключевые моменты. Материалы диссертации соответствуют заявленному паспорту специальности 2.5.7. «Технологии и машины обработки давлением».

Полученные результаты отличаются научной новизной и практической значимостью. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений в связи с использованием автором современного научного оборудования и методов исследования (универсальные электромеханические испытательные машины моделей LFM50 и LFM250, бинокулярный микроскоп модели Olympus Delta, электронные микроскопы моделей FEI QUANTA 650 и JSM-5600, прибор модели DuraScan-20, холодновысадочный автомат модели СН-3, электроэрозионный станок модели ONA AF-25), а также подтверждаются актами внедрения результатов диссертационных исследований в производственный процесс.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы

Теоретическая значимость работы заключается в полученной реологической модели никелевого сплава ХН60ВТ для диапазона температур 20…450 °С и скоростей деформации 0,001, 0,01 и 0,4 с-1 , позволяющая пополнить базу деформируемых материалов в расчетных компьютерных программах, предназначенных для моделирования процессов обработки металлов давлением.

Практическая значимость диссертации состоит в следующем:

- Исследованы тепловые параметры процесса автоматической высадки заклепок, что подтверждено экспериментально.
- Результаты проведенного в рамках диссертационной работы компьютерного и физического моделирования процесса высадки с анализом напряженного состояния деформирующего инструмента и заготовки явились основой для разработки и внедрения в производство технологических рекомендаций по повышению стойкости оснастки, что подтверждено актами внедрения.
- Разработанные и внедренные рекомендации по выбору величины натяга составного деформирующего инструмента, основанные на учете прочностных свойств высаживаемого материала, позволили повысить стойкость формообразующей оснастки с 1 500 до 60 000 высаженных заклепок.
- Результаты диссертационной работы позволили применять технологию обработки металлов давлением с использованием машины LFM250.
- Внедрены технологические рекомендации по расчету натяга при изготовлении холодновысадочного инструмента на предприятиях ПАО «Объединенная двигателестроительная корпорация».

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Полученные в работе результаты могут быть рекомендованы к использованию на машиностроительных предприятиях, занимающихся металлообработкой, таких как, ПАО ОДК «Сатурн» (г. Рыбинск), ПАО «Кузнецов» (г. Самара), на предприятиях Государственной корпорации «Ростех», таких как Объединённая авиастроительная корпорация (ОАК), АО Белзан (г. Белебей), ПАО КАМАЗ (г. Набережные Челны) и др, изготавливающих и применяющих инструмент при холодной объемной штамповке конструкционных и легированных сталей и жаропрочных сплавов, в целях повышения его стойкости и снижения затрат на инструментальное обеспечение производства.

Разработанную расчетную модель для определения рациональных параметров составного деформирующего инструмента целесообразно использовать и адаптировать к инструменту с более сложной геометрией, в том числе к многопозиционной оснастке холодновысадочных автоматов.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом, замечания по оформлению

Структура диссертационной работы и ее оформление соответствует ГОСТ Р 7.0.11-2011. Содержание диссертации изложено на 151 странице, содержит 63 рисунка, 18 таблиц и список литературы из 126 наименований. Выводы диссертации возникают из результатов, полученных автором, их достоверность не вызывает сомнений. В целом, работа носит фундаментально-прикладной характер и представляет собой целостную завершенную работу.

Соответствие содержания диссертации научной специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением, п. 6 «Методы оценки напряженного и деформированного состояния и способы увеличения жесткости, прочности и стойкости деформирующего инструмента».

Отрасль науки – технические науки, поскольку объектом исследования диссертационной работы являлся процесс холодной высадки заклепок, предметом исследования – стойкость деформирующего инструмента, результаты решения поставленных задач явились научным обоснованием технических решений повышения стойкости штампового инструмента для высадки заготовок из сплава ХН60ВТ.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Автореферат полностью отражает содержание диссертации и соответствует ее основным положениям. Структура автореферата и его оформление выполнено в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Замечания по диссертационной работе

В процессе рассмотрения диссертационной работы возникли следующие вопросы и замечания:

1. В работе показано, что локальная температура в головке заклепки может достигать ~400 °С, а средняя по объему – 250 °С. При этом нагрев инструмента стабилизируется на уровне не более 55 °С. Следовало бы более детально проанализировать влияние градиента температур на изменение фактического натяга в составном инструменте с учетом различия коэффициентов теплового расширения материалов вставки и обоймы.

2. При сравнении расчетных и экспериментальных данных по распределению деформаций и напряжений в сечении головки заклепки (метод микротвердости) получено расхождение на уровне 20–30 %. Автор объясняет это различием физической природы сравниваемых величин. Желательно было бы привести количественные оценки погрешности метода микротвердости при степенях деформации выше 0,4–0,5 и указать границы его применимости.

3. В работе исследовано влияние смазочных материалов на силовой режим высадки и установлено, что применение смазки ONV120 предпочтительнее по сравнению с CUT 165. Однако не приведены данные о влиянии смазок на стойкость инструмента в производственных условиях, что усилило бы практическую значимость этого раздела.

4. Полученная формула для расчета минимально допустимого натяга $\delta_{мин}$ (стр.75) применима только для заклепки с размерами и формой (см. рис. 8), для других форма и размеров заклепки требуется уточнять коэффициент k? Полученная формула для расчета максимально допустимого натяга $\delta_{макс}$ учитывает объемное напряженное состояние обоймы или нет? Если нет, то возможна ли разработка модели по результатам анализа распределения эквивалентного напряжения в обойме (нагруженной «натягом» и «технологической силой») и условия его ограничения пределом текучести?

5. В разделе 2.5 (в п.2.5.3 и в 2.5.8.) не приведены для моделирования напряженно-деформированного состояния обойм и вставок составной матрицы и составного пуансона принятые допущения, модели материалов, начальные и граничные условия, схемы нагружения инструмента.

6. В разделе. 3.2. проводится анализ распределения только средних нормальных напряжений в обоймах пуансона и матрицы, распределение эффективного напряжения автор не анализирует. Напряженное состояние, возникающее в заготовке в процессе формоизменения, существенно влияет на распределение напряжений (созданное предварительно натягом) в инструменте. Достижение эффективным напряжением (в какой-то локализованной области обоймы) напряжения текучести материала обоймы, в процессе формоизменения заготовки может существенно влиять на стойкость инструмента.

7. Подписание акта внедрения (Приложение Б, акт, печать – Филиал НИИ технологии и организации производства двигателей г. Москва) двумя работниками предприятия, в том числе диссертантом, представляется неуместным. Как правило, акт внедрения подписывается независимой комиссией.

Отмеченные выше замечания не снижают ценности полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Заключение

Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, выполнена на высоком научном уровне, обладает несомненной актуальностью, научной новизной, практической значимостью, достоверностью и обоснованностью представленных результатов. Выводы отражают основные положения и соответствуют цели и задачам исследования. Основные материалы и результаты диссертационной работы достаточно полно опубликованы в научных статьях и апробированы на международных и всероссийских научно-технических конференциях. Автореферат полностью соответствует основному содержанию диссертации, отражает её структуру и положения, выносимые на защиту.

Диссертационная работа соответствует требованиям пп. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Деметрашвили Ирина Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.7 – «Технологии и машины обработки давлением».

Диссертационная работа **Деметрашвили Ирины Сергеевны** на тему «Разработка научно обоснованных технических решений повышения стойкости штампового инструмента для высадки заготовок из сплава ХН60ВТ» и настоящий отзыв рассмотрены и обсуждены на заседании кафедры Материаловедения и физики металлов ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», протокол № 3 от «06» октября 2026 г. На заседании присутствовало 35 человек. Результаты голосования: «за» – 32, «против» – 0, «воздержалось» – 3.

Зав.кафедрой Материаловедения и физики
металлов, д.т.н., доцент

Парфенов Е.В.

Профессор кафедры
Материаловедения и физики
металлов ФГБОУ ВО УУНиТ,
д.т.н., доцент

Боткин А.В.

Отзыв составил:
д.т.н., доцент Боткин Александр Васильевич, профессор кафедры Материаловедения и физики металлов ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»
Докторская диссертация защищена по специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»
Адрес: 450076, Приволжский федеральный округ, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, дом 32.
Сайт: https://uust.ru. Телефон: +7(347)272-63-70, факс: +7(347)273-67-78.
E-mail: rector@uust.ru

ДЛЯ ДОКУМЕНТОВ 2

Подпись Парфенова Е.В.
Удостоверяю «06» 10 2026 г.
Начальник общего отдела УУНиТ Ахметова Л.Ф.

Подпись Боткина А.В.
Удостоверяю «06» 10 2026 г.
Начальник общего отдела УУНиТ Ахметова Л.Ф.