

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

На правах рукописи

Деметрашвили Ирина Сергеевна

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

2.5.7. «Технологии и машины обработки металлов давлением»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, старший научный сотрудник  
Бурлаков Игорь Андреевич

## Содержание

|                                                                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>                                                                                                      | <b>4</b>  |
| <b>ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА.....</b>                                                                              | <b>10</b> |
| Выводы по главе 1 .....                                                                                                   | 26        |
| <b>ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>                                                                      | <b>28</b> |
| 2.1 Объект исследования.....                                                                                              | 28        |
| 2.2 Изготовление образцов .....                                                                                           | 30        |
| 2.3 Методы исследования микроструктуры и микротвердости.....                                                              | 30        |
| 2.4 Методика определения реологических свойств сплава ХН60ВТ .....                                                        | 32        |
| 2.5 Методика вычислительного эксперимента (моделирование) .....                                                           | 35        |
| 2.6 Методика натурного эксперимента .....                                                                                 | 47        |
| 2.7 Методы обработки экспериментальных данных .....                                                                       | 51        |
| 2.8 Методика исследования микроструктуры деформированных образцов .....                                                   | 52        |
| Выводы по главе 2 .....                                                                                                   | 52        |
| <b>ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ .....</b>                                                                           | <b>54</b> |
| 3.1 Величина напряжений в заготовке.....                                                                                  | 54        |
| 3.2 Величина напряжений в инструменте .....                                                                               | 64        |
| 3.3 Разработка расчетной модели для определения рационального натяга .....                                                | 71        |
| 3.4 Влияние трения .....                                                                                                  | 77        |
| 3.5 Анализ напряженного состояния в оснастке при высадке на<br>холодновысадочном автомате .....                           | 79        |
| <b>ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ .....</b>                                                                | <b>89</b> |
| 4.1 Исследование холодновысадочного инструмента из стали 4Х5МФС с<br>запрессованной вставкой из твердого сплава ВК15..... | 89        |
| 4.2 Исследуемый материал заклепок .....                                                                                   | 90        |
| 4.3 Силовые параметры и структурные изменения.....                                                                        | 91        |
| 4.4 Анализ напряженно-деформированного состояния методом микротвердости<br>.....                                          | 95        |

|                                                                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5 Влияние смазочных материалов .....                                                                                       | 101        |
| 4.6 Оценка нагрева инструмента при холодной высадке .....                                                                    | 102        |
| 4.7 Селективная сборка инструмента .....                                                                                     | 102        |
| Выводы по главе 4 .....                                                                                                      | 103        |
| <b>ГЛАВА 5 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ .....</b>                                                                                | <b>105</b> |
| 5.1. Статистическая оценка экспериментальных данных.....                                                                     | 105        |
| 5.2 Сравнение реологических моделей.....                                                                                     | 106        |
| 5.3 Оценка адекватности разработанной математической модели на основе<br>численного эксперимента .....                       | 109        |
| 5.4 Сравнение расчетных и экспериментальных данных распределения<br>деформаций и напряжений в сечении головки заклепки ..... | 110        |
| 5.5 Проверка теплового эффекта расчетной модели.....                                                                         | 112        |
| 5.6 Оценка влияния смазочных материалов на силу деформирования.....                                                          | 112        |
| Выводы по главе 5 .....                                                                                                      | 114        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>                                                                                                      | <b>116</b> |
| <b>ВЫВОДЫ .....</b>                                                                                                          | <b>117</b> |
| <b>СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ</b><br>.....                                                            | <b>120</b> |
| <b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>                                                                                        | <b>121</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>                                                                                                    | <b>133</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....</b>                                                                                                    | <b>146</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ В .....</b>                                                                                                    | <b>148</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....</b>                                                                                                    | <b>150</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** 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 [1].

При изготовлении авиационных двигателей в значительных количествах применяют клепаные узлы типа корпусов и панелей. Так, например, на один средний комплект газотурбинного двигателя требуется более 6 тысяч заклепок из жаропрочных сплавов, высадка из которых сопровождается высокими контактными напряжениями, что приводит к частому преждевременному выходу из строя формообразующей оснастки (менее 1,5 тыс. заклепок). Для повышения ее стойкости 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. 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.

**Степень научной разработанности.** Значительный вклад в развитие методов повышения стойкости штампового инструмента в процессах холодной объемной штамповки и высадки внесли труды таких российских и зарубежных ученых, как Н.И. Безухова, Ю.А. Геллера, В.М. Зуева, В.М. Кенько, И.В. Крагельского, Ю.М. Лахтина, И.Н. Степанкина, М.В. Сторожева, В.И. Феодосьева, Л.А. Шофмана, О.В. Голубева, Т. Altan, В. Avitzur, С. Mohr, K.L. Johnson и др.

Теоретической основой расчета напряженного состояния бандажированных инструментов служат классические решения для толстостенных цилиндров (Г. Ламе, С.П. Тимошенко). Работами И.Н. Степанкина и В.М. Кенько экспериментально и численно доказано, что создание предварительных сжимающих напряжений бандажированием является наиболее эффективным способом сдерживания роста усталостных трещин. Однако проведенный анализ выявил, что существующие методики выбора рациональных параметров бандажирования носят общий характер и не учитывают напряжение текучести обрабатываемого материала, что ограничивает возможности проектирования инструмента для высокопрочных сплавов. Кроме того, в литературе отсутствуют данные о реологических свойствах сплава ХН60ВТ в диапазоне температур и скоростей деформации, характерных для процесса холодной высадки.

**Целью работы** являлось определение путей повышения стойкости холодновысадочного деформирующего инструмента с учетом прочностных свойств деформируемых материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать реологические свойства никелевого сплава ХН60ВТ для скоростей деформации 0,001, 0,01 и 0,4 с<sup>-1</sup> 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, используемой для производства заклепок, с учетом механических свойств применяемых материалов.

**Объект исследования** являлся процесс холодной высадки заготовок.

**Предметом исследования** – стойкость деформирующего инструмента.

**Методы исследования.** В работе использовали комплекс взаимодополняющих методов. Экспериментальные исследования включали механические испытания на сжатие на машинах LFM50 и LFM250, оптическую и электронную металлографию, измерение микротвердости, а также регистрацию силовых и температурных параметров процесса высадки. Теоретические исследования основаны на математическом моделировании методом конечных элементов в программном комплексе QForm с применением реологических моделей, определенных автором. Обработку экспериментальных данных выполнили с использованием программ MATLAB и Excel, а также методов математической статистики.

**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 смазки на напряженное состояние формообразующей оснастки при холодной высадке 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 и теплых процессах формообразования, в том числе при получении заготовок холодной высадкой, 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 высадки заклепок, что подтверждено экспериментально.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что 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.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Реологическая модель сплава ХН60ВТ для диапазона температур 20–450 °С, обеспечивающая возможность анализа процессов обработки давлением в холодном и теплом состояниях.

2. Расчетная модель составного инструмента, учитывающая геометрию соединения, механические свойства материалов обоймы, вставки и высаживаемой заклепки, а также величину натяга, исключаяющего сдвиг вставки и пластическую деформацию обоймы.

**Личный вклад автора.** Диссертант принимала непосредственное участие в обсуждении и постановке цели и задач работы, в экспериментах по определению реологических свойств сплава ХН60ВТ, высадке 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.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Диссертационная работа по своей цели, задачам, содержанию и научной новизне соответствует пункту 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».

**Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность результатов подтверждается применением современного аттестованного оборудования, использованием метода конечных элементов и хорошей сходимостью (расхождение не более 10–12 %) расчетных данных с экспериментальными. Основные положения работы докладывались на 8 российских и международных конференциях, включая «Климовские чтения» (2025), QFORM ФОРУМ-2025, XII Международный технологический форум (2026), XII международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (2026). По теме 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.

**Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы и приложений, изложена на 151 странице машинописного текста,

включающего 63 рисунка, 18 таблиц, 4 приложения, библиографический список из 126 наименований.

## ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

Объем крепежных изделий в машиностроительной отрасли составляет около 30 тысяч наименований [1,2].

Одним из таких видов являются заклепки, которые играют важную роль в сборочных соединениях. Они особенно важны в конструкциях, подверженных вибрационным и ударным нагрузкам, а также в ситуациях, когда сварка не гарантирует необходимую надежность или когда нагрев соединительных участков может привести к деформации материала [3].

Заклепочные соединения обладают рядом достоинств, таких как:

1. Простота конструкции и технологического исполнения;
2. Возможность соединения разнородных и нагартованных материалов;
3. Пригодность для неразрушающего контроля;
4. Высокие стабильность и стойкость при действии ударных и вибрационных нагрузок.

Однако наряду с достоинствами заклепочные соединения обладают и некоторыми недостатками, что требует тщательного анализа при выборе типа соединения. К основным недостаткам можно отнести:

1. Повышенный расход металла на образование соединения;
2. Высокую трудоемкость, что повышает стоимость изделия;
3. Ослабление прочности соединяемых деталей отверстиями под заклепки;
4. Нарушение плотности швов в процессе эксплуатации

Разнообразие областей применения заклепочных соединений порождает их разновидность. Выбор формы закладной головки зависит от назначения заклепочного шва [4].

В швах, требующих большой прочности и плотности, применяют заклепки с полукруглой головкой [5] (рисунок 1, а, б). Заклепки с потайной или полупотайной головкой [6,7] (рисунок 1, в, г) используют в том случае, когда выступающие закладные головки заклепок мешают перемещению каких-либо деталей или в

случае больших гидродинамических и аэродинамических сопротивлений (в судостроении и самолетостроении). Заклепки с бочкообразной головкой (рисунок 1, д) применяют там, где они омываются горячими газами, в топках парового котла и т.п.; в процессе эксплуатации головки обгорают и приобретают полукруглую форму, сохраняя необходимую прочность. Заклепки с широкой головкой (рисунок 1, е) применяют для соединения тонколистовых (до 1,5 мм) материалов. Трубчатые заклепки (пистоны) [8,9] (рисунок 1, ж) – в слабонагруженных металлических соединениях, а также в соединениях неметаллических материалов (фибра и др.). Трубчатые заклепки применяются также для того, чтобы использовать их отверстие в заклепочном соединении для пропуска электрических проводников, крепежных или других деталей. Полупустотелые заклепки применяются в тех случаях, когда нежелательно или недопустимо заклепочные соединения подвергать ударам. В случае невозможности образования замыкающей головки обычными способами (в труднодоступных – «узких» местах) применяют взрывные заклепки (рисунок 1, з). Наиболее распространены сплошные стержневые заклепки общемашиностроительного применения с закладной головкой различной формы.

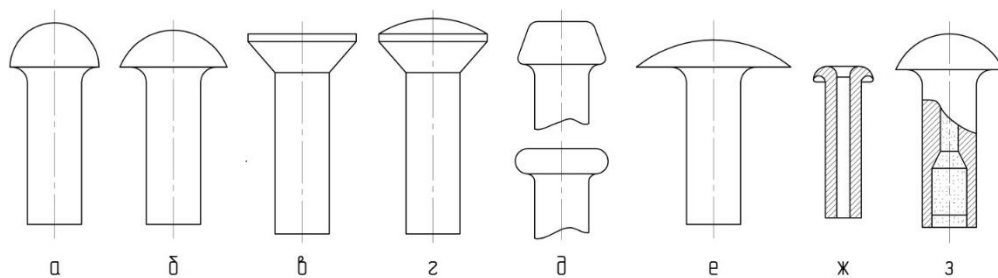


Рисунок 1 – Основные типы заклепок

а, б – полукруглая головка; в – потайная головка; г – полупотайная головка; д – бочкообразная головка; е – широкая головка; ж – взрывная заклепка; з – трубчатая заклепка

В авиастроении заклепочные соединения играют особенно важную роль, как обеспечивающие надежность и прочность конструкции самолета. Заклепки используются для соединения различных деталей фюзеляжа, крыльев, двигателя и

других элементов самолета. Благодаря своей прочности и устойчивости к вибрациям, заклепки позволяют создавать легкие и прочные конструкции, способные выдерживать экстремальные условия полета.

Не меньшее значение такие соединения имеют в авиадвигателестроении, где используются узлы из жаропрочных и жаростойких сплавов, работающие при высоких температурах и в режиме экстремальных нагрузок. Таким условиям отвечают никелевые сплавы, которые являются одним из важнейших материалов для современного авиастроения. В современных газотурбинных двигателях ~50 % деталей изготавливают из сплавов на основе никеля [10], которые работают в самых горячих зонах отечественных газотурбинных двигателей. Их используют для изготовления самых ответственных деталей и узлов всех отечественных газотурбинных двигателей [11]. При сборке узлов газотурбинного двигателя во избежание дополнительных температурных напряжений в соединении при колебаниях вследствие образования гальванической пары материалы заклепок и соединяемых деталей должны иметь одинаковый коэффициент температурного расширения и во избежание химической коррозии они должны быть близкого химического состава.

Количество заклепок в самолетах и вертолетах среднего веса достигает 400 000–800 000 шт., а в тяжелых и сверхтяжелых – до 1 500 000–2 000 000 шт. При таком количестве заклепок трудоемкость сборочно–клепальных работ составляет 30–35 % общей трудоемкости изготовления планера самолета (вертолета).

При изготовлении авиационных двигателей в значительных количествах применяют клепаные узлы типа корпусов и панелей. Так, например, на один комплект среднего газотурбинного двигателя требуется более 6 тысяч заклепок из коррозионностойких сталей типа 12Х18Н9Т, жаропрочных и жаростойких никелевых сплавов типа ХН60ВТ, ХН78Т и титановых сплавов ВТ20 и ВТ5–1. Из перечисленных сплавов в двигателестроении наиболее распространенным является никелевый сплав ХН60ВТ благодаря высокой прочности при повышенных температурах, стойкости к ползучести, усталостной выносливости и коррозионной

стойкости [12,13]. Эти свойства необходимы для деталей горячего тракта газотурбинных двигателей. Хотя многие аэрокосмические детали производят горячим деформированием, такие элементы, как высокопрочные заклепки, изготавливают холодной высадкой для достижения лучших механических свойств и точности размеров.

Для никелевых жаропрочных сплавов, таких как ХН60ВТ (ВЖ98), характерны высокое сопротивление деформации ( $\sigma_v > 750$  МПа), низкая теплопроводность и склонность к деформационному упрочнению. Эти свойства приводят к значительному росту контактных напряжений (до 3000–5000 МПа) и температурному разогреву заготовки (до 300–400 °С) в процессе высадки, что создает экстремальные условия работы инструмента и требует особого подхода к его проектированию.

Холодная объемная штамповка, и, в частности, холодная высадка, является одним из наиболее прогрессивных и высокопроизводительных методов получения крепежных деталей и других изделий сложной формы. Этот процесс позволяет изготавливать до нескольких сотен заготовок в минуту с высоким коэффициентом использования металла и благоприятным направлением волокон макроструктуры, что повышает прочность готовых изделий [14,15], в результате чего повышаются прочность деталей и сопротивление истиранию. Высадка обеспечивает получение деталей с местными утолщениями путем уменьшения длины части заготовки без нагрева металла [16]. Холодная высадка на прессах–автоматах обеспечивает получение деталей с точностью от 0,03–0,05 мм до 0,15–0,20 мм в зависимости от размеров высаживаемой детали и точности штамповой оснастки, которая подвергается в процессе эксплуатации значительному износу.

В настоящий момент заклепки изготавливают операциями высадки на специальных одно– и двухпозиционных высадочных автоматах, которые имеют большую производительность, достигающую 300–400 заготовок в минуту, на гидравлических прессах и на токарных станках; два последних способа являются низкопроизводительными.

Формообразование заклепки на автомате осуществляется в несколько последовательных переходов. На рисунке 2 представлена типовая схема высадки: исходная заготовка (1) после отрезки от прутка подается в зону деформации, где на первом переходе (2) производится предварительная осадка для формирования утолщения, а на завершающем переходе (3) осуществляется окончательное формообразование головки заклепки. Такая последовательность переходов позволяет получить деталь с благоприятным направлением волокон макроструктуры, огибающих контур головки, что повышает прочность и сопротивление истиранию [17].



Рисунок 2 – Основные переходы при высадке заклепок

1 – исходная заготовка; 2 – высадка (1-й переход); 3 – формирование готовой детали

Экономическая эффективность процесса холодной высадки в значительной мере определяется стойкостью штамповой оснастки – матриц и пуансонов. Затраты на инструмент и его эксплуатацию могут составлять до 15–25 % от себестоимости продукции, а простои из-за частых замен инструмента нарушают ритмичность производства [18].

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

Имеется большое количество производителей холодновысадочных автоматов для крепежных изделий, но среди них имеется ограниченное число

фирм, выпускающих специализированное оборудование для высадки заклепок, среди которых CH Heading machine, KUHNE, CDH, Chun Zu Machinery и др. Однако большинство серийных холодновысадочных автоматов не предназначено для изготовления заклепок из высокопрочных материалов, таких как никелевые жаропрочные сплавы. Это обусловлено высокими контактными нагрузками, возникающими при деформировании таких сплавов, что требует специальных конструктивных решений оснастки.

Правильный выбор материала формообразующего инструмента является одним из основных факторов, влияющих на его стойкость [18]. При выборе материала стоит руководствоваться масштабом производства (массовое или серийное), характером штамповочной операции, размерами и формой штампуемой детали и свойствами материала, из которого изготавливается данная деталь.

Работоспособность холодновысадочного инструмента лимитируется комплексом факторов, которые можно разделить на металлургические, конструктивные, технологические и эксплуатационные [19,20]. Основными видами выхода из строя оснастки являются: абразивный износ, усталостное разрушение, пластическая деформация и схватывание (задиры) [21,22].

Абразивный износ возникает вследствие трения между инструментом и заготовкой, особенно при наличии твердых частиц (оксидов, выкрошившихся карбидов) [23]. Сопротивление износу, согласно исследованиям Ф.П. Боудена и Д. Тейбора [22], пропорционально твердости и модулю упругости материала инструмента [24].

Усталостное разрушение проявляется в виде зарождения и роста микротрещин под действием длительных знакопеременных динамических нагрузок. В условиях холодной высадки доминирует отрыв (раскрытие трещины под действием растягивающих напряжений) [25,26]. Концентраторами напряжений, инициирующими трещины, служат карбидные включения, дефекты поверхности и конструктивные элементы.

По данным промышленной статистики [27,28], до 30 % выходов из строя холодновысадочной оснастки происходит из-за трещин в твердосплавных вставках матриц, около 25 % – вследствие износа контактных поверхностей пуансонов. Это подтверждает, что усталостное разрушение является одной из основных причин ограничения стойкости инструмента, особенно в зонах концентрации напряжений.

Пластическая деформация рабочих поверхностей является следствием превышения предела текучести материала инструмента под действием высоких контактных напряжений, которые, по данным ряда авторов, могут достигать 2000–2500 МПа и более [19,29] и схватывания – местного соединения инструмента и заготовки на межатомном уровне, приводящего к вырыванию частиц металла и образованию наростов на инструменте [30].

Наряду с такими известными способами повышения стойкости оснастки, как применение дорогих высокопрочных материалов, применение электроэрозионного легирования [31], поверхностной термической обработки [32-37], лазерного упрочнения [38,39] и нанесения износостойких покрытий [20,40-46] широко используется метод изготовления составного инструмента, включающего в себя вставку из твердого сплава типа ВК8–ВК25, бандажированную с натягом высокопрочной обоймой [47]. Это позволяет существенно снизить вероятность появления критичных для твердого сплава растягивающих напряжений и уменьшить вероятность выхода из строя формообразующего инструмента [48,49]. Твердые сплавы обладают высоким сопротивлением сжатию, благодаря чему их износостойкость в 20–25 раз выше стойкости матриц из закаленной инструментальной стали [50]. Однако чрезмерное увеличение натяга, снижая растягивающие напряжения, повышает уровень эквивалентных напряжений на рабочей поверхности, что может интенсифицировать износ [51]. Исследования влияния натяга на стойкость деформирующего инструмента, обобщенные в работе [23], показали, что существует диапазон натяга, в котором достигается максимальная стойкость. При недостаточном натяге преобладает разрушение магистральной трещиной, при избыточном – интенсивный износ и отслаивание

поверхностных слоев. Выбор рационального натяга должен производиться с учетом предела выносливости материала оснастки [52], существующие методики [52-55] дают ориентировочные значения, требуя уточнения для конкретных условий.

При высадке высокопрочных материалов, таких как ХН60ВТ [56], большая работа деформации приводит к нагреву заготовки, который, в свою очередь, может влиять на инструментальный узел [25]. Важно оценить возможное ослабление натяга в составном инструменте из-за теплового расширения, что может снизить предварительные напряжения и ресурс инструмента [17,25].

При проектировании технологических процессов холодной высадки важной задачей является прогнозирование напряженно-деформированного состояния (НДС) обрабатываемой заготовки и напряженного состояния (НС) формообразующего инструмента. От точности их определения зависит выбор материала оснастки, ее конструктивных параметров (включая величину натяга в составных инструментах), режимов деформирования и, в конечном итоге, стойкость инструмента и качество готовых изделий [57,58].

В зависимости от поставленных задач и доступного оборудования методы определения НДС заготовки и НС инструмента можно разделить на три группы: экспериментальные, теоретические (аналитические) и численные (компьютерное моделирование). Каждая из групп имеет свои достоинства, ограничения и области применения.

*Экспериментальные методы* позволяют получить наиболее достоверную информацию о реальном распределении напряжений и деформаций в материале. Однако они трудоемки, требуют специального оборудования и не всегда позволяют исследовать весь объем детали в динамике процесса.

*Метод микротвердости.* В процессе холодного деформирования происходит наклеп – упрочнение металла вследствие накопления дефектов кристаллической решетки. Чем выше степень деформации, тем выше твердость [59,60]. Измерение микротвердости по Виккерсу [61] на меридиональных шлифах

высаженных заклепок позволяет построить карту распределения накопленной деформации. Сопоставление этих данных с результатами компьютерного моделирования служит важным инструментом верификации реологических моделей [26,62].

Достоинства метода: высокая локальность измерений, возможность исследования малых объемов материала, относительно низкая стоимость оборудования. Недостатки: трудоемкость подготовки образцов, невозможность измерения напряжений (только косвенная оценка деформации), необходимость калибровочных зависимостей «твердость–деформация». Однако согласно работам ряда ученых [63-65], при деформации более 0,4–0,5 при данном методе исследования возникает ошибка в определении величины деформации.

*Металлографический метод* (изменение формы зерен). Пластическая деформация приводит к изменению формы и размеров зерен металла. В исходном состоянии (после рекристаллизационного отжига) зерна имеют равноосную форму. В процессе деформации зерна вытягиваются в направлении главного течения металла, и степень их вытянутости пропорциональна накопленной деформации [66,67]. Согласно [68,69], изменение размера зерна может служить количественной мерой деформации.

Достоинства: непосредственная визуализация течения металла (линии тока), возможность оценки направления деформации, наглядность. Недостатки: применим только для материалов с четко выявляемой зеренной структурой; трудоемкость количественной обработки; ограниченная точность при мелком зерне.

*Метод тензометрии.* Метод основан на измерении деформаций с помощью тензорезисторов, наклеиваемых на поверхность исследуемого объекта. При деформации объекта изменяется электрическое сопротивление тензорезистора, что позволяет рассчитать величину деформации в точке [70,71]. В задачах холодной высадки метод применяется для измерения деформаций на поверхности

инструмента (например, на наружной поверхности обоймы) и верификации результатов моделирования.

Достоинства: высокая точность измерения деформаций в реальном времени. Недостатки: сложность установки тензорезисторов в зоне высоких контактных давлений; ограниченный температурный диапазон (до 200–250 °С); точечный характер измерений.

*Аналитические методы* основаны на решении уравнений механики сплошной среды с упрощающими допущениями (осевая симметрия, плоское деформированное состояние, идеальная пластичность и др.). Классическим примером является метод верхней оценки, позволяющий оценить энергосиловые параметры процесса [72,73].

Метод основан на принципе минимума мощности диссипации: из всех кинематически возможных полей скоростей реализуется то, которое минимизирует полную мощность деформации. Это позволяет рассчитать силу деформирования без детального анализа напряжений.

Достоинства: относительно простые расчетные схемы, пригодные для предварительной оценки; возможность получения аналитических зависимостей. Недостатки: сильная зависимость от принятых допущений; невозможность точного описания сложных трехмерных процессов; ограниченная информация о полях напряжений.

*Численные методы* (метод конечных элементов). Наиболее универсальным и широко применяемым методом определения НДС заготовки и НС инструмента в задачах обработки металлов давлением является метод конечных элементов (МКЭ). МКЭ позволяет решать задачи в трехмерной постановке с учетом: нелинейных реологических свойств материалов; тепловых процессов (включая тепловыделение от пластической деформации и трения); контактного взаимодействия с трением; циклического нагружения инструмента; упругой деформации самого инструмента (так как пластическая деформация инструмента не допускается).

Среди программных комплексов, специализированных для моделирования процессов обработки металлов давлением, наиболее распространены QForm (Россия), Deform (США), Forge (Франция), Simufact Forming (Германия) [74,75].

QForm – отечественный программный комплекс, широко применяемый на промышленных предприятиях и в научных исследованиях. Он обеспечивает автоматическое построение конечно–элементной сетки с адаптивным сгущением, учет тепловых процессов, широкую базу реологических моделей материалов, возможность моделирования составных инструментов (бандажированных матриц и пуансонов), анализ напряжений методом трассируемых точек.

Точность моделирования процессов ОМД определяется адекватностью описания поведения материала. Без корректной реологической модели невозможна количественная верификация конечно-элементной модели по силе деформирования, формообразованию заготовки или распределению деформации.

В практике построения математической модели сопротивления деформации для аппроксимации экспериментальных кривых «напряжение текучести – деформация» применяют степенные или экспоненциальные зависимости, либо зависимости, основанные на термомеханических коэффициентах. Используются модели Смирнова-Аляева [76], Целикова [77], Томленова [78], Третьякова, Зюзина [79], Воуса, зависимости Хензеля – Шпиттеля с 5 и 9 коэффициентами и др.

Достоинства МКЭ: высокая точность, возможность моделирования сложных трехмерных процессов, учет широкого спектра физических явлений, визуализация полей напряжений, деформаций и температур. Недостатки: требует квалифицированного подхода, верификации моделей экспериментальными данными, значительных вычислительных ресурсов.

*Метод координатных сеток.* Метод заключается в нанесении на поверхность или в объем заготовки регулярной сетки линий (например, методом фотолитографии или гравировки) и последующем измерении ее искажений после деформации [78,80]. По изменению размеров ячеек сетки рассчитываются компоненты тензора деформации.

Достоинства: наглядность, возможность получения полей деформаций. Недостатки: трудоемкость, сложность нанесения сетки на высокопрочные материалы, невозможность измерения напряжений.

*Метод фотоупругости.* Метод основан на способности некоторых прозрачных материалов (например, эпоксидных смол) обнаруживать двойное лучепреломление при действии механических напряжений [81,82]. В задачах обработки давлением метод применяется для моделирования напряженного состояния инструмента (модели из оптически активных материалов) и визуализации зон концентрации напряжений.

Достоинства: наглядность, возможность оценки напряжений (а не только деформаций). Недостатки: ограниченное применение (только для прозрачных моделей, не для реальных металлических деталей); сложность учета пластических деформаций.

Для наглядности основные характеристики методов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Сравнение методов определения НДС заготовки и НДС инструмента

| Метод                 | Определяемые параметры                         | Преимущества                                      | Недостатки                                              |
|-----------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1                     | 2                                              | 3                                                 | 4                                                       |
| Микротвердость        | Деформация (косвенно)                          | Локальность, простота                             | Трудоемкость, калибровка                                |
| Металлография (зерна) | Деформация, направление течения                | Наглядность, визуализация                         | Трудоемкость, только для материалов с четкой структурой |
| Тензометрия           | Деформации (поверхность)                       | Высокая точность, реальное время                  | Трудоемкость                                            |
| Аналитические методы  | Сила, мощность                                 | Простота, аналитические формулы                   | Упрощающие допущения                                    |
| МКЭ (QForm и др.)     | Полные поля напряжений, деформаций, температур | Универсальность, высокая точность при верификации | Требуется верификация, вычислительные ресурсы           |
| Координатные сетки    | Деформации (объем)                             | Наглядность, полнота                              | Трудоемкость, только для деформаций                     |
|                       |                                                |                                                   |                                                         |

Продолжение таблицы 1

| 1             | 2                   | 3                                   | 4                             |
|---------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Фотоупругость | Напряжения (модели) | Наглядность, полные поля напряжений | Только для прозрачных моделей |

Важным элементом конечно-элементного моделирования является задание реологической модели материала заготовки – зависимости напряжения текучести от величины и скорости деформации и температуры. Для описания поведения металлов в процессах обработки давлением широко применяются аналитические модели Хензеля–Шпиттеля [26], Джонсона–Кука и другие, которые учитывают деформационное упрочнение, влияние скорости деформации и нагрев.

Применение легированных никелевых сплавов для изготовления деталей газотурбинных двигателей позволяет существенно повысить мощность и ресурс авиационных двигателей и сократить расход топлива. Однако никелевые сплавы наряду с достоинствами и имеют свои недостатки. Из-за высокой прочности никелевые сплавы трудно поддаются обработке, как механической, так и обработке давлением, осуществляемой, как правило, с нагревом до высоких температур, что повышает производственные затраты. Так, например, деформационный диапазон никелевых сплавов находится в пределах 980–1180 °С и в программе QForm в базе деформируемых материалов свойства по сопротивлению материала деформированию даны преимущественно в диапазоне 900–1200 °С. Данные по сопротивлению деформации сплава в холодном и теплом состояниях (20–400 °С) сплава ХН60ВТ отсутствуют и для моделирования процесса холодной высадки изделий из него требуется изучение его реологических характеристик.

Трение на контактных поверхностях «инструмент–заготовка» является одним из ключевых факторов, определяющих энергосиловые параметры процесса, напряженное состояние инструмента, качество поверхности готовых изделий и стойкость оснастки [83,22].

В процессах холодной объемной штамповки контактные давления достигают 2000–3000 МПа и более. В этих условиях существенную роль играют адгезионное взаимодействие – схватывание материалов инструмента и заготовки на

межатомном уровне и деформационная составляющая – пластическое течение материала в зоне контакта, а также тепловые эффекты – выделение тепла от трения и пластической деформации.

Смазочные материалы в процессах холодной штамповки выполняют несколько функций [84,85]: снижение коэффициента трения – разделение контактирующих поверхностей слоем смазки, уменьшение касательных напряжений на границе; антиадгезионное действие – предотвращение схватывания инструмента и заготовки, снижение риска образования наростов и задиров; теплоотвод – отвод тепла, выделяющегося в зоне деформации и трения, снижение тепловой нагрузки на инструмент; защита от коррозии – предотвращение коррозионного повреждения инструмента между циклами работы.

В зависимости от механизма действия смазки делятся на: жидкие (минеральные масла, синтетические масла, эмульсии) – работают по гидродинамическому или граничному механизму; твердые (графит, дисульфид молибдена) – создают разделяющий слой из твердых частиц; конверсионные (фосфатирование, оксалатирование) – образуют на поверхности заготовки химически связанный слой, удерживающий смазку [86].

Виды смазочных материалов для холодной штамповки. В промышленности для холодной высадки применяются следующие типы смазочных материалов [87,88]: минеральные масла (И–12, И–20, И–40) – универсальные, для невысоких давлений; синтетические масла (полиалкиленгликоли) – для высоких давлений, широкого температурного диапазона; эмульсии (масло–в–воде, вода–в–масле) – для массового производства, экологичны; коллоидно–графитовые суспензии (АГ–4 по ТУ 113-08-553-84) – для высоких температур и труднодеформируемых материалов; твердые смазки (дисульфид молибдена, графит) – для экстремальных давлений; конверсионные покрытия (фосфатирование цинком или марганцем) — для подготовки поверхности перед волочением и высадкой.

Многочисленными исследованиями установлено, что применение смазочных материалов позволяет [89,90]: снизить силу деформирования на 10–30 % в

зависимости от условий; уменьшить контактные напряжения на инструменте; предотвратить схватывание и задиры на поверхности инструмента; повысить стойкость оснастки в 2–5 раз и более; улучшить качество поверхности готовых изделий.

В работе [91] показано, что для холодной высадки заклепок из алюминиевых сплавов применение смазки позволяет снизить коэффициент трения с 0,3–0,4 до 0,05–0,1. Для высокопрочных сталей и никелевых сплавов, склонных к адгезионному схватыванию, выбор смазки имеет еще большее значение.

В.П. Романовский [87] отмечает, что вытяжные штампы в большинстве случаев выходят из строя не по причине полного износа, а вследствие образования задиров, царапин и дефектов поверхности штампуемых деталей. Применение смазок существенно уменьшает влияние этих факторов.

В программных комплексах для моделирования процессов обработки металлов давлением используются различные модели трения [92,93].

Закон Кулона – классическая модель, в которой касательное напряжение пропорционально нормальному давлению. Прост в реализации, но ограниченно применим при высоких давлениях.

Закон Леванова – широко используется в отечественных разработках. Предполагает постоянство коэффициента трения в широком диапазоне давлений, что подтверждено экспериментально для многих процессов.

Закон трения постоянным касательным напряжением – применяется при очень высоких давлениях, когда контактное трение достигает предела текучести материала на сдвиг.

Для моделирования процессов с применением смазок необходимо задавать коэффициент трения, соответствующий конкретному смазочному материалу. В ряде работ [94,95] показано, что коэффициент трения может варьироваться в диапазоне 0,02–0,4 в зависимости от смазки, давления, температуры и материала заготовки.

Выбор рациональной смазки должен учитывать не только снижение сил трения, термическую стабильность, адгезию к материалу заготовки, но и экологичность и экономическую эффективность [96].

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 управляемое 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.

Проведенный анализ также 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.

## **Выводы по главе 1**

1. Проведен аналитический обзор литературы, посвященный применению заклепочных соединений в машиностроении, позволивший определить, что заклепки из высокопрочных материалов, в частности никелевого жаропрочного сплава ХН60ВТ, являются важными элементами конструкций газотурбинных двигателей. Установлено, что холодная высадка является основным методом их изготовления, однако применение высокопрочных материалов создает сложные условия работы инструмента.

2. Выполнен анализ факторов, определяющих стойкость холодновысадочного инструмента, показавший, что основными видами выхода его из строя являются абразивный износ, усталостное разрушение, пластическая деформация и схватывание. Показано, что для снижения растягивающих напряжений и повышения ресурса твердосплавных вставок широко применяется метод бандажирования составного инструмента с натягом.

3. Установлено, что существующие методики выбора рациональных параметров бандажирования (величины натяга) носят общий или эмпирический характер и не учитывают прочностные характеристики обрабатываемого материала заготовки, что ограничивает возможность грамотного проектирования специализированного инструмента для высадки высокопрочных никелевых сплавов.

4. 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. Также выявлена необходимость в количественной оценке влияния смазочных материалов и теплового состояния инструмента на напряженно-деформированное состояние оснастки.

5. Определено, что комплексное решение задач по исследованию реологии сплава ХН60ВТ, моделированию процесса высадки и обоснованию рациональных параметров составного инструмента позволит повысить его стойкость, что имеет

важное значение для обеспечения эффективности производства крепежных изделий для авиационного двигателестроения.

## ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Объект исследования

В качестве исследуемого материала был выбран никелевый жаропрочный сплав ХН60ВТ (ВЖ98, ЭИ868), широко применяемый в авиационном двигателестроении для изготовления ответственных деталей, работающих при высоких температурах и нагрузках. Исследование проводилось на материале в виде прутка диаметром 4,0 мм в термообработанном состоянии.

Химический состав сплава ХН60ВТ (мас. %) представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав сплава ХН60ВТ (мас. %)

| Cr    | W     | Fe   | Mo   | Al   | Ti   | Mn   | Si   | Ni   |
|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 25,23 | 14,65 | 1,30 | 0,69 | 0,37 | 0,33 | 0,28 | 0,27 | Осн. |

Основные механические и физические свойства при комнатной температуре приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Механические свойства сплава ХН60ВТ при  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  [97]

| Временное сопротивление $\sigma_b$ ,<br>Н/мм <sup>2</sup> , не более | Относительное                                                      |                    |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------|
|                                                                      | удлинение $\delta_5$<br>при $L_{\text{расч.}} = 100\text{ мм}$ , % | сужение $\psi$ , % |
|                                                                      | не менее                                                           |                    |
| 1030                                                                 | 30                                                                 | 50                 |

Таблица 4 – Физические свойства сплава ХН60ВТ при  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  [97]

|                              |      |
|------------------------------|------|
| Плотность, кг/м <sup>3</sup> | 8800 |
| Теплопроводность, Вт/(м·°C)  | 29,6 |
| Теплоемкость, Дж/кг·K        | 590  |
| Модуль Юнга, ГПа             | 210  |
| Коэффициент Пуассона         | 0,33 |

Микроструктура исходного материала (рисунки 3, 4) представляет собой полиэдрические зерна с линиями двойникования, средний размер зерна не превышает 10 мкм. В структуре отмечаются выделения сыпцеобразных и

продолговатых интерметаллидов на основе вольфрама, а также мелкие строчки нитридов титана.

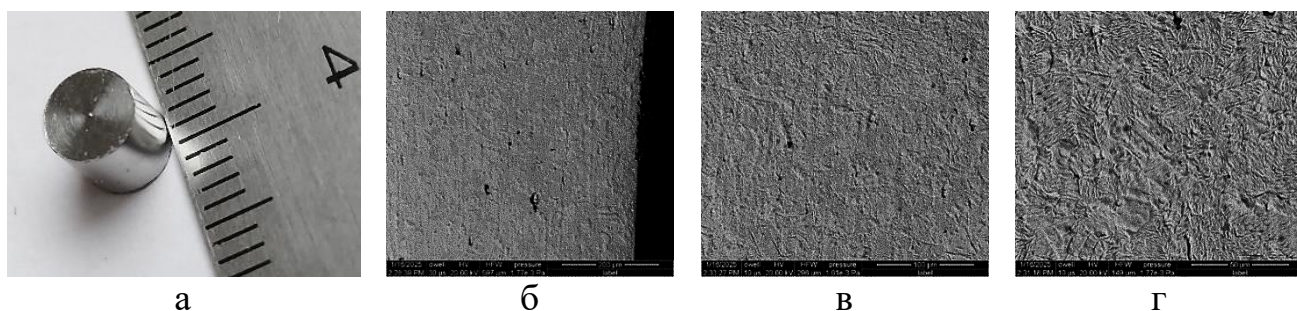
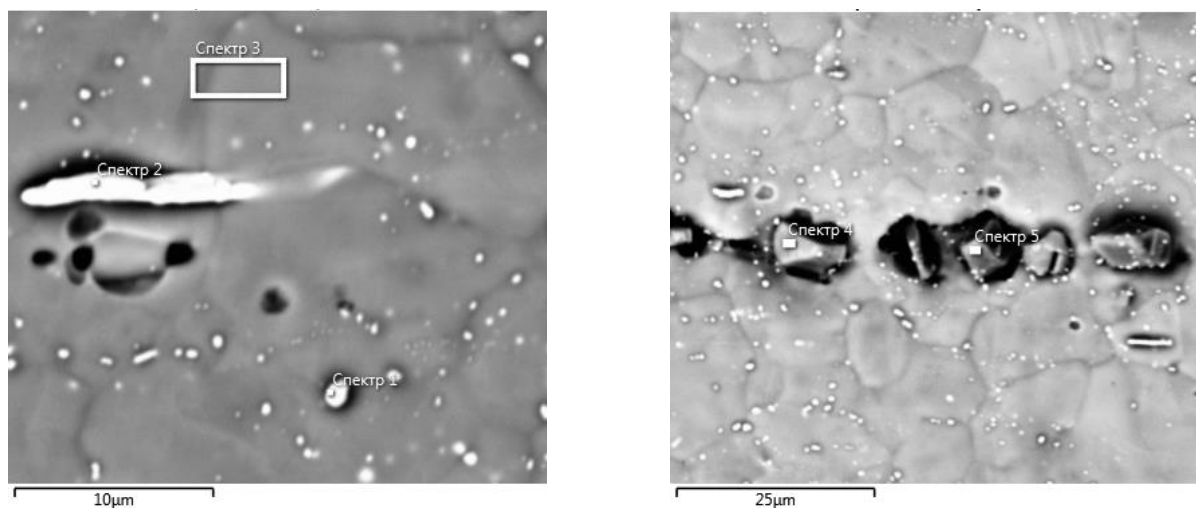


Рисунок 3 – Исходный образец никелевого сплава ХН60ВТ (а); структура исходного образца, увеличение: б –  $\times 250$ , в –  $\times 500$ , г –  $\times 1000$



| Название спектра | N     | Al   | Ti    | Cr    | Fe   | Ni    | W     | Сумма  |
|------------------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|--------|
| Спектр 1         | 0,00  | 0,19 | 0,76  | 18,06 | 1,30 | 27,99 | 51,69 | 100,00 |
| Спектр 2         | 0,00  | 0,20 | 0,29  | 16,04 | 1,11 | 30,01 | 52,35 | 100,00 |
| Спектр 3         | 0,00  | 0,48 | 0,44  | 26,09 | 2,11 | 56,35 | 14,54 | 100,00 |
| Спектр 4         | 3,67  | 0,13 | 45,25 | 8,69  | 0,48 | 11,76 | 30,03 | 100,00 |
| Спектр 5         | 10,27 | 0,11 | 43,03 | 11,74 | 0,69 | 15,73 | 18,42 | 100,00 |

Рисунок 4 – Данные рентгеноспектрального микроанализа

В связи со сложным химическим составом, как видно из рисунка 2, материал характеризуется значительной ликвацией.

## **2.2 Изготовление образцов**

Все образцы для лабораторных исследований имели цилиндрическую форму. Изготовление образцов осуществлялось методом электроэрозионной резки на станке модели ONA AF-25. Данный метод позволяет получать образцы с высокой точностью геометрических размеров без изменения структурно-фазового состояния материала.

Для испытаний на сжатие использовались образцы диаметром 4,0 мм и высотой 5,0 мм. Для экспериментальной высадки заклепок исходные заготовки имели диаметр 4,0 мм и длину  $10,85 \pm 0,05$  мм.

## **2.3 Методы исследования микроструктуры и микротвердости**

### **2.3.1 Подготовка образцов для металлографических исследований**

Для проведения металлографических исследований образцы, вырезанные из полуфабрикатов и заготовок до и после деформации при различных температурно-скоростных условиях, подвергались шлифовке и полировке. Для выявления микроструктуры применялось электролитическое травление.

### **2.3.2 Оборудование для микроскопических исследований**

Исследования микроструктуры осуществляли с применением следующего оборудования:

- бинокулярный микроскоп Olympus Delta с увеличениями  $\times 25$ ,  $\times 100$ ,  $\times 500$ ,  $\times 1000$ ,  $\times 2500$ ;
- электронный микроскоп FEI QUANTA 650 с увеличением до  $\times 5000$ ;
- электронный микроскоп JSM-5600 для исследования микроструктуры с увеличением  $\times 2000$ .

Микроструктуру изучали в поляризованном свете, используя шлифы, подвергнутые электролитической полировке.

### 2.3.3 Анализ напряженного состояния методом измерения микротвердости

Для анализа напряженного состояния в высаженных заклепках методом микротвердости необходимо определение тарировочной кривой зависимости твердости от величины деформации. Для получения тарировочной кривой было осажено при комнатной температуре 19 образцов с логарифмическими деформациями от 0,1 до 1,63 в соответствии с матрицей, представленной в таблице 5.

Таблица 5 – Матрица эксперимента для получения тарировочной кривой

| № образца | Деформация $\varepsilon$ |
|-----------|--------------------------|
| 1         | 0,10                     |
| 2         | 0,16                     |
| 3         | 0,22                     |
| 4         | 0,29                     |
| 5         | 0,35                     |
| 6         | 0,43                     |
| 7         | 0,51                     |
| 8         | 0,69                     |
| 9         | 0,79                     |
| 10        | 0,83                     |
| 11        | 0,91                     |
| 12        | 0,91                     |
| 13        | 1,14                     |
| 14        | 1,45                     |
| 15        | 1,58                     |
| 16        | 1,60                     |
| 17        | 1,60                     |
| 18        | 1,61                     |
| 19        | 1,63                     |

Осаженные образцы были разрезаны электроэрозионным способом в меридиональной плоскости.

Микротвердость образцов замеряли по Виккерсу (HV) в плоскости разреза на приборе DuraScan-20 с нагрузкой на индентор 1 Н в соответствии с требованиями ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости в осаженных образцах осуществляли в

трех точках согласно схеме (рисунок 5) и для построения тарировочной кривой использовали среднее значение.



Рисунок 5 – Схема измерения микротвердости

Высаженные заклепки так же были разрезаны электроэрозионным способом в меридиональной плоскости. Схема измерения микротвердости показана на рисунке 6.

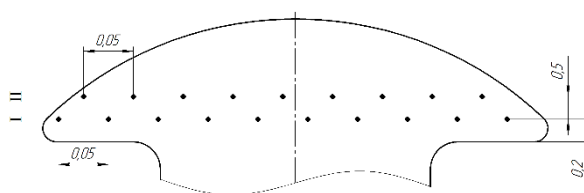


Рисунок 6 – Схема измерений микротвердости

## 2.4 Методика определения реологических свойств сплава ХН60ВТ

### 2.4.1 Оборудование для испытаний на сжатие

Испытания на сжатие проводились на универсальных электромеханических испытательных машинах:

- LFM250 (максимальная нагрузка 250 кН) – для испытаний при комнатной температуре (20 °С);
- LFM50 (максимальная нагрузка 50 кН) – для испытаний при повышенных температурах (100, 200, 300, 350 и 450 °С).

Технические характеристики испытательных машин представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики испытательных машин

| Параметр                                               | Показатель          |                    |
|--------------------------------------------------------|---------------------|--------------------|
|                                                        | LFM50               | LFM250             |
| Максимальная нагрузка                                  | 50 кН               | 250 кН             |
| Минимальная нагрузка                                   | 0,250 кН            | 1,25 кН            |
| Максимальная скорость деформации                       | 0,4 с <sup>-1</sup> | 30 с <sup>-1</sup> |
| Исполнение                                             | Настольная          | Напольная          |
| Ход траверсы                                           | до 1000 мм          |                    |
| Точность всей системы согласно ISO 7500-1 и EN 10002-2 | 0,5 %               |                    |
| Конструкция                                            | 2 колонная рама     |                    |
| Тип испытания                                          | Статические         |                    |
| Тип привода                                            | Электромеханический |                    |

Машина LFM-50 оснащена нагревательным устройством, обеспечивающим подогрев как деформирующего инструмента, так и образца исследуемого материала.

Испытания проводились на воздухе при постоянной температуре без применения смазочных материалов.

#### 2.4.2 Параметры и матрица эксперимента

Температурный интервал испытаний (20–450 °С) был выбран на основе расчета, согласно которому в процессе высадки материал заклепки нагревается до 400 °С. Скорости деформации составили  $\dot{\epsilon} = 0,001, 0,01$  и  $0,4 \text{ с}^{-1}$ . Постоянство скорости деформации в ходе испытаний обеспечивалось программным управлением скоростью перемещения траверсы испытательной машины. Скорость перемещения траверсы рассчитывалась по формуле:

$$S_i = h_0 - \exp(-\dot{\epsilon}_i \times t) \times h_0,$$

где  $S_i$  – перемещение траверсы испытательной машины;  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации;  $t$  – время;  $h_0$  – исходная высота образца исследуемого материала.

Для каждого температурно-скоростного режима было испытано по три образца. Результаты испытаний регистрировались в виде диаграмм «сила деформации – ход инструмента».

Матрица экспериментальных исследований представлена в таблице 7.

Таблица 7 – Матрица экспериментальных исследований

| № образца | Температура сжатия $T$ , °C | Скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ , с <sup>-1</sup> | Количество образцов, ед. |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1         | 20                          | 0,001                                                     | 3                        |
| 2         | 20                          | 0,01                                                      | 3                        |
| 3         | 20                          | 0,4                                                       | 3                        |
| 4         | 100                         | 0,001                                                     | 3                        |
| 5         | 100                         | 0,01                                                      | 3                        |
| 6         | 100                         | 0,4                                                       | 3                        |
| 7         | 200                         | 0,001                                                     | 3                        |
| 8         | 200                         | 0,01                                                      | 3                        |
| 9         | 200                         | 0,4                                                       | 3                        |
| 10        | 300                         | 0,001                                                     | 3                        |
| 11        | 300                         | 0,01                                                      | 3                        |
| 12        | 300                         | 0,4                                                       | 3                        |
| 13        | 350                         | 0,001                                                     | 3                        |
| 14        | 350                         | 0,01                                                      | 3                        |
| 15        | 350                         | 0,4                                                       | 3                        |
| 16        | 450                         | 0,001                                                     | 3                        |
| 17        | 450                         | 0,01                                                      | 3                        |
| 18        | 450                         | 0,4                                                       | 3                        |

### 2.4.3 Обработка экспериментальных данных

Полученные диаграммы «сила–ход» были перестроены в координатах «напряжение текучести – истинная деформация». Пересчет осуществлялся с использованием следующих соотношений:

– истинное напряжение:  $\sigma = p_i/f_i$ , где  $p_i$  – сила деформации,  $f_i$  – текущая площадь поперечного сечения образца;

– истинная деформация:  $\varepsilon = \ln(h_0/h_i)$ , где  $h_0$  – исходная высота образца,  $h_i$  – текущая высота образца.

Для каждого температурно-скоростного режима определялись средние значения напряжения текучести, а также оценивался разброс экспериментальных данных.

#### 2.4.4 Построение реологической модели по методу Хензеля–Шпиттеля

Для математического описания сопротивления деформации сплава ХН60ВТ была применена эмпирическая модель, предложенная Хензелем и Шпиттелем, устанавливающая связь между напряжением текучести и термомеханическими параметрами (деформация, скорость деформации, температура) и имеет следующий вид:

$$\sigma_i = A \exp(m_1 T) T^{m_9} \varepsilon_i^{m_2} \exp(m_4 / \varepsilon_i) (1 + \varepsilon_i)^{m_5 T} \exp(m_7 \varepsilon_i) \dot{\varepsilon}^{m_3} \dot{\varepsilon}^{m_8 T}, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  – напряжение текучести, МПа;  $\varepsilon$  – величина деформации;  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ ;  $T$  – температура заготовки,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $A, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_7, m_8, m_9$  – неизвестные коэффициенты модели сопротивления деформации.

Определение неизвестных коэффициентов модели осуществлялось методом наименьших квадратов с использованием алгоритма Левенберга–Марквардта [98], реализованного в вычислительных программах MATLAB и Microsoft Excel.

#### 2.4.5 Построение табличной функции

Для использования в программном комплексе QForm реологические свойства сплава ХН60ВТ были также представлены в виде табличной функции. В табличной форме напряжение текучести задается для дискретного набора значений деформации, скорости деформации и температуры. Данный подход позволяет непосредственно использовать экспериментальные данные без дополнительной аппроксимации и обеспечивает высокую точность расчетов при моделировании процессов обработки металлов давлением.

### 2.5 Методика вычислительного эксперимента (моделирование)

#### 2.5.1 Программное обеспечение

Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовки и напряженного состояния инструмента в процессе холодной высадки заклепок проводились методом конечных элементов (МКЭ). В качестве

программного комплекса использовался QForm (версии 11 и 12), предназначенный для математического моделирования технологических процессов обработки металлов давлением с учетом термомеханических процессов нагрева и охлаждения металла, а также взаимодействия деформирующейся заготовки с технологическим инструментом и оборудованием.

### 2.5.2 Реологические модели для моделирования

Для моделирования процесса высадки заклепок из сплава ХН60ВТ использовались реологические модели, полученные автором:

- аналитическая модель, построенная по методу Хензеля–Шпиттеля;
- табличная функция, построенная на основе экспериментальных данных.

Для материалов инструмента (твердый сплав ВК15 – вставка, сталь 4Х5МФС – обойма и корпус) реологические модели были взяты из стандартной базы данных материалов инструментов программы QForm.

### 2.5.3 Исходные данные для моделирования

Моделирование процесса формообразования заготовок выполнялось со следующими исходными данными, сведенными в таблицу 8.

Таблица 8 – Исходные данные для моделирования

| Параметр                                   | Значение / Описание                              |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Тип заготовки                              | Цилиндрической формы из никелевого сплава ХН60ВТ |
| Размеры заготовки,                         | $\varnothing 4,0 \times 10,85 \pm 0,05$          |
| Ход инструмента, мм                        | 2,5                                              |
| Объем заготовки                            | Неизменный                                       |
| Напряженное состояние                      | Трехмерное (3D-расчет)                           |
| Начальная температура формообразования, °С | 20                                               |
| Фактор трения (по закону Леванова)         | 0,2                                              |
| Учет тепловых процессов                    | Да                                               |
| Скорость формообразования, мм/мин          | 2                                                |

Моделирование высадки осуществлялась в соответствии со схемой, показанной на рисунке 7.

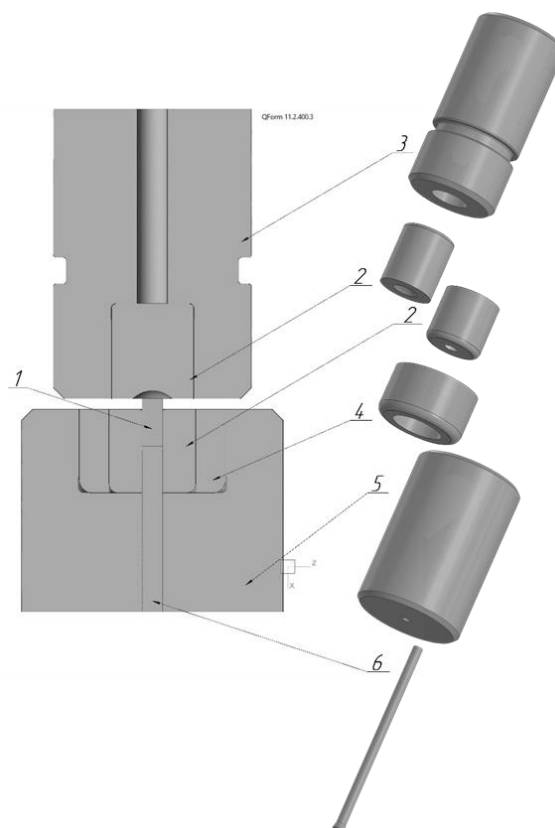


Рисунок 7 – Схема формообразующего инструмента для высадки заклепок

1 – заготовка; 2 – вставка из твердого сплава; 3 – корпус пуансона;

4 – обойма; 5 – корпус матрицы; 6 – выталкиватель

#### 2.5.4 Определение параметров составного инструмента

Как показано в главе 1, одним из эффективных способов повышения стойкости холодновысадочного инструмента является создание в твердосплавных вставках предварительных сжимающих напряжений путем их запрессовки в бандажирующие обоймы с натягом. С учетом этого в настоящей работе для формообразования заклепок применяется оснастка составной конструкции. Пуансон и матрица состоят из твердосплавной вставки, воспринимающей непосредственно контактные нагрузки, и стальной обоймы, создающей необходимый натяг.

*Материалы элементов составного инструмента.* В качестве материала твердосплавных вставок выбран сплав ВК15 [99], обладающий высокими прочностью и износостойкостью. Химический состав сплава представлен в таблице 9.

Таблица 9 – Химический состав сплава ВК15

| Массовая доля элемента. % |      |
|---------------------------|------|
| Co                        | WC   |
| до 15                     | 85 % |

Для бандажирующих обойм и корпусных деталей инструмента используется сталь 4Х5МФС [100], обладающая высокой прочностью, вязкостью и теплопроводностью. Химический состав стали приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Химический состав стали 4Х5МФС (мас. %)

| Массовая доля элемента. % |           |           |           |           |           |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| C                         | Si        | Mn        | Cr        | V         | Mo        |
| 0,32–0,40                 | 0,90–1,20 | 0,20–0,50 | 4,50–5,50 | 0,30–0,50 | 1,20–1,50 |

Физико-механические свойства материалов вставки и обоймы, определяющие работоспособность составного инструмента, приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Физико-механические свойства материалов составного инструмента

| Материал | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Твердость | Сопротивление изгибу, МПа | Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup> | Коэффициент теплового расширения, 10 <sup>-6</sup> /K |
|----------|------------------------------|-----------|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| ВК15     | 13,9                         | 86 HRA    | 2160                      | 0,90                                 | 10,1–17,1                                             |
| 4Х5МФС   | 7,8                          | 50–54 HRC | —                         | 30–40                                | 11,5                                                  |

Конструктивные схемы составного пуансона и составной матрицы приведены на рисунках 8 и 9, соответственно. В рамках установленных допусков колебания размеров составляют для пуансона 0,035 мм, для матрицы 0,031 мм.

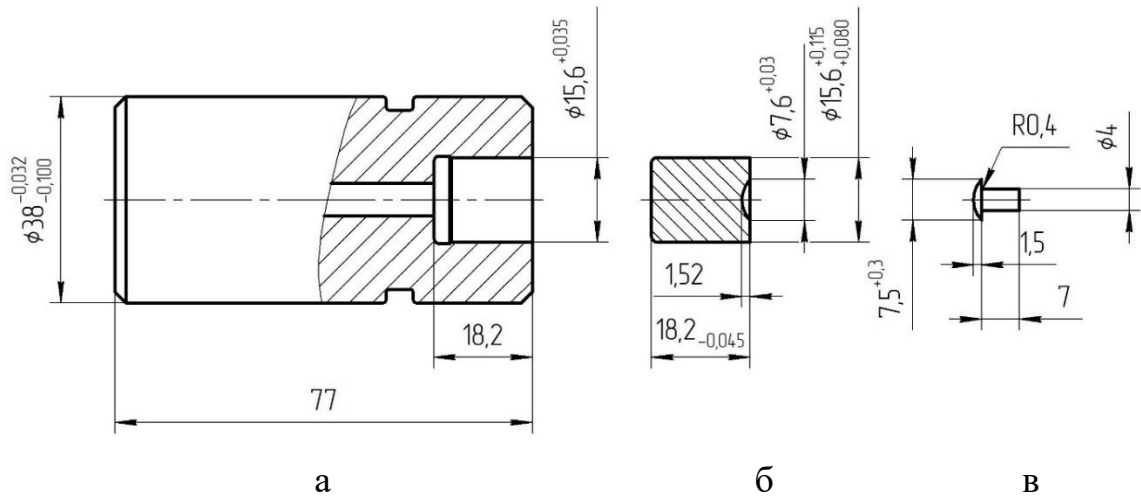


Рисунок 8 – Эскиз обоймы пуансона

а – обойма; б – формообразующая полость; в – получаемая деталь

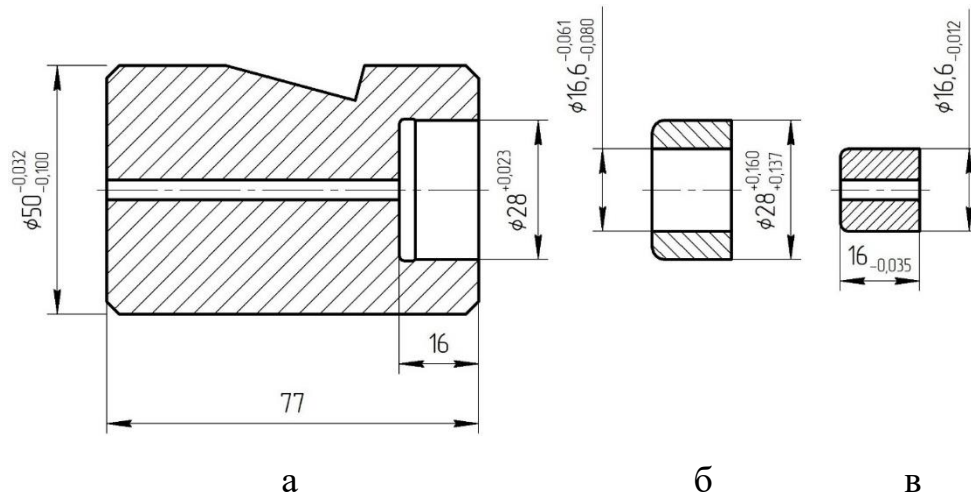


Рисунок 9 – Эскиз матрицы

а – корпус; б – обойма; в – вставка

*Методика расчета натяга в составном инструменте.* Для обеспечения работоспособности составного инструмента необходимо определить рациональную величину натяга между твердосплавной вставкой и стальной обоймой. Натяг создает контактное давление на посадочной поверхности, которое должно быть достаточным для предотвращения сдвига (проворота или выдавливания) вставки под действием осевой силы высадки, но при этом не вызывать пластической деформации обоймы.

На рисунках 10 и 11 представлены схемы соединения с гарантированным натягом и распределения напряжений в элементах составного инструмента.

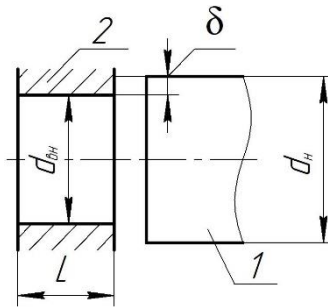


Рисунок 10 – Соединение с гарантированным натягом

1 – вставка; 2 – обойма;  $d_n$  – диаметр вставки;  $d_{вн}$  – диаметр обоймы;  
 $\delta$  – натяг,  $d_{вн} - d_n$ ;  $L$  – посадочная длина контактной поверхности

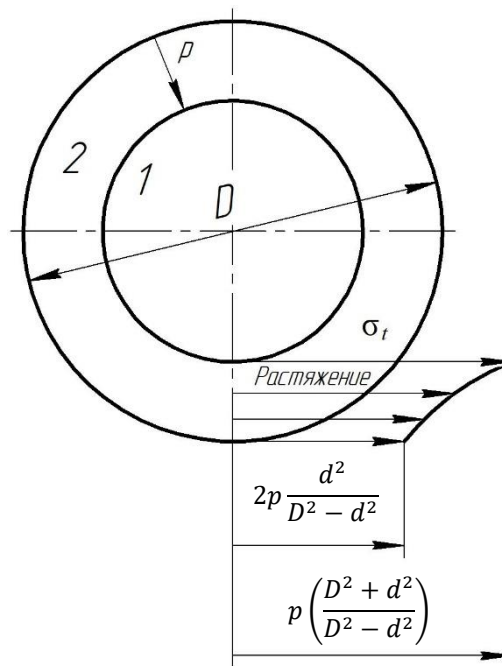


Рисунок 11 – Схема соединения

1 – вставка; 2 – обойма;  $D$  – наружный диаметр;  
 $\sigma_t$  – напряжение растяжения;  $p$  – контактное давление

Расчет натяга выполнялся в два этапа: определение минимального натяга из условия отсутствия сдвига вставки и определение максимального натяга из условия отсутствия пластической деформации обоймы. В его основе лежат:

- классические решения теории упругости для толстостенных цилиндров (задача Ламе);
- геометрические параметры инструмента: посадочный диаметр  $d$ , наружный диаметр обоймы  $D$ , длина контактной поверхности  $L$ ;
- физико-механические характеристики материалов вставки и обоймы: модули упругости  $E_1, E_2$ , коэффициенты Пуассона  $\mu_1, \mu_2$ , предел текучести материала обоймы  $\sigma_{т\ об}$ ;
- характеристики материала заготовки: предел текучести  $\sigma_{т\ закл}$  и технологические коэффициенты: коэффициент, учитывающий влияние формы и трения при осадке  $k$  и коэффициент трения покоя на паре «обойма–вставка»  $f$ .

Минимальный натяг определяли из условия, при котором сила трения на посадочной поверхности превышает осевую силу, действующую на вставку в процессе высадки. Максимальный натяг ограничивается условием, при котором в обойме не возникают пластические деформации.

В ходе вычислительного эксперимента варьировалась величина натяга для оценки ее влияния на распределение напряжений во вставке и обойме. Анализ проводился с использованием метода трассируемых точек, позволяющего отслеживать изменение параметров в конкретных зонах инструмента на протяжении всего процесса.

### 2.5.5 Определение величины трения

Для определения фактора трения  $m$  на контактных поверхностях «инструмент–заготовка» использовались данные литературы и результаты предварительных экспериментов. В программном комплексе QForm реализован закон трения Леванова, который широко применяется для моделирования процессов объемной штамповки. Фактор трения исследовался в интервале 0,0–1,0.

### 2.5.6 Расчет скорости деформирования

В реальных производственных условиях на холодновысадочном автомате, кинематическая схема которого показана на рисунке 12, скорость ползуна изменяется от 131 до 0 мм/с.

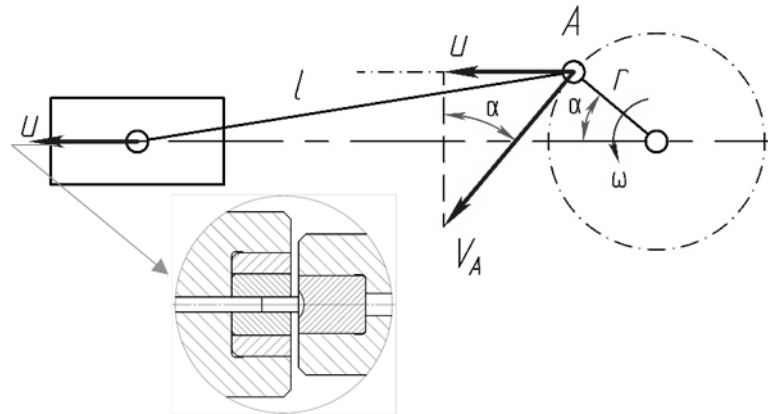


Рисунок 12 – Кинематическая схема холодновысадочного автомата

$V_A$  – вектор скорости, касательной к окружности радиусом  $r$ , по которой вращается кривошип;  $\omega$  – угловая скорость;  $U$  – осевая скорость ползуна;  $l$  – длина шатуна (600 мм);  $n$  – частота вращения (120 об/мин);  $\alpha$  – угол поворота кривошипа

Осевую скорость ползуна  $U$  рассчитали и по формуле из условия, что ход инструмента для формирования головки составлял 2,5 мм (рисунок 13):

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

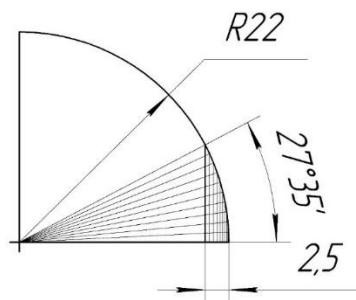


Рисунок 13 – Схема расчета реальной скорости формообразования заклепки на холодновысадочном автомате

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.

### 2.5.7 Влияние температуры

В процессе пластической деформации часть работы деформирования преобразуется в тепловую энергию. Согласно литературным данным [101], доля перехода механической энергии в тепло составляет до 5 %. При высоких скоростях деформирования, характерных для холодной высадки на автоматах, диссипация тепла в окружающую среду практически отсутствует, что приводит к локализованному нагреву заготовки в очаге деформации.

Для оценки возможного повышения температуры в процессе формообразования заклепок был выполнен расчет по формуле:

$$\Delta T = \frac{\alpha \int \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}}{\rho C} = \frac{\alpha \bar{\sigma}_{\alpha} \bar{\epsilon}}{\rho C},$$

где  $\bar{\sigma}$  – среднее значение  $\sigma$  за интервал деформации от 0 до  $\epsilon$ ;  $\rho$  – плотность;  $C$  – массовая теплоемкость;  $\alpha$  – доля накопленной энергии (0,98).

Расчет показал, что при высадке заклепок из сплава ХН60ВТ температура в зоне деформации может повышаться до 400 °С. Это подтверждает обоснованность выбора температурного диапазона (20–450 °С) при проведении испытаний на сжатие для определения реологических свойств материала.

Повышение температуры в процессе высадки оказывает непосредственное влияние на работоспособность составного инструмента. Вставка (твердый сплав ВК15) и обойма (сталь 4Х5МФС) имеют различные коэффициенты теплового расширения: для ВК15 он составляет  $(10,1–17,1) \cdot 10^{-6}$  1/К, для 4Х5МФС –  $11,5 \cdot 10^{-6}$  1/К. При нагреве инструмента в процессе эксплуатации разница в тепловом

расширении может приводить к изменению фактического натяга на посадочной поверхности. В ряде случаев возможно частичное или полное ослабление натяга, что снижает эффект бандажирования и может стать причиной преждевременного выхода оснастки из строя (сдвиг вставки, образование трещин).

При моделировании процесса высадки учитывали тепловыделение от пластической деформации и контактного трения и теплопередачу между заготовкой и инструментом, а также нагрев элементов оснастки. Это позволило оценить температурные поля в заготовке и инструменте, а также проанализировать изменение напряженного состояния вставки и обоймы с учетом теплового расширения материалов.

Граничные условия соответствовали производственным: температура среды 20 °С, величина теплопроводности 13,5 Вт/(м·К), степень черноты 0,6. Моделировали полный цикл формообразования одной заклепки, а затем последовательно повторяли расчет для 96 последующих ходов. Такой подход необходим для оценки прогрессирующего нагрева инструмента за счет накопленного тепла от последовательно высаживаемых заготовок и частичного охлаждения в интервалах между ударами. Выбор 96 ударов воспроизводит репрезентативную производственную партию. Конечно-элементная модель содержала 7 509 элементов, при этом сетку сгустили в основной зоне деформации и на контактных поверхностях для повышения точности расчета.

Температуру нагрева пуансона при холодной высадке на холодновысадочном автомате мод. СН-3 определили с помощью пирометра мод. Мегеон 16550, стрелкой показано место измерения температуры (рисунок 14).

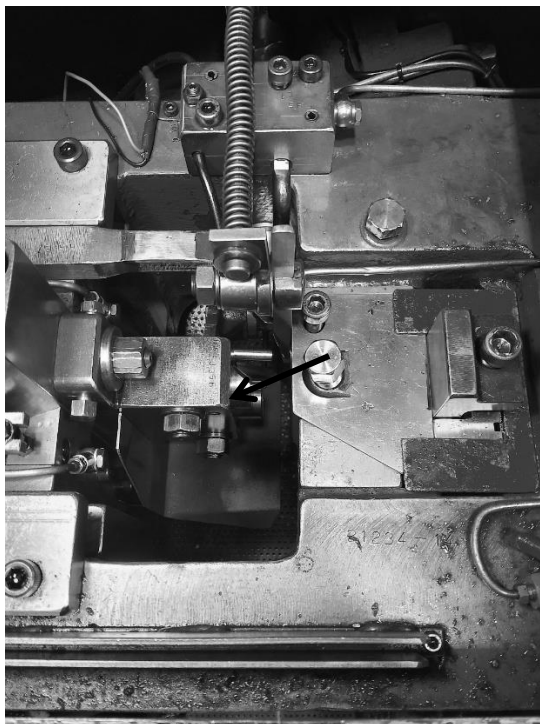


Рисунок 14 – Узел высадки заклепок холодновысадочного автомата

### 2.5.8 Задачи и параметры моделирования

С помощью конечно-элементного моделирования в программе QForm 3D решали следующие задачи:

- определение полей деформаций, напряжений и температур в заготовке в процессе высадки;
- определение температурных полей в инструменте (вставке и обойме) с учетом тепловыделения от пластической деформации и трения;
- оценка влияния скорости деформирования на напряженно-деформированное состояние заготовки и инструмента;
- анализ распределения напряжений в твердосплавной вставке и обойме в зависимости от величины натяга;
- анализ динамики напряжений во вставке в процессе циклического нагружения;
- верификация результатов моделирования путем сопоставления с данными натурного эксперимента (сила высадки, форма заклепки).

Моделирование процесса формообразования заготовок было выполнено в программном комплексе QForm 11.2.400.3 с данными, приведенными ранее (п. 2.5.3) и дополнительно учитывалось:

- материал вставки – твердый сплав ВК15;
- материал обоймы – сталь 4Х5ВФС;
- величины натяга: 0; 0,025; 0,05; 0,10 мм;
- анализ напряжений в оснастке – метод трассируемых точек;
- суммарное количество объемных узлов составляло 7399–8222;
- модель деформации инструмента – общая.

Применяемый подход согласуется с общепринятыми методами моделирования в металлообработке [97], где учет трехмерного напряженного состояния и тепловых эффектов является критически важным для точности прогнозирования.

Распределение напряжений, деформаций и температур в процессе моделирования формообразования заготовок определяли, как в конечный момент, так и в процессе формообразования.

Для этого использовался метод трассируемых точек, позволяющий задать несколько характерных точек в сечении заготовки и построить графики изменения интересующих параметров в этих точках. Это позволяет проследить изменение напряжений и перемещений по времени.

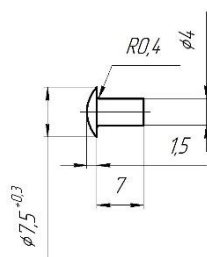
Аналогично для определения напряженного состояния в инструменте назначались трассируемые точки в характерных местах. После этого подключали подпрограмму для определения требуемых параметров. Включали расчет подпрограммы после этого требуемые параметры в трассируемых точках.

Однако для определения динамики этих параметров необходимо экспортировать расчеты в трассируемых точках и загружать их в программу Microsoft Excel с последующей обработкой.

## 2.6 Методика натурального эксперимента

### 2.6.1 Объект экспериментальной высадки

Объектом являлись заклепки с полукруглой головкой. Их геометрическая форма соответствовала стандартному типоразмеру с диаметром стержня 4 мм и высотой головки ~2 мм (рисунок 15)



а



б

Рисунок 15 – Высаженная заклепка, а – эскиз, б – готовое изделие

### 2.6.2 Оснастка для высадки

Для проведения высадки использовали серийную оснастку (рисунок 16) со следующими элементами:

- вставки матрицы и пуансона – из твердого сплава ВК15 (HRA = 89);
- обоймы и корпус – из стали 4X5МФС;
- выталкиватель – для удаления готовой детали из матрицы.

Для центрирования пуансона и матрицы методом 3D-печати из пластика PLA была изготовлена направляющая втулка (см. рисунок 16). Данное устройство позволило обеспечить соосность инструментов и получить заготовки, соответствующие чертежу.

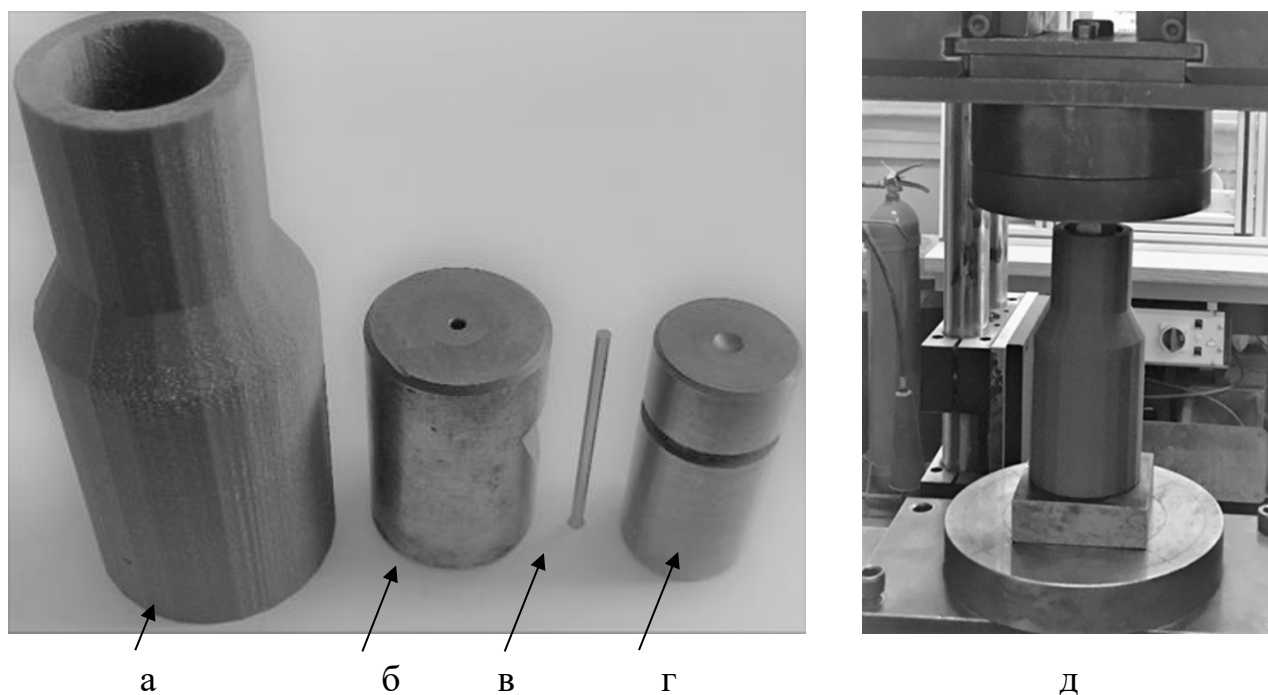


Рисунок 16 – Оснастка для натурального эксперимента

а – направляющая втулка из PLA; б – матрица; в – выталкиватель; г – пуансон;  
д – оснастка в сборе

### 2.6.3 Оборудование для высадки

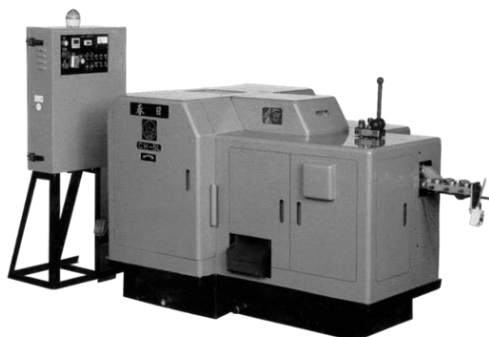
Экспериментальные исследования процесса высадки проводились на двух типах оборудования.

*Холодновысадочный автомат модели СН-3.* Данный автомат предназначен для изготовления крепежных изделий методом холодной высадки из пруткового материала. Основные технические характеристики автомата СН-3 приведены в таблице 12.

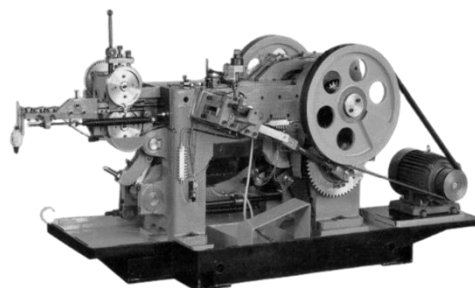
Таблица 12 – Основные характеристики холодновысадочного автомата СН-3

|                                            |                            |
|--------------------------------------------|----------------------------|
| Диаметр отрезной заготовки, мм             | 0,8–4,0                    |
| Максимальная длина отрезной заготовки, мм  | 34                         |
| Размеры 1-ого пуансона, мм                 | $\varnothing 26 \times 45$ |
| Размеры 2-ого пуансона, мм                 | $\varnothing 18 \times 38$ |
| Ход ползуна, мм                            | 44                         |
| Ход выталкивателя, мм                      | 22                         |
| Регулировка хода выталкивателя, мм         | 4                          |
| Номинальная сила, кН                       | 100                        |
| Производительность (максимальная), шт./мин | 300                        |

На рисунке 17 показан общий вид автомата СН-3 (слева) и вид со снятым кожухом (справа).



Общий вид



Со снятым кожухом

Рисунок 17 – Холодновысадочный автомат СН-3

*Изготовление оснастки.* Корпуса пуансона и матрицы изготовили из центральной части исходного горячекатаного прутка диаметром 120 мм открытой выплавки. Исходный пруток подвергли термической обработке по следующему режиму: закалка при температуре 1050 °С в течение 40 минут, охлаждение в масле; отпуск при температуре 460 °С в течение 60 минут с последующим охлаждением на воздухе.

Вставку изготовили из твердого сплава ВК15. Определение величины натяга являлось одной из задач настоящего исследования.

Запрессовку вставки из твердого сплава провели при температуре 400 °С.

Внешний вид матрицы приведен на рисунке 18.

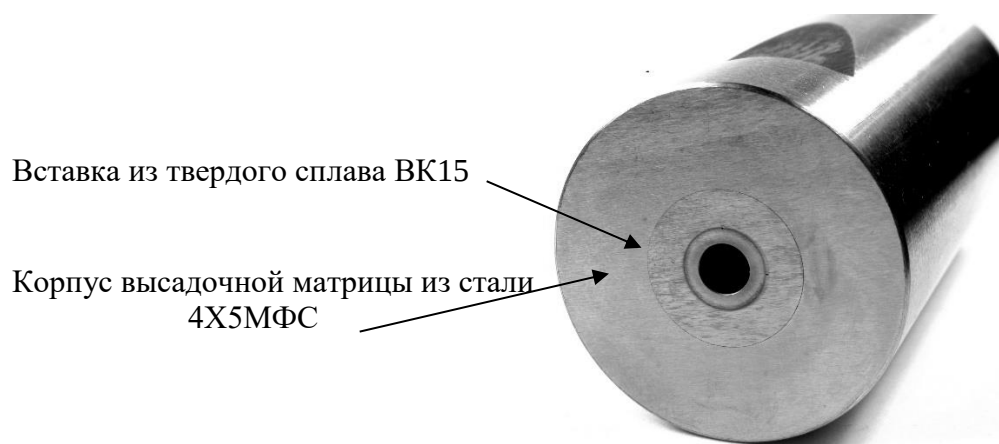


Рисунок 18 – Внешний вид матрицы

*Испытательная машина LFM250.* В процессе высадки регистрировались диаграммы «ход–сила» с помощью встроенной системы сбора данных испытательной машины. Полученные данные использовались для сравнения с результатами компьютерного моделирования.

#### **2.6.4. Схема высадки**

Формообразование заклепки осуществляется в несколько последовательных переходов (рисунок 19).

Исходная заготовка после отрезки от прутка подавалась в зону деформации, где на первом переходе производилась предварительная осадка для формирования утолщения, а на завершающем переходе осуществлялось окончательное формообразование головки заклепки. Такая последовательность переходов позволяет получить деталь с благоприятным направлением волокон макроструктуры, огибающих контур головки, что повышает прочность и сопротивление истиранию.

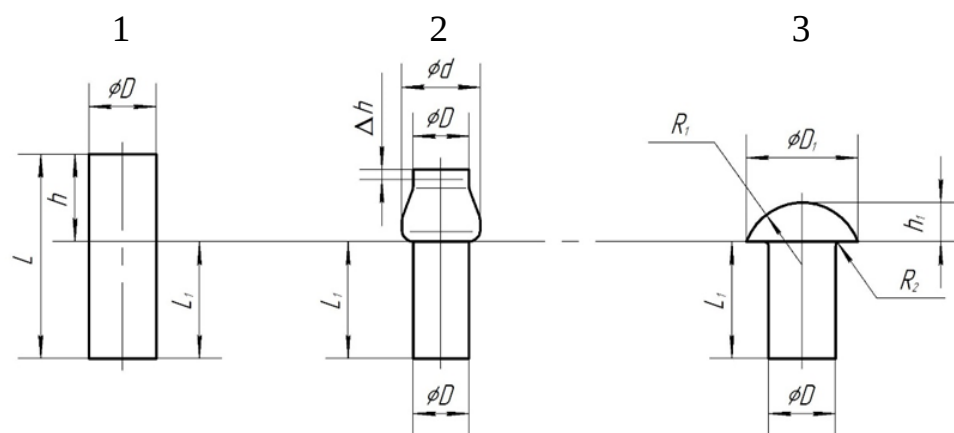


Рисунок 19 – Основные переходы при высадке заклепок

1 – исходная заготовка; 2 – высадка (1-й переход); 3 – формирование готовой детали;  $D$  – диаметр исходной заготовки;  $L$  – общая длина заготовки под высадку;  $L_1$  – длина стержня заклепки;  $h$  – длина стержня для высадки головки;  $D_1$  – диаметр головки;  $h_1$  – высота головки

### 2.6.5 Оценка влияния смазочных материалов

Одним из технологических способов снижения контактной нагрузки на формообразующую оснастку и, как следствие, повышения ее стойкости, является применение эффективных технологических смазок. Для количественной оценки влияния трения на процесс высадки заклепок из сплава ХН60ВТ были проведены работы по высадке заклепок со смазками CUT165 и ONV120 для сравнения с результатами моделирования.

### 2.6.6 Селективная сборка

В пределах заданной точности изготовления матрицы (см. рисунок 9) максимальный натяг может быть 0,080 мм, а минимальный 0,049 мм и, следовательно, его различие может достигать величины 0,031 мм. Ряд авторов [97] считает целесообразным осуществлять селективную сборку инструмента. Были подобраны пуансоны и вставки, обеспечивающие натяг с допуском в пределах 0,02–0,05 мм.

### 2.7 Методы обработки экспериментальных данных

Статистическая обработка результатов включала:

- расчет средних арифметических значений для каждого режима испытаний на сжатие образцов из сплава ХН60ВТ;
- оценку среднеквадратичного отклонения.

Сравнение экспериментальных и расчетных кривых сила деформирования от хода инструмента выполнили по величине средней абсолютной ошибки и коэффициенту детерминации  $R^2$ .

## **2.8 Методика исследования микроструктуры деформированных образцов**

После проведения испытаний на сжатие при различных температурно-скоростных режимах, а также после высадки заклепок, образцы подвергались металлографическому исследованию.

Образцы разрезались электроэрозионным методом в меридиональной плоскости, затем шлифовались, полировались и травились. Исследование микроструктуры деформированных образцов осуществлялось с целью:

- количественного анализа изменения формы и размера зерен в зависимости от температуры и скорости деформации;
- выявления характера течения металла в процессе формообразования;
- исследования влияния температурно-скоростных параметров деформации на структурные изменения сплава;
- определения величины деформации по величине зерна.

## **Выводы по главе 2**

1. Представлены химический состав и основные физико-механические свойства исследуемого никелевого жаропрочного сплава ХН60ВТ, применяемого для изготовления ответственных деталей авиационных двигателей. Приведены характеристики микроструктуры исходного материала в виде прутка диаметром 4,0 мм в термообработанном состоянии.

2. Приведены сведения о применяемом исследовательском и испытательном оборудовании: универсальных электромеханических испытательных машинах LFM250 и LFM50 для определения реологических свойств при температурах от 20 до 450 °С, бинокулярном микроскопе Olympus Delta и электронных микроскопах FEI QUANTA 650 и JSM-5600 для металлографических исследований, приборе DuraScan-20 для измерения микротвердости по Виккерсу, холодновысадочном автомате СН-3 для экспериментальной высадки заклепок, а также электроэрозионном станке ONA AF-25 для изготовления образцов.

3. Разработана матрица экспериментальных исследований реологических свойств сплава ХН60ВТ, охватывающая температуры 20, 100, 200, 300, 350 и 450 °С и скорости деформации 0,001, 0,01 и 0,4 с<sup>-1</sup>. Определен температурный диапазон испытаний, обоснованный расчетным локальным повышением температуры в зоне деформации при высадке заклепок до 400 °С.

4. Определены параметры для оценки напряженно-деформированного и теплового состояния заготовки и составного инструмента с использованием метода конечных элементов в программном комплексе QForm 3D. В качестве реологической модели материала заготовки были выбраны зависимости Хензеля–Шпиттеля и табличная функция, построенная по экспериментальным данным.

5. 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.

6. Представлены методики натурального эксперимента по холодной высадке заклепок на холодновысадочном автомате СН-3 и испытательной машине LFM250, включая конструкцию составной оснастки с регистрацией параметров «сила–ход».

7. Изложен метод статистической оценки средних значений, среднеквадратичного отклонения и доверительных интервалов, а также определения коэффициентов модели Хензеля–Шпиттеля методом наименьших квадратов с использованием алгоритма Левенберга–Марквардта.

## ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как показал анализ литературных данных и производственный опыт, основными технологическими и конструкционными параметрами, влияющими на стойкость оснастки, являются:

- величина напряжений в инструменте,
- конструкция инструмента,
- величина натяга вставки и обоймы,
- амплитуда изменения напряжений в твердосплавной вставке,
- температурные поля в заготовке и инструменте,
- материал высаживаемых изделий,
- фактор трения между заготовкой и инструментом,
- влияние скорости деформации,
- влияние количества ударов при автоматической высадке.

### 3.1 Величина напряжений в заготовке

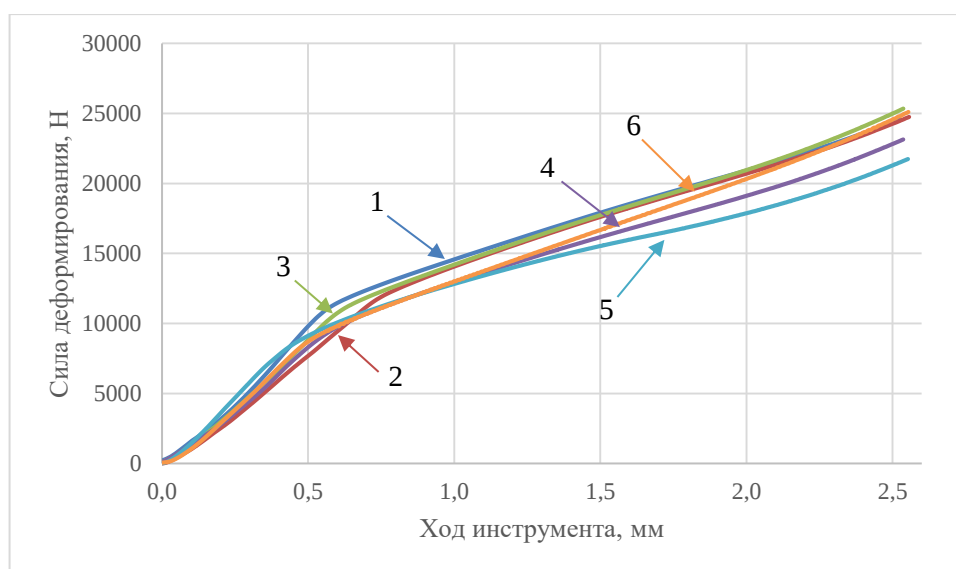
В соответствии с методикой, изложенной в главе 2, был выполнен анализ напряженно-деформированного состояния в заготовке.

#### 3.1.1 Определение реологических моделей

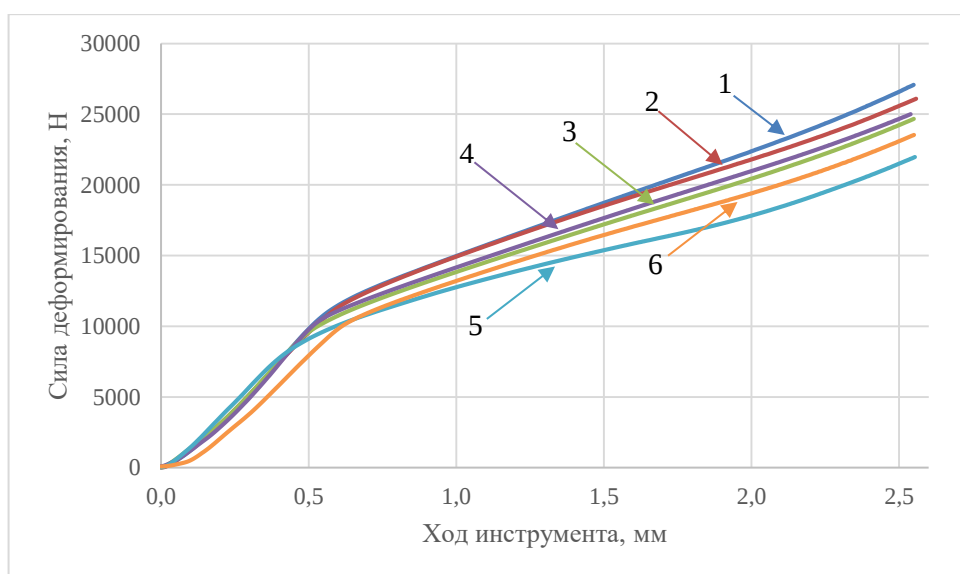
Для вычислительного эксперимента была необходима реологическая модель исследуемого материала. Жаропрочный никелевый сплав ХН60ВТ применяется преимущественно для изготовления ответственных деталей, эксплуатирующихся в условиях повышенных механических и термических нагрузок. Формообразование их заготовок осуществляют, как правило, с нагревом в интервале 980–1180 °С, следовательно, деформационные свойства данного сплава как в справочных материалах, так и в базе деформируемых материалов программы QForm представлены только для диапазона 900–1200 °С. В связи с отсутствием данных по сопротивлению деформированию сплава ХН60ВТ при холодном формообразовании потребовалось экспериментально определить реологическую

модель сплава ХН60ВТ с учетом нагрева заготовки в процессе высадки (20–400 °С), необходимую для моделирования операций холодной высадки заклепок.

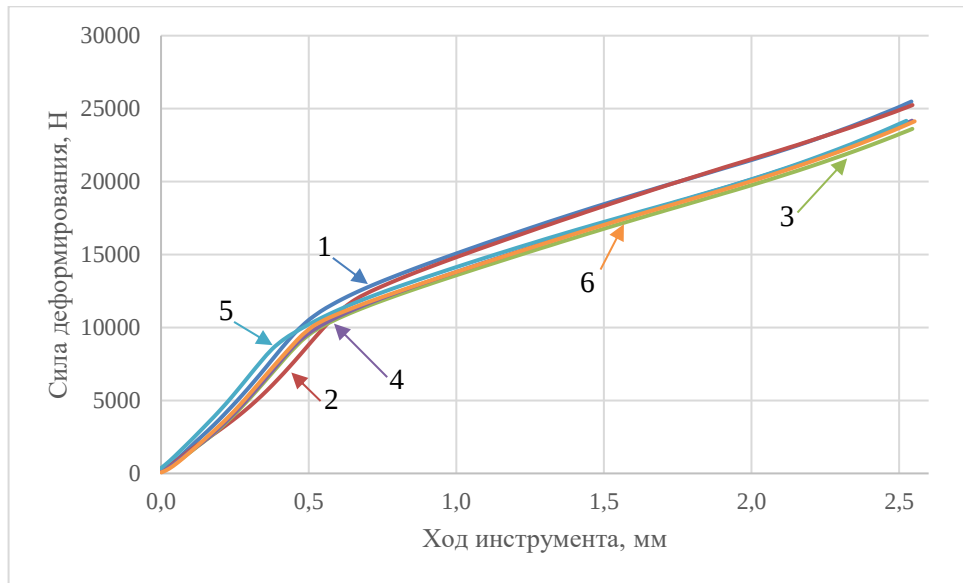
Экспериментальные данные сила–ход (рисунок 20), полученные при осадке образцов, обработаны, согласно методике, двумя методами: с применением эмпирической модели, предложенной Хензелем-Шпиттелем, которая устанавливает связь между напряжением текучести и термомеханическими параметрами, и путем прямого пересчета полученных осадкой данных в табличную форму.



а



б



В

Рисунок 20 – Зависимости силы деформирования от хода инструмента при различных температурах и скоростях деформации

а –  $0,001 \text{ с}^{-1}$ ; б –  $0,01 \text{ с}^{-1}$ ; в –  $0,4 \text{ с}^{-1}$ ;

1 –  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 4 –  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 5 –  $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 6 –  $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Полученные диаграммы «сила–ход» (см. рисунок 20) были перестроены в координатах «напряжение текучести–деформация» (рисунок 21).

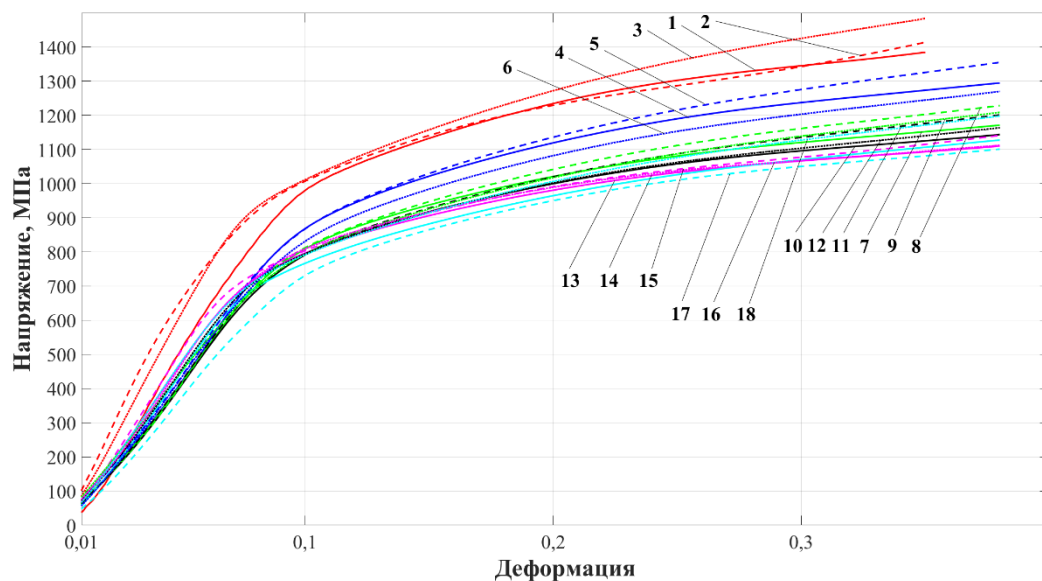


Рисунок 21 – Зависимость напряжения текучести никелевого сплава ХН60ВТ от деформации при различных термомеханических условиях деформации

- 1, 2, 3 – при температуре 20°C и скоростях деформаций 0,4; 0,01; 0,001 с<sup>-1</sup>;  
 4, 5, 6 – при температуре 100°C и скоростях деформаций 0,4; 0,01; 0,001 с<sup>-1</sup>;  
 7, 8, 9 – при температуре 200°C и скоростях деформаций 0,4; 0,01; 0,001 с<sup>-1</sup>,  
 10, 11, 12 – при температуре 300°C и скоростях деформаций 0,4, 0,01, 0,001 с<sup>-1</sup>;  
 13, 14, 15 – при температуре 350°C и скоростях деформаций 0,4, 0,01, 0,001 с<sup>-1</sup>;  
 16, 17, 18 – при температуре 450°C и скоростях деформаций 0,4, 0,01, 0,001 с<sup>-1</sup>

График (см. рисунок 21), перестроенный в координатах «напряжения текучести-деформации» был использован для построения математической модели сплава ХН60ВТ. Найденные коэффициенты по формуле (1) для температурных интервалов 20–450 °С приведены в таблице 13 и в графическом виде на рисунке 22 (модель Хензеля-Шпиттеля).

Таблица 13 – Коэффициенты модели Хензеля-Шпиттеля для никелевого сплава ХН60ВТ

| Температура деформации<br>$T, ^\circ\text{C}$ | Коэффициенты |          |          |           |           |           |          |           |           |
|-----------------------------------------------|--------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
|                                               | $A$          | $m_1$    | $m_2$    | $m_3$     | $m_4$     | $m_5$     | $m_7$    | $m_8$     | $m_9$     |
| 20-200-450                                    | 1978,97134   | 0,000007 | 0,032818 | -0,002306 | -0,047557 | -0,000185 | 0,193921 | -0,000002 | -0,075990 |

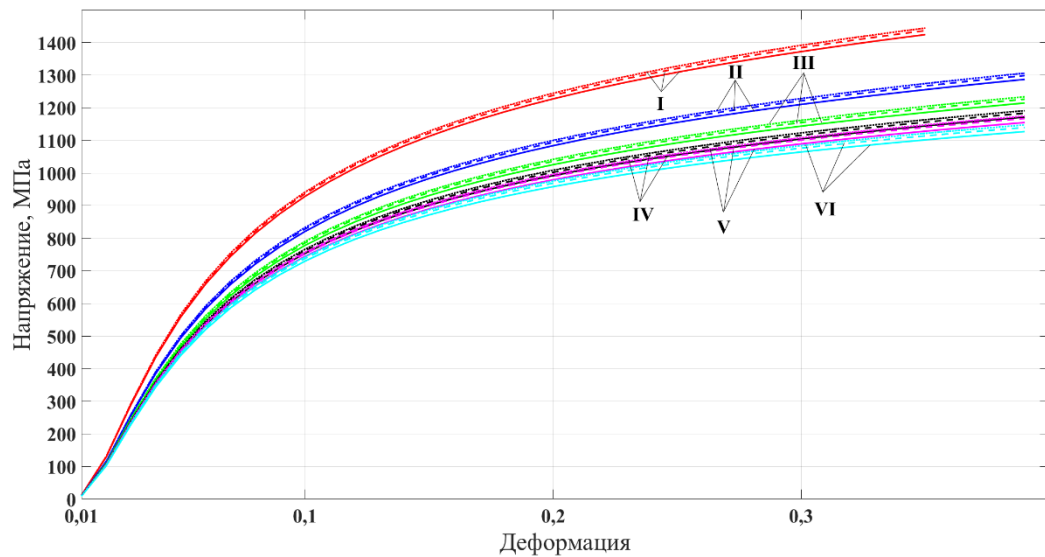


Рисунок 22 – Зависимости напряжений текучести никелевого сплава ХН60ВТ от деформации (модель Хензеля-Шпиттеля) при различных температурах и скоростях деформации

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<sup>-1</sup>; - - - - 0,01 с<sup>-1</sup>; • • • • 0,001 с<sup>-1</sup>)

Другой математической моделью исследуемого сплава является табличная функция (рисунок 23), найденная путем обработки экспериментальных данных (см. рисунок 20).

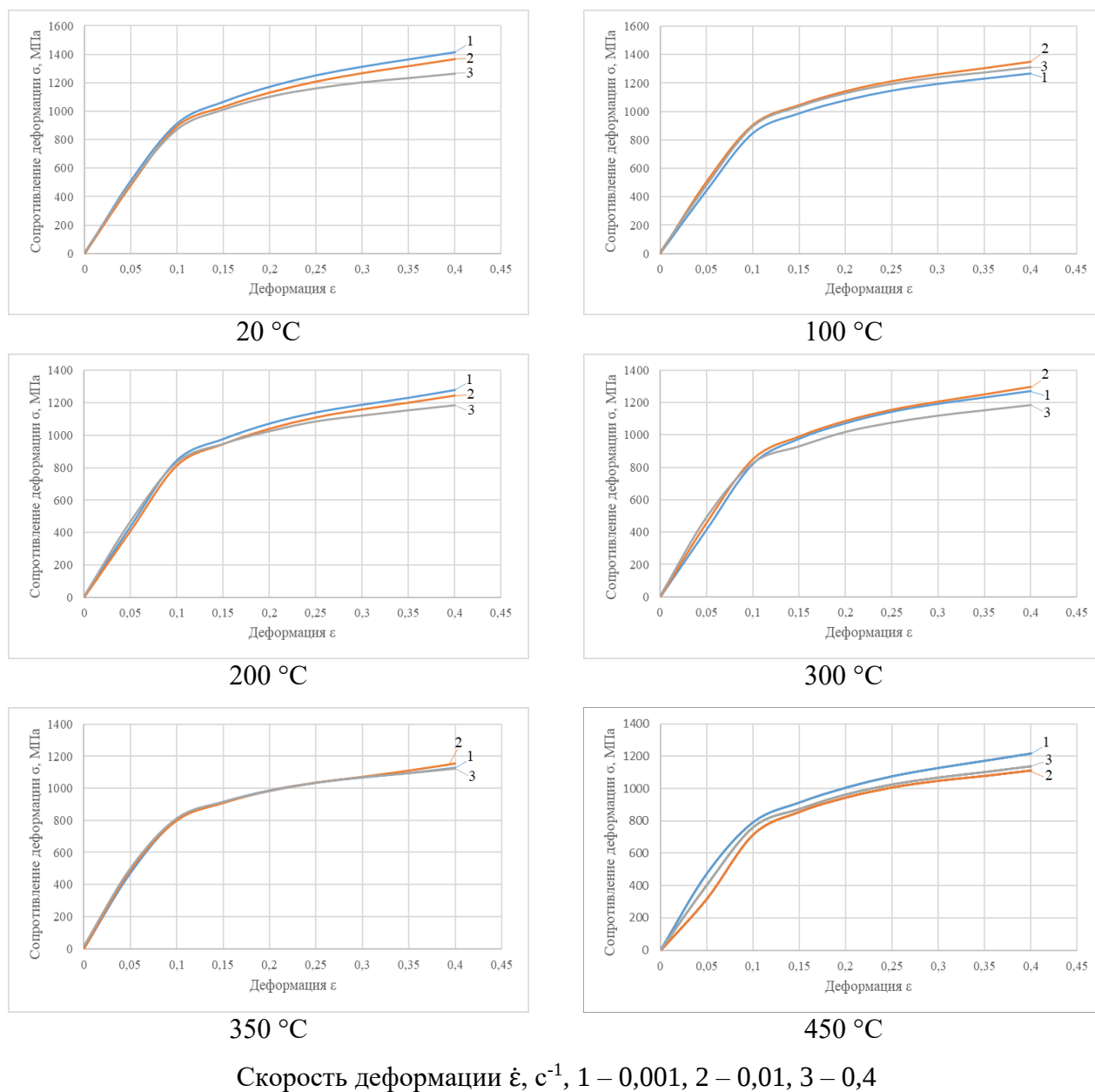


Рисунок 23 – Реологическая модель сплава XH60VT в виде табличной функции

Сравнение диаграмм зависимостей силы деформации от хода инструмента, полученных моделированием процесса высадки с найденными моделями в ходе предварительного эксперимента, показали их различие до 10 % в среднем (рисунок 24).

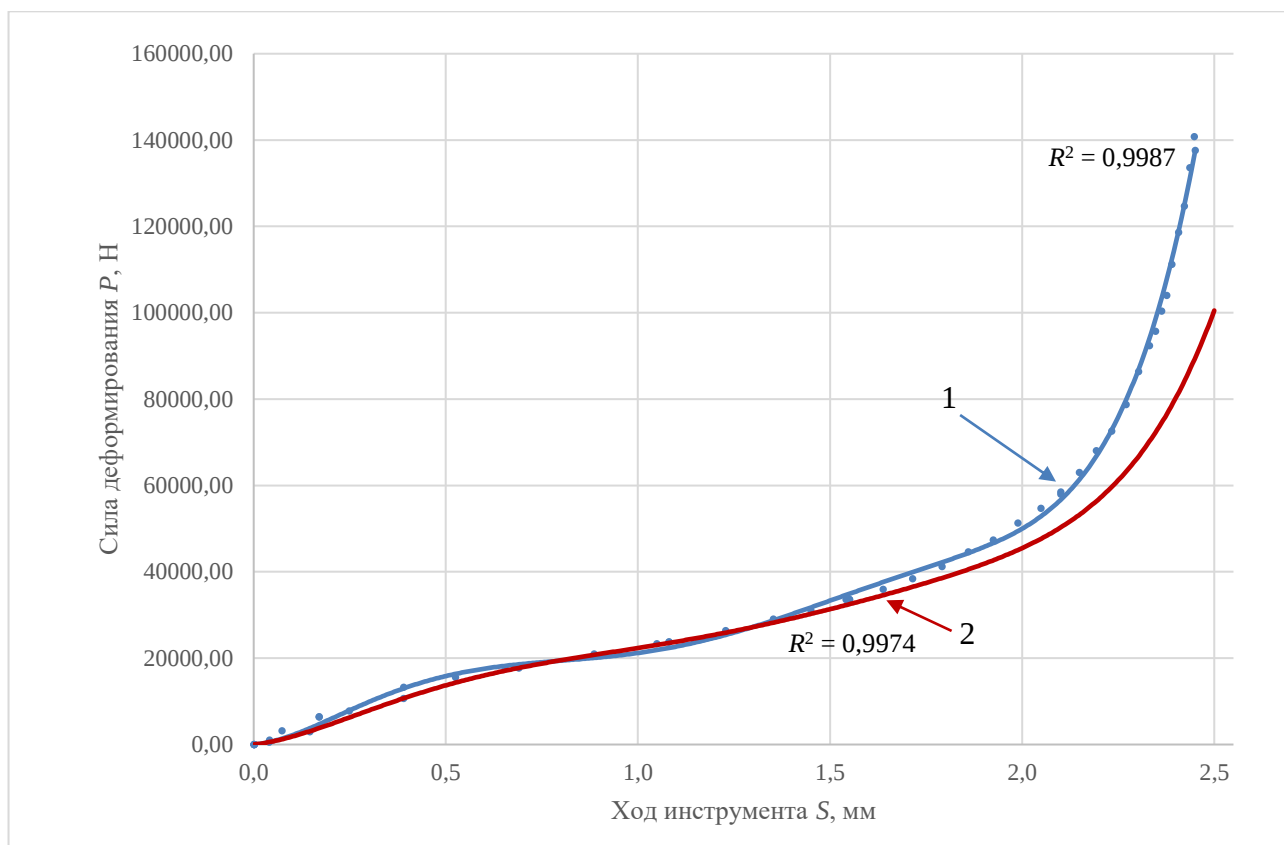


Рисунок 24 – Зависимость силы формообразования заклепки из сплава ХН60ВТ от хода деформирующего инструмента

1 – табличная функция; 2 – модель по Хензелю-Шпиттелю

Дальнейшие исследования проводили с применением реологической модели в виде табличной функции.

### 3.1.2 Напряженно-деформированное состояние в заготовке

Напряженно-деформированное состояние в заготовке определяли методом конечно-элементного анализа с применением программы QForm с исходными данными, приведенными в методике с учетом прочности штампуемого материала, натяга в инструменте, скорости деформации, фактора трения и температуры.

Ввиду того что реализация экспериментов в промышленных условиях на производственном оборудовании для автоматической холодной высадки затруднительна, моделирование процесса высадки заклепок провели в условиях испытательной машины с дальнейшей экстраполяцией полученных данных на процесс холодной высадки на автомате.

Проведенные предварительные расчеты показали, что полное оформление головки заклепок осуществляется при силе менее 200 кН (рисунок 25). Поэтому экспериментальные работы были проведены на испытательной машине LFM 250 силой 250 кН.

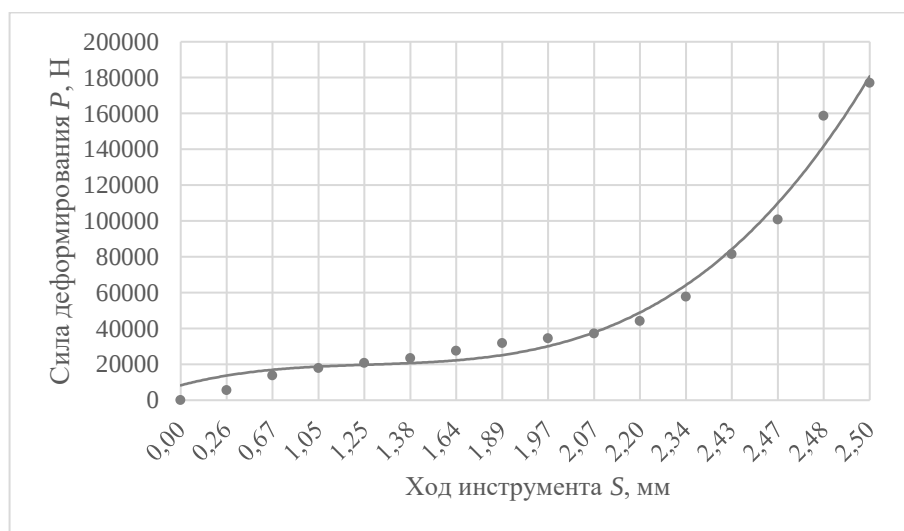


Рисунок 25 – Зависимость силы деформации высадки заклепки от хода инструмента

Распределение напряжений и деформаций определяли в точках, показанных на рисунке 26. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что в процессе холодной высадки заготовок формируется неравномерное распределение этих величин (рисунки 27, 28); для наглядности эпюры приведены в графическом виде.

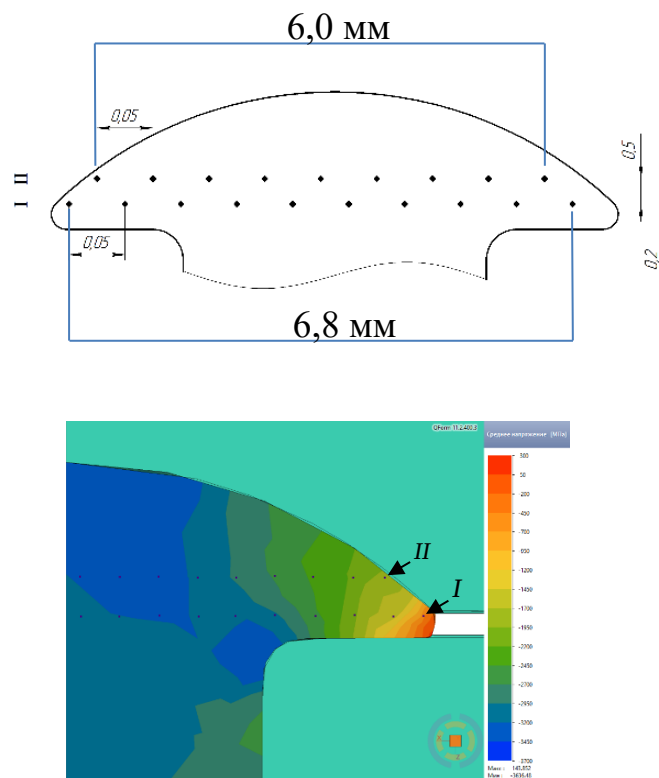


Рисунок 26 – Схема измерения напряжений и деформаций в заготовке

Как видно из рисунка 27, логарифмическая деформация изменяется в пределах от 0,4 до 1,4.

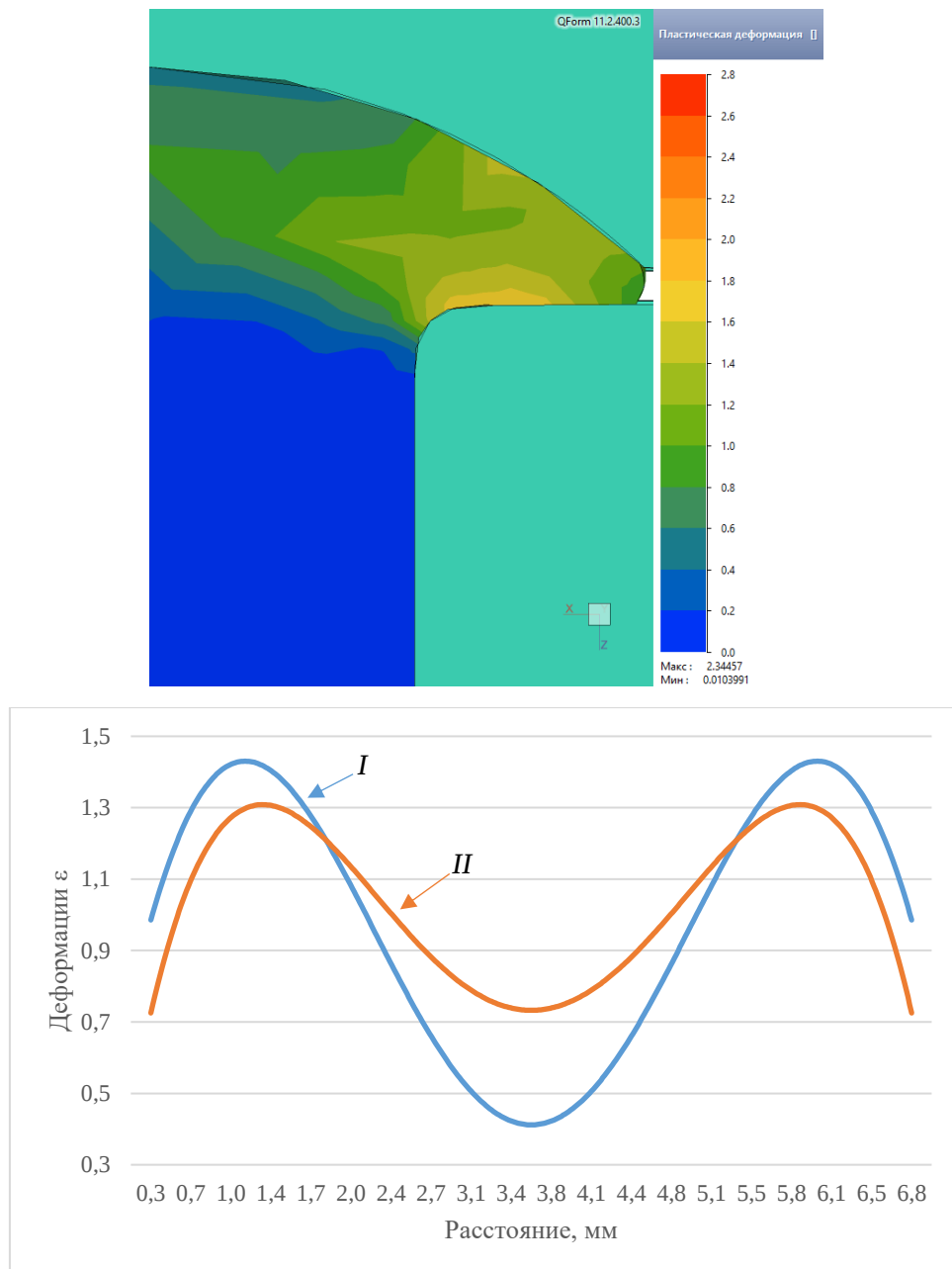


Рисунок 27 – Распределение пластической деформации в меридиональном сечении головки заклепки ( $\epsilon_{\text{макс}} = 1,4$ )

Средние напряжения изменяются от -1500 до -3200 МПа.

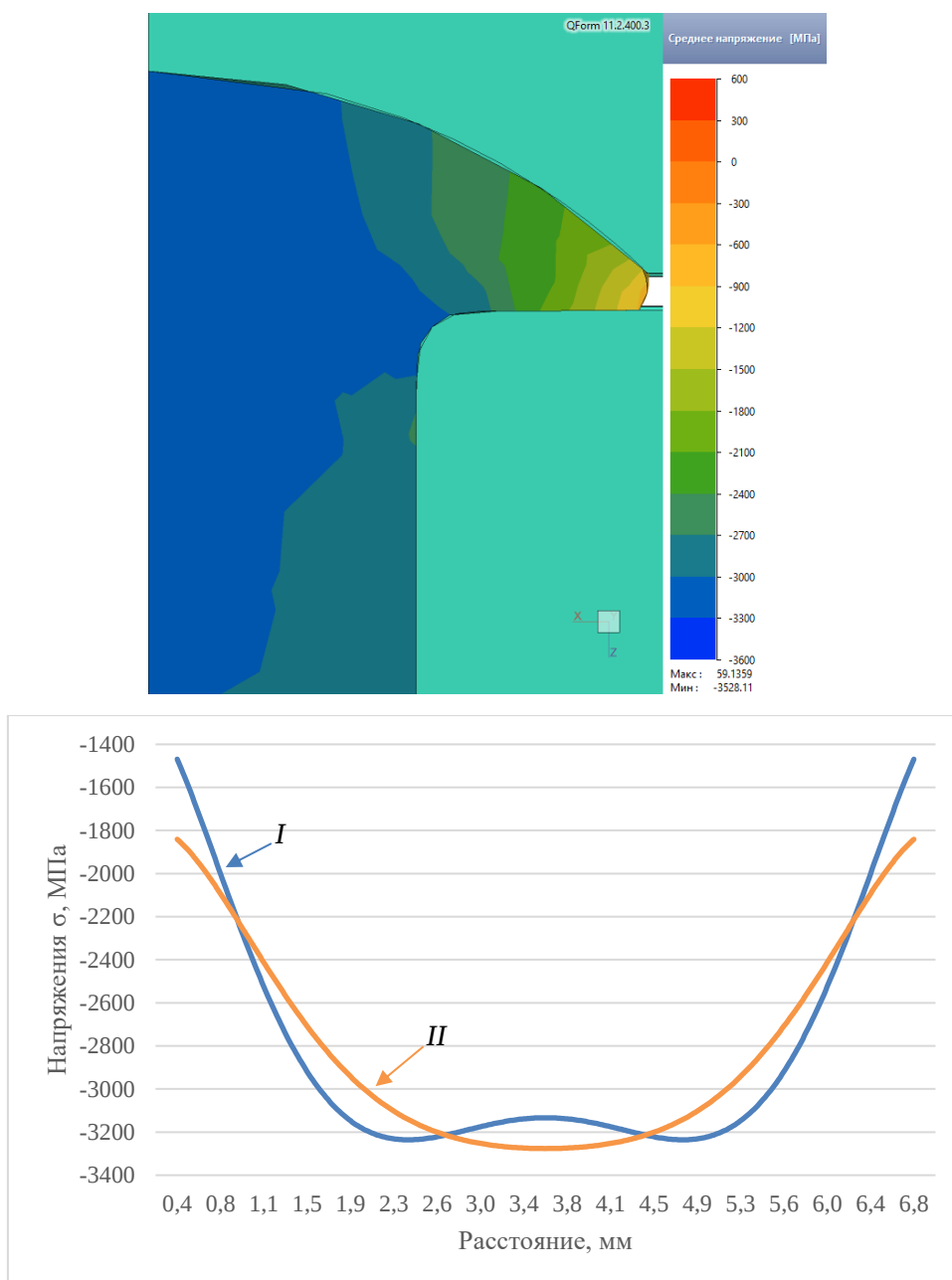


Рисунок 28 – Эпюра средних напряжений в меридиональном сечении головки заклепки в конечный момент высадки ( $\sigma_{\text{ср макс}} = 1350$  МПа)

### 3.2 Величина напряжений в инструменте

Напряженное состояние, возникающее в заготовке в процессе формоизменения, существенно влияет на распределение напряжений в инструменте. Изучение напряженного состояния в оснастке при условном натяге 0,1 мм (рисунок 29) показало, что сжимающие напряжения как во вставке пуансона, так и матрицы наименьшее значение имеют на границе с обоймой (трассируемые

точки 12 и 32), следствием чего является наибольшая вероятность образования дефектов в этой области, что подтверждено практикой.

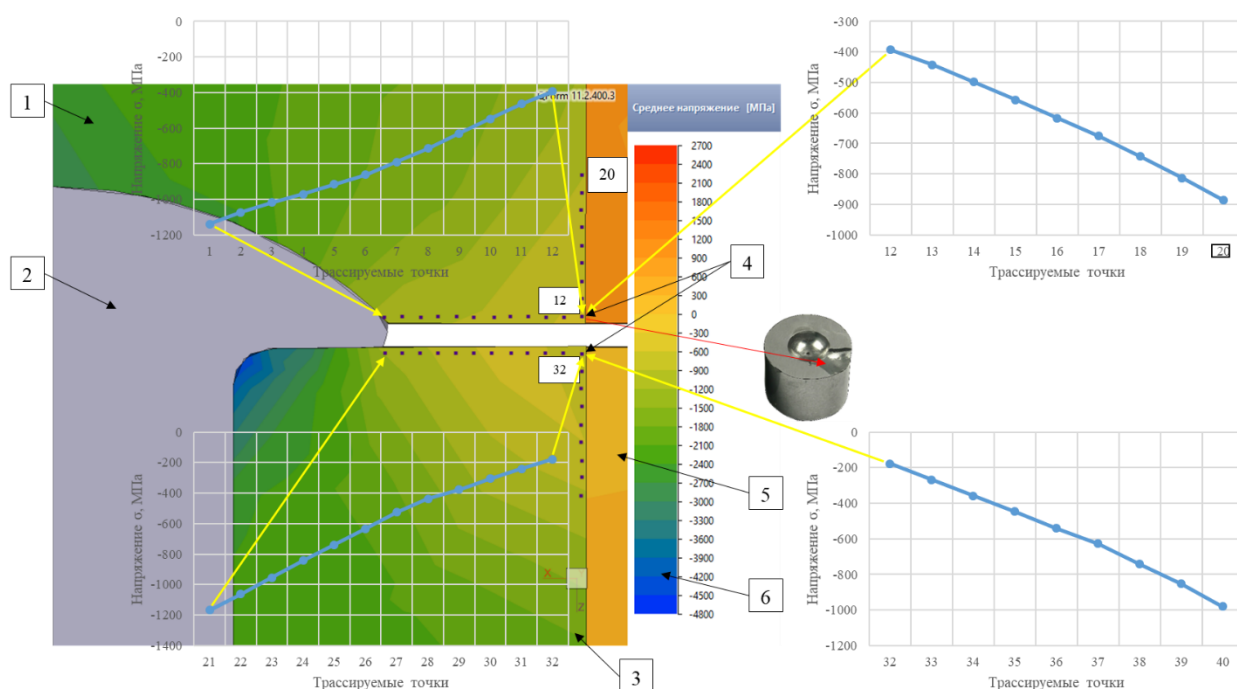


Рисунок 29 – Схема холодной высадки и распределение напряжений в твердосплавных вставках

1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – пуансон; 4 – трассируемые точки;  
5 – бандажная обойма; 6 – шкала напряжений

### 3.2.1 Зависимость напряжений в инструменте от прочностных характеристик высаживаемых материалов

Учитывая существенное влияние прочностных характеристик материала заклепок на стойкость деформирующего инструмента, был проведен анализ напряжений в оснастке методом трассируемых точек, охвативший широкий спектр материалов (рисунок 30) – от низкопрочных, типа АД0 [102] и М1[103-105] до высоколегированных, включая ХН60ВТ и 12Х18Н10Т.

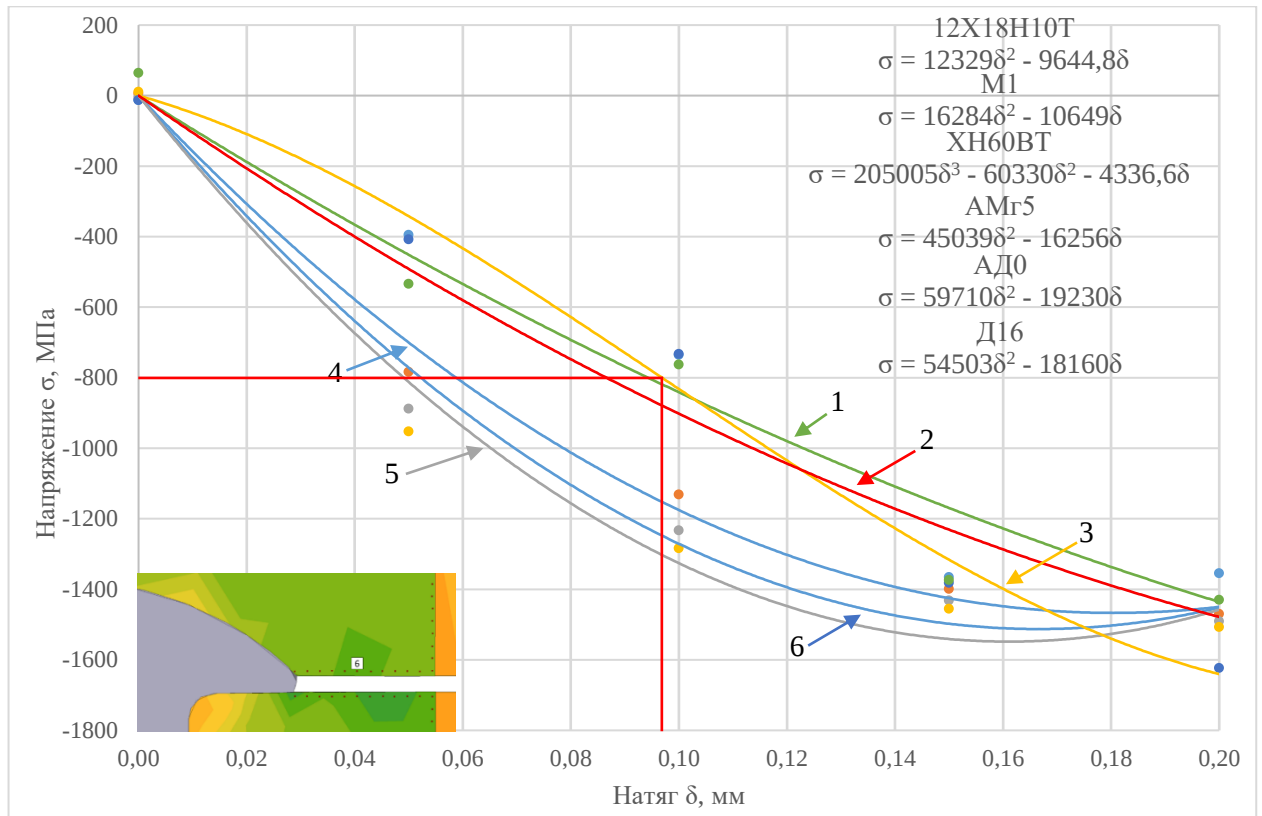


Рисунок 30 – Влияние прочности материала заклепки (моделирование)

на величину сжимающих напряжений во вставке (точка 6)

1 – сталь 12X18H10T; 2 – медь М1; 3 – никелевый сплав ХН60ВТ;

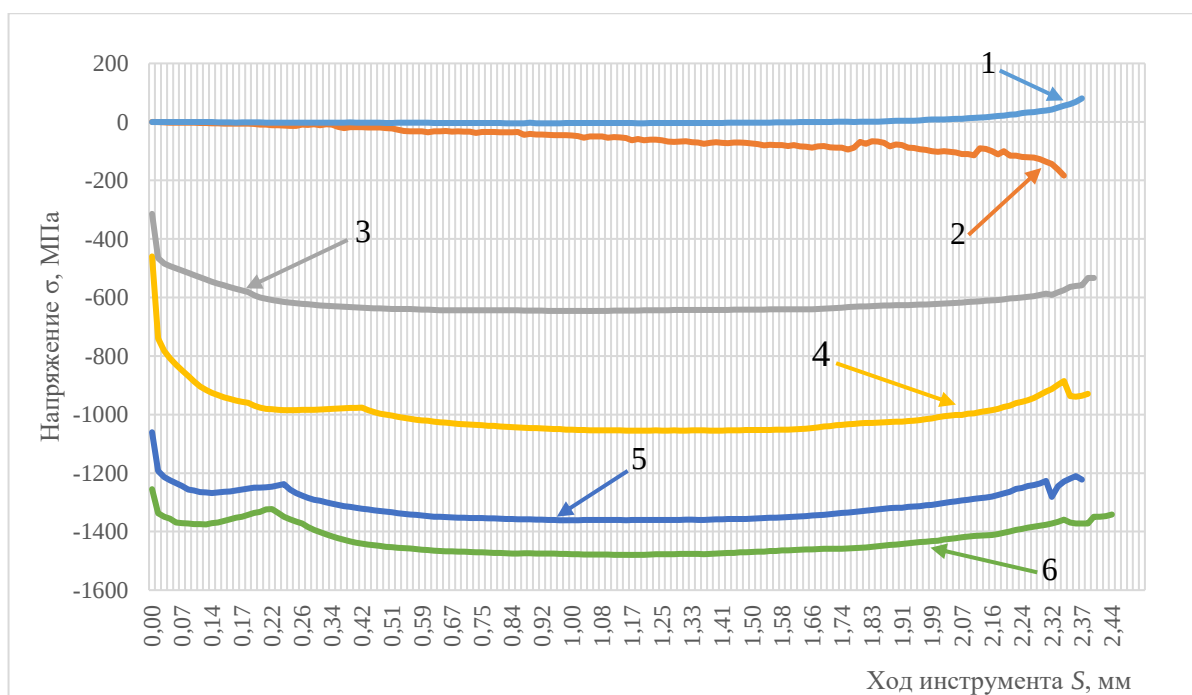
4 – алюминиевый сплав АМг5; 5 – алюминиевый сплав АД0;

6 – алюминиевый сплав Д16

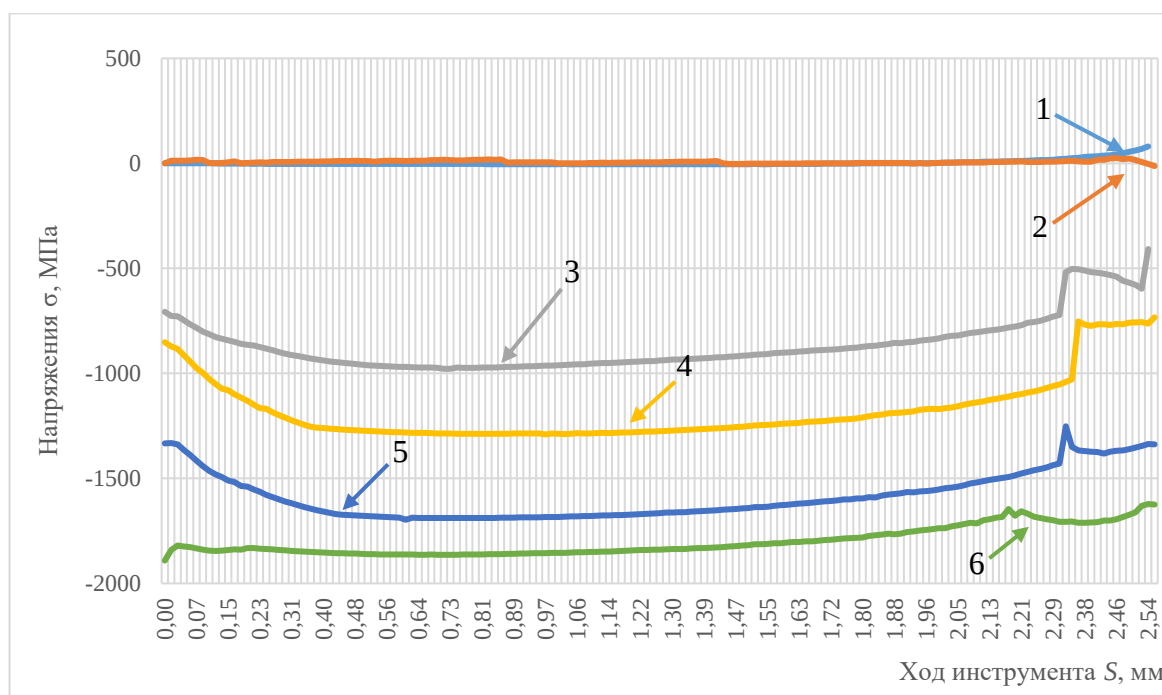
Анализ позволил установить рациональную величину натяга в зависимости от материала высаживаемых заклепок. Методом моделирования в программе QForm определяем величину сжимающих напряжений, гарантирующих отсутствие перехода в зону растягивающих напряжений в процессе формообразования изделий. Так, например, рисунок 24, при найденном напряжении (-800) МПа, необходимая величина натяга для сплава АМг5 составляет 0,06 мм, а для сплава ХН60ВТ – 0,10 мм.

### 3.2.2 Влияние амплитуды циклических колебаний напряжений

Ряд авторов отмечает [106], что на стойкость твердосплавных вставок значительное влияние оказывает амплитуда циклических колебаний напряжений. На рисунке 31 представлены диаграммы изменения напряжений в пуансоне (а) и матрице (б) в процессе формообразования заготовки в зависимости от величин натяга между твердосплавной вставкой и обоймой.



а



б

Рисунок 31 – Динамика напряжений во вставках оснастки в зависимости от величины натяга (моделирование)

1 – без банджа; 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 банджа подвергается нежелательным растягивающим напряжениям (см. рисунок 31, кривые 1). Натяг в диапазоне 0,05–0,15 мм (см. рисунок 31, кривые 2–4) преобразует их в сжимающие, снижает амплитуду циклической нагрузки и предотвращает усталостное разрушение деформирующего инструмента. При натягах свыше 0,15 мм (см. рисунок 31, кривые 5 и 6) дополнительного снижения амплитуды не происходит, что определяет границу применения.

Исходя из этого, наиболее эффективным для сплава ХН60ВТ является диапазон натяга от 0,10 до 0,15 мм, который обеспечивает нужное сжимающее напряжение и продлевает ресурс оснастки.

### 3.2.3 Исследование напряжений в инструменте при натяге 0,025 мм

Как видно, создание натяга позволяет эффективно повысить сжимающие напряжения (рисунок 32). Натяг уже величиной 0,025 мм создает сжимающие напряжения в интервале 370–180 МПа у пуансона и 490–190 МПа у матрицы, что снижает вероятность усталостного разрушения.

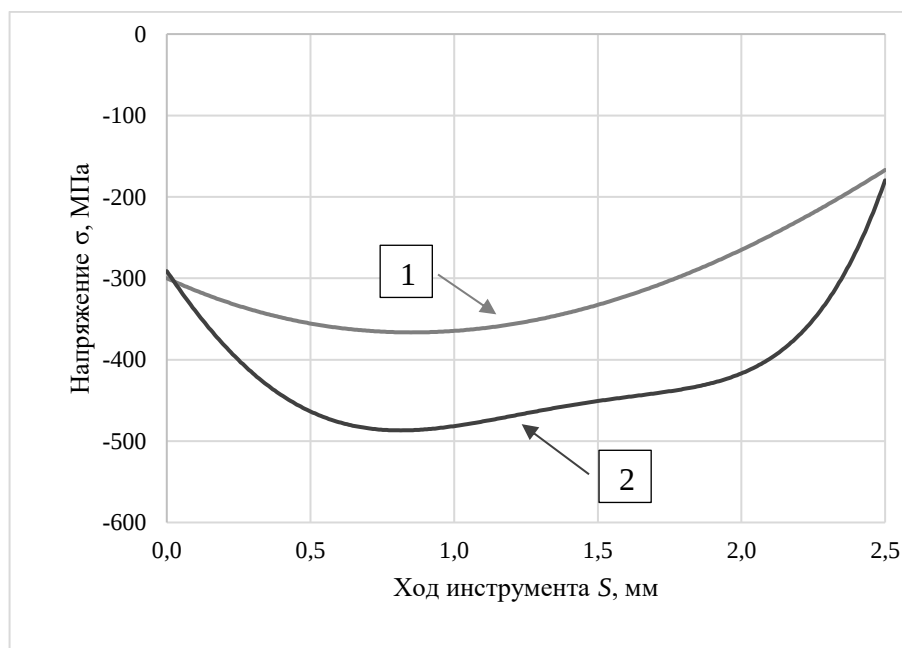
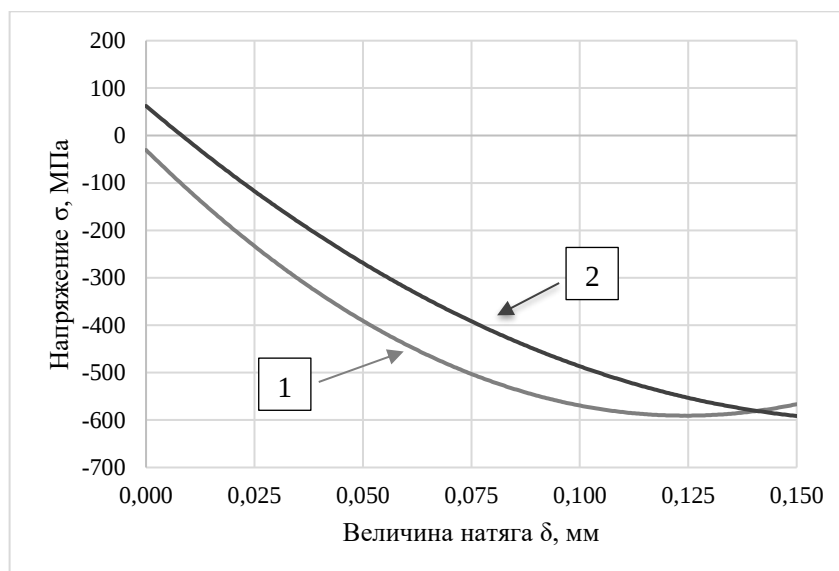


Рисунок 32 – Динамика напряжений в процессе высадки при натяге 0,025 мм

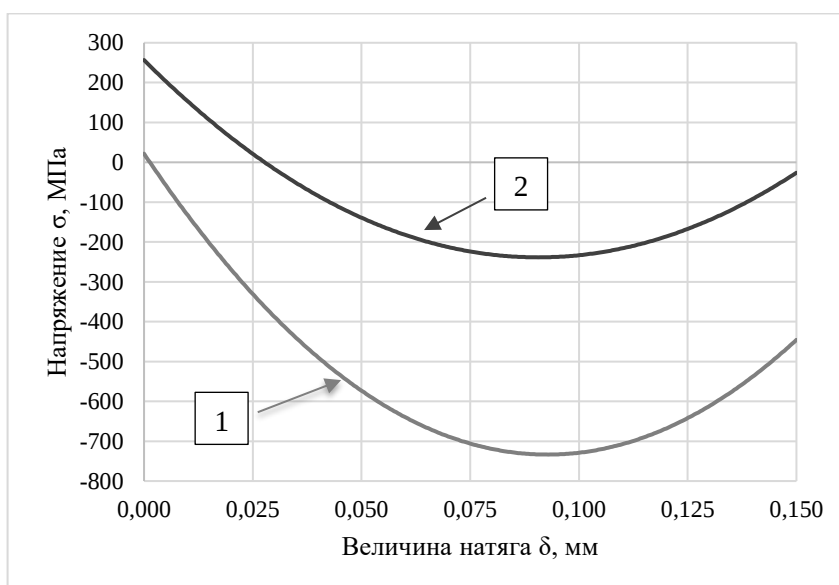
1 – в пуансоне; 2 – в матрице

Сравнение сжимающих напряжений, возникающих во вставках пуансона и матрицы при натяге 0,025 мм (см. рисунок 32), показывает, что в начале и конце процесса формообразования они имеют практически одинаковые значения, однако амплитуда колебаний напряжений в матрице составляет около 300 МПа, а пуансона – около 190 МПа, что свидетельствует о большей вероятности развития усталостных трещин в матрице.

Следует отметить относительно незначительное изменение напряжений в диапазоне «максимум – минимум» в начале и в конце формообразования (около 100 МПа) во вставке пуансона при натяге 0,025 мм, в то время как во вставке матрицы эта величина достигает 500 МПа (рисунок 33).



а



б

Рисунок 33 – Влияние натяга на сжимающие напряжения в твердосплавном пуансоне (а) и в твердосплавной матрице (б)

1 – в начале процесса высадки; 2 – в конце процесса высадки

Это приводит к значительным колебаниям напряжений во вставке матрицы, что может приводить к развитию микродефектов.

### **3.3 Разработка расчетной модели для определения рационального натяга**

На основе выполненного анализа напряженно-деформированного состояния составного инструмента и условий его работоспособности разработана инженерная расчетная модель. Данная модель представляет собой замкнутую систему аналитических уравнений, позволяющую определить диапазон рациональных натягов  $\delta$ , обеспечивающих требуемую несущую способность соединения «обойма–вставка» без риска повреждения оснастки.

Блок-схема модели, включающая ввод исходных данных, расчетный блок и блок анализа результатов, представлена на рисунке 34.

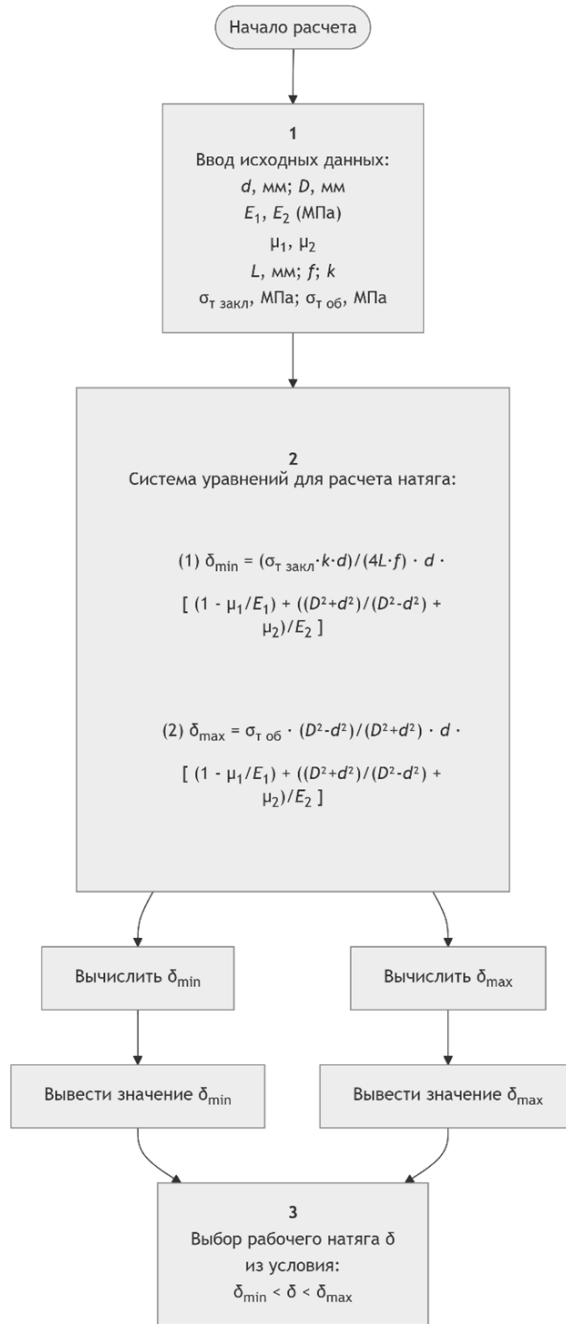


Рисунок 34 – Блок-схема модели

1 – блок исходных данных для расчета; 2 – расчетный блок;

3 – блок анализа результатов

Разработка модели и вывод ее основных соотношений основываются на фундаментальных решениях теории упругости для толстостенных цилиндров

(формула Ламе) и двух ключевых критериях работоспособности составного инструмента:

1. Условие отсутствия сдвига вставки. Сила трения покоя, возникающая на посадочной поверхности, должна превышать максимальную осевую технологическую силу, действующую на вставку в процессе высадки. Данное условие определяет минимально допустимый натяг  $\delta_{\text{мин}}$ .

2. Условие прочности обоймы. Максимальные растягивающие напряжения в бандажирующей обойме от контактного давления не должны превышать предел текучести ее материала. Данное условие определяет максимально допустимый натяг  $\delta_{\text{макс}}$ .

Исходными данными для расчета являются:

- свойства материала заклепки (предел текучести  $\sigma_{\text{т закл}}$ , используемый для расчета требуемого технологического давления);
- свойства материалов инструмента (модули упругости  $E_1$  (вставка) и  $E_2$  (обойма), коэффициенты Пуассона  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  и предел текучести материала обоймы  $\sigma_{\text{т об}}$ );
- геометрические параметры оснастки (номинальный посадочный диаметр  $d$ , наружный диаметр обоймы  $D$  и длина посадочной поверхности  $L$ );
- коэффициент трения покоя  $f$  в паре «обойма–вставка»;
- технологический коэффициент  $k = 1,8$  учитывающий совместное влияние формы деформируемой головки заклепки и контактного трения при осадке. Данное значение получено эмпирически путем сопоставления данных компьютерного моделирования в QForm и натурных экспериментов на испытательной машине. Так, для сплава ХН60ВТ с  $\sigma_{\text{т}} \approx 1200$  МПа моделирование показало требуемое давление формообразования  $P_{\text{треб}} \approx 2\,200$  МПа, что дает  $k = 2\,200/1\,200 \approx 1,83$ . Округленное значение 1,8 принято как надежное для всего диапазона исследуемых материалов.

Давление  $p$  на поверхности сопряжения от величины натяга  $\delta$  для соединения с гарантированным натягом типа «сплошной вал – втулка» определяется по зависимости, вытекающей из решения задачи Ламе [107]:

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

где  $p$  – давление на посадочной поверхности, МПа;

$\delta$  – расчетный натяг, мм;

$d$  – посадочный диаметр, мм.

Коэффициенты  $c_1$  и  $c_2$  являются безразмерными и отражают геометрию и упругие свойства, соответственно, охватываемой (вставка) и охватывающей (обойма) деталей. Для случая сплошной вставки ( $d_{\text{вн}} = 0$ ) и обоймы с наружным диаметром  $D$  они определяются по следующим зависимостям:

$$c_1 = \frac{d^2 + 0}{d^2 - 0} - \mu_1, \quad c_2 = \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} - \mu_2.$$

Для сплошного вала:

$$c_1 = 1 - \mu_1.$$

С учетом данного подхода, расчет с использованием модели осуществляется в следующей последовательности.

1. Расчет технологической силы и требуемого давления. Требуемое давление  $P_{\text{треб}}$ , необходимое для формообразования заклепки, определяется как:

$$P_{\text{треб}} = \sigma_{\text{т закл}} \cdot k.$$

## 2. Расчет минимально допустимого натяга $\delta_{\text{мин}}$ .

Исходя из условия неподвижности вставки, сила трения в соединении должна быть больше осевой силы высадки. Отсюда выводится выражение для минимального контактного давления  $p_{\text{мин}}$ :

$$p_{\text{мин}} \geq \frac{(P_{\text{треб}} d)}{(4Lf)}.$$

Минимальный натяг рассчитывается с использованием зависимости давления от натяга:

$$\delta_{\text{мин}} = p_{\text{мин}} d \left( \frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right).$$

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

## 3. Расчет максимально допустимого натяга $\delta_{\text{макс}}$ .

Для предотвращения пластической деформации обоймы максимальное контактное давление  $p_{\text{нат макс}}$  ограничивается ее пределом текучести:

$$p_{\text{макс}} = \sigma_{\text{т об}} \left( \frac{D^2 - d^2}{D^2 + d^2} \right).$$

Аналогично, максимальный натяг рассчитывается по формуле Ламе:

$$\delta_{\text{макс}} = p_{\text{макс}} d \left( \frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right).$$

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

#### 4. Определение рационального натяга.

Работоспособный диапазон натягов, обеспечивающий надежную и безопасную работу оснастки, определяется итоговым неравенством:

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

### **3.3.1 Зависимость давления на поверхности контакта обоймы и вставки от диаметра обоймы**

Представленные на рисунке 35 зависимости давления  $p$  на поверхности контакта обоймы и вставки от диаметра обоймы позволяют определить минимальный натяг для посадки заклепок с конкретными механическими свойствами.

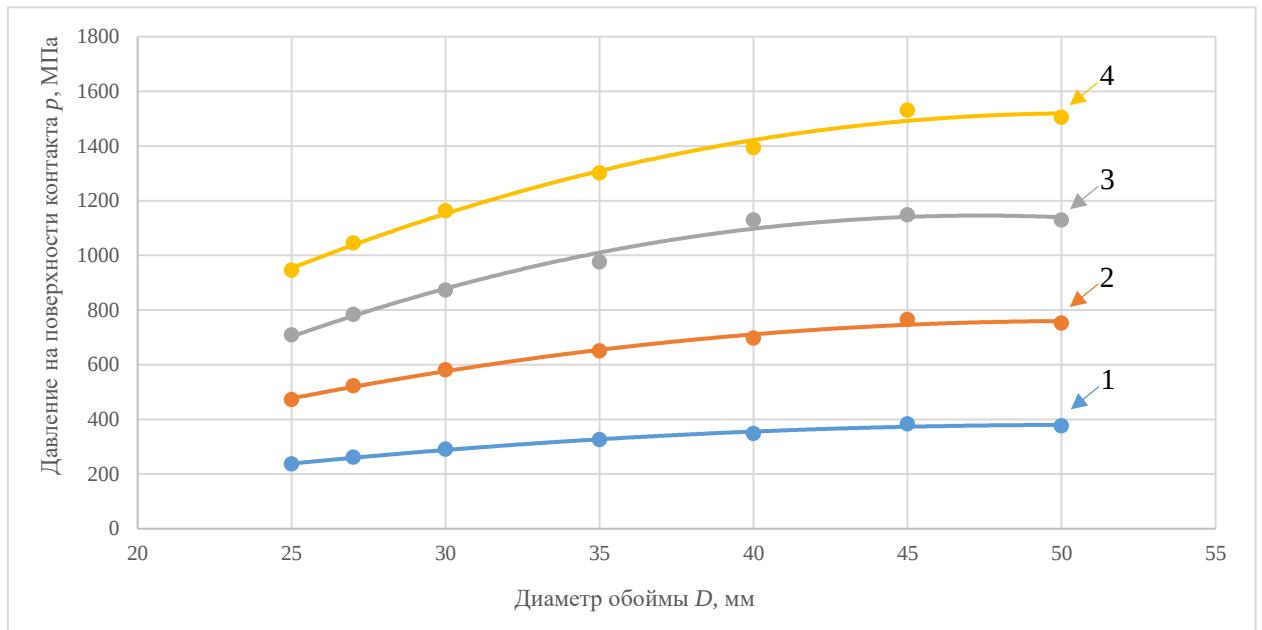


Рисунок 35 – Зависимости давления на поверхности контакта от диаметра обоймы из стали 4X5МФС

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

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

### 3.4 Влияние трения

Учитывая сложные условия контакта инструмента и заготовки, было изучено влияние фактора трения на силовые параметры холодной высадки, так как величина смазочного слоя имеет важное значение при высоких давлениях [96].

Тенденция влияния фактора трения на сжимающие напряжения в оснастке представлена на рисунке 36.

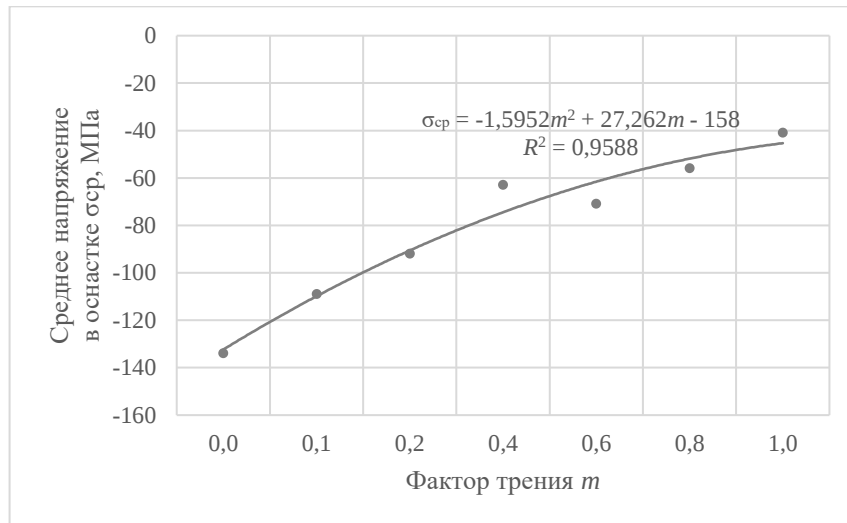


Рисунок 36 – Влияние фактора трения на средние напряжения в инструменте (моделирование)

Как видно, с повышением фактора трения наблюдается тенденция к постоянному повышению средних напряжений в оснастке.

Учитывая, что рекомендуемый фактор трения редко превышает 0,4, был проведен анализ для факторов трения 0,2, 0,4 и без трения (идеальные условия) (рисунок 37).

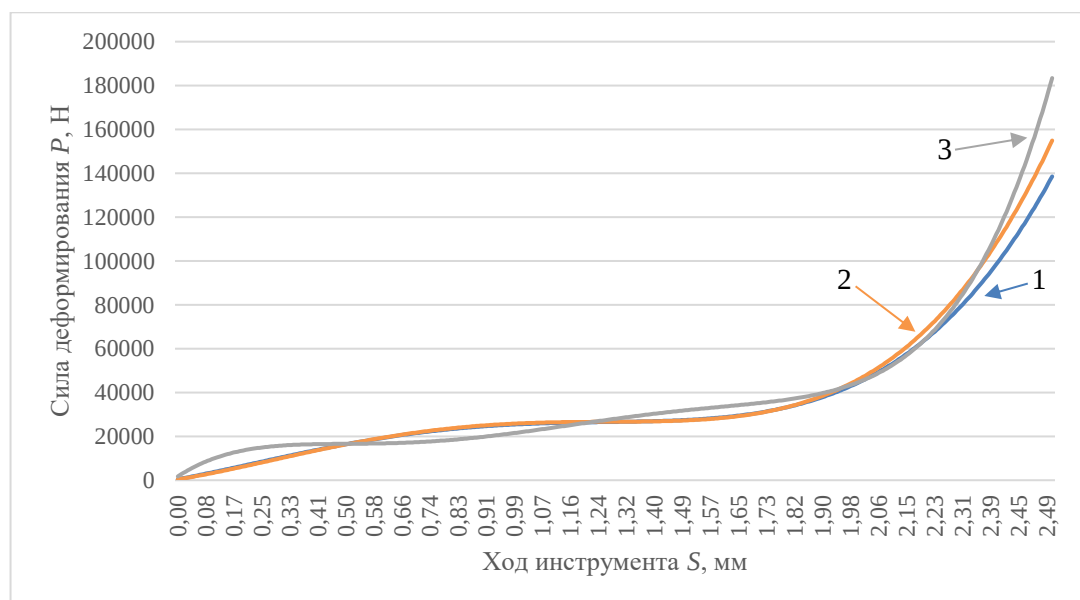


Рисунок 37 – Влияние фактора трения на силу деформирования  
1 – фактор трения равен нулю; 2 – фактор трения равен 0,2; 3 – фактор трения равен 0,4

Было установлено, что сила деформирования по сравнению с идеальными условиями увеличивается на 30 %, что говорит о необходимости применения эффективных смазочных материалов для снижения силовой нагрузки на инструмент.

Как показали результаты моделирования (рисунок 38), величина напряжения сжатия  $\sigma$  в точке 6 (см. рисунок 30) зависит от фактора трения в исследуемом интервале (0,0–0,4). Это подтверждает, что применение смазочных материалов, минимизирующих трение, позволяет снизить нагрузку на инструмент и тем самым повысить его ресурс [108,109].

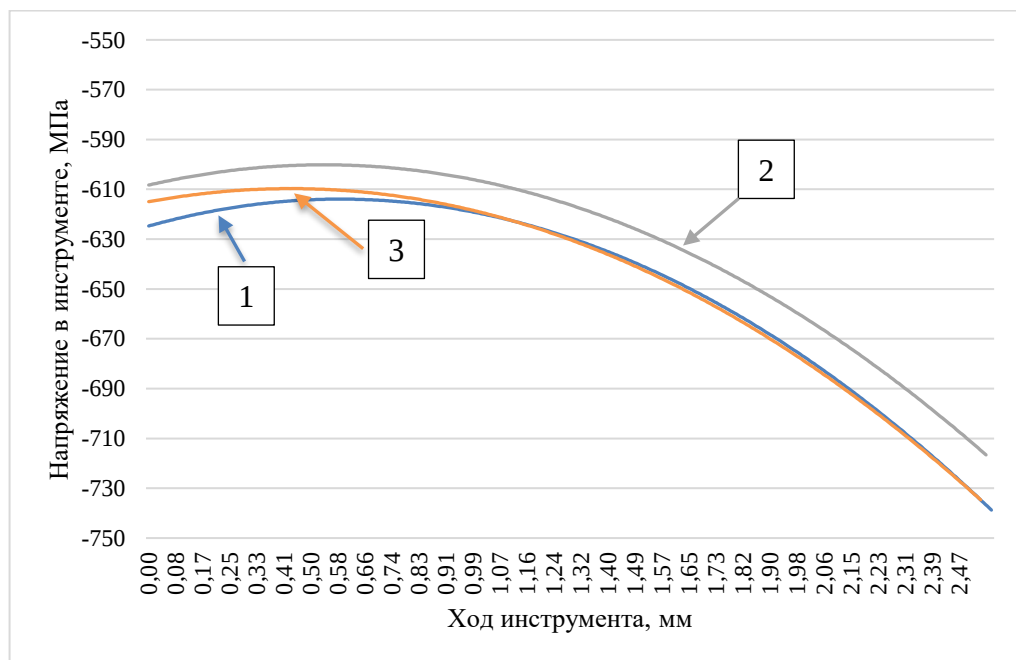


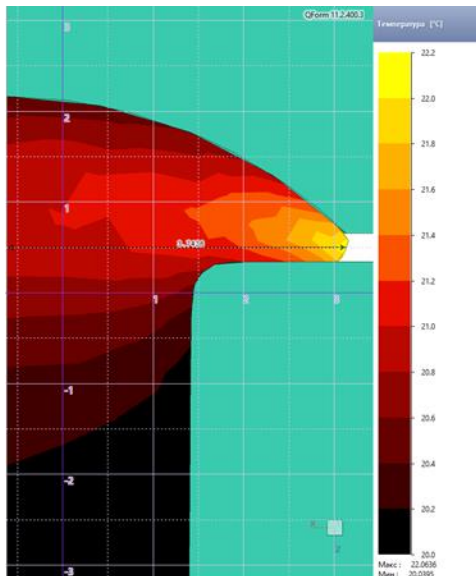
Рисунок 38 – Влияние трения на средние сжимающие напряжения  $\sigma$  инструмента в точке 6 (моделирование)

1 – фактор трения равен нулю; 2 – фактор трения равен 0,2; 3 – фактор трения равен 0,4

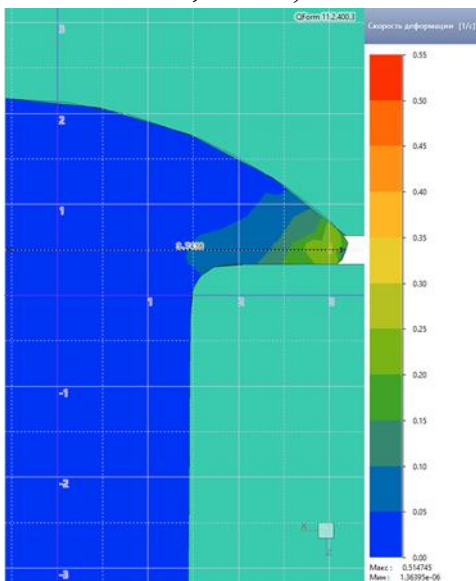
### 3.5 Анализ напряженного состояния в оснастке при высадке на холодновысадочном автомате

*Одиночный цикл.* Эксперименты, проведенные на испытательной машине при скорости деформирования  $V = 0,033$  мм/с, показали незначительный нагрев

заготовок. Однако это условие не отражает реальную картину холодной высадки на автомате, где скорость деформирования выше почти на три порядка,  $V = 131\text{--}0$  мм/с (рисунок 39).

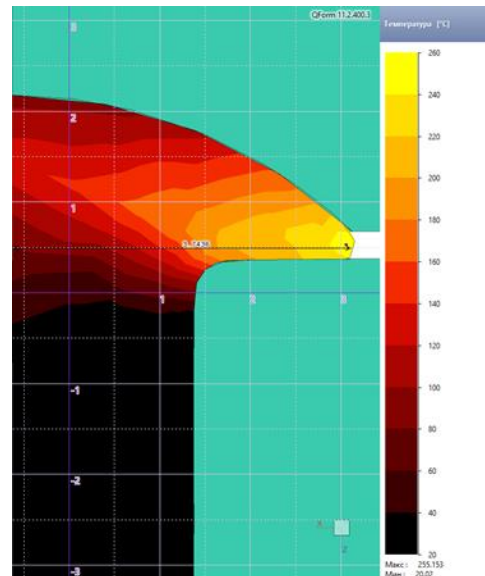


$T = 22\text{ °C}$ ,  $V = 0,033\text{ мм/с}$

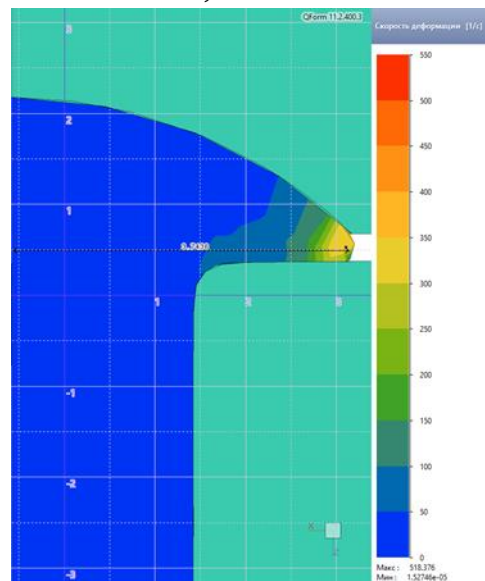


$\dot{\epsilon} = 0,20\text{ с}^{-1}$

а



$T = 400\text{ °C}$ ,  $V = 131\text{--}0\text{ мм/с}$



$\dot{\epsilon} = 150\text{ с}^{-1}$

б

Рисунок 39 – Распределение температуры в головке заклепки и скорости деформации в конечный момент формообразования

а – в условиях испытательной машины; б – в условиях холодновысадочного автомата

Таким образом, скорость деформации необходимо рассматривать не только как независимый параметр, но и как фактор, который вызывает нагрев заготовки и влияет на температурное распределение инструмента.

*Автоматический цикл.* Динамика напряжений во вставках и обоймах.

Анализ напряженного состояния обойм и вставок пуансона и матрицы в процессе формообразования партии из 96 заготовок показал, что напряжения в процессе деформации увеличиваются незначительно (кривые 1, 2 рисунок 40). Это свидетельствует о том, что в процессе высадки данные напряжения не приведут к пластической деформации обойм.

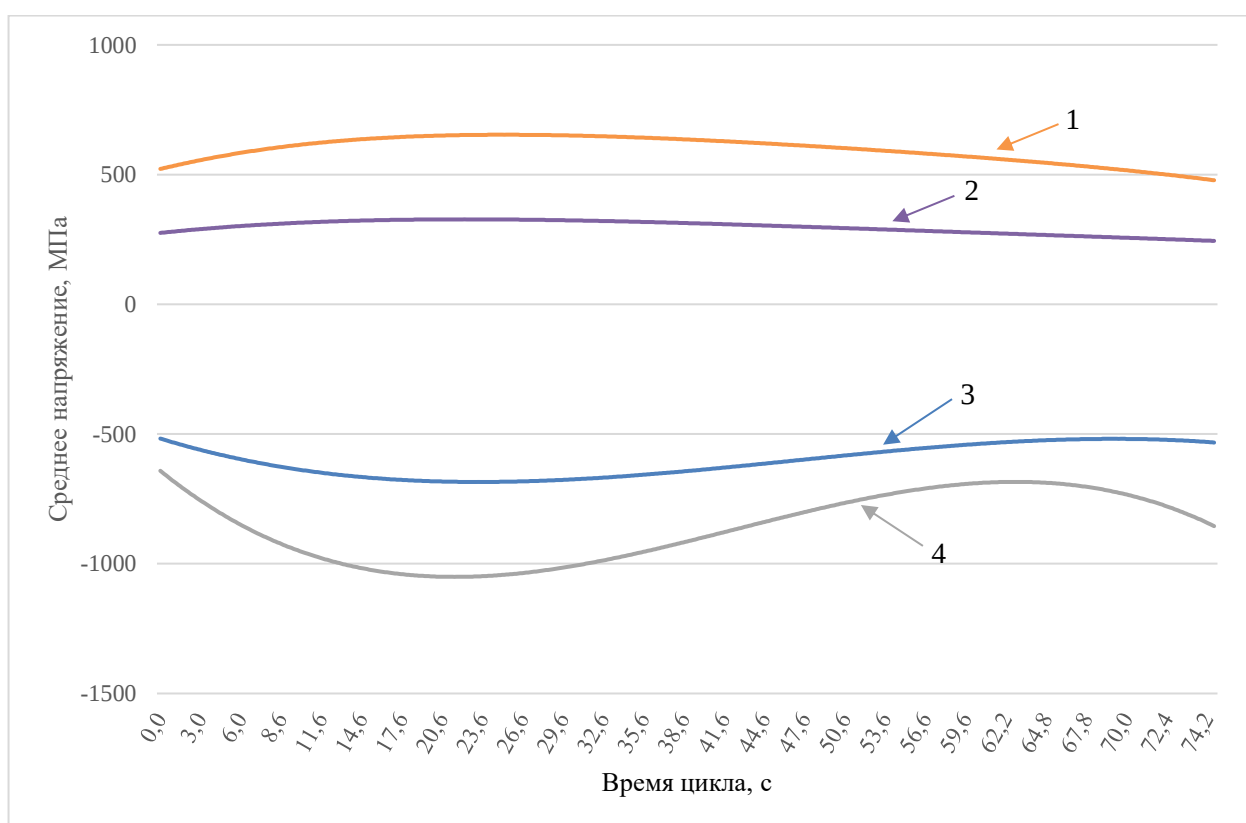


Рисунок 40 – Распределение напряжений в обоймах и вставках пуансона и матрицы в процессе цикла

1 – в обойме пуансона; 2 – в обойме матрицы; 3 – во вставке пуансона;

4 – во вставке матрицы

### 3.5.1 Исследование теплового эффекта

По мнению ряда авторов [25,106], при применении твердосплавных вставок возникающий нагрев может вызывать деформации в бандаже при незначительной деформации самих вставок. Следовательно, в таких случаях может возникнуть ослабление или полное устранение предварительного натяга, необходимого для сохранения работоспособности инструмента. Поэтому в работе изучена динамика температур как в заготовке, так и в оснастке с учетом циклического характера процесса. Первоначально моделировали полный цикл формообразования одной заклепки, а затем последовательно повторяли расчет для 96 последующих ходов. Такой подход необходим для оценки прогрессирующего нагрева инструмента за счет накопленного тепла от последовательно высаживаемых заготовок и частичного охлаждения в интервалах между ударами. Выбор 96 ударов моделировал типовую производственную партию.

Анализ теплового состояния заготовки из сплава ХН60ВТ методом трассируемых точек показал, что наиболее интенсивный нагрев происходит на завершающей стадии формообразования, где деформация и трение максимальны. Средняя по объему температура в сформированной головке заклепки достигает примерно 250 °С, а локальный максимум наблюдается в периферийной части головки (точка 1), где температура может составлять ~400 °С (рисунок 41).

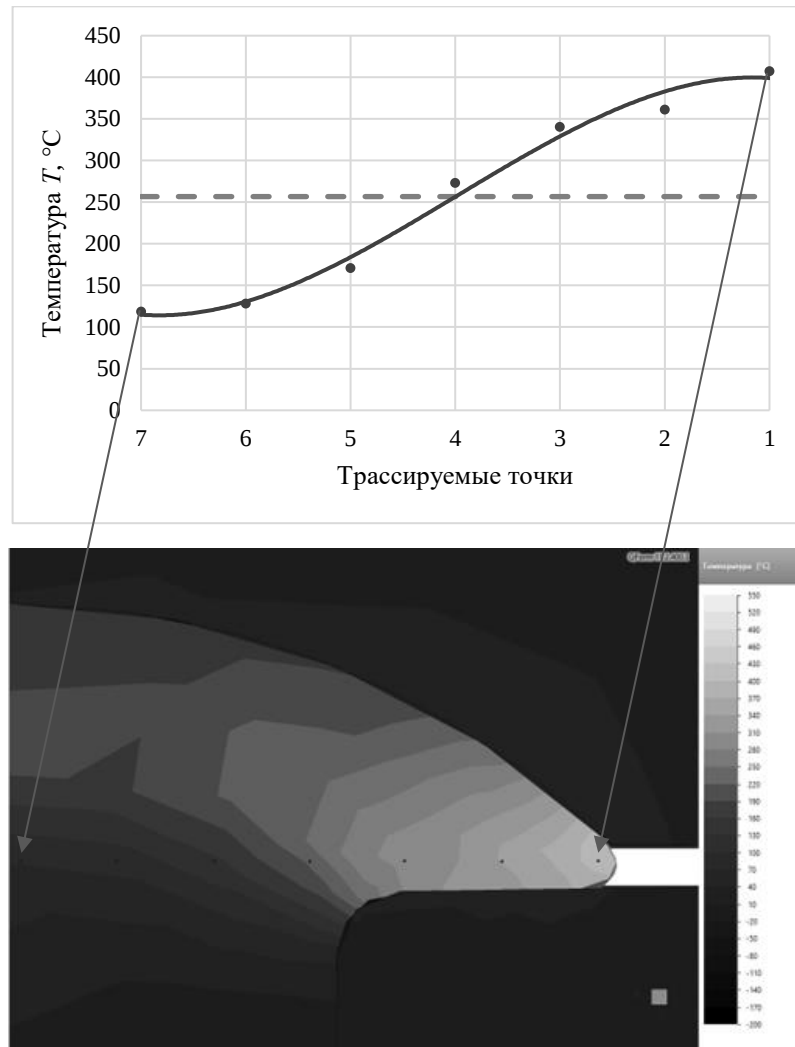


Рисунок 41 – Эпюра температур в головке заклепки в конце процесса высадки  
сплошная линия – температура в трассируемых точках; штриховая – средняя температура

В отличие от заготовки, инструмент подвергается аккумулятивному в течение цикла нагреву. На рисунке 42 показано изменение температуры в твердосплавных вставках матрицы и пуансона для 1-го, 50-го и 96-го ударов.

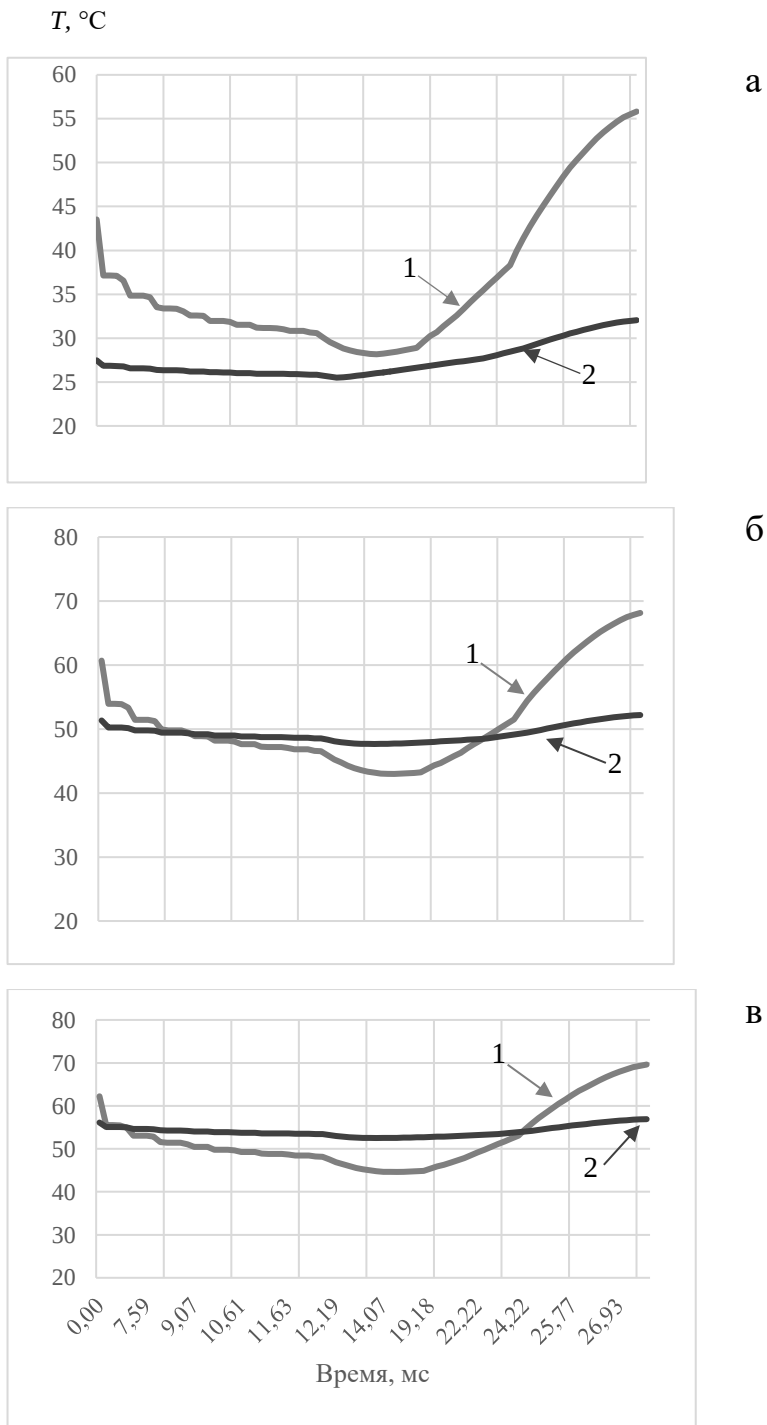


Рисунок 42 – Зависимость температуры вставки матрицы (1) и вставки пуансона (2) от времени в процессе цикла ударов  
а – 1-ый удар; б – 50-ый удар; в – 96-ой удар

В течение первых 20–30 ударов вставка матрицы нагревается интенсивнее, однако затем скорости нагрева выравниваются, и к концу серии ударов температуры становятся близкими (рисунок 42 в).

Усредненная температура вставок за всю партию (рисунок 43) показывает, что наиболее быстрый нагрев происходит при первых ударах, а после примерно 50-го удара скорость роста температуры заметно снижается.

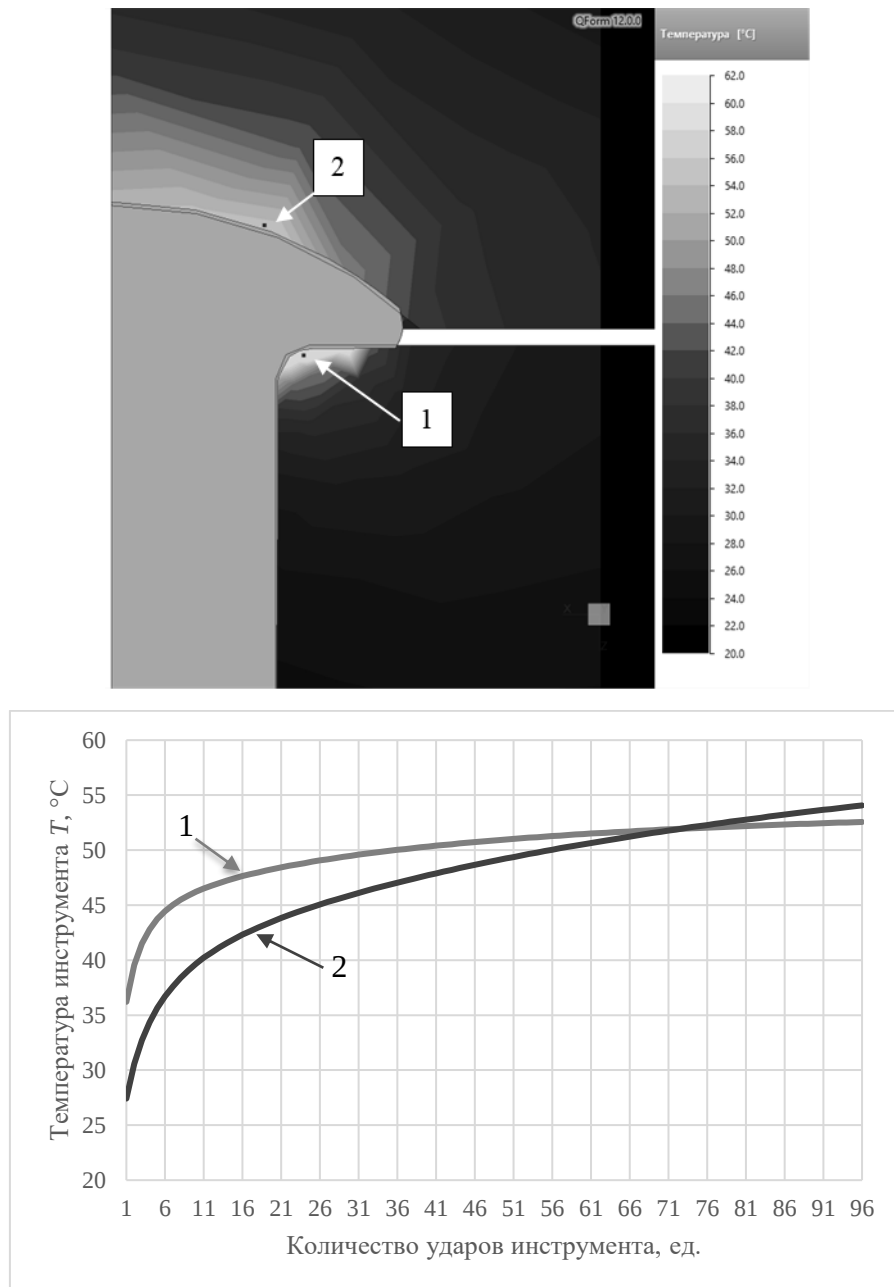


Рисунок 43 – Изменение температуры инструмента при циклической высадке заготовок, а – температурное поле; б – изменение температуры:  
1 – вставка матрицы, 2 – вставка пуансона

Установлено, что в смоделированных условиях нагрев инструмента стабилизируется на относительно низком уровне, не превышая 55 °С относительно начальных 20 °С за все 96 ударов. Это свидетельствует о том, что при данных конструкционных и технологических параметрах тепловые эффекты не приводят к критическому ослаблению натяга и не являются причиной износа.

Полученные данные имеют прямое практическое значение. Найденная моделированием максимальная температура заготовки (~400 °С) задает верхнюю границу для выбора температурного интервала при построении реологических моделей материалов.

### **Выводы по главе 3**

1. На основе экспериментальных исследований осадки образцов из жаропрочного никелевого сплава ХН60ВТ в изотермических условиях в диапазоне температур 20–450 °С и скоростей деформации 0,001–0,4 с<sup>-1</sup> определены реологические модели, устанавливающие связь между напряжением текучести и термомеханическими параметрами. Модели получены в двух формах: эмпирическая (коэффициенты модели Хензеля-Шпиттеля) и табличная функция. Сравнение результатов моделирования холодной высадки с натурным экспериментом подтвердило высокую точность обеих моделей (коэффициент достоверности  $R^2$  составил 0,9987 и 0,9974 соответственно), что доказывает их адекватность и применимость для инженерного анализа.

2. С применением найденной реологической модели в виде табличной функции в программном комплексе QForm выполнен конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния системы «заготовка–инструмент». Установлено, что при высадке возникает существенная неравномерность распределения напряжений и деформаций. Показано, что в твердосплавных вставках наиболее опасной зоной с точки зрения вероятности зарождения дефектов является граница контакта с обоймой, где уровень сжимающих напряжений минимален, что подтверждается производственной практикой.

3. Исследовано влияние прочностных свойств высаживаемого материала на напряженное состояние инструмента. Установлено, что при типовых натягах 0,05–0,10 мм в наиболее нагруженных точках деформирующего инструмента при посадке алюминиевых сплавов (АД0, Д16, АМг5) развиваются сжимающие напряжения на уровне 700–1300 МПа, в то время как для высокопрочных материалов (ХН60ВТ, 12Х18Н10Т) – 450–850 МПа.

4. Доказано, что бандажирование и рациональный натяг позволяют не только сместить напряженное состояние в область сжатия, но и значительно снизить амплитуду колебаний напряжений, минимизируя риск 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.

5. Разработана расчетная модель, основанная на критериях отсутствия сдвига вставки и прочности обоймы, которая связывает воедино свойства материала заклепки, геометрию оснастки и характеристики материалов инструмента. Верификация модели путем сопоставления контактных давлений с результатами конечно-элементного моделирования в QForm показала их хорошее совпадение, что подтверждает корректность предложенного подхода. Модель позволяет целенаправленно определять рациональные параметры натяга  $\delta$  и диаметра обоймы  $D$  для обеспечения надежной работы инструмента.

6. С использованием метода конечных элементов, применительно к реальной кинематике автомата (темп работы 120 ход/мин), проведен анализ тепловых эффектов при циклическом формообразовании. 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 ~400 °С, а средняя по объему – 250 °С. Эти данные согласуются с натурными измерениями и задают необходимый верхний предел (450 °С) при определении реологических моделей материалов для холодной посадки.

7. Исследование аккумулятивного нагрева составного инструмента в течение 96 последовательных циклов показало, что, несмотря на высокую температуру заготовки, температура твердосплавных вставок стабилизируется на уровне, не превышающем 55 °С. Это свидетельствует о том, что при данных конструкционных параметрах (массивная стальная обойма) и темпе работы тепловые эффекты не являются причиной ослабления натяга и износа инструмента, а значит, его ресурс определяется преимущественно механическими факторами (амплитуда напряжений, усталость).

8. Показано, что применение смазочных материалов, минимизирующих фактор трения (например, ONV120), позволяет снизить максимальную силу высадки на 8–10 % и тем самым уменьшить технологическую нагрузку на оснастку, что является практическим способом повышения ее стойкости.

9. На основе комплексного анализа влияния технологических параметров установлено, что долговечность оснастки для высадки заклепок из высокопрочных никелевых сплавов определяется точностью обеспечения расчетного натяга. Рекомендовано перед сборкой инструмента вводить операцию селективной сортировки вставок и обойм, что позволяет формировать пары «вставка–обойма» с требуемым натягом и, как показала практика, кардинально повышает стойкость оснастки.

## ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 4.1 Исследование холодновысадочного инструмента из стали 4X5МФС с запрессованной вставкой из твердого сплава ВК15

Исследованием продольных микрошлифов из корпусов высадочного инструмента было установлено, что микроструктура основного материала состоит из троостита отпуска [110] и характерна для нормально термообработанного состояния стали 4X5МФС (рисунок 44).

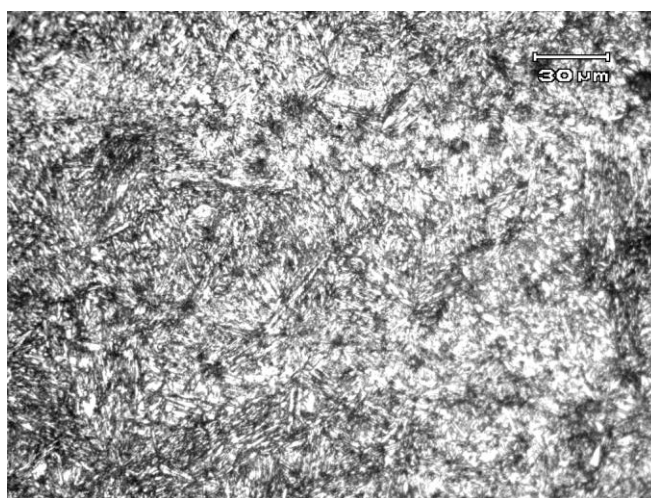


Рисунок 44 – Микроструктура стали 4X5МФС, увеличение  $\times 500$

Исследованием поперечного микрошлифа, выполненного из вставки, установлено, что микроструктура основного материала состоит из смеси  $\alpha$ - фазы (карбида вольфрама) и связующей  $\beta$  - фазы (кобальта). Объемное содержание пор менее 0,02 % (объемное содержание пор определялось по шкале «А» ГОСТ 4872-75 [111]. Распределение связующей  $\beta$  - фазы равномерное, а максимальный размер отдельных крупных зерен  $\alpha$  - фазы – 9 мкм (рисунок 45).

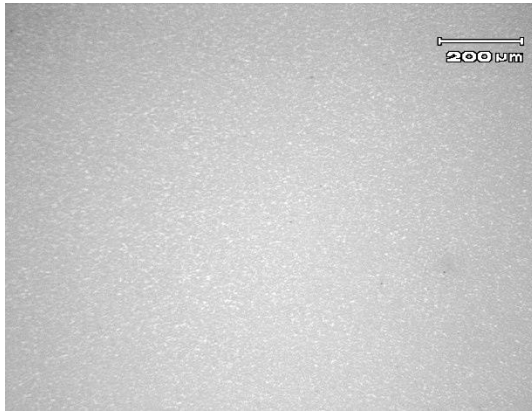
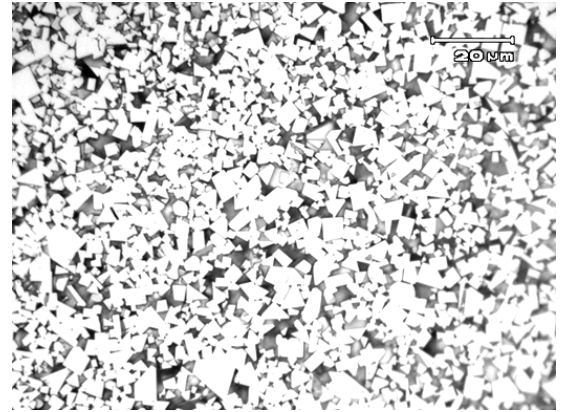
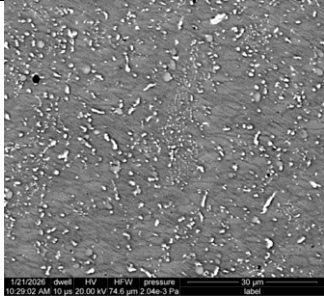
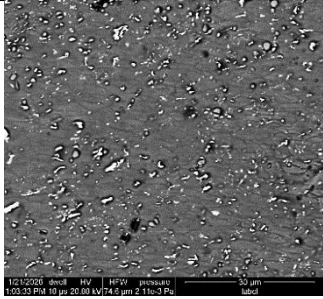
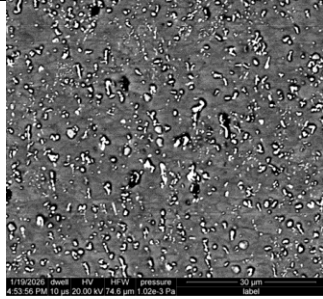
увеличение  $\times 100$ увеличение  $\times 1000$ 

Рисунок 45 – Микроструктура твердого сплава BK-15

Проведенными замераами твердости установлено: твердость материала обойм (сталь 4X5МФС) HRC = 49,0; твердость материала вставки (твердый сплав BK15) HRA = 84,0, что соответствует требованиям ГОСТ 3882-74 [112].

#### 4.2 Исследуемый материал заклепок

Микроструктуры образцов, осаженных для получения реологических свойств, показаны на рисунке 46. Они характеризуются наличием субзерен размерами от 2 до 10 мкм.

| Температура деформации, °C | Скорость деформации, $\dot{\epsilon}$ с <sup>-1</sup>                               |                                                                                      |                                                                                       |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                            | 0,001                                                                               | 0,01                                                                                 | 0,4                                                                                   |
| 1                          | 2                                                                                   | 3                                                                                    | 4                                                                                     |
| 20                         |  |  |  |

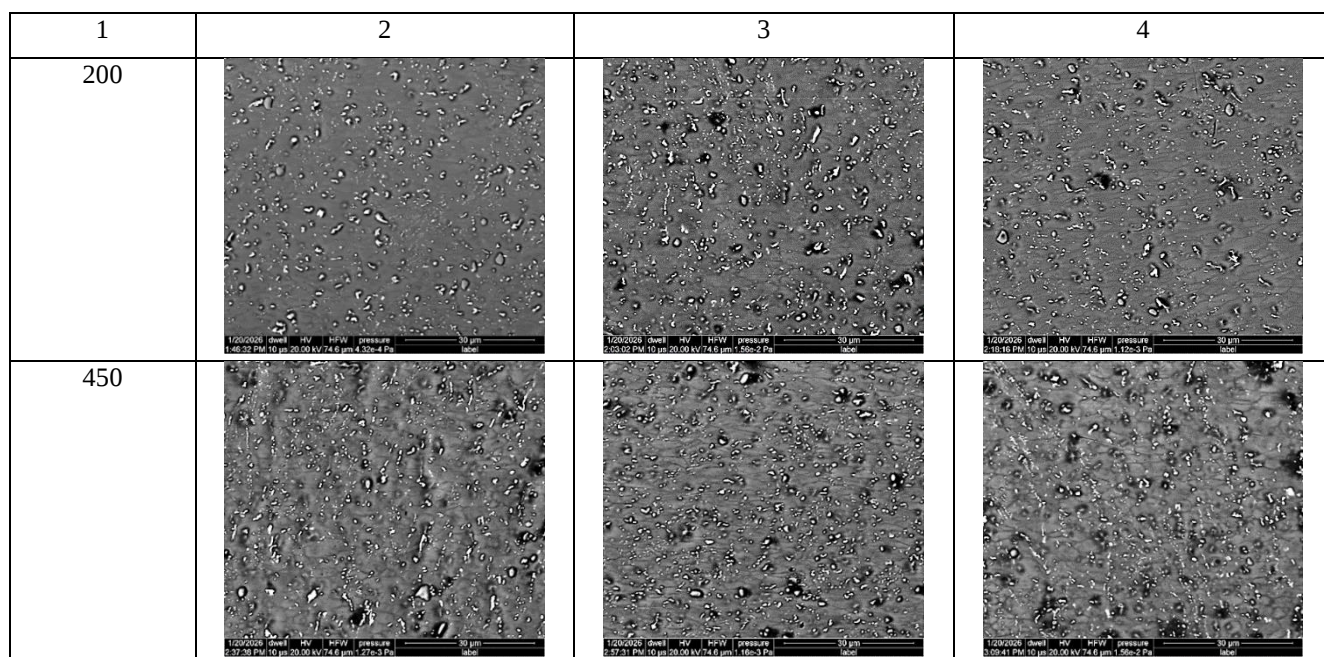


Рисунок 46 – Микроструктуры образцов сплава ХН60ВТ после деформации при различных температурах и скоростях (увеличение  $\times 2000$ )

Изменение скорости деформаций в диапазоне 0,001–0,4 практически не влияет на величину субзерен, что подтверждается результатами исследований ряда авторов [113,114]. Однако с ростом температуры деформации от комнатной до 450 °С наблюдается их некоторый рост, что и приводит к изменению напряжений течения сплава.

### 4.3 Силовые параметры и структурные изменения

В соответствии с методикой была найдена зависимость силы деформирования от хода инструмента (рисунок 47), которая подтвердила возможность использования испытательной машины модели LFM250 для экспериментальной высадки заклепок.

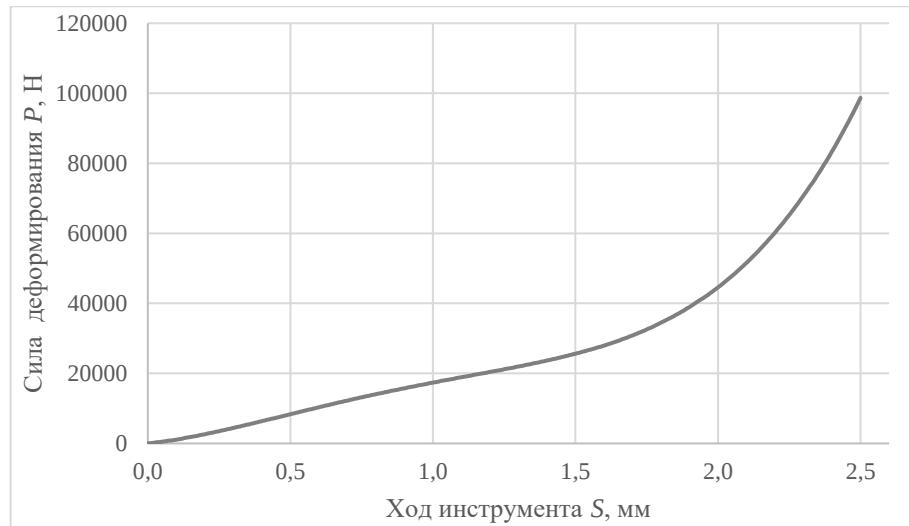


Рисунок 47 – Диаграмма «сила–ход» при высадке заклепки из сплава ХН60ВТ

Полученные образцы заклепок показаны на рисунке 48.



ХН60ВТ



М1



АМг5

Рисунок 48 – Образцы заклепок, полученные высадкой на испытательной машине

Макроструктура заклепки из сплава ХН60ВТ, разрезанной в меридиональной плоскости электроэрозионным способом, характеризуется наличием мелких зерен (рисунок 49).

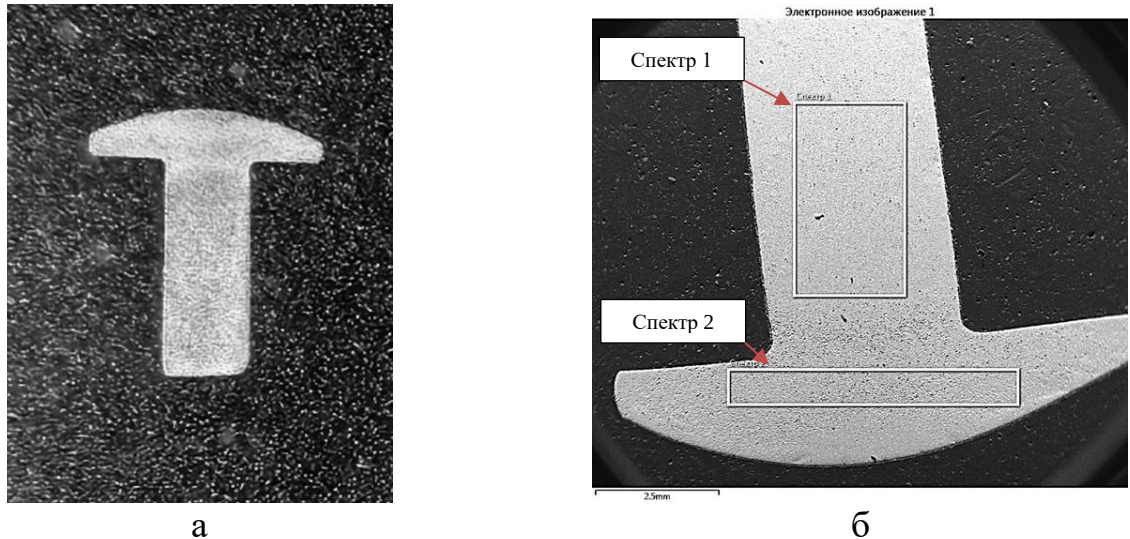


Рисунок 49 – Макроструктура высаженной заклепки

а – увеличение  $\times 5$ ; б – увеличение  $\times 10$

Химический состав в стержне (спектр 1) и головке (спектр 2) практически не отличаются (рисунок 49 б, таблица 14).

Таблица 14 – Химический состав стержня и головки

| Название спектра | Al   | Ti   | Cr    | Fe   | Ni    | Mo   | W     | Сумма  | Папка проекта |
|------------------|------|------|-------|------|-------|------|-------|--------|---------------|
| Спектр 1         | 0,57 | 0,65 | 25,25 | 1,56 | 55,84 | 1,30 | 14,83 | 100,00 | стержень      |
| Спектр 2         | 0,71 | 0,60 | 25,15 | 1,59 | 56,02 | 1,29 | 14,63 | 100,00 | головка       |

В головке заклепки наблюдается веерообразная текстура материала с вытянутыми вдоль направления деформации зёрнами (рисунок 50) и точечными неметаллическими включениями (рисунок 51).

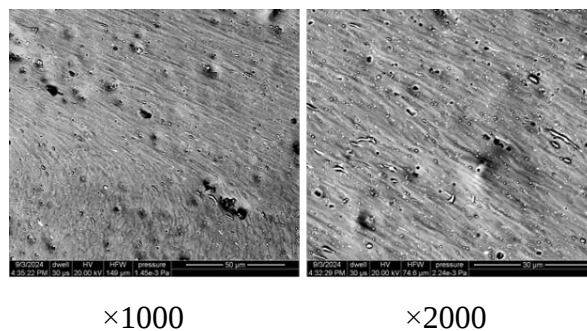
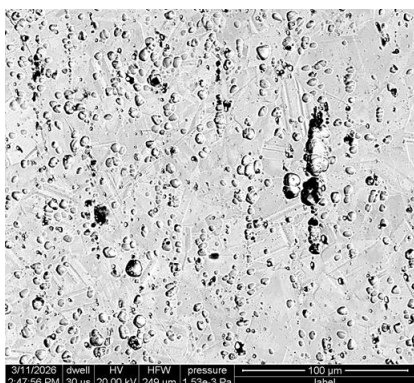
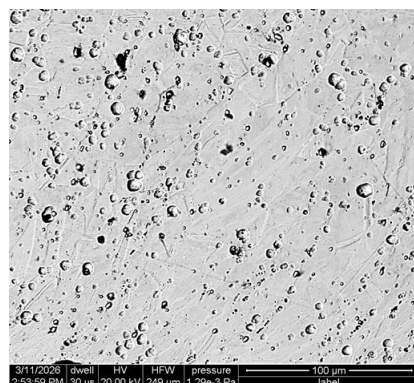


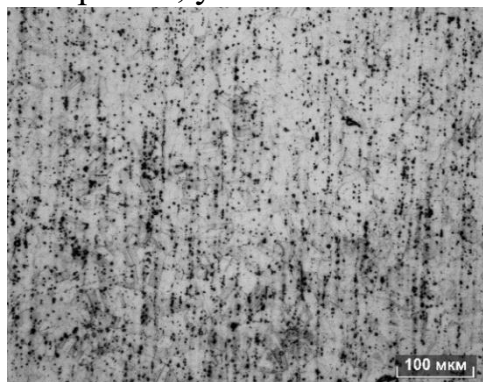
Рисунок 50 – Характерная микроструктура материала в головке заклепки



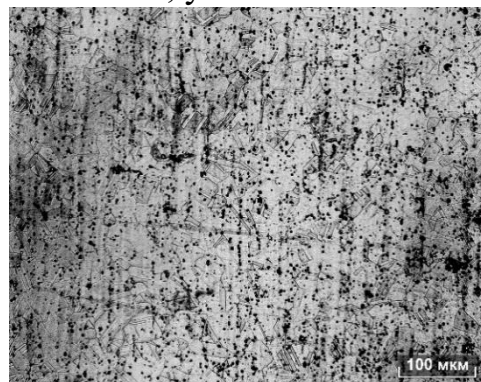
стержень, увеличение  $\times 200$



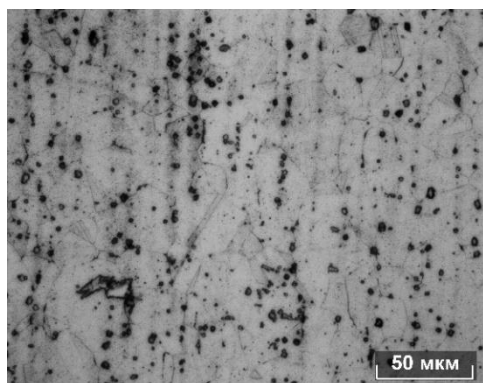
головка, увеличение  $\times 200$



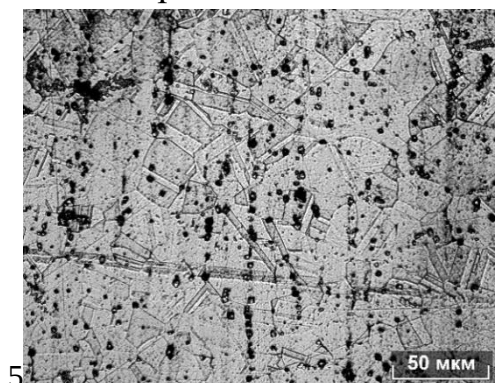
Центр головки,  $\times 200$



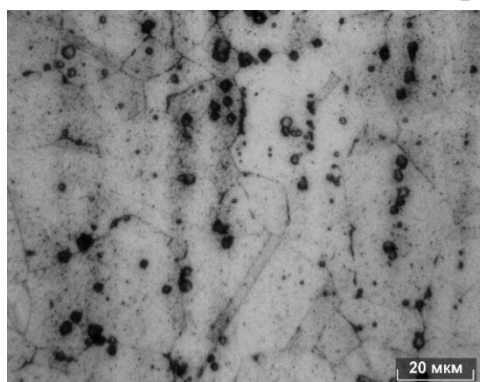
Центр головки,  $\times 200$ ,  
поляризованный свет



Центр головки,  $\times 500$



Центр головки,  $\times 500$ ,  
поляризованный свет



$\times 1000$

Рисунок 51 – Структура материала высаженной заклепки

#### 4.4 Анализ напряженно-деформированного состояния методом микротвердости

Результаты измерения микротвердости образцов из сплава ХН60ВТ, осаженных в соответствии с методикой (рисунок 52), приведены в таблице 15.

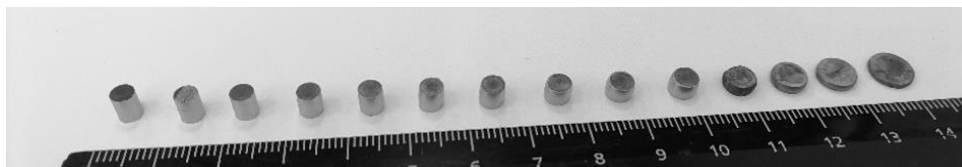
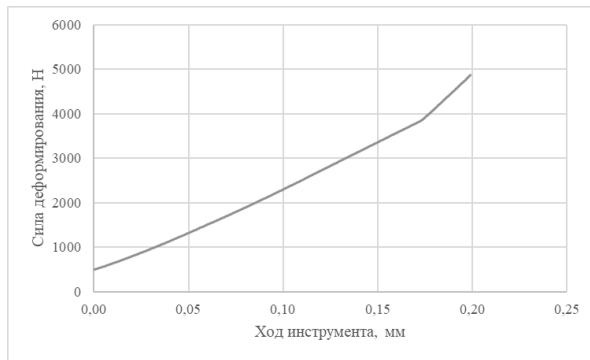


Рисунок 52 – Осаженные образцы для определения тарировочной кривой

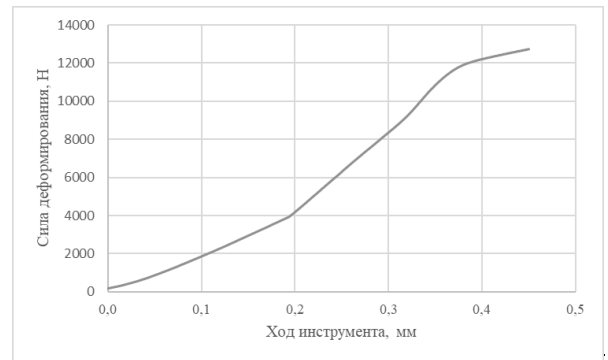
Таблица 15 – Результаты измерения микротвердости осаженных образцов (см. рисунок 5)

| № образца | Микротвердость (HV0,1) |                   |                |
|-----------|------------------------|-------------------|----------------|
|           | краевая зона 1         | центральная часть | краевая зона 2 |
| 1         | 320                    | 318               | 308            |
| 2         | 288                    | 290               | 316            |
| 3         | 323                    | 315               | 312            |
| 4         | 307                    | 338               | 324            |
| 5         | 367                    | 358               | 355            |
| 6         | 376                    | 381               | 375            |
| 7         | 391                    | 378               | 384            |
| 8         | 407                    | 415               | 406            |
| 9         | 390                    | 409               | 405            |
| 10        | 400                    | 415               | 398            |
| 11        | 408                    | 424               | 422            |
| 12        | 420                    | 430               | 435            |
| 13        | 441                    | 433               | 426            |
| 14        | 420                    | 427               | 410            |
| 15        | 491                    | 485               | 485            |
| 16        | 488                    | 468               | 471            |
| 17        | 458                    | 449               | 444            |
| 18        | 458                    | 469               | 455            |
| 19        | 453                    | 453               | 443            |

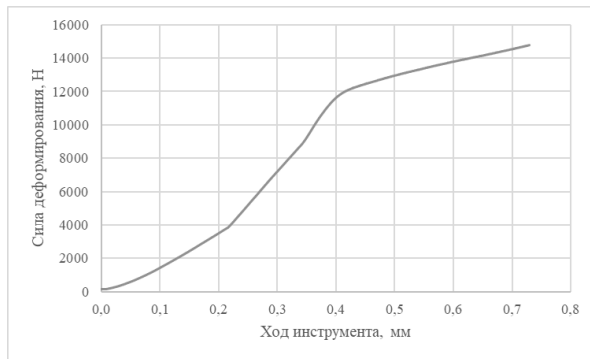
При осадке образцов были получены зависимости сила-ход, которые приведены на рисунке 53.



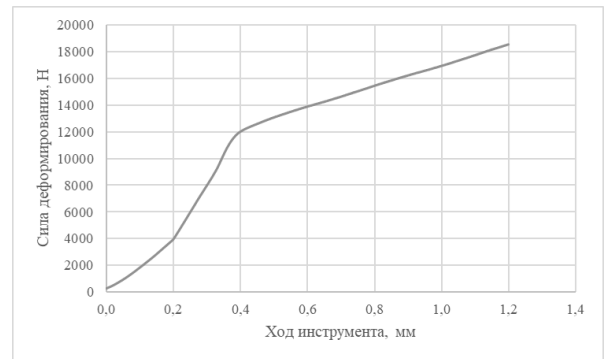
Образец № 2



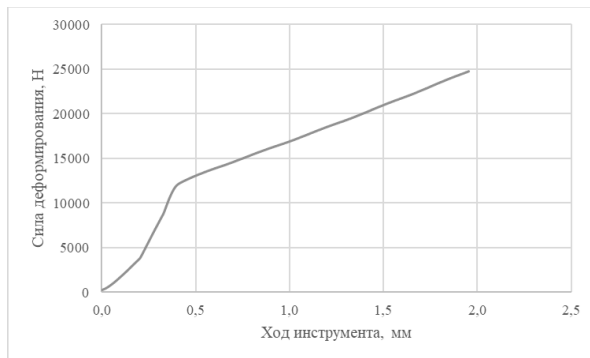
Образец № 3



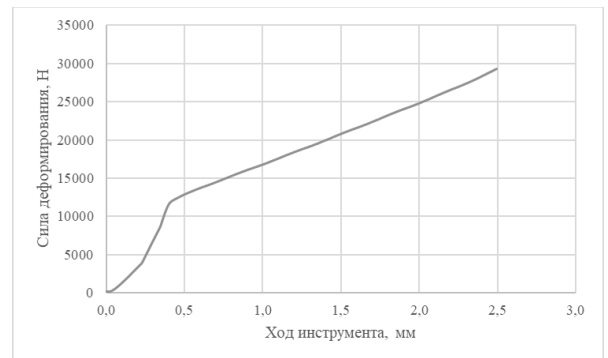
Образец № 4



Образец № 6



Образец № 8



Образец № 10

Рисунок 53 – Зависимости сил деформирования от хода инструмента

Результаты обработки данных таблицы 15 приведены в таблице 16 и на рисунке 54.

Таблица 16 – Зависимость твердости и напряжения текучести от величины деформации сплава ХН60ВТ

| $\varepsilon$ | HV  | $\sigma$ , МПа |
|---------------|-----|----------------|
| 1             | 2   | 3              |
| 0,10          | 315 | 14             |
| 0,16          | 298 | 395            |

| 1    | 2   | 3    |
|------|-----|------|
| 0,22 | 317 | 998  |
| 0,29 | 323 | 1107 |
| 0,35 | 360 | 1203 |
| 0,43 | 377 | 1277 |
| 0,51 | 384 | 1348 |
| 0,69 | 409 | 1462 |
| 0,79 | 401 | 1495 |
| 0,83 | 419 | 1614 |
| 0,91 | 433 | 1855 |
| 0,91 | 404 | 1527 |
| 1,14 | 433 | 2309 |
| 1,45 | 419 | 2544 |
| 1,58 | 487 | 2572 |
| 1,60 | 450 | 3171 |
| 1,60 | 476 | 2843 |
| 1,61 | 450 | 3907 |
| 1,63 | 461 | 3354 |

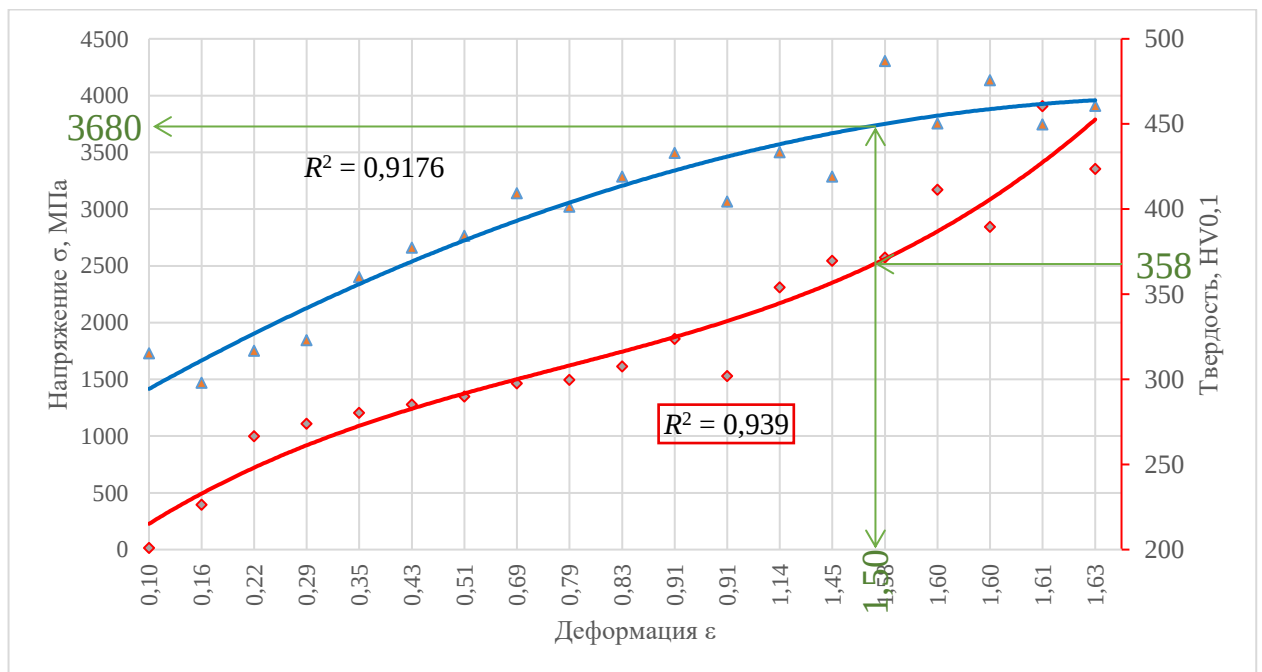


Рисунок 54 – Зависимость микротвердости (красная) и напряжений (синяя) от деформации

Зависимости, показанные на рисунке 54, в аналитическом виде имеют следующий вид:

$$\varepsilon = 2,854 \cdot 10^{-5} (\text{HV})^2 - 0,013232 (\text{HV}) + 1,5205$$

$$R^2 = 0,8718$$

$$\sigma = 500,2459 \varepsilon^2 + 702,3854 \varepsilon + 722,387$$

$$R^2 = 0,9063$$

Кривые (рисунок 54) позволяют определить распределение деформации и напряжений на высаженной заклепке.

Заклепка, разрезанная в меридиональной плоскости, измерена согласно схеме (см. рисунок 6), и определено распределение микротвердости с последующим расчетом напряжений и деформаций по сечению (таблица 17, рисунки 55, 56, 57).

Таблица 17 – Распределение микротвердости, деформаций и напряжений по сечению заклепки

| Расстояние | Микротвердость,<br>HV0,1 | Деформация, $\varepsilon$ | Напряжение,<br>МПа | Микротвердость,<br>HV0,1 | Деформация, $\varepsilon$ | Напряжение,<br>МПа |
|------------|--------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------|
|            | Сечение I                |                           |                    | Сечение II               |                           |                    |
| 0,3        | 444                      | 1,27                      | 2424,72            | 448                      | 1,32                      | 2522,49            |
| 0,7        | 450                      | 1,35                      | 2572,97            | 467                      | 1,57                      | 3047,78            |
| 1,0        | 467                      | 1,57                      | 3047,78            | 430                      | 1,11                      | 2114,38            |
| 1,4        | 463                      | 1,51                      | 2928,42            | 452                      | 1,37                      | 2624,55            |
| 1,7        | 456                      | 1,42                      | 2731,02            | 428                      | 1,09                      | 2073,87            |
| 2,0        | 417                      | 0,97                      | 1866,94            | 436                      | 1,18                      | 2241,51            |
| 2,4        | 419                      | 0,99                      | 1902,63            | 432                      | 1,13                      | 2155,81            |
| 2,7        | 436                      | 1,18                      | 2241,51            | 456                      | 1,42                      | 2731,02            |
| 3,1        | 450                      | 1,35                      | 2572,97            | 454                      | 1,40                      | 2677,22            |
| 3,4        | 454                      | 1,40                      | 2677,22            | 442                      | 1,25                      | 2377,41            |
| 3,8        | 446                      | 1,30                      | 2473,08            | 446                      | 1,30                      | 2473,08            |
| 4,1        | 448                      | 1,32                      | 2522,49            | 436                      | 1,18                      | 2241,51            |
| 4,4        | 472                      | 1,63                      | 3203,97            | 448                      | 1,32                      | 2522,49            |
| 4,8        | 465                      | 1,54                      | 2987,49            | 459                      | 1,46                      | 2813,86            |
| 5,1        | 481                      | 1,76                      | 3505,56            | 467                      | 1,57                      | 3047,78            |
| 5,5        | 469                      | 1,59                      | 3109,31            | 463                      | 1,51                      | 2928,42            |
| 5,8        | 474                      | 1,66                      | 3268,68            | 442                      | 1,25                      | 2377,41            |
| 6,1        | 483                      | 1,79                      | 3576,29            | 446                      | 1,30                      | 2473,08            |
| 6,5        | 444                      | 1,27                      | 2424,72            | 438                      | 1,20                      | 2285,82            |
| 6,8        | 442                      | 1,25                      | 2377,41            | 432                      | 1,13                      | 2155,81            |

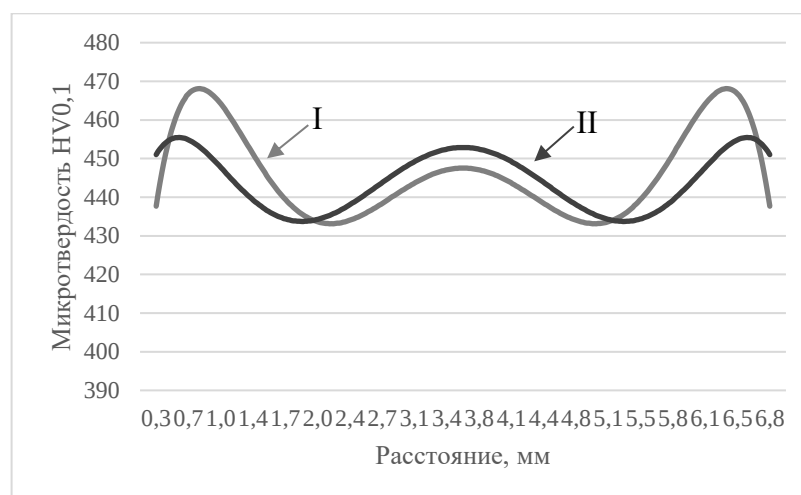


Рисунок 55 – Распределение микротвердости в сечении головки заклепки

На рисунке 55 представлено распределение микротвердости (HV<sub>0,1</sub>) в двух меридиональных сечениях (I и II) головки заклепки из сплава ХН60ВТ. Анализ графика показывает, что микротвердость распределена неравномерно по сечению. Наблюдается явно выраженная зона повышенной твердости в центрально-периферийных областях (на расстояниях от 4,4 до 6,1 мм от оси), где значения HV достигают 480–485. Максимальное значение зафиксировано на расстоянии 6,1 мм в сечении I (HV 483). В периферийных (0,3–1,0 мм) и приосевых зонах (3,4–4,1 мм) значения микротвердости несколько ниже и составляют 440–460 HV. Микротвердость качественно характеризует распределение деформации, что в данном случае свидетельствует о ее неравномерности в объеме головки заклепки. При этом форма кривых для сечений I и II качественно подобна, что указывает на симметричность процесса деформирования относительно оси заклепки.

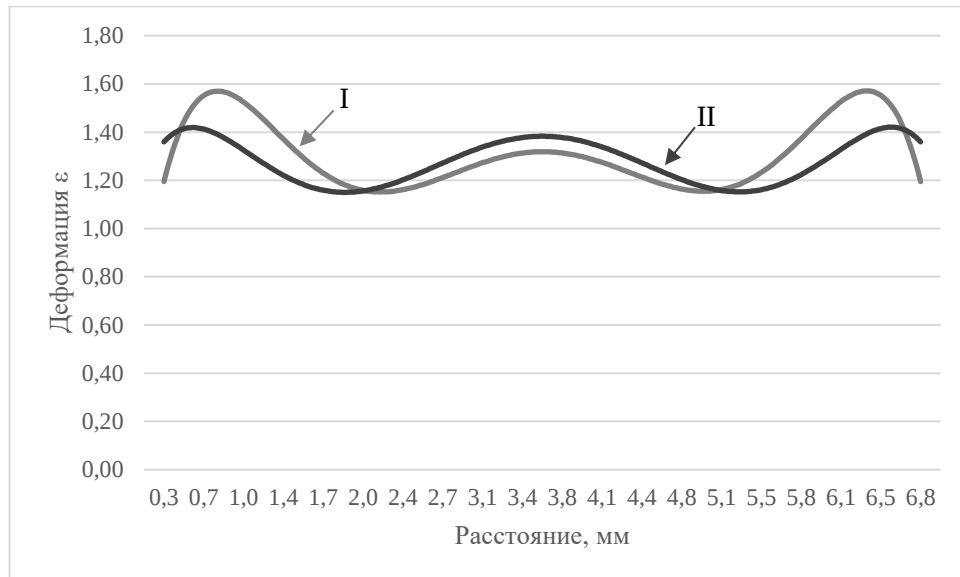


Рисунок 56 – Распределение деформаций в сечении головки заклепки

Графики распределения истинных логарифмических деформаций  $\epsilon$  по сечениям головки заклепки (рисунок 56) построены с использованием тарировочной зависимости  $\epsilon$ –(HV) (рисунок 5.0). Установлено, что зона максимальных деформаций ( $\epsilon = 1,6–1,8$ ) локализована в области, удаленной от оси на 4,5–6,1 мм, что коррелирует с зоной повышенной микротвердости. Наибольшее значение деформации ( $\epsilon = 1,79$ ) зафиксировано в сечении I на расстоянии 6,1 мм. В центральной части головки (расстояния 2,0–4,1 мм) и у наружного края (0,3–1,0 мм) деформация снижается до  $\epsilon = 0,9–1,2$ , что подтверждается результатами анализа величины деформации по изменению размера зерен в соответствии с методикой, изложенной в работе [69].

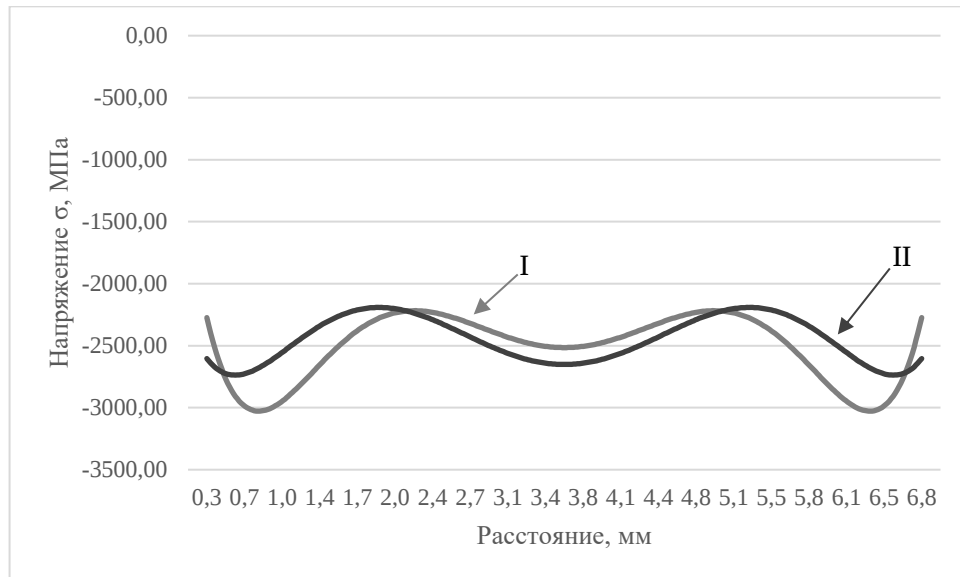


Рисунок 57 – Распределение напряжений в сечении головки заклепки

На рисунке 57 приведены графики распределения напряжений текучести  $\sigma$  (МПа) по сечению головки заклепки, рассчитанные через деформацию с помощью аппроксимирующей зависимости  $\sigma(\epsilon)$ . Закономерности распределения напряжений качественно повторяют кривые деформации.

Анализ рисунков 55–57 в совокупности с данными таблицы 17 показывает, что распределение микротвердости, деформаций и напряжений в меридиональном сечении заклепки носит немонотонный характер. Форма кривых имеет выраженный максимум в зоне, расположенной на расстоянии примерно 4–6 мм от оси головки, и минимумы – у оси и на внешней границе. Такое распределение типично для процессов высадки с образованием утолщенной головки и объясняется характером течения материала: центральные слои движутся поступательно с меньшим искажением, наружные – тормозятся о стенки матрицы, а промежуточные слои испытывают наибольшие сдвиговые деформации и упрочнение.

#### 4.5 Влияние смазочных материалов

Для оценки влияния смазочных материалов на силовой режим процесса осуществили высадку заклепок со скоростью деформирования 0,033 мм/с и

записью диаграммы «сила – ход инструмента» с применением смазки CUT165 и с использованием смазки ONV120. Полученные результаты показаны на рисунке 58.

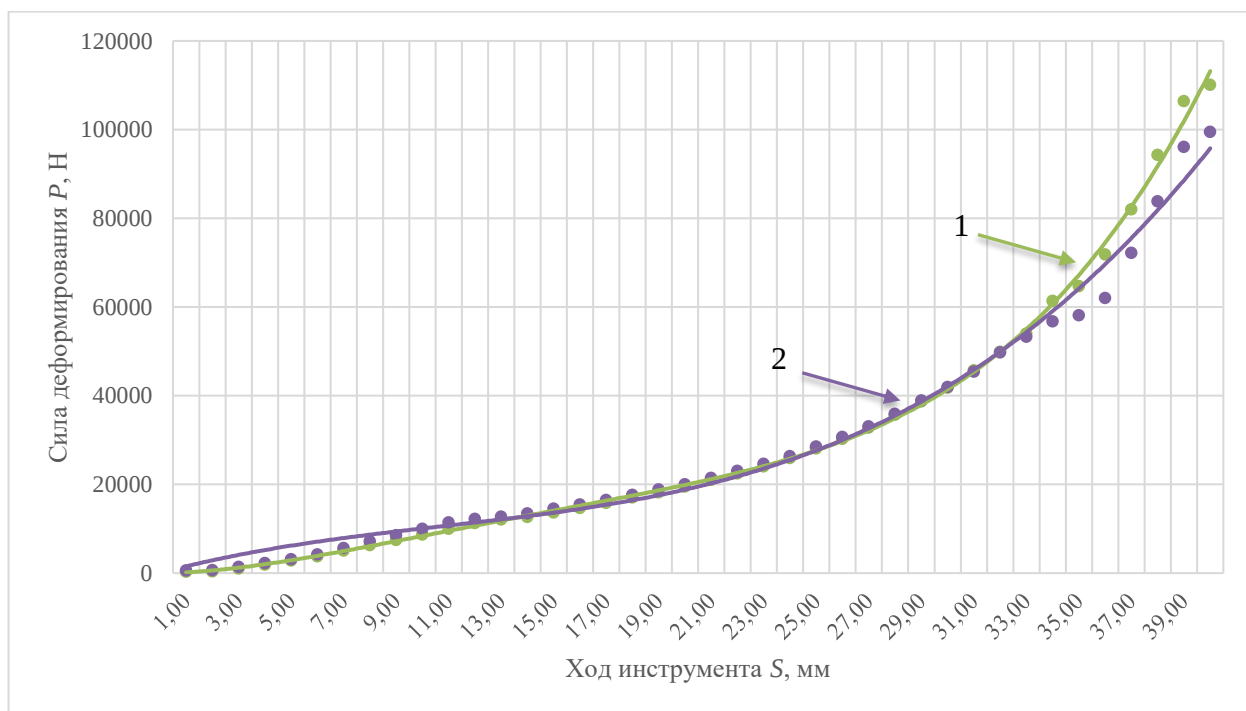


Рисунок 58 – Влияние смазок на силу деформирования

1 – смазка Zetcut; 2 – смазка ONV120

#### 4.6 Оценка нагрева инструмента при холодной высадке

Температуру нагрева пуансона определили пирометром после трех циклов высадки 96–103 заклепок, которая составляла от 43 до 54 °С.

#### 4.7 Селективная сборка инструмента

Подбор пуансонов и вставок, обеспечивающих натяг с допуском в пределах 0,02–0,05 мм, позволил повысить стойкость оснастки до 60 000 заклепок.

#### **Выводы по главе 4**

1. Методом металлографического анализа подтверждено соответствие микроструктуры материала оснастки (сталь 4Х5МФС – троостит отпуска) и твердосплавной вставки (ВК15 – смесь  $\alpha$ -фазы карбида вольфрама и связующей  $\beta$ -фазы кобальта) нормативно-техническим требованиям. Твердость обоймы составила HRC 49,0, твердость вставки – HRA 84,0, что отвечает требованиям ГОСТ 3882-74.

2. Исследование микроструктуры образцов сплава ХН60ВТ, деформированных в диапазоне температур 20–450 °С при скоростях деформации 0,001–0,4 с<sup>-1</sup>, показало, что структура характеризуется наличием субзерен размерами от 2 до 10 мкм. Изменение скорости деформации в исследованном диапазоне практически не влияет на размер субзерен, тогда как повышение температуры деформации от комнатной до 450 °С приводит к их некоторому росту, что объясняет изменение напряжений течения сплава.

3. Экспериментально подтверждена возможность использования испытательной машины LFM250 для высадки заклепок из сплава ХН60ВТ. Получены зависимости силы деформирования от хода инструмента при высадке заклепок как из сплава ХН60ВТ. Макроструктура высаженных заклепок характеризуется веерообразной текстурой с вытянутыми вдоль направления деформации зернами, при этом химический состав материала в стержне и головке практически не различается.

4. 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.

5. 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, что подтверждает целесообразность ее использования для снижения контактных нагрузок на инструмент.

6. Установлено, что после трех циклов высадки партий объемом 96–103 заклепок температура пуансона находилась в интервале от 43 до 54 °С.

7. Практически подтверждена эффективность селективной сборки составного инструмента. В пределах заданной точности изготовления матрицы разброс значений-натяга может достигать 0,031 мм (от 0,049 до 0,080 мм). 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.

## ГЛАВА 5 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

### 5.1. Статистическая оценка экспериментальных данных

В соответствии с методикой, изложенной в п. 2.7, была выполнена статистическая обработка результатов испытаний на сжатие образцов из сплава ХН60ВТ.

Для каждого температурно-скоростного режима (таблица 7) было испытано по три образца. Диаграммы «сила–ход» преобразованы в зависимости «напряжение текучести–истинная деформация» (см. рисунок 23).

По каждому из 18 режимов (испытания были проведены с 6 температурами и 3 скоростями деформации при каждой температуре) были рассчитаны средние арифметические значения напряжения текучести для фиксированных величин деформации.

В качестве примера приведены результаты обработки данных испытаний на сжатие образцов, деформированных со скоростью  $0,4 \text{ с}^{-1}$  при температуре  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (таблица 18).

Таблица 18 – Результаты обработки данных испытаний образцов на сжатие

| № записи | Образец № 1    |               | Образец № 2    |               | Образец № 3    |               | $\sigma_{\text{ср}}$ , МПа | $\varepsilon_{\text{ср}}$ |
|----------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------------------|---------------------------|
|          | $\sigma$ , МПа | $\varepsilon$ | $\sigma$ , МПа | $\varepsilon$ | $\sigma$ , МПа | $\varepsilon$ |                            |                           |
| 1        | 9,534236       | 0             | 11,93869       | 0             | 9,422771       | 0             | 10,29857                   | 0                         |
| 2        | 10,53992       | 0,000141      | 31,39281       | 0,002802      | 22,84063       | 0,002513      | 21,59112                   | 0,001818                  |
| 3        | 28,00092       | 0,002438      | 69,46045       | 0,007055      | 52,32516       | 0,006667      | 49,92884                   | 0,005387                  |
| ...      | ...            | ...           | ...            | ...           | ...            | ...           | ...                        | ...                       |
| 98       | 1295,907       | 0,433948      | 1372,931       | 0,438611      | 1202,08        | 0,445716      | 1290,306                   | 0,439425                  |
| 99       | 1299,635       | 0,438346      | 1376,268       | 0,443003      | 1204,809       | 0,450201      | 1293,570                   | 0,44385                   |

Определение среднеквадратичного отклонения показало, что все результаты испытаний укладываются в 7 % интервал (рисунок 59).

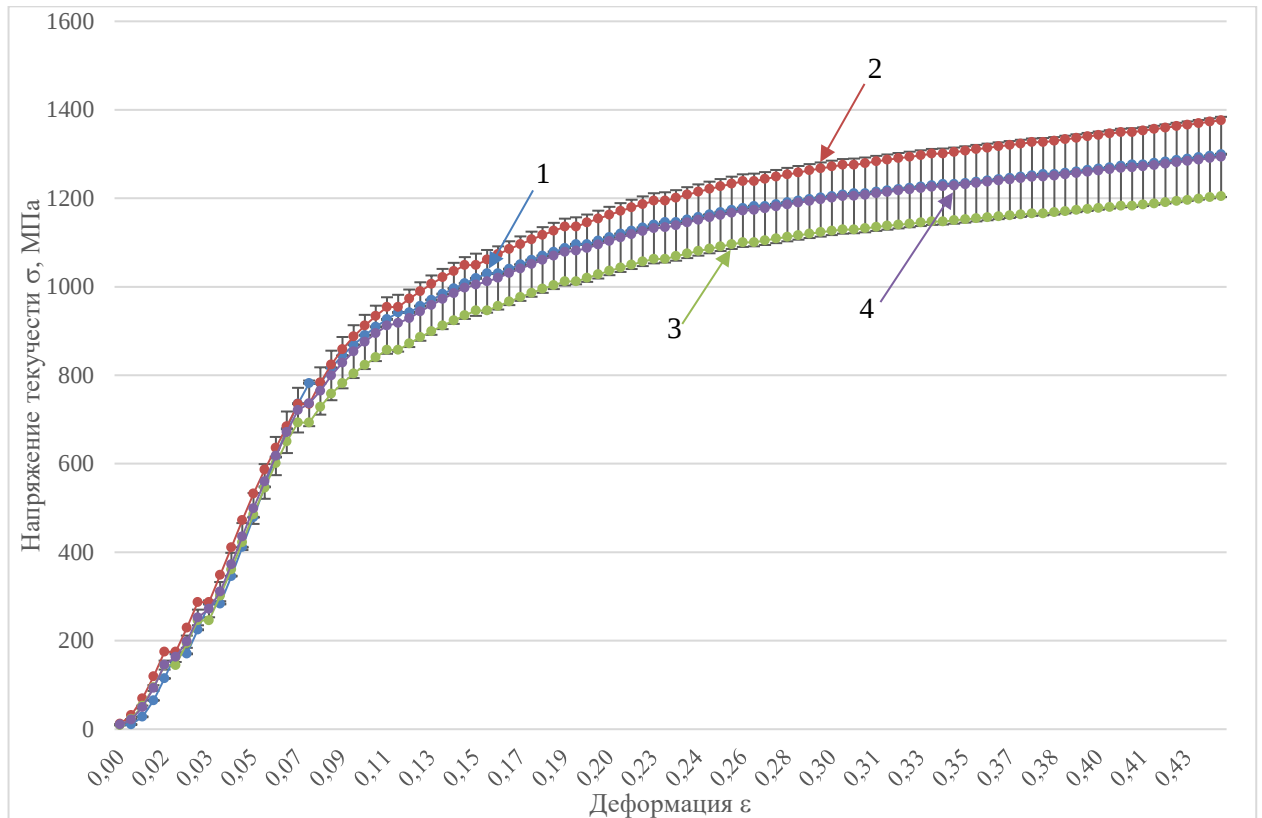


Рисунок 59 – Доверительный интервал результатов испытаний осадки образцов из сплава ХН60ВТ

1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – кривая средних значений напряжений

## 5.2 Сравнение реологических моделей

Диаграммы зависимостей силы деформирования от хода инструмента, полученные в натурном эксперименте процесса высадки заклепок, а также в результате моделирования с найденными реологическими моделями, показывают их близкое качественное и количественное совпадение (рисунок 60) [115-119].

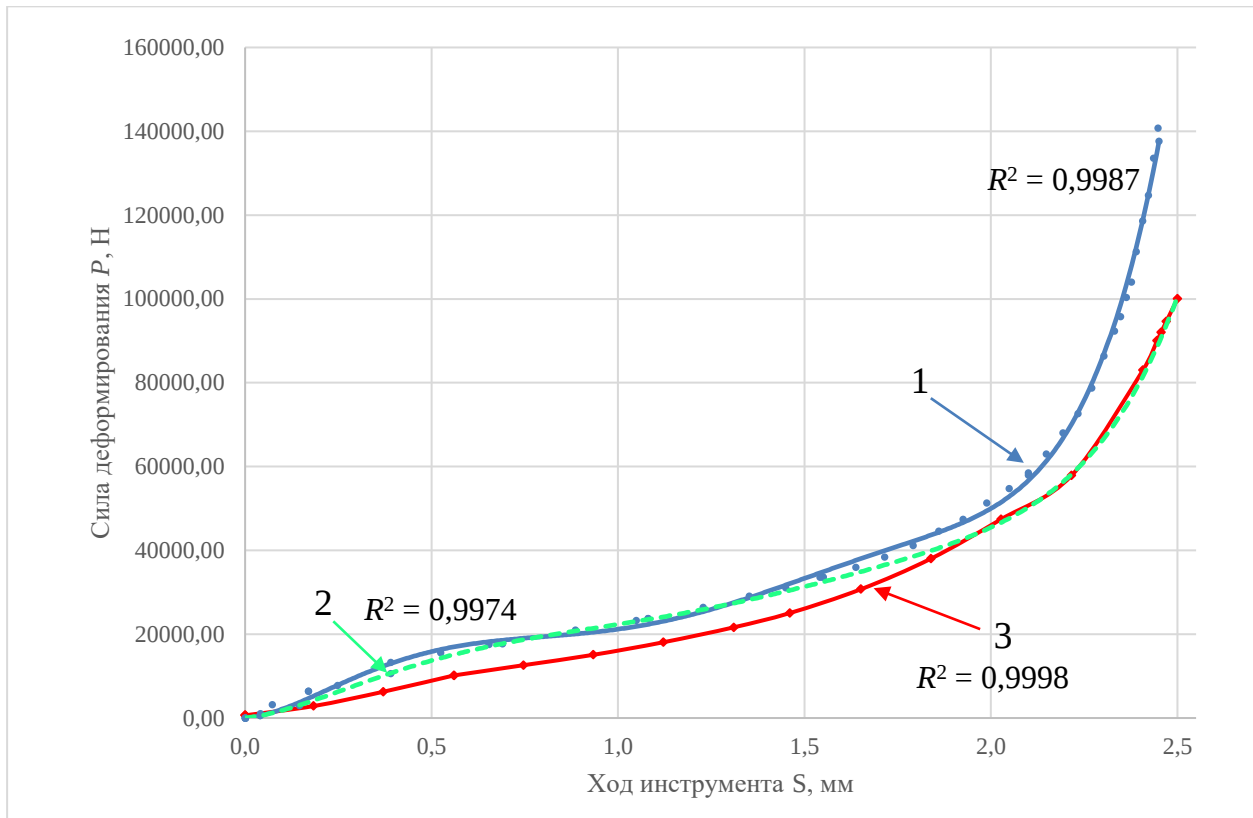


Рисунок 60 – Сравнение расчетных и экспериментальных сил формообразования заклепок от хода инструмента

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

Зависимость, построенная по табличной модели (см. рисунок 60, кривая 2), практически совпадает с экспериментальной, что говорит о предпочтительности ее применения в качестве реологической модели при моделировании процессов деформации заготовок из рассматриваемого сплава.

Для оценки адекватности найденной табличной модели выполнили сравнение расчетных данных с результатами, полученных в ходе натурного эксперимента. Поскольку дискретные значения хода в расчетной и экспериментальной выборках не совпадают, перед сравнением выполнили линейную интерполяцию экспериментальных значений силы для приведения их в соответствие с расчетными перемещениями.

Интерполяцию выполнили для каждого  $i$ -го расчетного хода по двум ближайшим экспериментальным точкам:

$$P_{iэ} = P_k + \frac{P_{k+1} - P_k}{S_{k+1} - S_k} \cdot (S_{ip} - S_{kэ}),$$

где  $P_{iэ}$  – экспериментальное значение силы, интерполированное на расчетный ход  $S_{ip}$ ;  $k$  – индекс экспериментальной точки, ближайшей слева к  $S_{ip}$ .

$$S_{kэ} \leq S_{ip} \leq S_{k+1}.$$

Затем сравнили массивы  $P_{ip}$  и  $P_{iэ}$  для всех  $i = 1 \dots n$ , где  $n$  – количество сравниваемых точек, где  $P_{ip}$  – сила по расчетным данным.

Для количественной оценки степени соответствия расчетных и экспериментальных данных использовали два критерия:

– среднюю абсолютную ошибку (САО), которая характеризует среднее абсолютное отклонение расчетных значений от экспериментальных:

$$\text{САО} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_{ip} - P_{iэ}|, \text{ Н};$$

– коэффициент детерминации ( $R^2$ ), который показывает, какая доля дисперсии экспериментальных данных объясняется моделью:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_{iэ} - P_{ip})}{\sum_{i=1}^n (P_{iэ} - P_э)},$$

где

$$\bar{P}_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{is}.$$

В результате расчетов CAO составляет 4711,2 Н,  $R^2 = 0,962$ .

Визуальный анализ кривых (рисунок 60) показал, что на начальном участке ( $S < 0,2$  мм) отклонения минимальны. В диапазоне  $S = 0,4 \dots 1,5$  мм расчетные значения силы на всех точках оказались ниже экспериментальных, что является основной причиной средней абсолютной ошибки. После  $S > 1,8$  мм кривые сближаются, однако расчетные значения остаются ниже экспериментальных на 5–10 %. В конечной точке ( $S = 2,45$  мм) значения практически совпадают, что указывает на корректное моделирование конечного момента формообразования.

Таким образом, табличная модель соответствует эксперименту с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,962$ . Средняя абсолютная ошибка не превышает 5 % от максимальной силы.

### **5.3 Оценка адекватности разработанной математической модели на основе численного эксперимента**

Как известно из классических работ, например, Ландау и Лифшица [120], 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 натяге 0,1 мм (см. рисунок 35), показали удовлетворительную сходимость с результатами, полученными с применением разработанной расчетной модели (рисунок 61).

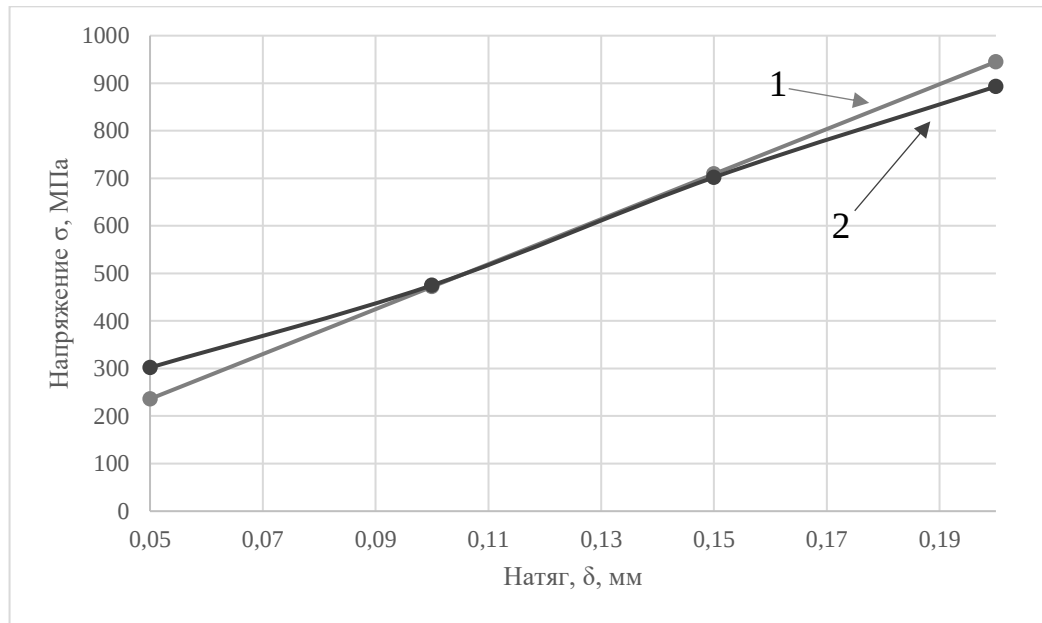


Рисунок 61 – Сравнение расчетных зависимостей для диаметра обоймы 25 мм

1 – расчетная модель; 2 – конечно-элементная модель

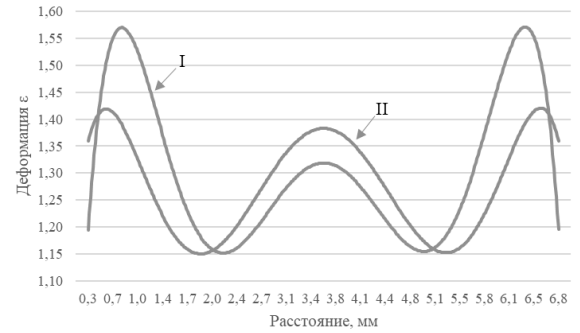
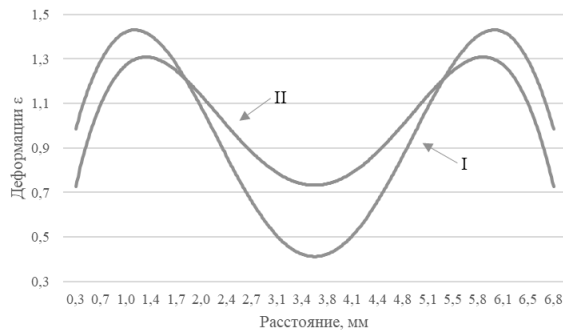
#### 5.4 Сравнение расчетных и экспериментальных данных распределения деформаций и напряжений в сечении головки заклепки

Для проверки расчетных данных моделирования напряженно-деформированного состояния в головке заклепки были применены экспериментальный метод микротвердости (методика измерений и тарировочные зависимости подробно изложены в главах 2 и 4) и метод определения деформации по величине зерна.

Так, значению микротвердости 358 HV соответствуют напряжения  $\sigma \approx 3\,680$  МПа и накопленная степень деформации  $\epsilon \approx 1,50$  (рисунок 54).

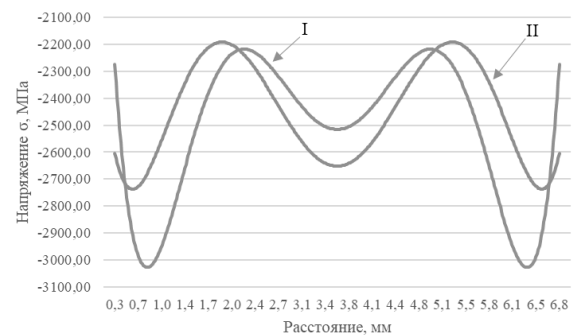
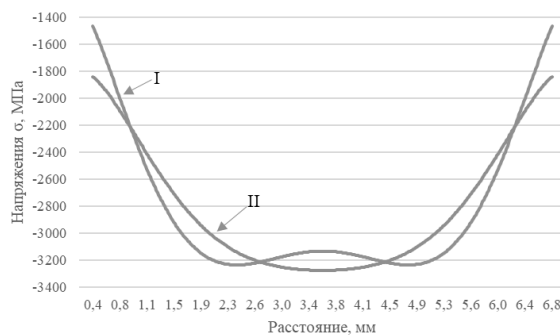
Величина зерна в исходном материале заготовки (см. рисунки 3,4) составила 10–11 мкм, после высадки средний размер зерна составил 2,5–3,0 мкм. Таким образом, величина деформации, определенная по их изменению в процессе деформации в соответствии с методикой Онищенко А.К. составила 1,34, что соответствует результатам, полученным моделированием.

Также выполнен сравнительный анализ напряжений и деформаций, определенных моделированием и методом микротвердости (рисунок 62).



Распределение деформаций в головке заклепок (моделирование)

Распределение деформаций в головке заклепок (метод микротвердости)



Распределение напряжений в головке заклепок (моделирование)

Распределение напряжений в головке заклепок (метод микротвердости)

Рисунок 62 – Сравнение деформаций и напряжений в головке по сечению (см. рисунок 26)

Сравнение полей деформаций и напряжений, полученных методом конечно-элементного моделирования и методом микротвердости, показало расхождение результатов на уровне 20–30 %, что объясняется различием физической природы сравниваемых величин. Моделирование отражает мгновенное состояние при максимальной обжатии [121-123] тогда как микротвердость фиксирует остаточные параметры после снятия нагрузки [65].

При значительных степенях пластической деформации ( $\epsilon > 0,4-0,5$ ) использование твердости для оценки напряжений становится некорректным [63]. Метод вдавливания индентора также не обеспечивает геометрического подобия отпечатков, что приводит к занижению истинных значений деформации и напряжений [64].

Таким образом, расхождение данных имеет физически обоснованный характер и не ставит под сомнение адекватность модели. Она подтверждается

совпадением зон локализации деформации и связью между расчетными напряжениями и экспериментально измеренной микротвердостью. При степенях деформации выше 0,4 метод микротвердости требует введения поправочных коэффициентов для количественной оценки напряженно-деформированного состояния [64].

### **5.5 Проверка теплового эффекта расчетной модели**

Сопоставление данных конечно-элементного моделирования с результатами экспериментальных замеров (глава 4) показало их удовлетворительную количественную сходимость. Расчетное значение установившейся температуры пуансона составило  $\sim 55$  °С, в то время как измеренные после трех циклов высадки партий объемом 96–103 заклепки значения находились в диапазоне 43–54 °С; максимальное расхождение не превышает 12 %. Данный результат свидетельствует о том, что в исследованных условиях нагрев инструмента остается умеренным и не достигает уровня, способного вызвать ослабление натяга в составной оснастке из-за разницы коэффициентов теплового расширения материалов вставки и обоймы.

Подтвержденная сходимость расчетных и экспериментальных тепловых полей доказывает корректность связанной термомеханической модели, построенной с применением найденной реологической модели сплава ХН60ВТ. Это создает расчетную основу для анализа и оптимизации теплового режима холодной высадки других высокопрочных сплавов, чувствительных к скоростному и тепловому разупрочнению.

### **5.6 Оценка влияния смазочных материалов на силу деформирования**

Влияние смазок на силовые параметры процесса высадки заклепок оценили по данным экспериментов с записью зависимостей силы от хода деформирующего инструмента (рисунок 53). Исследовали два режима контактного взаимодействия со смазкой ONV120 (кривая 1) и со смазкой CUT165 (кривая 2) в сравнении с моделированием процесса с фактором трения  $m = 0,3$ .

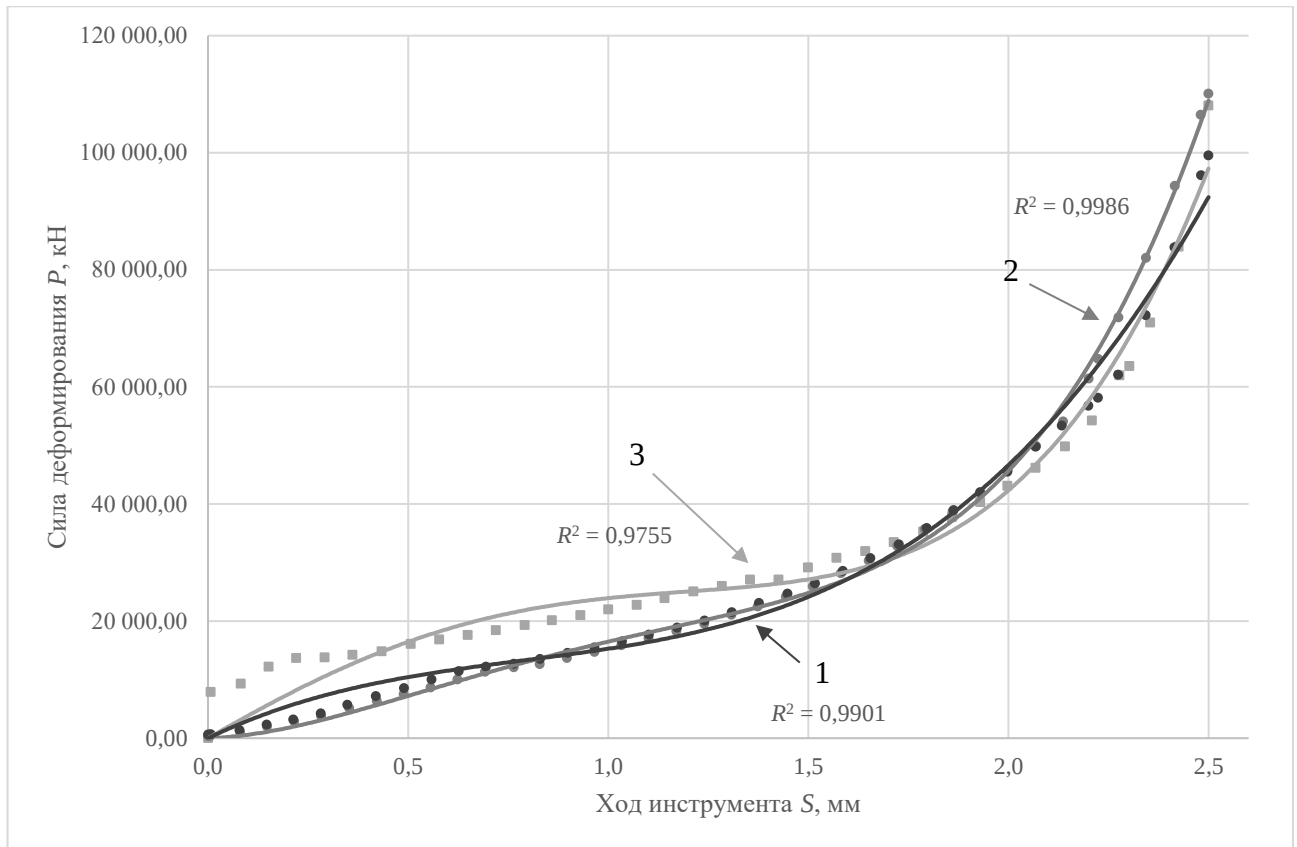


Рисунок 63 – Влияние трения на силу холодной высадки заклепок из ХН60ВТ на испытательной машине. Сравнение с расчетом  
1 – смазка ONV120; 2 – смазка CUT165; 3 – моделирование

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. Выбор рациональных антифрикционных материалов, как показано в работах [124,125],

должен учитывать не только снижение сил трения, но и термическую стабильность и адгезию к материалу заготовки, что объясняет различия в эффективности смазок CUT165 и ONV120 [126].

### **Выводы по главе 5**

1. Установлено, что разработанная математическая модель соответствует эксперименту с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,962$ . Средняя абсолютная ошибка не превышает 5 % от максимальной силы.

2. По результатам сравнения реологических моделей установлено, что обе модели обеспечивают качественное и количественное совпадение расчетных и экспериментальных кривых «сила–ход». Однако табличная функция, построенная по экспериментальным точкам, показала меньшее расхождение с натурным экспериментом, что подтверждает предпочтительность ее использования для моделирования процессов холодной высадки заклепок из сплава ХН60ВТ в программном комплексе QForm.

3. 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.

4. 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.

5. Показана удовлетворительная сходимость (расхождение не более 12 %) между расчетными и измеренными с помощью пирометра значениями температуры пуансона при циклической высадке, что доказывает корректное

описание программой QForm взаимосвязи пластической деформации и контактного трения.

6. Подтверждена эффективность применения технологических смазок как способа снижения силовой нагрузки на инструмент. Показано, что применение смазки ONV120 позволяет снизить максимальную силу высадки на 8–10 % по сравнению с процессом высадки со смазкой Zetcut, что качественно и количественно согласуется с результатами моделирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе теоретических и экспериментальных исследований, а также разработанной расчетной модели для определения рациональной величины натяга и внедрения ее в производство на филиалах АО «ОДК», цель работы была полностью достигнута. Разработанные и внедренные рекомендации по выбору величины натяга составного деформирующего инструмента, основанные на учете прочностных свойств высаживаемого материала, позволили кратно повысить стойкость формообразующей оснастки: с 1 500 до 60 000 высаженных заклепок, что подтверждено актами внедрения.

Для промышленного применения разработанной методики рекомендуется:

- назначать величину натяга в интервале  $\delta = 0,10\text{--}0,15$  мм для высокопрочных материалов типа ХН60ВТ ( $\sigma_{\text{Т закл}} \geq 600$  МПа);
- для материалов средней прочности (алюминиевые сплавы, медь) использовать натяг  $0,05\text{--}0,10$  мм;
- применять смазку ONV120, обеспечивающую снижение силы деформирования до 10 %.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в расширении базы данных реологических моделей труднодеформируемых сплавов при скоростях деформации, характерных для автоматической посадки ( $\dot{\epsilon}$  до  $150\text{ с}^{-1}$ ), а также в адаптации разработанной расчетной модели к инструменту с более сложной геометрией, в том числе к многопозиционной оснастке холодновысадочных автоматов.

## ВЫВОДЫ

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<sup>-1</sup>) 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 посадке 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 ~400 °С, а средняя по объему головки – 250 °С. Эти данные согласуются с натурными измерениями и задают необходимый верхний предел (450 °С) 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  $\delta_{\min}$ , и предотвращение пластической деформации бандажирующей обоймы, определяющее максимально допустимый натяг  $\delta_{\max}$ . Предложены аналитические зависимости для расчета величины натяга  $\delta$  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 адекватность.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

| Обозначение         | Наименование переменной/сокращения             |
|---------------------|------------------------------------------------|
| HV                  | — твердость по Виккерсу                        |
| МКЭ                 | — метод конечных элементов                     |
| НДС                 | — напряженно-деформированное состояние         |
| НС                  | — напряженное состояние                        |
| PLA                 | — полимолочная кислота (пластик для 3D-печати) |
| ГТД                 | — газотурбинный двигатель                      |
| САО                 | — средняя абсолютная ошибка                    |
| $\varepsilon$       | — величина деформации                          |
| $\dot{\varepsilon}$ | — скорость деформации, $\text{с}^{-1}$         |
| $\sigma_{\text{в}}$ | — предел прочности, МПа                        |
| $\sigma_{\text{т}}$ | — предел текучести, МПа                        |
| $\delta$            | — относительное удлинение, %                   |
| $k$                 | — напряжение сдвига, МПа                       |
| $P$                 | — сила деформации, Н                           |
| $R^2$               | — коэффициент детерминации                     |
| $S$                 | — ход инструмента, мм                          |
| $\sigma_i$          | — напряжение текучести, МПа                    |
| $T$                 | — температура, °C                              |
| $p$                 | — контактное давление, МПа                     |
| $\delta$            | — величина натяга, мм                          |
| $E$                 | — модуль упругости, МПа                        |
| $\mu$               | — коэффициент Пуассона                         |

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Абибов А.Л., Бирюков Н.М. Технология самолётостроения. М.: Машиностроение, 1982. 551 с.
2. Чукин В.В., Артюхин В.И., Рубин Г.Ш. и др. Стандартизация и управление качеством в металлургии // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2007. № 4. С. 99–102.
3. Ачеркан Н.С. Справочник металлиста. Т. 2. М.: Машиностроение, 1958. 952 с.
4. Губич Т.А. Заклепочные соединения: учебно-методическое пособие для СПО / Т.А. Губич. – Красноярский политехнический техникум, 2023. – 56 с.
5. ГОСТ 10299-80. Изделия заклепочные. Общие технические условия. Введ. 1982-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1981. 12 с.
6. ГОСТ 14797-85. Головки заклепок под потай. Конструкция и размеры. Введ. 1987-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1985. 8 с.
7. ГОСТ 10300-80. Заклепки с полукруглой головкой. Конструкция и размеры. Введ. 1982-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1981. 6 с.
8. ГОСТ 14798-85. Головки заклепок полукруглые. Конструкция и размеры. Введ. 1987-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1985. 7 с.
9. ГОСТ 12638-80. Заклепки с полукруглой головкой повышенной точности. Конструкция и размеры. Введ. 1982-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1981. 5 с.
10. Галиева Э.В. Твердофазное соединение интерметаллидного сплава на основе Ni3Al и жаропрочного никелевого сплава с использованием сверхпластической деформации: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2021. 150 с. (предполагаемый объем).
11. Востриков А.В., Ломберг Б.С. и др. Современные жаропрочные деформируемые никелевые сплавы ВИАМ для деталей ГТД // Современные жаропрочные никелевые деформируемые сплавы и технологии их производства: материалы науч.-техн. конф. (24 сентября 2021 г.). М.: ВИАМ, 2021. С. 10–15. (предполагаемые страницы).

12. Sims C.T., Stoloff N.S., Hagel W.C. (eds.). Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power. New York: Wiley, 1987. 640 p.
13. Reed R.C. The Superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 372 p.
14. Ковка и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 3: Холодная объемная штамповка / под ред. Г.А. Навроцкого. М.: Машиностроение, 1987. 384 с.
15. Сторожев М.В. Технологический справочник по ковке и объемной штамповке. М.: Машгиз, 1959. 966 с.
16. Григорьев Л.Л., Иванов К.М., Юргенсон Э.Е. Холодная штамповка: справочник. Санкт-Петербург : политехника, 2009. 665 с.
17. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки. Л.: Машиностроение, 1989. 303 с.
18. Зубцов М.Е., Корсаков В.Д. Стойкость штампов. Л.: Машиностроение, 1971. 200 с.
19. Зубцов М.Е. Повышение стойкости штампов для холодной штамповки. Л.: Ленинградский дом науч.-техн. пропаганды, 1960. 84 с.
20. Ляхович Л.С., Ворошнин Л.Г., Карпенко Д.П. Повышение стойкости штампового инструмента методами химико-термической обработки. Минск: Вышэйшая школа, 1971. 56 с.
21. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Механическое изнашивание сталей и сплавов. М.: Недра, 1996. 364 с.
22. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. М.: Машиностроение, 1968. 544 с.
23. Иванова В.С. Усталостное разрушение металлов. М.: Металлургиздат, 1963. 272 с.
24. Одинг И.А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. М.: Машгиз, 1962. 260 с.
25. Биллигман И. Высадка и другие методы штамповки. М.: Машгиз, 1960. 468 с.

26. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки давлением: справочник. М.: Металлургия, 1982. 360 с.
27. Tarasov S.Y., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Tool life in cold forging of aluminum parts: wear mechanisms and surface engineering solutions // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 121, No. 1–2. P. 135–147. DOI: 10.1007/s00170-022-09309-7.
28. Векслин И.И., Дрозько И.С. Исследование стойкости матриц сборной конструкции для холодной высадки // Кузнечно-штамповочное производство. 1983. № 11. С. 39–40.
29. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1984. 584 с.
30. Позняк Л.А., Скрынченко Ю.М., Тишаев С.И. Штамповые стали. М.: Металлургия, 1980. 244 с.
31. Электротехническая сталь [Электронный ресурс]. URL: [https://eti.su/articles/electrotehnika/electrotehnika\\_887.html](https://eti.su/articles/electrotehnika/electrotehnika_887.html) (дата обращения: 23.05.2026).
32. Гуляев А.П. Теория быстрорежущей стали // Металловедение и термическая обработка металлов. 1998. № 11. С. 27–32.
33. Ассонов А.Д. Основные сведения о металловедении и термической обработке. М.: Машиностроение, 1972. 172 с.
34. Штамповые материалы: сб. ст. / под ред. Н.Т. Деордиева, Г.П. Большакова. М.: Машиностроение, 1968. 143 с.
35. Хейфец И.Л. Термомеханическая обработка холодновысадочного и резьбонакатного инструмента // Кузнечно-штамповочное производство. 1983. № 11. С. 37–38.
36. Касымов С.А., Мирсалимова Э.А. Прогрессивная технология термообработки штампов для холодного деформирования // Повышение стойкости инструментальной и технологической оснастки: тез. докл. науч.-техн. конф. Минск, 1980. С. 59.

37. Хомяк Б.С. Твердосплавный инструмент для холодной высадки и выдавливания. М.: Машгиз, 1960. 117 с.

38. Богданович В.И., Борвенюк В.А. Опыт разработки и применения износостойких покрытий для повышения стойкости инструментальной оснастки и приспособлений // Повышение стойкости инструмента, оснастки и приспособлений. Куйбышев, 1987. С. 28–29.

39. Бельский Е.И. и др. Химико-термическая обработка инструментальных материалов. Минск: Наука и техника, 1986. 247 с.

40. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1985. 256 с.

41. Степанкин И.Н., Кенько В.М., Бойко А.А. Влияние науглероживания и температуры закалки на стойкость штампового инструмента из стали Р6М5 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 3. С. 19–23.

42. Степанкин И.Н. Адаптированная технология упрочнения рабочих поверхностей инструмента для холодной высадки и выдавливания // Материалы, технологии, инструменты. 2008. Т. 13, № 4. С. 88–92.

43. Кенько В.М., Степанкин И.Н., Столяров А.И. Влияние низкотемпературной нитроцементации на стойкость холодновысадочных матриц // Материалы 53-й Междунар. науч.-техн. конф. профессоров, преподавателей, науч. работников и аспирантов. Минск: БГПА, 1999. Ч. 1. С. 145.

44. Кенько В.М., Степанкин И.Н., Камко А.И. К вопросу исследования контактной выносливости быстрорежущей стали Р6М5 // Вестник Полоцкого государственного университета. 2012. № 3. С. 39–45.

45. Ганаго О.А., Марченко В.Л., Ковтун В.В. Расчет и оптимизация конструкций осесимметричных матриц для холодной объемной штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. 1985. № 9. С. 21–24.

46. Кенько В.М., Степанкин И.Н. Комплексный учет факторов, определяющих стойкость холодновысадочной оснастки // Кузнечно-штамповочное производство. 2006. № 2. С. 39–42.

47. Белков Е.Г. Стойкость инструмента при холодной штамповке нормалей и метизов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2016. Т. 16, № 1. С. 131–134. DOI: 10.14529/met160119.

48. Кенько В.М., Степанкин И.Н., Столяров А.И. Износостойкость матриц холодновысадочной оснастки // Трение и износ. 1998. Т. 19, № 3. С. 402–406.

49. Кенько В.М., Степанкин И.Н., Столяров А.И. Влияние натяга на износ матриц // Современные проблемы машиноведения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Гомель, 1998. С. 71–72.

50. [Без автора] Германская техника. Дюссельдорф, 1957. РЗ. С. 109–112. (На русск. яз.).

51. Кремнев Л.С. Критический коэффициент интенсивности напряжений и вязкость разрушения высокопрочных инструментальных материалов // Металловедение и термическая обработка металлов. 1996. № 1. С. 30–35.

52. Методика расчета и конструктивные особенности скрепленного инструмента для холодной объемной штамповки: руководящий материал. Куйбышев: Куйбышев. кн. изд-во, 1969. 30 с.

53. Шамис М.Д. Оптимизация проектирования инструмента для холодной объемной штамповки на основе расчетов на усталостную прочность: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1988. 223 с.

54. Степанский Л.Г. Оптимизация конструкции предварительно напряженных матриц для холодной объемной штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. 1996. № 6. С. 18–21.

55. Дьянчук В.П. Сокращенная методика расчета контейнеров и матриц скрепленной конструкции // Кузнечно-штамповочное производство. 1980. № 7. С. 9–11.

56. ТУ 14-1-2287-2018. Прутки со специальной отделкой поверхности из сплава марки ХН60ВТ (ЭИ868, ВЖ98), ХН60ВТ-ВД (ЭИ868-ВД, ВЖ98-ВД). М.: ЦНИИчермет, 2018. 15 с.

57. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1971. 424 с.
58. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганя В.А. Деформируемость металлов при пластическом формоизменении. М.: Машиностроение, 1978. 176 с.
59. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. М.: Металлургия, 1982. 584 с.
60. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Структура и механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1970. 472 с.
61. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Введ. 1977-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1976. 34 с.
62. Джонсон У., Меллор П.Б. Теория пластичности для инженеров. М.: Машиностроение, 1979. 568 с.
63. Сергиев А.П., Макаров А.В., Владимиров А.А., Белов Н.В. Анализ методов измерения твердости и перспективы их совершенствования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 10. С. 119–125. DOI: 10.12737/article\_5bd95a79601bb4.49440716.
64. Мощенок В.И., Лалазарова Н.А., Дощечкина И.В., Демченко С.В. Сравнение показателей прочности, определённой при испытаниях на растяжение, и по значениям твердости // Вестник ХНАДУ. 2016. № 73. С. 115–118.
65. Болобов В.И., Бочков В.С., Чупин С.А., Бондаренко П.П., Цинянь Сюй. Зависимости твердости металлов от степени пластической деформации при различных способах деформирования // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81, № 6. С. 52–56.
66. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: МИСИС, 2005. 432 с.
67. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. М.: Металлургия, 1970. 230 с.
68. ГОСТ 21073-75. Металлы цветные. Определение величины зерна. Введ. 1977-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1975. 21 с.

69. Онищенко А.К. Теория промышленнойковки стали и сплавов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Спутник+, 2021. 305 с.
70. Мэкки Д. Методы тензометрии. М.: Мир, 1976. 312 с.
71. Лебедев А.А., Музыка Н.Р., Волчек Н.Л. Тензометрия в машиностроении. Киев: Техніка, 1975. 184 с.
72. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1980. 456 с.
73. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.
74. Власов А.В., Стебунов С.А., Евсюков С.А. и др. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 383 с.
75. Шевченко А.А., Власов А.В., Стебунов С.А. Моделирование процессов объемной штамповки в программном комплексе QForm. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 200 с.
76. Смирнов-Аляев Г.А. Краткие основы современных методов расчета процессов обработки металлов давлением [Текст] / Г. А. Смирнов-Аляев, проф. д-р техн. наук. - Ленинград : [б. и.], 1958. 99 с.
77. Целиков А.И. Основы теории прокатки [Текст]. — [Москва] : Металлургия, 1965. — 247 с.
78. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. М.: Металлургия, 1972. 408 с.
79. Третьяков А. В., Зюзин В. И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. Справочник 2-е изд. М. :«Металлургия», 1973, 224 с.
80. Унксов Е.П., Джонсон У., Колмогоров В.Л. и др. Теория пластических деформаций. М.: Машиностроение, 1983. 598 с.
81. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973. 576 с.

82. Фролов К.В., Махутов Н.А., Гузь А.Н. и др. Экспериментальная механика. М.: Машиностроение, 2000. 624 с.
83. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
84. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1982. 312 с.
85. Шевченко А.А., Ключников С.А., Ершов В.И. Смазочные материалы для обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1973. 272 с.
86. Трофимов В.Н., Шевченко А.А., Ключников С.А. Конверсионные покрытия для обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1985. 248 с.
87. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
88. Зубцов М.Е. Смазочные материалы для холодной штамповки. Л.: ЛДНТП, 1965. 36 с.
89. Groche P., Müller Ch., Jahn A. Effects of the Tool Lubrication in Cold Forging // Tribology Letters. 2014. Vol. 53, No. 3. P. 599–605.
90. Behrens B.A., Bouguecha A., Hadifi T. et al. Advanced friction modeling for bulk metal forming processes // Production Engineering. 2011. No. 5. P. 621–627.
91. Bay N., Olsson D.D., Andreasen J.L. Lubricant test methods for sheet metal forming // Tribology International. 2008. Vol. 41. P. 844–853.
92. Леванов А.Н., Колмогоров В.Л., Буркин С.П. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1976. 416 с.
93. Стебунов С.А., Власов А.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением с учетом контактного трения // Кузнечно-штамповочное производство. 2015. № 2. С. 28–34.
94. Петров А.Н., Петров М.А., Мизера С.В., Харитонов С.А. Исследование смазочных материалов для холодной высадки заклепок на автоматах // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2023. № 5. С. 44–48.

95. Vazquez V., Hannan D., Altan T. Tool life in cold forging – an example of design improvement to increase service life // *Journal of Materials Processing Technology*. 2000. Vol. 98, Iss. 1. P. 90–96.

96. Завьялов Г.А., Завьялов О.Г. Динамика ротора в опорах скольжения с учетом структуры сил смазочного слоя // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2009. № 2. С. 31–35.

97. Справочник по авиационным материалам. Том III Коррозионностойкие и жаропрочные стали и сплавы / под ред. А.Т. Туманова. М.: Машиностроение, 1965. 632 с.

98. Marquardt D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters // *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1963. Vol. 11, No. 2. P. 431–441.

99. Баженов М.Ф., Байчман С.Г., Карпачев Д.Г. Твердые сплавы. Справочник. М.: Металлургия, 1978. 184 с.

100. ГОСТ 5950-2000. Прутки и полосы из инструментальной легированной стали. Технические условия. Введ. 2002-01-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. 25 с.

101. Li S., Li L., He H., Wang G. Influence of the deformation heating on the flow behavior of 6063 alloy during compression at medium strain rates. // *J. Mater. Res.*, 34(2) (2019) pp. 309-320.

102. Ву Чонг Бач, Деметрашвили И.С., Бурлаков И.А. Изучение напряженно-деформированного состояния инструмента при высадке заклепок из алюминиевых сплавов // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2025. № 4. С. 9–16. (предполагаемые страницы).

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

104. Деметрашвили И.С. Эволюция микроструктуры меди М1 при пластической деформации / А.Д. Куликов, П.А. Петров, И.А. Бурлаков, Н.Х. Тоан, И.С. Деметрашвили // Технология легких сплавов. – 2024. – № 4. – С. 38–44.
105. Константинов Д.А., Петров П.А., Бурлаков И.А., Деметрашвили И.С. Эволюция микроструктуры сплава БрХ0,8 при пластической деформации // Технология легких сплавов. 2025. № 1. С. 23–28.
106. Степанкин И.Н., Кенько В.М. Стойкость холодновысадочной оснастки и методы ее повышения. Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2014. 197 с.
107. Лурье А. И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – С. 111. – 940 с.
108. Романов А.В., Демидов А.С. Сравнительный анализ смазочных материалов для холодной объемной штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. 2021. № 3. С. 12–18.
109. Wang H., Zhang P. Residual Stresses in Tool Inserts for Cold Forging: FEM and Experimental Study // Materials & Design. 2017. Vol. 130. P. 27–35.
110. ГОСТ 8233-56. Сталь. Методы микроструктурного анализа. Введ. 1957-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1956. 15 с.
111. ГОСТ 4872-75. Сплавы алюминиевые деформируемые. Методы испытаний на твердость. Введ. 1977-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1975. 8 с.
112. ГОСТ 3882-74. Сплавы твердые спеченные. Технические условия. Введ. 1976-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1974. 14 с.
113. Петров П.А., Перфилов В.И. Исследование упрочнения алюминиевого сплава АМг6 на начальном участке кривой текучести при повышенных температурах // Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии: тр. 2-й Всерос. науч.-практ. конф. / под общ. ред. С.П. Мочалова. Новокузнецк: СибГИУ, 2006. С. 205–212.
114. Моторин А.С. Функционально-механические свойства никелида титана при высокоскоростном растяжении: дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб.: СПбГУ, 2016. 134 с.

115. Деметрашвили И.С., Бурлаков И.А. Исследование напряженно-деформированного состояния инструмента при высадке заклепок из сплава ВЖ98 // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2025. № 4. С. 9–16. DOI: 10.31857/S0235711925040028.

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

117. Деметрашвили И.С. Анализ напряженно-деформированного состояния инструмента при высадке 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.

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

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

120. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособие для вузов. В 10 т. Т. VII: Теория упругости. 5-е изд., стер. М.: Физматлит, 2003. 264 с.

121. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов. 6-е изд., стер. М.: Наука, 1972. 544 с.

122. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов: учебник для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1989. 622 с.

123. Тимошенко С.П., Гудьер Д.Н. Теория упругости / пер. с англ. М.И. Рейтмана; под ред. Г.С. Шапиро. М.: Наука, 1975. 575 с.
124. Liu Y. et al. Numerical Simulation of Cold Forging Processes Using QForm: Validation and Case Studies // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 103. P. 2109–2121.
125. Кохановский В.А., Глазунов Д.В. Многокритериальная оптимизация состава смазочного материала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 1. С. 51–59.
126. Vu Trong Bach, Demetrashvili I.S., Petrov A.N., Burlakov I.A., Kharitonov S.A. Study on the influence of lubricants on the technological process of cold heading of heat-resistant alloy rivets // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2026. Vol. 55, № 2. P. 193–198.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ № 0065/09-1325 от 20.05.2026**

по расчету натяга при изготовлении холодновысадочного инструмента

Утверждаю

30.01  
Главный инженер  
филиала АО ОДК «ОДК-Салют»



Земкин С.В.  
Нуртдинов Ю.Р.

12.12.24

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ № 0065/09-1325  
от 20.05.2026

по расчету натяга при изготовлении холодновысадочного инструмента

Начальник бюро

Начальник цеха № 17

Инженер-технолог 1 категории

Шалаев А.С.

Дубянский Г.В.

Деметрашвили И.С.

Москва – 2025 год

Рекомендации предназначены для инженеров-конструкторов холодновысадочной составной технологической оснастки и могут быть использованы на этапах проектирования, модернизации и верификации инструмента.

Помимо конструкторов, настоящие рекомендации могут быть использованы инженерами-технологами для оценки пригодности существующей оснастки для высадки изделий из материалов с другими прочностями характеристиками, для обоснования корректировок технологических режимов холодной высадки крепежных изделий и проведения предварительного анализа причин преждевременного выхода из строя инструмента.

## 1 Область применения

1.1 Настоящие Рекомендации распространяются на составную оснастку типа «стальная бандажная обойма – твердосплавная рабочая вставка», применяемую для холодной высадки крепежных и аналогичных изделий.

1.2 Рекомендации устанавливают методику проверочного расчета натяга, гарантирующего отсутствие сдвига вставки и пластической деформации обоймы в рабочих условиях.

1.3 Рекомендации могут быть применены при:

- проектировании новой оснастки;
- вводе в эксплуатацию оснастки для изделий из новых материалов и изменой геометрической формой;
- анализе причин преждевременного выхода оснастки из строя.

1.4 Конструктор – выполняет расчет на этапе проектирования, закладывает натяг в чертеж.

1.5 Технолог – использует методику для проверки возможности применения существующей оснастки для изготовления новых деталей или из нового материала.

1.6 Начальник производственного участка (цеха) – обеспечивает соблюдение режимов сборки оснастки в соответствии с указанным в нормативной документации натягом.

## 2 Расчет натяга в составном инструменте

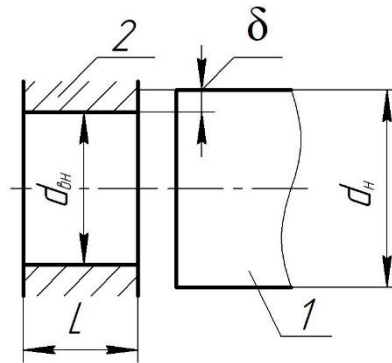


Рисунок 1 – Соединение с гарантированным натягом

1 – вставка; 2 – обойма;  $d_n$  – диаметр вставки;  $d_{вн}$  – диаметр обоймы;  
 $\delta$  – натяг,  $d_{вн} - d_n$ ;  $L$  – посадочная длина контактной поверхности

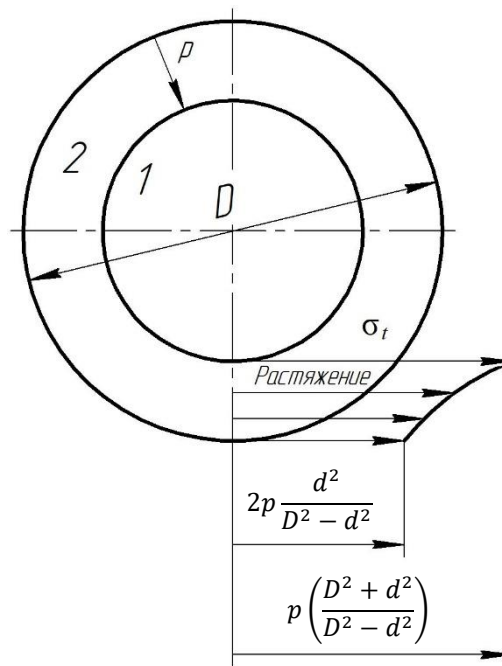


Рисунок 2 – Схема соединения

1 – вставка; 2 – обойма;  $D$  – наружный диаметр;  
 $\sigma_t$  – напряжение растяжения;  $p$  – контактное давление

Таблица 1 – Переменные, параметры и их описание

| Переменная               | Описание                                                                   | Единица измерения |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| $\delta_{\min}$          | Минимальный расчетный натяг                                                | мм                |
| $\delta_{\max}$          | Максимальный расчетный натяг                                               | мм                |
| $p_{\min}$               | Минимальное контактное давление на посадочной поверхности                  | МПа               |
| $p_{\max}$               | Максимальное контактное давление на посадочной поверхности                 | МПа               |
| $P_{\text{треб}}$        | Удельное давление, необходимое для осадки заготовки                        | МПа               |
| $\sigma_{\text{т закл}}$ | Предел текучести материала заклепки (заготовки)                            | МПа               |
| $\sigma_{\text{т об}}$   | Предел текучести материала обоймы                                          | МПа               |
| $k$                      | Технологический коэффициент, учитывающий влияние формы и трения при осадке | безразм.          |
| $d$                      | Посадочный диаметр (номинальный диаметр вставки и отверстия обоймы)        | мм                |
| $D$                      | Наружный диаметр обоймы (бандажа)                                          | мм                |
| $L$                      | Длина контактной поверхности (посадочной длины)                            | мм                |
| $f$                      | Коэффициент трения покоя на паре «обойма-вставка»                          | безразм.          |
| $E_1$                    | Модуль упругости материала вставки                                         | МПа               |
| $E_2$                    | Модуль упругости материала обоймы                                          | МПа               |
| $\mu_1$                  | Коэффициент Пуассона материала вставки                                     | безразм.          |
| $\mu_2$                  | Коэффициент Пуассона материала обоймы                                      | безразм.          |
| $c_1$                    | Расчетный коэффициент для внутреннего цилиндра (вставки)                   | безразм.          |
| $c_2$                    | Расчетный коэффициент для внешнего цилиндра (обоймы)                       | безразм.          |

## 2.1 Расчет минимального натяга

*Условие: Вставка не смещается под действием осевой силы.*

### 2.1.1 Требуемое давление для осадки:

$$P_{\text{треб}} = \sigma_{\text{т закл}} \cdot k$$

### 2.1.2 Минимальное контактное давление от натяга:

$$p_{\min} \geq (P_{\text{треб}} \cdot d) / (4 \cdot L \cdot f)$$

### 2.1.3 Минимальный натяг (по формуле Ламе):

$$\delta_{\text{мин}} = p_{\text{мин}} \cdot d \cdot ((c_1 / E_1) + (c_2 / E_2))$$

## 2.2 Расчет максимального натяга

*Условие: Обойма не переходит в состояние пластичности.*

### 2.2.1 Максимальное давление, выдерживаемое обоймой:

$$p_{\text{макс}} = \sigma_{\text{т об}} \cdot ((D^2 - d^2) / (D^2 + d^2))$$

### 2.2.2 Максимальный натяг (по формуле Ламе):

$$\delta_{\text{макс}} = p_{\text{макс}} \cdot d \cdot ((c_1 / E_1) + (c_2 / E_2))$$

## 2.3 Расчет коэффициентов для формулы Ламе

### 2.3.1 Коэффициент для внутреннего цилиндра (вставки):

$$c_1 = 1 - \mu_1$$

### 2.3.2 Коэффициент для внешнего цилиндра (обоймы):

$$c_2 = (D^2 + d^2) / (D^2 - d^2) + \mu_2$$

### 2.3.3 Условие работоспособности конструкции:

$$\delta_{\text{мин}} < \delta_{\text{реком}} < \delta_{\text{макс}}$$

*Рекомендация по выбору рабочего натяга.* Для обеспечения запаса по обоим критериям оптимальный натяг следует выбирать в середине диапазона, например, по формуле:

$$\delta_{\text{реком}} \approx \delta_{\text{мин}} + (\delta_{\text{макс}} - \delta_{\text{мин}}) / 2$$

Приведенные формулы позволяют выполнить расчет для любой комбинации материалов и геометрических параметров. Для этого необходимо подставить в них соответствующие значения из таблицы.

### 3 Пример расчета

#### 3.1 Исходные данные:

Вставка: твердый сплав ВК15,  $E_1 = 600 \cdot 10^3$  МПа,  $\mu_1 = 0,22$

Обойма: сталь 4Х5МФС,  $\sigma_{\text{тоб}} = 1\,550$  МПа,  $E_2 = 210 \cdot 10^3$  МПа,  $\mu_2 = 0,3$

Геометрические параметры:  $D = 25$  мм,  $d = 15,6$  мм,  $L = 18,2$  мм

Материал заклепки: ВЖ98,  $\sigma_{\text{закл}} = 1\,030$  МПа

Коэффициенты:

-  $k$  – коэффициент, учитывающий совместное влияние формы деформируемой заклепки и сил трения. Принят равным 1,8 на основании сопоставления данных компьютерного моделирования и натурных экспериментов;

-  $f$  – коэффициент трения сталь-твердый сплав в условиях сухого трения;  $f \approx 0,10$ – $0,15$ . Принят равным 0,12.

#### 3.2 Расчет минимального натяга из условия отсутствия сдвига вставки

##### 3.2.1 Расчет требуемого давления осадки:

$$P_{\text{треб}} = \sigma_{\text{закл}} \cdot k = 1\,030 \cdot 1,8; P_{\text{треб}} = 1\,854 \text{ МПа}$$

##### 3.2.2 Расчет минимального контактного давления от натяга:

Условие:

$$F_{\text{тр}} \geq F_{\text{высадки}},$$

$F_{\text{высадки}}$  – сила трения, удерживающая вставку внутри обоймы, должна быть больше или равна той осевой силе, которую вставка испытывает при высадке заклепки. Если это условие не выполняется, вставка начнет выталкиваться или проворачиваться.

$$(p_{\text{мин}} \cdot \pi \cdot d \cdot L) \cdot f \geq (P_{\text{треб}} \cdot \pi \cdot d^2 / 4)$$

$$p_{\text{мин}} \geq (P_{\text{треб}} \cdot d) / (4 \cdot L \cdot f),$$

$$p_{\min} \geq (1\,854 \cdot 15,6) / (4 \cdot 18,2 \cdot 0,12)$$

$$p_{\min} \geq (28\,922,4) / (8,736); p_{\min} \approx 331,0 \text{ МПа}$$

3.2.3 Расчет коэффициентов для формулы Ламе:

$$c_1 = 1 - \mu_1 = 1 - 0,22; c_1 = 0,78$$

$$c_2 = (D^2 + d^2)/(D^2 - d^2) + \mu_2 = (625 + 243,36)/(625 - 243,36) + 0,3 = 2,275 + 0,3;$$

$$c_2 = 2,575$$

$$(c_1/E_1) + (c_2/E_2) = (0,78 / 600\,000) + (2,575 / 210\,000) = 0,0000013 +$$

$$+ 0,000012262; (c_1/E_1) + (c_2/E_2) \approx 0,000013562 \text{ 1/МПа}$$

3.2.4 Расчет минимального натяга:

$$\delta_{\min} = p_{\min} \cdot d \cdot ((c_1/E_1) + (c_2/E_2))$$

$$\delta_{\min} = 331,0 \cdot 15,6 \cdot 0,000013562; \delta_{\min} \approx 0,070 \text{ мм}$$

3.3 Максимальный натяг из условия прочности обоймы

3.3.1 Расчет коэффициента формы:

$$K_{\text{формы}} = (D^2 - d^2) / (D^2 + d^2) = (625 - 243,36) / (625 + 243,36) = 381,64 / 868,36;$$

$$K_{\text{формы}} \approx 0,4395$$

3.3.2 Расчет максимального давления, выдерживаемого обоймой:

$$p_{\max} = \sigma_{\text{т об}} \cdot K_{\text{формы}}$$

$$p_{\text{макс}} = 1\,550 \cdot 0,4395; p_{\text{макс}} \approx 681,2 \text{ МПа}$$

### 3.3.3 Расчет максимального натяга:

$$\delta_{\text{макс}} = p_{\text{макс}} \cdot d \cdot ((c_1/E_1) + (c_2/E_2))$$

$$\delta_{\text{макс}} = 681,2 \cdot 15,6 \cdot 0,000013562; \delta_{\text{макс}} \approx 0,144 \text{ мм}$$

Таблица 2 – Сводная таблица результатов

| Параметр                         | Обозначение             | Значение                                       | Примечание                             |
|----------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Минимальное контактное давление  | $p_{\text{мин}}$        | 331,0 МПа                                      | Рассчитано из условия сдвига           |
| Минимальный натяг                | $\delta_{\text{мин}}$   | ~0,070 мм                                      |                                        |
| Максимальное контактное давление | $p_{\text{макс}}$       | 681,2 МПа                                      | Рассчитано из условия прочности обоймы |
| Максимальный натяг               | $\delta_{\text{макс}}$  | ~0,144 мм                                      |                                        |
| Диапазон рабочих натягов         | $\delta$                | $0,070 \text{ мм} < \delta < 0,144 \text{ мм}$ |                                        |
| Рекомендованный натяг            | $\delta_{\text{реком}}$ | ~0,107 мм                                      | Среднее в диапазоне                    |

## Шаблон для расчета рабочего диапазона натягов

Исходные данные:

- материал вставки:  $E_1, \mu_1$ ;
- материал обоймы:  $\sigma_{\text{т об}}, E_2, \mu_2$ ;
- материал заготовки:  $\sigma_{\text{т закл}}$ ;
- геометрия:  $D, d, L$ ;
- коэффициенты:  $k, f$ .

Предварительный расчет коэффициентов:

- $c_1 = 1 - \mu_1$
- $c_2 = (D^2 + d^2)/(D^2 - d^2) + \mu_2$

| Параметр                  | Расчетная формула                                                      | Обозначение                          |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| $P_{\text{треб}}$         | $\sigma_{\text{т закл}} \cdot k$                                       | Требуемое давление осадки            |
| $p_{\text{мин}}$          | $(P_{\text{треб}} \cdot d) / (4 \cdot L \cdot f)$                      | Мин. контактное давление (от сдвига) |
| $\delta_{\text{мин}}$     | $p_{\text{мин}} \cdot d \cdot (c_1/E_1) + (c_2/E_2)$                   | Минимальный натяг                    |
| $p_{\text{макс}}$         | $\sigma_{\text{т обоймы}} \cdot ((D^2 - d^2) / (D^2 + d^2))$           | Макс. давление для обоймы            |
| $\delta_{\text{макс}}$    | $p_{\text{макс}} \cdot d \cdot (c_1/E_1) + (c_2/E_2)$                  | Максимальный натяг                   |
| Условие работоспособности | $\delta_{\text{мин}} < \delta_{\text{расч}} < \delta_{\text{макс}}$    | Проверка существования решения       |
| Рекомендованный натяг     | $\delta_{\text{мин}} + (\delta_{\text{макс}} - \delta_{\text{мин}})/2$ | Оптимальное значение                 |

Порядок использования шаблона:

1. Заполните блок «Исходные данные».
2. Рассчитайте  $c_1, c_2$ .
3. Подставьте значения в формулы таблицы, последовательно заполняя все строки.
4. Проверьте «Условие работоспособности». Если оно выполняется, конструкция работоспособна.
5. Выберите «Рекомендованный натяг».

Этот шаблон универсален и позволяет проводить прочностной расчет для любой комбинации «обойма–вставка».

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы

Деметрашвили Ирины Сергеевны

AKT

о внедрении результатов диссертационной работы

Деметрашвили Ирины Сергеевны

Настоящий акт составлен в том, что разработанные в рамках диссертационной работы «Технические рекомендации по расчету натяга при изготовлении холодновысадочного инструмента» позволили оптимизировать величины натягов при изготовлении формообразующего инструмента.

Благодаря внедрению расчетной модели составного деформирующего инструмента, учитывающей механические свойства материалов инструмента и величину технологического натяга с прочностными характеристиками высаживаемого сплава на научно обоснованной основе, обеспечивающей отсутствие растягивающих напряжений в твердосплавных вставках и стабильность натяга в установившемся режиме, была повышена стойкость формообразующей оснастки с 1 500 до 60 000 заклепок при сохранении качества получаемых деталей.

Начальник технологического бюро ОГМет  
филиала АО «ОДК» «МКБ «Горизонт»  / С.А. Харитонов/

Инженер-технолог 1 категории  
филиала АО «ОДК» «НИИД» Делаш / И.С. Деметрашвили/



## **ПРИЛОЖЕНИЕ В**

### **АКТ**

использования результатов диссертационной работы Деметрашвили Ирины Сергеевны  
«Повышение стойкости формообразующей оснастки путем учета прочности материала  
высаживаемых заклепок»

Утверждаю

Начальник цеха № 17

АО «ОДК» «ОДК-Салют»

Дубянский Г.В.



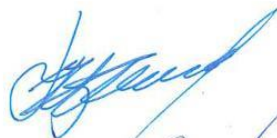
# АКТ

использования результатов диссертационной работы Деметрашвили Ирины Сергеевны  
«Повышение стойкости формообразующей оснастки путем учета прочности материала  
высаживаемых заклепок»

Рассмотренные на научно-техническом совете филиала АО «ОДК» НИИД с приглашением представителей филиалов АО «ОДК» «ОДК-Салют» и МКБ «Горизонт» результаты работы по повышению технического уровня производства заклепок из труднодеформируемых материалов позволяют:

1. Осуществлять быстрый подбор и проверку параметров составной оснастки (обоймы и твердосплавной вставки) при разработке технологических процессов холодной высадки крепежных изделий.
2. Определять рациональный высадочный инструмент в зависимости от марки высаживаемого материала.
3. Повысить стойкость применяемой высадочной оснастки.
4. Снизить эксплуатационные затраты на оснастку за счет увеличения межремонтного периода и ресурса инструмента.
5. Унифицировать подходы к проектированию оснастки для холодной высадки, сократив время на подготовку новых технологических процессов.
6. Повысить стабильность качества готовой продукции (заклепок) за счет снижения риска брака, связанного с износом инструмента.

Начальник ТБ цеха 17



В.А. Кобизский

Главный специалист УГТ, д.т.н.



НАЧАЛЬНИК УПРАВЛЕНИЯ  
ПО РАБОТЕ С ПЕРСОНАЛОМ  
ФИЛИАЛА «ОДК-Салют»  
Б. А. САВАТУЛИН

А.К. Онищенко



## **ПРИЛОЖЕНИЕ Г**

### **АКТ**

использования результатов диссертационной работы Деметрашвили Ирины Сергеевны  
«Повышение стойкости формообразующей оснастки путем учета прочности материала  
высаживаемых заклепок»

Утверждаю

Начальник цеха 117002

Филиала АО «ОДК» «МКБ «Горизонт»

А. Б. Волков



# АКТ

использования результатов диссертационной работы Деметрашвили Ирины Сергеевны  
«Повышение стойкости формообразующей оснастки путем учета прочности материала  
высаживаемых заклепок»

Рассмотренные на научно-техническом совете филиала АО «ОДК» НИИД с приглашением представителей филиалов АО «ОДК» «ОДК-Салют» и МКБ «Горизонт» результаты работы по повышению технического уровня производства заклепок из труднодеформируемых материалов позволяют:

1. Осуществлять быстрый подбор и проверку параметров составной оснастки (обоймы и твердосплавной вставки) при разработке технологических процессов холодной высадки крепежных изделий.
2. Определять рациональный высадочный инструмент в зависимости от марки высаживаемого материала.
3. Повысить стойкость применяемой высадочной оснастки.
4. Снизить эксплуатационные затраты на оснастку за счет увеличения межремонтного периода и ресурса инструмента.
5. Унифицировать подходы к проектированию оснастки для холодной высадки, сократив время на подготовку новых технологических процессов.
6. Повысить стабильность качества готовой продукции (заклепок) за счет снижения риска брака, связанного с износом инструмента.

Начальник ТБ цеха 117002

С.А. Харитонов

Главный специалист УГТ, д.т.н.

А.К. Онищенко

НАЧАЛЬНИК УПРАВЛЕНИЯ  
ПО РАБОТЕ С ПЕРСОНАЛОМ  
ФИЛИАЛА «ОДК-САЛЮТ»  
Б. А. САВАТУЛИН

