

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

На правах рукописи



РОГУЛИН СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ГОРЯЧЕЙ ВАЛЬЦОВКИ ПРИ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ И ОКОНЧАТЕЛЬНОМ ФОРМОИЗМЕНЕНИИ
УДЛИНЕННЫХ В ПЛАНЕ ПОКОВОК**

Специальность: 2.5.7 – Технологии и машины обработки давлением

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор,
«Заслуженный работник высшей школы РФ»
Сосенушкин Евгений Николаевич

Москва – 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ УРОВНЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДСТВА УДЛИНЕННЫХ В ПЛАНЕ ПОКОВОК	17
1.1. Обоснование целесообразности использования заготовительных операций в производстве поковок с удлиненной осью.....	17
1.1.1 Способы предварительного профилирования заготовок перед окончательными операциями ГОШ	19
1.1.2 Теоретические исследования и уровень техники в области горячей вальцовки	29
1.2 Изделие типа «гаечный ключ», как представитель группы поковок, удлиненных в плане	35
1.3 Анализ известных способов изготовления гаечных ключей	36
1.4 Обоснование выбора программного комплекса для проведения компьютерных исследований операций ОМД.....	47
1.5 Выводы по главе 1	51
ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА ГАЕЧНЫХ КЛЮЧЕЙ МЕТОДАМИ ГОШ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВАЛЬЦОВКИ	54
2.1 Современные и перспективные технологии производства удлиненных поковок, ориентированных на использование горячей вальцовки на ковочных вальцах.....	54
2.2 Разработка технологии горячей вальцовки секторами-штампами, имеющими ручки постоянного сечения	59
2.2.1 Разработка чертежа поковки.....	60
2.2.2 Обоснование выбора оборудования для операции вальцовки.....	63
2.2.3 Этапы определения формы и размеров исходной заготовки	67

2.2.4	Расчет деформации профилированной заготовки и выбор системы ручьев	70
2.2.5	Определение размеров овального и круглого калибров.....	72
2.3	Разработка технологии горячей вальцовки секторами-штампами в ручьях переменного сечения.....	74
2.3.1	Выбор детали-представителя для расчетов горячей вальцовки в ручьях переменного сечения.....	74
2.3.2	Разработка чертежа поковки для расчетов горячей вальцовки в ручьях переменного сечения.....	75
2.3.3	Этюра сечений расчетной и вальцованной заготовки, и определение размеров исходной заготовки	79
2.3.4	Выбор системы переходов с определением поперечных и продольных размеров профилированной заготовки	82
2.3.5	Расчет силовых параметров вальцовки	85
2.3.6	Ручьи секторов-штампов двух переходов переменного сечения и их поперечные размеры.....	88
2.3.7	Центральные углы характерных участков овального и квадратного калибров	89
2.3.8	Определение продольного профиля овального и квадратного ручьев	91
2.4	Разработка конструкции крепления секторов-штампов на валки консольных ковочных вальцов	92
2.5	Определение силы штамповки КГШП и выбор оборудования	95
2.6	Разработка технологии поперечной горячей штамповочной вальцовки	97
2.6.1	Разработка чертежа поковки гаечного ключа и определение размеров исходной заготовки	98
2.6.2	Обоснование выбора системы калибров для поперечной горячей штамповочной вальцовки.....	104

2.6.3	Определение размеров вальцованной заготовки после каждого перехода	105
2.6.4	Определение силы вальцовки.....	107
2.6.5	Определение размеров секторов-штампов.....	109
2.6.6	Разработка конструкции крепления ручьевой вставки для поперечной горячей штамповочной вальцовки на валах консольных ковочных вальцах.....	111
2.7	Выводы по главе 2	114
ГЛАВА 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ И ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ГОРЯЧЕЙ ВАЛЬЦОВКИ ПОКОВКИ ГАЕЧНОГО КЛЮЧА		116
3.1	Особенности проектирования инструмента для моделирования предварительной горячей вальцовки	116
3.2	Исследование процесса вальцовки в секторах-штампах в ручьях постоянного сечения.....	117
3.3	Технология штамповки на КГШП профилированной заготовки, полученной вальцовкой в ручьях постоянного сечения	129
3.4	Рационализация горячей вальцовки методом моделирования для повышения ресурсосбережения.....	130
3.5	Моделирование процесса вальцовки в секторах-штампах в ручьях переменного сечения	138
3.6	Исследование стойкости секторов-штампов и работоспособности системы их крепления на валах ковочных вальцов консольного типа	151
3.7	Исследование процесса горячей продольной штамповочной вальцовки	170
3.8	Исследование процесса предварительного профилирования на ковочных вальцах и моделирование горячей поперечной штамповочной вальцовки	177

3.9 Результаты моделирования штамповки на КГШП профилированной заготовки, разработанной для горячей поперечной штамповочной вальцовки	190
3.10 Выводы по главе 3	192
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЯЧЕЙ ВАЛЬЦОВКИ ПОКОВКИ ГАЕЧНОГО КЛЮЧА	196
4.1 Разработка конструкции и методика изготовления штамповой оснастки для физического моделирования процессов вальцовки.....	197
4.2 Физическое моделирование горячей вальцовки в ручьях переменного сечения по системе «круг – овал – квадрат»	201
4.2.1 Влияние зазора между секторами штампами на изменение формы и размеров профилированных заготовок двух переходов при физическом моделировании горячей вальцовки	206
4.3 Физическое моделирование горячей вальцовки в ручьях переменного сечения по системе «квадрат – плоский овал – квадрат»	208
4.4 Методика проектирования технологии горячей продольной штамповочной вальцовки.....	213
4.5 Выводы по главе 4	216
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	219
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	223

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В современном обществе, в частности, в развитых странах, в условиях высокой рыночной конкуренции и мобильности рынка в целом, все большее внимание уделяется совершенствованию технологических процессов изготовления той или иной востребованной продукции в металлургии и машиностроении.

Изготовление заготовок и деталей в условиях серийного и массового производства с использованием обработки металлов давлением (ОМД) имеет большую значимость в машиностроении наряду с другими способами обработки, благодаря преимуществам, главными из которых являются высокая производительность, ресурсосбережение, определяемое коэффициентом использования металла (КИМ), повторяемость формы и размеров изделий, выпускаемых с высокими технологическими, физико-механическими и эксплуатационными параметрами. Перечисленные достоинства позволяют достичь высокого уровня конкурентоспособности на рынке за счет уменьшения себестоимости продукции при исключительном качестве и надежности.

Горячая объемная штамповка (ГОШ) остаётся на сегодняшний день наиболее востребованной технологией кузнечно-штамповочного производства (КШП) и позволяет изготавливать поковки различной по сложности формы с размерами и массой, изменяющихся в широких пределах. Указанные параметры во многом определяют состав и последовательность операций типовых технологических процессов, которые могут быть реализованы на различном кузнечно-штамповочном оборудовании (КШО), выбор которого зависит как от размерных характеристик и форм поковок, так и от годовой программы их выпуска.

Большую группу составляют поковки с удлиненной осью, которые изготавливаются, в основном, в условиях крупносерийного или массового производства с высоким разнообразием номенклатуры и типоразмеров, где в процессе разработки технологии важную роль уделяют таким параметрам, как

минимизация энергозатрат и ресурсосбережение при сохранении механических и эксплуатационных характеристик на требуемом уровне. Кроме того, возникает потребность в высокой скорости переналадки производственных линий кузнечных цехов, чтобы оперативно отвечать потребностям рынка.

Для решения задач сокращения количества отходов и уменьшения силы деформирования применяют традиционные технологии, в состав которых, входят, наряду с заготовительными операциями, ряд штамповочных для изготовления готовой удлиненной в плане поковки на штамповочном молоте в штампах при наличии подкатных, протяжных, формовочных, предварительных и окончательных ручьев.

Применение технологий обработки давлением на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП) включает ряд ограничений использования заготовительных ручьев. Допускается набор металла высадкой в конические полости инструмента, выдавливание с предельными значениями по длине заготовки, операции осадки. Поэтому предварительное профилирование заготовок под штамповку удлиненных в плане поковок осуществляют на специализированном оборудовании, встраиваемом в производственную линию.

Наиболее широко используются ковочные вальцы наряду с альтернативными машинами, выполняющими функцию предварительного деформирования - станами поперечно-винтовой, радиально-сдвиговой, поперечно-клиновой прокатки. При этом конструктивные особенности оборудования и специфика технологического процесса вальцовки позволяют не только изменять форму и размеры исходной заготовки для последующей штамповки, но и в некоторых случаях выполнять окончательное формоизменение. Поэтому остаются **актуальными** изучение механики течения металла, анализ его напряженно-деформированного состояния в процессе заготовительных и штамповочных операций, разработка и совершенствование технологии продольной и поперечной вальцовки, а также

проектирование соответствующей штамповой оснастки с оценкой ее работоспособности.

Степень разработанности темы исследования.

Поковки выбранных объектов исследования относятся к удлиненным в плане, согласно классификациям таких авторов, как Ребельский А.В., Иванюк А.В., Семенов Е.И., Акаро И.Л., Кондратенко В.Г., имеют широкую номенклатуру типоразмеров и производятся массово. Авторами научно и технически доказана необходимость применения предварительного формоизменения исходных заготовок использованием ресурсосберегающих технологий ГОШ, например, на базе горячей вальцовки. Теоретические положения кинематики течения металла в процессе воздействия инструмента на заготовку, в частности, при локальном перемещении очага деформации подробно описаны в источниках.

Кроме технологий, ориентированных на предварительное профилирование исходной заготовки горячей вальцовкой, широко известны заготовительные операции, реализуемые в подкатном, протяжном и гибочно-формовочном ручьях молотового штампа, видами поперечной прокатки, высадкой утолщений на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ), а в некоторых случаях используют длинномерный полуфабрикат периодического профиля.

Большой вклад в становление и развитие теоретических основ и технологических процессов горячей вальцовки внесли как отечественные, так и зарубежные научные школы специалистов в области ОМД. Наиболее яркими представителями таких школ являются отечественные и иностранные ученые: Семенов Е.И., Румянцев М.И., Целиков А.И., Смирнов В.К., Литвинов К.И., Харитонин С.В., Бундин А.Т., Атрошенко А.П., Рудаков Б.П., Никольский Л.Н., Скрябин С.А., Березин И.В., Кауфман К.М., Кохан Л.С., Пунин В.И., Ремпель Г.Б., Карпайтис Е.П., Золотухин П.И., Володин И.М., Pater Z., Tofil A., Zhoi J., Jia Zhi, Grass H., Krempaszky C., Werner E., Ru-xiong Li., Zhuang W., Hua L., Wang X. и многие другие.

Анализом и разработкой конструкций оборудования, основной и вспомогательной оснастки, а также автоматизацией процесса горячей вальцовки занимались Трофимов И.Д., Павлов В.А., Кузьмичев Н.В., Титов Ю.А, Титов А.Ю., Masato M., Yuantian C., Genxue C., Jiefeng X., Tian P., Juan D., Toshiharu A., Young Chang J., Hwan Myung P., Song Man J. и многие другие.

Целью исследования является совершенствование процесса вальцовки на основе разработки эффективных вариантов технологических процессов изготовления удлиненных поковок на ковочных вальцах предварительным и окончательным профилированием заготовок.

Задачи исследования:

1. Проанализировать номенклатуру удлиненных в плане поковок, имеющих в конструкции тонкое полотно, и осуществить выбор деталей-представителей с перспективой возможного производства с использованием технологии вальцовки на ковочных вальцах консольного типа.

2. Разработать варианты технологических процессов с применением вальцовки, ориентированных на высокий уровень производительности для условий крупносерийного и массового производства, ресурсосбережения и универсальности профилируемых заготовок под различные варианты окончательного формоизменения.

3. Разработать универсальные и надежные способы крепления и фиксации штамповой оснастки на валах ковочных вальцов, спроектировать варианты конструкций с последующей оценкой прочности элементов крепления и параметров стойкости секторов-штампов методами компьютерного моделирования и математической статистики.

4. Выполнить анализ напряженно-деформированного состояния металла заготовки на основных операциях ОМД, вошедших в варианты технологии, и оценить соответствие качества изменения формы промежуточных заготовок размерным параметрам поковки в процессе предварительного и окончательного формоизменения методом компьютерного моделирования.

5. Поставить и выполнить физическое моделирование новых вариантов

технологий вальцовки для проверки достоверности разработанных математических и компьютерных моделей.

6. Результаты выполненной работы, обладающие научной новизной, использовать в учебном процессе. Разработанные варианты технологического процесса горячей штамповочной вальцовки рекомендовать к внедрению в кузнечных цехах машиностроительных предприятий.

Объект исследования - удлиненные в плане поковки на примере гаечных ключей различного исполнения, изготавливаемых в условиях крупносерийного и массового производства.

Предмет исследования – варианты технологии горячей вальцовки поволоок деталей типа «гаечный ключ» и их влияние на ресурсосбережение и производительность при достижении высоких показателей механических и эксплуатационных характеристик обрабатываемого металла.

Методы исследования и оборудование. Для решения поставленных задач виртуальные объекты моделирования строились в CAD системе SolidWorks, моделирование технологических процессов вальцовки продольной и поперечной, а также операции окончательной штамповки на КГШП проводили с применением МКЭ в программном пакете DEFORM-3D. Для компьютерного исследования НДС и прочностных характеристик штампового инструмента для вальцовки и элементов системы его крепления и фиксации на валах ковочных вальцов проведено в программе SolidWorks Simulation. Результаты исследований обрабатывали с применением пакета MS Excel. Технологические процессы вальцовки отрабатывались на ковочных вальцах консольного типа модели CA1335 по методике постадийного деформирования металла заготовки. Аналитические зависимости оценки стойкости секторов-штампов и статистические модели зависимости прочности системы крепления секторов-штампов от технологических параметров построены методами математической теории планирования эксперимента и математической статистики. Результаты технологических расчетов и компьютерного моделирования процессов вальцовки в ручьях

переменного сечения разных систем калибров верифицировались проведением физического моделирования в лаборатории технологий пластического деформирования материалов Технологического полигона инжинирингового центра «Цифровые технологии машиностроения» «МГТУ «СТАНКИН».

Степень достоверности результатов исследований и обоснованность выводов подтверждается использованием в работе известных положений фундаментальных и прикладных наук, таких как физика, теоретическая механика, математика, теория обработки металлов давлением. Решением задач анализа напряженно-деформированного состояния деформируемого металла, кинематики его течения в ручьях штампов и оценка истощения ресурса пластичности численным методом конечных элементов, реализованном в пакете прикладных программ DEFORM-3D. Полученными автором результатами экспериментальных исследований с применением современных методов статистической обработки, а также сопоставлением опытных данных с результатами, полученными независимыми исследователями.

Научная новизна работы заключается в:

- установлении степени влияния формы и размеров поперечных сечений ручьев секторов-штампов с разной последовательностью калибров для горячей продольной вальцовки заготовок на качество заполнения окончательного ручья штампа КГШП;
- закономерностях изменения интенсивности напряжений и интенсивности деформаций, полученных МКЭ с помощью компьютерных моделей, позволивших выявить в сечениях очага деформации профилируемых заготовок, непрерывно изменяющимся во времени при воздействии секторов-штампов на деформируемый металл;
- определении зависимости и характера изменения сил во время операции горячей вальцовки от формы и размеров ручьев в исполнении калибров постоянного и переменного сечений;

- разработке методик проектирования технологии горячей продольной штамповочной вальцовки накидного гаечного ключа по ГОСТ 10112-2001 и предварительного профилирования заготовок рожкового гаечного ключа с открытым зевом по ГОСТ 2839-80, пригодных для поперечной штамповочной вальцовки и окончательной штамповки на КГШП или штамповочном молоте;
- математической модели, позволяющей прогнозировать стойкость секторов-штампов и анализировать запас прочности оснастки для их крепления и фиксации на рабочих валах консольных ковочных вальцов.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Результаты аналитических расчетов, с помощью которых установлены геометрические и размерные параметры профилируемой заготовки и ручьев секторов-штампов продольной вальцовки в калибрах постоянного и переменного сечений, а также произведен выбор необходимого оборудования.

2. Компьютерные модели, позволившие прогнозировать параметры технологических процессов изготовления рожкового двухстороннего гаечного ключа ГОСТ 2839-80 с предварительным профилированием горячей вальцовкой в секторах-штампах в ручьях постоянного сечения по системе «круг-овал-круг», что позволило при окончательной штамповке на КГШП добиться уменьшения количества отходов в виде облоя в зоне рукояти и повысить КИМ на 8% (67% против 59%). Для другой номенклатуры, а именно при изготовлении накидного двухстороннего гаечного ключа ГОСТ 10112–2001, уточнены параметры технологического процесса с предварительным профилированием заготовки горячей вальцовкой в секторах-штампах в ручьях переменного сечения по системе «круг-овал-квадрат», геометрия которых позволила полуфабрикат для осуществления качественного заполнения гравюры штампа КГШП с КИМ, равным 70%.

3. Предложен технологический процесс, позволяющий получить окончательную поковку в виде развертки накидного двухстороннего гаечного ключа продольной штамповочной вальцовкой в фасонном ручье сектора-

штампа, тем самым отказаться от окончательной штамповки на ма машинах повышенной мощности - КГШП или штамповочном молоте, используя один вид оборудования – ковочные вальцы.

4. Разработаны варианты конструкций системы крепления и способы фиксации секторов-штампов на рабочих валах консольных ковочных вальцов для реализации вальцовки как предварительной операции, а также продольной штамповочной вальцовки, используемой в качестве окончательной операции, техническая новизна конструкций подтверждена 3-мя патентами на изобретения и получены 3 патента на изобретения на способы фиксации деформирующего инструмента.

5. По результатам моделирования силовых параметров методами МКЭ-анализа в DEFORM-3D и SolidWorks Simulation, воспринимаемых одной из разработанных конструкций крепления секторов-штампов на валах консольных ковочных вальцов, разработана аналитическая модель для оценки стойкости деформирующего инструмента и работоспособности системы его крепления, позволяющей оперативно прогнозировать их ресурс работы при изменениях энергосиловых и температурных режимов вальцовки.

6. Предложен технологический процесс производства поковки гаечного ключа способом поперечной вальцовки. Для ее реализации выполнена технологическая подготовка, направленная на получение профилированной заготовки, пригодной для окончательного формоизменения, что подтверждено результатами компьютерного моделирования процессов предварительного профилирования и окончательной штамповочной вальцовки.

7. Для проведения физического моделирования операций предварительной вальцовки для разных технологических процессов с использованием ручьев постоянного и переменного сечений спроектирована и реализована в металле оригинальная оснастка в виде пар секторов-штампов, образующих калибры необходимой формы и размеров для заданного числа

пропусков и одна из запатентованных систем крепления и фиксации оснастки на валах консольных ковочных вальцов.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты аналитических расчетов параметров технологии и инструмента, их компьютерные модели, с помощью которых установлены и уточнены геометрические характеристики как профилируемых заготовок в соответствии с числом пропусков, так и ручьев секторов-штампов продольной вальцовки в калибрах постоянного и переменного сечений, а также произведен выбор необходимого оборудования;

- новые варианты технологических процессов продольной и поперечной вальцовки профилируемых заготовок для формообразования удлиненных в плане поковок, имеющих участок тонкого полотна, на примере гаечных ключей различных конструкций;

- методика технологической подготовки производства удлиненных в плане поковок на примере гаечных ключей различных типов;

- статистическая модель, позволяющая анализировать запас прочности деталей системы крепления деформирующего инструмента на рабочих валах консольных ковочных вальцов и прогнозировать стойкость секторов-штампов в условиях изменяющихся силовых, деформационных и температурных режимов вальцовки.

Личный вклад автора состоит в проведении теоретических и экспериментальных исследований процессов горячей вальцовки для наиболее эффективных и перспективных технологий, ориентированных на предварительное и окончательное формоизменение удлиненных в плане поковок с целью выявления особенностей течения металла, оценки силовых параметров, температурных полей и напряженно-деформированного состояния профилированных заготовок, в частности, с помощью полученных графиков изменения интенсивности напряжений и интенсивности деформаций от времени обработки; разработке методики проектирования технологии горячей продольной штамповочной вальцовки и установлении

рекомендаций на этапе выбора системы калибров для предварительных переходов горячей поперечной штамповочной вальцовки; разработке конструкций крепления секторов-штампов на рабочие валы консольных ковочных вальцов для предварительных и окончательных процессов продольной вальцовки; разработке и реализации экономически эффективной оснастки для физического моделирования и методики ее производства; разработке конструкции крепления ручьевых вставок на валы консольных ковочных вальцов для реализации процесса горячей поперечной штамповочной вальцовки; разработке методики оценки работоспособности конструкций крепления деформирующего инструмента на рабочие валы ковочных вальцов и стойкости секторов-штампов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует следующим пунктам направления исследований научной специальности 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением:

4. Технологииковки, прессования, листовой и объемной штамповки, а также формования и комплексных процессов с обработкой давлением, например, непрерывного литья и прокатки заготовок.

6. Методы оценки напряженного и деформированного состояния и способы увеличения жесткости, прочности и стойкости деформирующего инструмента.

8. Технологии продольной и поперечно-винтовой прокатки заготовок деталей, методы конструирования деталепрокатных станов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих симпозиумах и конференциях:

XXVIII Международная промышленная выставка «Металл-Экспо'22: Диплом лауреата конкурса «Молодые ученые» за научную работу «Технологическая подготовка операции вальцовки профильной заготовки для штамповки поковки «гаечный ключ» г. Москва 8-11 ноября 2022 г.;

Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные

проблемы науки и техники», г. Ростов-на-Дону, ДГТУ, 15-17 марта 2023 года;

XXVIII Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий «Архимед-2025»: Бронзовая медаль за проект «Способ крепления и фиксации секторов-штампов на рабочих валах ковочных вальцов консольного типа» г. Москва, 18-20 марта 2025 г.;

Первый научный семинар кафедры прикладной математики «МГТУ «СТАНКИН» 26-го мая 2026 г.;

Научные семинары кафедры систем пластического деформирования «МГТУ «СТАНКИН», 2023, 2026 гг.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 271 странице машинописного текста, включает введение, 4 главы, заключение, 70 рисунков, 50 таблиц, список литературы из 190 источников и приложение.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ УРОВНЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДСТВА УДЛИНЕННЫХ В ПЛАНЕ ПОКОВОК

1.1. Обоснование целесообразности использования заготовительных операций в производстве поковок с удлиненной осью

Поковки по своим параметрам, согласно технической литературе [1-5], классифицируют с делением на группы. Одна из таких групп объединяет поковки, имеющие продолговатую, вытянутую форму в горизонтальной плоскости или удлиненные в плане.

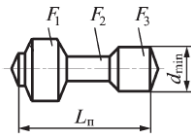
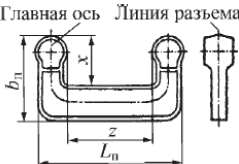
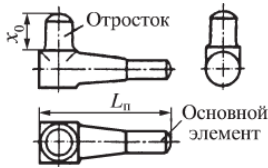
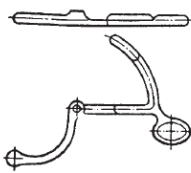
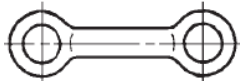
Область применения удлиненных поковок достаточно обширна и включает в себя производство распространенных деталей или изделий. К примеру, это может быть медицинский инструмент (лопаточки для отделения тканей, скальпели, ложки для операций на позвоночнике, пинцеты и т.п.) или элементы конструкции, которые подвергаются изгибающим нагрузкам. В важных отраслях, таких как автомобилестроение, станкостроение, судостроение и пр. используются валы и оси. В гидравлических, пневматических системах и каких-либо других механизмах задействованы рычаги и тяги разных форм и размеров. Также к этой группе поковок относятся виды слесарно-монтажного инструмента, типа отверток, воротков, гаечных ключей, зубил.

В таблице 1.1 приводятся примеры таких поковок, изготавливаемых на молотах и КГШП [3].

На Камышинском заводе слесарно-монтажного инструмента, являющимся одним из крупнейших российских производителей профессионального инструмента (свыше 4 млн. шт. в год), освоен выпуск более 1500 видов основной продукции, большая часть которой является удлиненной в плане [6].

Таблица 1.1

Примеры поковок, изготавливаемых на штамповочных молотах или КГШП

	Основная характеристика поковок	Пример поковки
Молотовые поковки	Удлиненные в плане с прямой осью и небольшой разницей в площадях поперечных сечений на других участках поковки ($F_1 \gg F_2$; $F_2 \approx F_3$)	
	Удлиненные с изогнутой осью	
	Удлиненные с отростками и развилинами	
	Удлиненные комбинированной формы	 Изготавливаемые на штамповом молоте в сочетании с прессом или специальными машинами
Поковки, штампуемые на КГШП	Поковки удлиненной формы типа тяг, проушин, валиков с небольшой разницей в площадях поперечных сечений вдоль оси	
	Поковки удлиненной формы типа рычагов, шатунов, коленчатых валов со значительной разницей в площадях поперечных сечений вдоль оси.	
	Поковки удлиненной формы с изогнутой осью.	

При изготовлении поковок, вытянутых в плане, применяют сортовой прокат, геометрические особенности которого характеризуются постоянством площади поперечного сечения, обусловленные способами его производства. Несмотря на то, что технологи стремятся подобрать полуфабрикат максимально приближенный своими характеристиками к готовой поковке, а многие детали или изделия имеют значительные перепады объема металла в определенных участках – при штамповке возникает образование большого

количества отходов, что значительно повышает себестоимость продукции. Кроме того, научно и технически доказано [7-10], что излишки металла негативно влияют на стойкость штампового инструмента, производительность и силу деформирования. Нестационарность течения металла и значительная степень деформации ведут к необходимости постепенного приближения формы заготовки к форме готовой поковки с помощью заготовительных операций, особенно при изготовлении поволоков с удлиненной осью.

Исходя из научно-обоснованных положений кинематики течения металла [11-18] установлено, что профилирование полуфабриката под последующую штамповку происходит в результате действия на заготовку локальных деформирующих сил, приложенных к пятну контакта и способствующих течению металла в соответствии с принципом наименьшего сопротивления. Так происходит формирование участков с поперечным сечением разной геометрии и площади.

1.1.1 Способы предварительного профилирования заготовок перед окончательными операциями ГОШ

В настоящее время широко распространены технологии ГОШ с применением штамповочных молотов, считающимися традиционным деформирующим оборудованием и до сих пор востребованными благодаря универсальности [19, 20]. Для придания необходимой формы и размеров исходной заготовке предварительным формоизменением используют подкатные, протяжные, гибочно-формовочные ручьи (рисунок 1.1) [3, 21]. Основным недостатком таких технологий считается нерентабельность паровоздушного привода, поэтому в последнее время молоты модернизируют переводом на гидропривод. Кроме того, эксплуатация молотов сопровождается высоким уровнем шума и вибраций, а также повышенными требованиями к квалификации рабочих. При этом наличие значительных

припусков и штамповочных уклонов приводит к повышенному расходу металла.

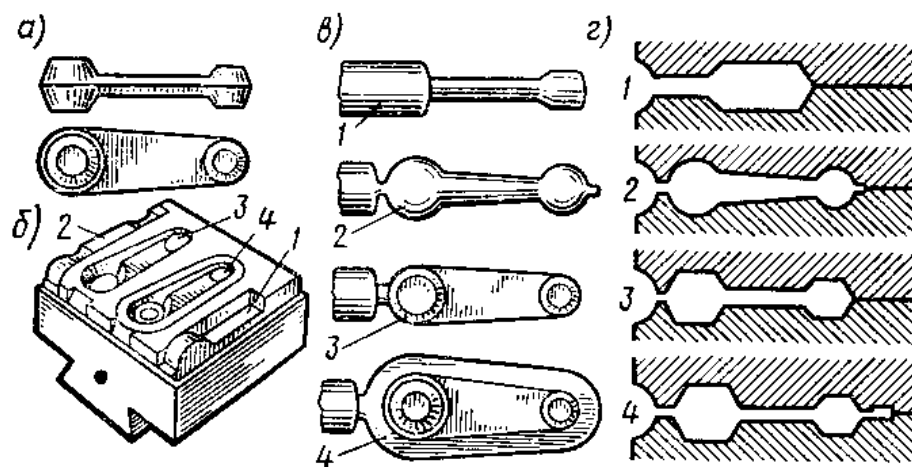


Рисунок 1.1 – Схема многоручьевого молотового штампа: а – готовая поковка; б – штамп; в – переходы штамповки: 1 – протяжной; 2 – подкатной; 3 – штамповочный в предварительном ручье; 4 – штамповочный в окончательном ручье; г – ручки штампа: 1 – протяжной; 2 – подкатной; 3 – предварительный; 4 – окончательный

Благодаря высокой производительности и точности поковок, широко распространены технологические процессы ГОШ на базе КГШП, которые характеризуются отсутствием заготовительных ручьев в штампе, ввиду конструктивных особенностей, направляющих пресса. Поэтому, в случае приложения деформирующей силы перпендикулярно оси заготовки, реализацию предварительного профилирования переносят на другой тип оборудования. Примером такого оборудования являются машины поперечной прокатки, которые реализуют поперечно-клиновую (в валках, плитах, валково-сегментную), поперечно-винтовую и радиально-сдвиговую прокатку (рисунок 1.2) [3, 22-25]. Проанализировав данные способы формоизменения заготовок, Добровлянский С. Н. [26] сделал вывод о том, что оборудование, на котором выполняются вышеперечисленные процессы, является энергоемким и нуждается в чрезмерно-затратном обслуживании и содержании

дополнительных цеховых площадей или вовсе предполагает ориентацию заказов на металлургические предприятия. Также в современных условиях быстроменяющегося рынка выпуск продукции осуществляется малыми сериями, и данные способы утрачивают свою рентабельность.

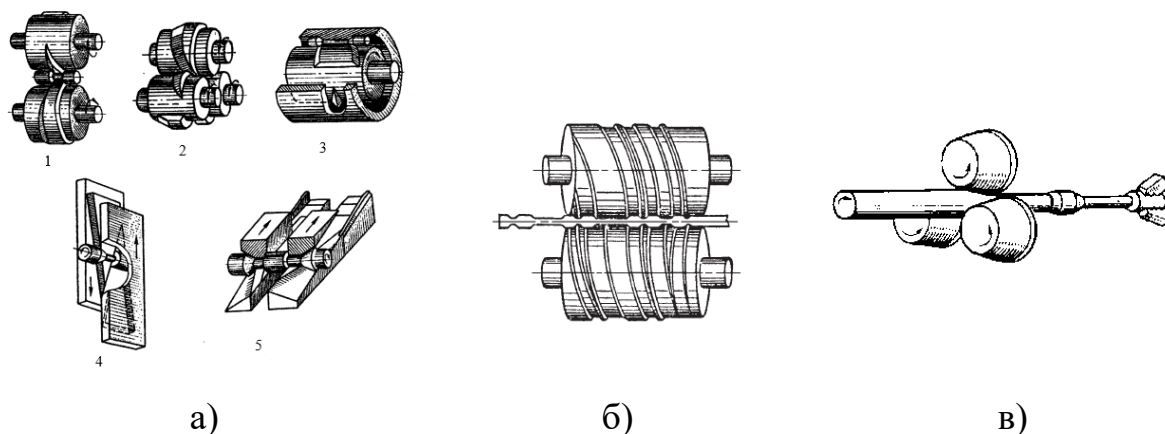


Рисунок 1.2 – Виды поперечной прокатки: а – поперечно-клиновья: 1 – в двух валках; 2 – в трех валках; 3 – валково-сегментная; 4 – с двумя подвижными плитами; 5 – с одной подвижной и неподвижной плитами; б – поперечно-винтовая; в – радиально-сдвиговая

В настоящее время ведутся научно-исследовательские работы, направленные на совершенствование режимов ГОШ, уменьшение времени настройки оборудования поперечной прокатки, разработку перспективных калибровок главных инструментов, увеличение их стойкости в процессе эксплуатации [27-30], изучение специфики течения металла при локальном деформировании и его напряженно-деформированного состояния [31, 32].

Параллельно разрабатываются патенты на различные конструкторско-технологические решения [33], предлагаются варианты по сокращению металлоемкости поковок, штампового инструмента и оборудования, создаются методики и алгоритмы автоматизированного проектирования [34-36]. Авторами работы [37] предложена конструкция двухвалкового стана винтовой прокатки, позволяющая повысить точность изделий периодического профиля при уменьшении габаритных параметров. В патенте [38] описывается конструкция стана поперечно-клиновой прокатки (ПКП), обладающего более

низкими показателями энергопотребления и продукцией увеличенной точности.

В работе [28] Кожевникова Г.В. утверждает, что на текущий момент технологии ПКП, разработанные в ФТИ НАН Беларуси, обеспечивают стойкость плоскопрокатного инструмента около 1 млн штук изделий, коэффициент использования металла (КИМ) до 0,8-0,9, повышение удобства эксплуатации оборудования на 10-15% и относительно высокую производительность в зависимости от схемы прокатки – 300-720 шт/час. Однако, несмотря на преимущества, имеется ряд нерешенных проблем, требующих дальнейшего совершенствования технологии.

Существуют способы исключения из технологической цепочки заготовительных операций, одним из которых является применение проката периодического профиля в качестве исходных заготовок. Прокат с переменными площадями поперечного сечения используют для последующей штамповки поковок сложной конфигурации, имеющих зоны стержней и утолщений. Применение проката периодического профиля позволяет сэкономить до 15 % металла и до 30% упростить изготовление поковок [39, 40, 41].

Стоит отметить и недостатки, заключающиеся в большой металлоемкости и трудоемкости конструкций оборудования, сложности переналадки, а также узкой направленности производства и ориентации на массовую продукцию. Все перечисленное влияет на стоимость исходных заготовок, что, в конечном счете, сказывается на рентабельности технологических процессов.

Ученые Всесоюзного научно-исследовательского института металлургического машиностроения (ВНИИМЕТМАШ) занимались разработками станов периодической прокатки на основе копировального устройства (рисунок 1.3 а), с применением подпора (рисунок 1.3 б) и др.

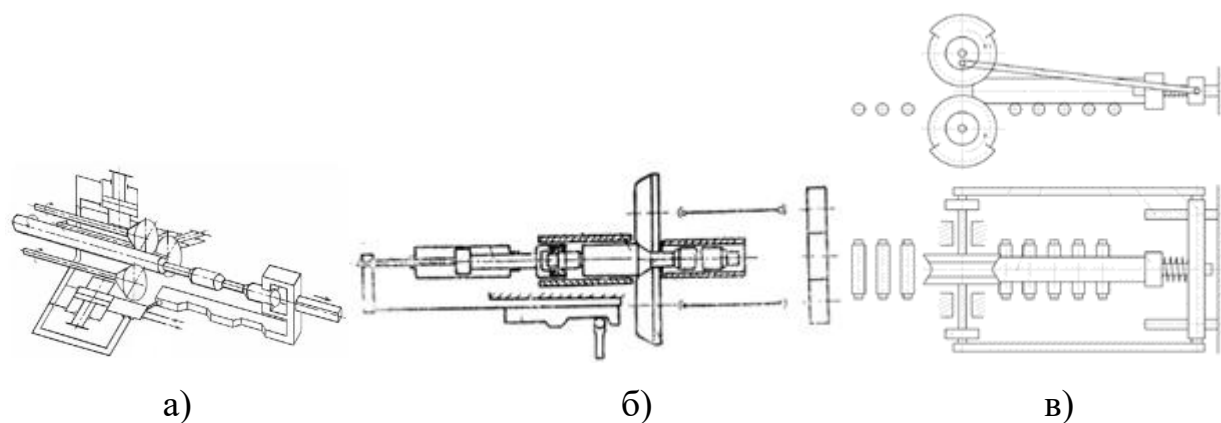


Рисунок 1.3 Примеры разработок конструкторских решений и схем периодической прокатки: а – схема копира; б – схема периодической прокатки тракторной полуоси с использованием подпора; в – схема стана вальцовки под штамповку передней оси автомобиля

В работе [42] представлены схемы станов и технология периодической вальцовки заготовок под штамповку передней балки автомобиля МАЗ. Обсуждаются преимущества и недостатки используемых приводов вращения валков (механического и гидравлического) и способов загрузки в зону прокатки (пневматическая, кривошипно-шатунная или кривошипно-кулисная подача или с приводным рольгангом). По мнению авторов, оптимальной схемой предварительной вальцовки под штамповку передней оси автомобиля является прокатка с механическим приводом вращения двухвалковой клетки и кривошипно-шатунным или кривошипно-кулисным механизмом подачи (рисунок 1.3 в). Внедренная технология предварительной периодической прокатки на РУП «Кузнечный завод тяжелых штамповок», дает возможность экономии около 250 тонн стали 40Х в год. Кроме того, удалось сократить число ударов молота с 20 до 17 и повысить стойкость штампов на 30%.

Существует способ профилирования заготовок высадкой утолщений на ГКМ, причем деформированию подвергается лишь определенный участок длины полуфабриката. В настоящее время решаются задачи, касающиеся устойчивости процесса высадки из-за неравномерности течения металла в наборных переходах [43], изучается напряженно-деформированного

состояние с использованием метода конечных элементов (МКЭ) [44, 45], предлагаются новые элементы конструкции оборудования и штамповой оснастки, например машины и штампы с горизонтальным разъемом матриц [46, 47]. К преимуществам технологии, реализуемой на ГKM, можно отнести высокую производительность и точность формоизменения, однако существует недостаток в виде ограничения количества переходов в одном штампе, обусловленный размерами блока матриц.

Операция вальцовки на ковочных вальцах, как один из частных случаев продольной периодической прокатки [3, 48], широко применяется в период последнего столетия на многих машиностроительных заводах США, Германии, Франции, Англии, Японии, Китая и других стран [9, 49] в качестве как подготовительной операции перед штамповкой, так и окончательной (штамповочная вальцовка), и считается традиционным способом профилирования (рисунок 1.4). Активное использование вальцовки в отечественных кузнечно-штамповочных цехах началось с 50-х годов прошлого века. На тот период утверждалось, что при переводе заготовительных операций на вспомогательное оборудование, в том числе на вальцы, могут быть модернизированы технологические процессы для 30% поковок [50]. Взамен подкатных и протяжных ручьев у молотовых штампов, предварительное профилирование заготовок стали проводить на ковочных вальцах, установленных в линию со штамповочными молотами, что позволило повысить производительность в 1,5-2,5 раза [51].

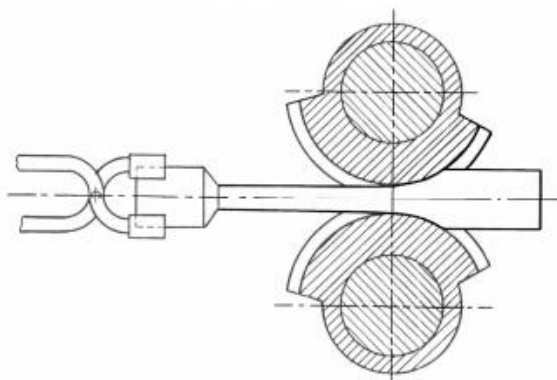


Рисунок 1.4 Схема процесса продольной вальцовки

При штамповке гаечных ключей на Новосибирском инструментальном заводе была достигнута разница в 4-5 раз в технико-экономических показателях при сравнении технологии без предварительного формоизменения исходной заготовки и профилированной заготовки вальцовкой. Рост показателей зафиксировали исследователи уральской школы обработчиков давлением в кузнечно-штамповочных цехах Уралмашзавода, Уралвагонзавода, Челябинского тракторного завода. Однако фактор ограниченности площади кузнечных цехов предприятий не давал возможности широкого применения технологии.

Операция вальцовки приобрела значительное распространение благодаря внедрению в линию КГШП в качестве заготовительной операции для формоизменения исходных заготовок перед штамповкой поковок, удлиненных в плане. Кроме этого, благодаря использованию индукционного нагрева, почти не образуется окалина и отсутствует обезуглероживание поверхностей заготовок в связи с высокой скоростью нагрева и стабилизации его режима, а также требуется меньше производственных площадей для размещения необходимого оборудования.

В настоящее время ковочные вальцы применяют на ряде крупных промышленных предприятий, таких как Минский автомобильный завод (МАЗ), Минский тракторный завод (МТЗ), Камышинский завод слесарно-монтажного инструмента, Волжский (ВАЗ), Камский (КАМАЗ), Горьковский (ГАЗ) автомобильные заводы.

Механизированные штамповочные линии КАМАЗа на базе КГШП номинальной силой 16, 25, 40 и 120 МН включают 14 двухопорных ковочных вальцов с манипуляторами, работающими в автоматическом режиме. Масса заготовок варьируется от 3 до 115 кг.

Ковочные вальцы являются перспективным оборудованием для современного кузнечного цеха массового производства. На рисунке 1.5 изображены некоторые поковки, полученные с применением вальцовки [52].

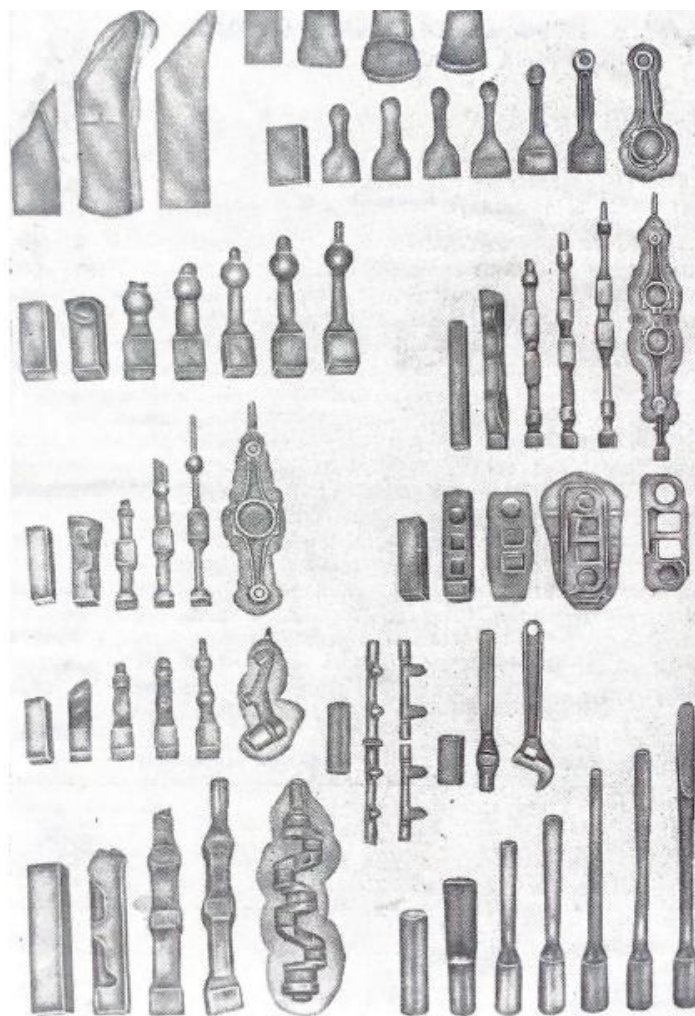


Рисунок 1.5. Поковки после обработки с применением ковочных вальцов

Наиболее высокая концентрация оборудования наблюдается на заводах автокомпонентов, к примеру предприятие ZF Friedrichshafen (крупнейший производитель трансмиссий), а также известных автомобильных концернов, таких как Volkswagen Group (Германия), Mercedes-Benz (Германия), General Motors (США), Hyundai Motor Group (Южная Корея) и другие.

В аэрокосмической промышленности требования к качеству поковок особенно высоки. Операция вальцовки используется для предварительного профилирования заготовок под последующую ковку или штамповку лопаток турбин, дисков, валов и других деталей на таких предприятиях, как GE Aerospace (США), Rolls-Royce plc (Великобритания), MTU Aero Engines (Германия), Pratt & Whitney (США) и другие.

Производством специализированного оборудования, в том числе ковочных вальцов, на данный момент занимаются фирмы Ajax Manufacturing CECO Equipment (США), SMS group (Германия), Комбинат «Тяжстанкогидропресс» (Россия), EUMUCO GmbH (Германия), оборудование которых серии ARWS установлено в цехах Кузнечного завода КАМАЗа.

В работах [48, 51] показана целесообразность применения вальцовки поковок с удлиненной осью при выполнении следующих требований:

1. Отношение площадей поперечных сечений у поковок вместе с облоем, образующимся в процессе штамповки, не должно превышать 1:8 – 1:10. При этом готовую профилированную заготовку можно получить за 2-4 перехода.

2. Исходя из логики максимальной эффективности и рациональности использования вальцовки, суммарная длина обжимаемых участков валками не должна быть меньше 1,5 диаметра исходной заготовки.

3. Нельзя допускать снижение производительности труда после предварительного формоизменения заготовки по сравнению со штамповкой только на молоте или прессе.

Технология с использованием операции вальцовки может быть более предпочтительна благодаря таким преимуществам, как [53]:

- снижение себестоимости производства поковок на прессах и молотах на 10-25%; стоимости изготовления штампов на 10 – 15% и повышение производительности штамповочных прессов и молотов в 1,5 – 2,5 раза за счет отказа от подкатных и протяжных ручьев;

- увеличение стойкости молотовых штампов на 20 – 50% за счет применения более точных заготовок с высокой повторяемостью размеров, а также повышение длительности работы штока молота путем исключения внецентренных ударов;

- сокращение расхода металла на 5 – 20 %.

В качестве заготовительного оборудования, используемого совместно с прессом или молотом, вальцовка также позволяет:

- сократить количество единиц оборудования: например, вместо трех молотов можно поставить одни ковочные вальцы, так как исключается операция подкатки и протяжки;

- благодаря повторяемости размеров профилируемых заготовок, отсутствует необходимость назначения увеличенных припусков на дальнейшую механическую обработку, что благоприятно сказывается на ресурсосбережении;

- высокая мобильность ковочных вальцов позволяет повысить коэффициент использования оборудования ввиду отсутствия необходимости фундамента;

- высокая скорость операции дает возможность производить вальцовку и последующую штамповку с одного нагрева.

К недостаткам операции вальцовки можно отнести:

- относительно низкая стойкость секторов – штампов;
- ограничение участка обжатия заготовок (не более $2/3$ длины окружности вала);

- частая невозможность установки перед КГШП или молотом в связи с ограниченностью площади кузнечно-штамповочного цеха;

- экономическая выгода применения появляется только в условиях крупных партий или массового производства.

Проведенный анализ способов профилирования заготовок ресурсосберегающими методами учеными Pater Z., и Tofil A. [31] позволил сделать выводы о том, что процессы предварительного формоизменения заготовок становятся все более распространенными, особенно при изготовлении осесимметричных деталей; исследования технологии изготовления поковок проводятся преимущественно в программных комплексах, основанных на методе конечных элементов; технологии поперечно-клиновой прокатки значительно усовершенствовались за последние десятилетия, а поперечно-винтовая прокатка наоборот редко используется в промышленности из-за низкой практичности.

Однако существуют и другие мнения, например автором работ [22, 54] отмечено, что, если установка дополнительного специализированного оборудования, такого как ковочные вальцы, станы поперечно-клиновой и продольно-копировальной прокатки экономически нецелесообразна и зачастую технически невозможна ввиду таких проблем как отсутствие дополнительных производственных площадей, то существует потребность в разработке новых способов профилирования заготовок, анализе и прогнозировании предварительного формоизменения, а также, в проектировании высокотехнологичной оснастки, обладающей высокой стойкостью, для получения профилированных заготовок под штамповку непосредственно в штампах КГШП или молотах.

1.1.2 Теоретические исследования и уровень техники в области горячей вальцовки

Разработкой технологии горячей вальцовки и исследованиями в этой области занимались как российские инженеры и ученые, так и специалисты зарубежных стран. Наиболее яркими представителями, которые значительное внимание уделяли фундаментальным основам вальцовки, а именно, разработке методик расчетов и выявлению взаимосвязей между технологическими характеристиками, построению рационального профиля заготовки, сбору эмпирических данных, в частности, касающихся таких параметров, как пружинение валов в процессе операции, расчету и проектированию вальцовочных штампов, являются Смирнов В. К., Литвинов К. И., Харитонин С. В. [48], Атрошенко А. П. [51], Никольский Л. Н., Кузнецов А. В. [55, 56], Скрыбин С. А. [57], Березин И. В. [58].

Головин А. Ф. [22] предложил метод соответственной полосы, с помощью которого можно достаточно точно рассчитать деформацию при вальцовке в калибрах простой конфигурации. При этом, учитывается такой

производственный фактор, как поднастройка рабочих валков при колебаниях технологических параметров и степени изношенности ручьев секторов-штампов. Также он был основоположником энергетического описания течения металла и метода смещенных объемов, позволяющего определить схему деформированного состояния.

Отнесение вальцовки к частному методу продольно-периодической прокатки дает возможность упомянуть вклад в теоретические аспекты вальцовки, академиков Целикова А. И., создавшего методики расчета силы деформирования [39] и Рудского А. И. [41], внесшего существенный вклад в теорию продольной и поперечной прокатки.

Семенов Е. И. в своих трудах [3] коснулся большинства операций ГОШ, в том числе и вальцовки. Им предложена последовательность технологических расчетов процесса деформации заготовки в ручьях постоянного сечения, приведена классификация процессов вальцовки, представлены графики определения максимально возможного коэффициента вытяжки и поправочного коэффициента уширения для различных систем калибров, разработаны рекомендации допустимых соотношений сторон заготовок при возможных комбинациях ручьев секторов-штампов.

Кроме теоретических положений и разработки технологий некоторые производственники и научные деятели уделяли немалое значение проектированию оснастки, узлов оборудования, подробному описанию работы машин и их внедрению в технологический процесс. Например, Трофимов И. Д., Павлов В. А., Кузьмичев В. Н. в своей работе [52] привели классификацию и обзор конструкций ковочных вальцов, а также расчеты узлов оборудования. Акцентировали внимание на вопросах, связанных с механизацией и автоматизацией машин, электрооборудованием (электроаппаратура, электроприводы оборудования), определением силы и моментов вальцовки.

В трудах Титова Ю. А. и Титова А. Ю. [59] приведены варианты конструкций крепления секторов-штампов на валах ковочных вальцов при

традиционном выполнении операции, когда в калибрах происходит деформация заготовки вдоль ее оси, тем самым разгоняя металл в будущие головки поковок и уменьшая объем в области полотен, рукояток, перемычек и т.п. Кроме того, авторы утверждают, что в последнее время находит применение поперечная вальцовка на валково-сегментных или плоско-прокатных вальцах, когда ось заготовки располагается вдоль оси рабочих валов (рисунок 1.6). Применяя такой способ возможно получение конечной поковки, без использования штамповочных молотов или прессов.

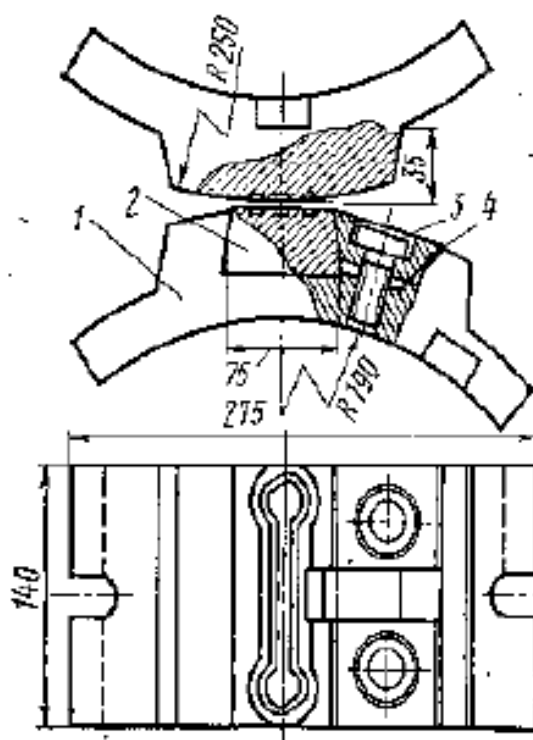


Рисунок 1.6. Пример конструкции штампа для поперечной вальцовки:

1 – штамп; 2 – рабочая вставка; 3 – болт; 4 – прижим

В настоящее время опубликовано немало патентов зарубежных стран. Среди таких изобретателей можно выделить Masato M. [60], спроектировавшего инструмент и метод вальцовки для известной компании Toyota Motor Corp. Yong X., Bo L., Yuantian C., Genxue C. [61] разработали технологию получения балки переднего моста автомобиля методом штамповочной вальцовки. Патентообладателем является компания Chongqing Kane Mech Manufacturing Co Ltd, занимающаяся производством автозапчастей

в Китае. Проектируются принципиально новые конструкции секторов-штампов и машин, предлагаются способы вальцовки валов различного назначения (кривошипных, коленчатых, шлицевых), рычагов, рельсовых поковок, автомобильных осей [62-70]. Jiefeng X., Tian P., Juan D. [71] разработали способ предварительной вальцовки коленчатого вала ассиметричной формы.

Кроме конструирования основного инструмента изобретаются устройства для его быстрой замены и механизмы фиксации, а также методы обработки поверхности ручьев [72-78]. Toshiharu A. [79] создал устройство для замены секторов-штампов ковочных вальцов, патентообладателем которого является компания Sumitomo Heavy Industries – крупный производитель промышленного оборудования в Японии.

Известны патенты для автоматизации и роботизации процесса вальцовки [80, 81]. Южно-Корейская компания Formetal Co., Ltd, производящая обработкой давлением шатуны, поворотные кулаки, поршневые рейки и т.п., является обладателем патента на метод вальцовки алюминиевых материалов на ковочных вальцах с использованием робота-манипулятора авторов Young Chang J., Hwan Myung P., Song Man J. [82].

Для выявления особенностей течения металла, определения момента его перехода в пластическое состояние и обнаружения дефектов с помощью компонентов тензоров напряжений, необходимо изучать напряженно-деформированное состояние поковки, исследование которого может проводиться как аналитическими методами [12, 18], так и методами компьютерных экспериментов с применением специальных программ, основанных на методе конечных элементов [83-85]. Кроме этого, отечественные и зарубежные обработчики давлением занимаются выявлением закономерностей между различными параметрами в процессе формоизменения заготовки при вальцовке, изучением влияния пружинения валов в ходе операции, поиском решений снижения силовых параметров и повышения ресурсосбережения.

Кауфман К. М. [86] занимался установлением закономерностей деформации при высоких обжатиях валками заготовки в процессе вальцовки, используя методику В. Л. Колмогорова [16] при проведении натурных экспериментов.

Авторы Кохан Л.С., Пунин В. И., Ремпель Г.Б. проводили исследования горячей вальцовки в калибрах ромбического и параболического сечений для осуществления предлагаемой технологии изготовления детали типа «лопатка направляющая компрессора высокого давления» [87-90]. В результате их работы определены параметры, при которых наблюдается повышение стабильности эксплуатационных свойств изделия, подтвержденное испытаниями на кафедре МиОМД Московского государственного вечернего металлургического института (МГВМИ). Установлено повышение КИМ и снижение силовых показателей, увеличение прочности поковок после профилирования на ковочных вальцах.

Покрас И. Б., Ахмедзянов Э. Р. [91] усовершенствовали методику проектирования технологии с применением метода эквивалентной полосы. Утверждается, что с использованием аналитических формул полученные результаты позволяют рассчитать количество переходов вальцовки и могут быть применимы в системах автоматизированного проектирования (САПР).

Работы Золотухина П. И., Володина И. М., Карпайтис Е. П. [92-95] посвящены проектированию инструмента, анализу деформированного состояния металла в процессе горячей вальцовки по схеме «круг-овал-круг» за два прохода. Проводились исследования с помощью двух методов – компьютерного моделирования в программе «Qform 3D», основанной на методе конечных элементов, и методики проектирования, разработанной В. К. Смирновым [48] вместе с другими сотрудниками, реализуемой на отечественных предприятиях и заключающейся в использовании формул, полученных аппроксимацией результатов численного решения теоретической задачи пластического деформирования металла на ЭВМ. Также результатами исследований стало получение уравнения регрессии для расчета пружинения

валов ковочных вальцов. Установлено, что учет пружинения в процессе проектирования калибров позволяет исключить возможность появления бокового заусенца у профилированной заготовки, что является важным при некоторых последующих видах обработки давлением.

Также существуют работы Смирнова В. К. Литвинова К. И., Харитонина С. В. [96-98], в которых изложен опыт использования операции вальцовки при изготовлении поковок турбинных лопаток двигателей летательных аппаратов, анализируется технико-экономическая эффективность технологии предварительного профилирования перед основной операцией формоизменения.

В промышленности компьютерное моделирование процессов ОМД пользуется большой популярностью, особенно при разработке технологий изготовления ответственных деталей. Программные комплексы, основанные на методе конечных элементов, позволяют с большой точностью оценить кинематику течения металла, температурное поле поковки и напряженно-деформированное состояние, не затрачивая значительное количество времени и ресурсов на натурные эксперименты. Таким образом, современные труды зарубежных ученых и производителей в области вальцовки связаны, в основном, с анализом и изучением результатов компьютерных экспериментов и оценки влияния таких факторов, как: форма и размеры калибров на определенных участках, размеры исходной заготовки и секторов-штампов, влияния трения, температуры, скорости деформирования.

Например, в статье [99] немецких авторов Grass H., Krempaszky C., Werner E. описывается исследование микроструктуры и механических свойств шатуна, полученного методом предварительной вальцовки за несколько переходов для последующей осадки и штамповки на кривошипном прессе. Методика включала в себя два этапа – проведение компьютерного моделирования в программном обеспечении MSC.Superform и верификация полученных данных по результатам натурального эксперимента. Многие работы китайских ученых [100, 101] посвящены анализу результатов компьютерного

моделирования балки передней оси автомобиля.

1.2 Изделие типа «гаечный ключ», как представитель группы поковок, удлиненных в плане

Представителем удлиненных в плане изделий с относительно тонким полотном (см. таблицу 1.1) является гаечный ключ – слесарный инструмент для сборки и разборки резьбовых соединений, раскручивая или закручивая болты, гайки и другие метизные изделия.

Спрос на ручные инструменты значительно вырос благодаря введению в строй новых предприятий и технопарков [102, 103]. Гаечные ключи используют практически во всех сферах деятельности: промышленности, сельском хозяйстве, строительстве или ремонте при сборке-разборке механизмов различных уровней сложности. Несмотря на относительную простоту конструкции, изделие обладает большими годовыми программами выпуска, отличается технологичностью и требует многооперационной технологии изготовления.

Рожковый гаечный ключ с открытым зевом является одним из представителей группы поковок с удлиненной осью (рисунок 1.7), имеющим тонкое полотно. В странах СНГ руководствуются стандартами ГОСТ 2838-80 [104] и ГОСТ 2839-80 [105] при определении технических условий, а также размерного ряда и геометрических параметров. Обычно рожковые ключи производят в двухстороннем исполнении. Это сокращает ассортимент в два раза.



Рисунок 1.7. Гаечный ключ (ГОСТ 2839 – 80) [6, 105, 106]

На производстве же находят применение и односторонние ключи, оснащенные более широким зевом – этот инструмент предназначен для гаек, параметры шестигранника которых превышают 30 мм.

1.3 Анализ известных способов изготовления гаечных ключей

Примером одной из классических технологий является изготовление поковок гаечных ключей с использованием подкатного ручья в молотовых штампах. Подкатной ручей служит для точного распределения металла по длине заготовки за счет уменьшения ее поперечных сечений на одних участках и увеличения их (набор металла) на других участках. Как правило, по заготовке наносятся два – четыре удара, сопровождающихся каждый раз кантовкой ее на 90°. Из подкатного ручья поковку перекладывают в предварительный штамповочный ручей, а иногда в гибочный или формовочный.

В кузнечном цехе «Камышинского завода слесарно-монтажного инструмента» по действующей технологии производят поковку гаечного ключа на паровоздушном штамповом молоте с использованием операции подкатки (рисунок 1.8).

В источнике [107] приводились показатели технологического процесса изготовления поковки гаечного ключа с размером зева 50×55 самой известной технологией (таблица 1.2).

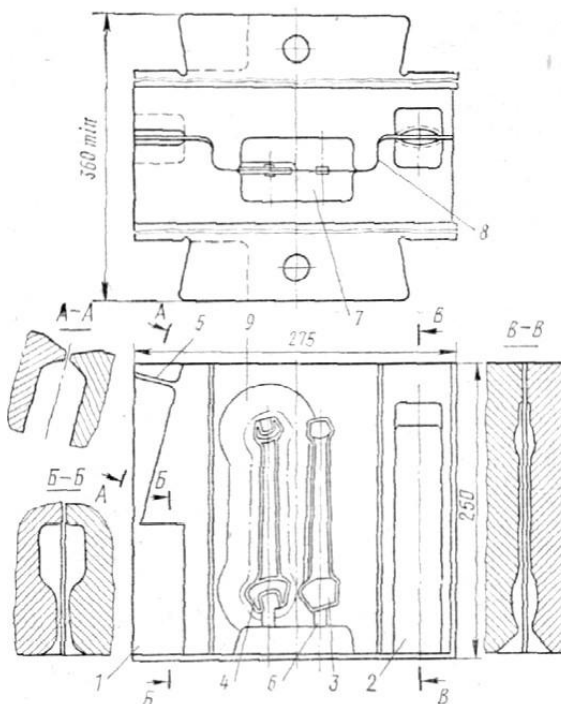


Рисунок 1.8 Схема гравюры многоручьевого молотового штампа:
заготовительные ручки: 1 – протяжной; 2 – подкатной; формующие ручки: 3 – черновой; 4 – чистовой; другие элементы гравюры: 5 – отрубной нож; 6 – литниковая канавка; 7 – выемка под клещевину; 8 – замок; 9 – облойная канавка [59]

Таблица 1.2

Показатели технологического процесса (ключ 50×55)

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1	Масса поковки, кг	2,31
2	Масса облая, кг	0,43
3	Угар, кг	0,015
4	Норма расхода материала на 1 деталь, кг	3,85
5	Масса детали, кг	1,8
6	КИМ	0,42

Исходя из таблицы 1.2, можно сделать вывод о том, что одна из основных технологий получения поковки гаечного ключа имеет относительно низкий коэффициент использования металла 0,42.

В отечественных производствах распространена технология штамповки заготовок гаечных ключей из проката круглого сечения [108] с использованием валковой прокатки и открытых штампов в соответствии с ГОСТ 2310-77 [109], ГОСТ ИЕС 60900-2019 [110].

Заготовки из прутка определенного диаметра и длины разделяются на сортовых ножницах для получения нужного размера по длине (рисунок 1.9 а), затем разогреваются до ковочных температур в газовых печах. Далее нагретая заготовка прокатывается на валках для протяжки до необходимой длины под штамповку, при этом увеличивая коэффициент использования материала и качество поковки (рисунок 1.9 б). Следующим этапом идет штамповка на молоте в два перехода (предварительном и окончательном) (рисунок 1.9 в-г). Облой отделяется на обрезном прессе (рисунок 1.9 д).

Тайваньская компания на собственном заводе изготавливает гаечные ключи под брендом FORCE похожим способом [111]. Кроме того, технология применяется итальянской компанией Gray tools [112].

Похожую технологию использует фирма Green Bay Drop Forge Co. (GBDF) – американский производитель поковок различных конфигураций, в том числе группы ручных слесарных инструментов. Основное отличие заключается в количестве переходов штампового молота. Заготовка после обработки в валковом устройстве переносится сначала в формовочный ручей штампа, затем в предварительный и окончательный. Всего количество ударов молота, согласно источнику [113], девять, что существенно повышает время штамповки и износ штампов.

К недостаткам технологии можно отнести невозможность установки более экономичной и производительной индукционной печи рядом с молотом из-за возникающих вибраций в процессе штамповки, которые могут привести к поломке нагревательного устройства.



Рисунок 1.9. Традиционная технология штамповки заготовок гаечных ключей из прутка с использованием валковой прокатки и открытых штампов в производстве слесарного инструмента в соответствии с ГОСТ 2310-77, ГОСТ 11516-94 (Россия): а – исходная заготовка; б – валковая прокатка; в – штамповка на молоте г – обрезка; д – отходы (облой)

Кроме изготовления гаечных ключей с использованием специального оборудования, распределяющего металл посредством деформирования инструментом вдоль оси заготовки, существуют технологии с применением предварительного профилирования методом поперечно-клиновой прокатки (ПКП), внедрение которой позволяет значительно сократить количество штамповых операций [28, 114].

Республиканское унитарное промышленное предприятие (РУПП) «Кобринский инструментальный завод «СИТОМО» (Республика Беларусь) для изготовления гаечных ключей использует поточные линии штамповки, в состав которых входит ряд устройств индукционного нагрева заготовок,

валково-клиновые станы для ПКП, горячештамповочные прессы или паровоздушные молоты, обрезающие прессы разных типов.

Применение станов ПКП позволяет с высокой точностью распределить металл для последующей штамповки поковок ключей за 1-2 удара молота с минимальным количеством отходов в виде облоя [115]. При этом КИМ на поточных линиях производства ключей составляет 0,7...0,81, в отличие от технологии штамповки на молоте с применением формовочно-протяжных ручьев, где количество ударов составляет 5-6, а КИМ не превышает 0,53...0,6. Технология заключается в том, что заготовка круглого сечения отрезается от проката на сортовых ножницах, нагревается до ковочных температур и отправляется на стан поперечно-клиновой прокатки. Металл распределяется от центра к концам заготовки, удлиняясь до нужных размеров перед последующей штамповкой. Следующими этапами является штамповка на КГШП и обрезка отходов.

Внедрение автоматизированных линий ПКП «АМТ инжиниринг» WRL 3510 в комплексе с закрытой объемной штамповкой (см. рисунок 1.10), разработанной в соответствии с патентом RU №2305610 [116] компанией ООО «Инженерный центр «АМТ инжиниринг» способствовало совершенствованию производства гаечных ключей контрольного идентификационного знака (КИЗ) «СИТОМО». По мнению авторов статьи Клушина В.А. и Рудой А.О. [117] линия WRL 3510 обладает такими преимуществами, как: возможность получить профилированную заготовку с точностью размеров по 6 – 12 квалитетам, что в некоторых случаях исключает дополнительный процесс финишной обработки. Производство широкой номенклатуры гаечных ключей возможно, благодаря сменному комплекту инструмента, используемого на одной единице прокатных станов. Поперечно-клиновая прокатка позволяет повысить коэффициент использования металла до 0,94% в зависимости от материала детали (сталь 4047 (AISI) сталь 45 и др.), что делает штамповку практически безоблойной.



Рисунок 1.10. Технология бережливого производства гаечных ключей с использованием технологии поперечно-клиновой прокатки на станах WRL производства ООО «Инженерный центр «АМТинжиниринг»: а – исходная заготовка; б – поперечно-клиновая прокатка; в – г – штамповка в закрытых штампах на КГШП; д – отходы

Этот техпроцесс также не лишен недостатков. Большие габариты прокатной машины и необходимость в установке такого модуля, как гидростанция делают технологию проблематичной для внедрения в кузнечно-штамповочный цех. Существуют трудности проектирования и изготовления инструмента и ограниченность в размерах выпускаемых изделий. Кроме того, предложенную линию нежелательно ставить перед молотом, так как имеется некоторое количество достаточно вибронеустойчивых модулей, таких как индукционная печь.

Другой пример подобной технологии с применением процесса поперечно-клиновой прокатки содержится в патентах авторов Bairong L. (Китай) [118] и Po-Jung L. (США) [119].

Технологию безоблойной штамповки поковок гаечного ключа

предлагает автор Chin Chen L. (США) [120]. Суть заключается в отрезке исходной заготовки от прутка, предварительном формировании утолщений за счет деформации области рукоятки, прессование каждого утолщения с целью образования верхней и нижней плоскостей для удобства укладки, отжиге для уменьшения сопротивления деформированию, предварительной и окончательной штамповке в закрытом штампе. К основным недостаткам технологии можно отнести отсутствие этапа нагрева, позволяющего уменьшить сопротивление деформированию, из-за чего происходит повышенный износ штампа и возникает необходимость в выборе более мощного пресса, обладающего достаточной силой деформирования и специального оборудования для предварительного формирования утолщений. Кроме того, для безоблойной штамповки необходимо обеспечить точное перераспределение объема металла у профилированной заготовки.

Существуют способы изготовления гаечных ключей из длинномерного и штучного полуфабриката периодической площади поперечного сечения и штучной с последующей штамповкой на горизонтальном молоте [121-125]. В качестве исходной заготовки используются как прутки круглого поперечного сечения, так и лист или полосу. Форма подготовленной заготовки и схематичное изображение последовательности штамповки представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Способы штамповки гаечных ключей на горизонтальном молоте

№	Форма полуфабриката	Схематичное представление способа штамповки
1	Длинномерная заготовка, профилированная поперечно-винтовой прокаткой, затем продольной прокаткой – разгонкой [121]	

Окончание таблицы 1.3

№	Форма полуфабриката	Схематичное представление способа штамповки
2	Длинномерная плоская заготовка с поэлементной отрезкой участков в области рукоятки и зевов ключа [122]	
3	Длинномерная заготовка, профилированная радиально-сдвиговой прокаткой [123]	
4	Длинномерная плоская заготовка, с предварительной вырубкой в зоне рукоятки и пробивкой в области зевов [124]	
5	Штучная плоская заготовка фигурного контура, полученная с помощью двухсторонней отрезки [125]	

К преимуществам способов можно отнести высокую производительность и КИМ, однако существуют такие недостатки, как ограниченность выпускаемой номенклатуры изделий из-за небольшого штампового пространства и низкой мощности молота, а также необходимость в значительной производственной площади, используемой для профилирования длинномерных заготовок.

Разновидностью технологии получения гаечных ключей из стальной ленты, является вырубка заготовки необходимых размеров, предварительный нагрев и штамповка на молоте. Механические свойства изделия достигаются благодаря сохранению направления структуры металла [126], что особенно важно для таких изделий, как гаечные ключи, которые в процессе работы подвергаются высоким статическим нагрузкам. Далее производят удаление облоя на специальном обрезном прессе. Такая технология используется в компании UNIOR (рисунок 1.11).

В качестве недостатков отметим большое количество отходов после вырубки, вследствие чего сравнительно низкий КИМ, имеются сложности в формовке исходной заготовки перед штамповкой и относительно невысокая производительность.

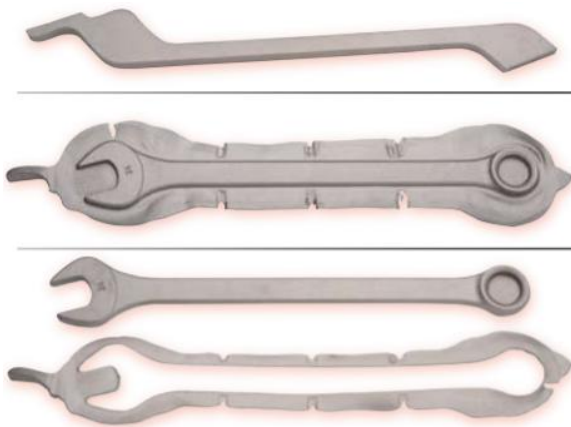


Рисунок 1.11 Изготовление поковок гаечного ключа фирмы UNIOR
(Словения)

Следующий способ изготовления поковки гаечного ключа совпадает с первым формой исходной заготовки, но отличается сдваиванием поковок, что

повышает эффективность производства [127]. После вырубки заготовки из листовой стали (рисунок 1.12 а), та подвергается предварительному нагреву, а затем проходит несколько этапов прокатки (рисунок 1.12 б-г). Далее прокатанная заготовка приобретает форму гаечного ключа на молоте (рисунок 1.12 д-ж), после чего производится отделение облоя на обрезном прессе (рисунок 1.12 з) [128]. Этот способ изготовления поковок характерен для многих предприятий Индии.



Рисунок 1.12. Технология штамповки сдвоенных заготовок гаечных ключей из листовой заготовки (Индия): а – исходная заготовка; б– г – прокатка; д – ж – штамповка на молоте; з – отходы (облой)

Большим отличием данного технологического процесса от предыдущего является операция прокатки, которая позволяет получить увеличенный КИМ, однако при этом значительно уменьшается производительность, так как требуется большое число переходов.

Изобретатели из Японии предложили патент [129], содержащий технологию изготовления гаечного ключа из листа или полосы, суть которой заключается в предварительном нагреве удлиненной плоской исходной заготовки, формировании утолщений под будущие головки зевов в специальном штамповочном прессе, штамповке и калибровке (схема на рис. 1.13).

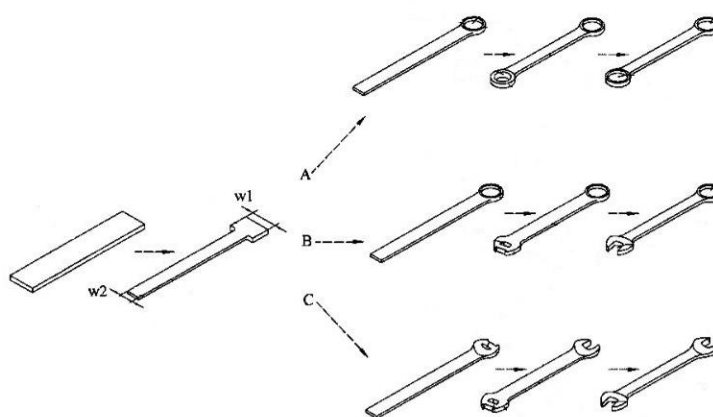


Рисунок 1.13. Способ изготовления и варианты исполнения гаечного ключа

В процессе разработки технологий изготовления изделия из плоской исходной заготовки (лист или полоса), зачастую приходится решать задачу, связанную с выбором оптимальной формы полуфабриката для более эффективного использования металла, обеспечивающего минимальное количество отходов.

Например, немецкие ученые разработали способ [130], позволяющий использовать максимальное количество материала за счет раскроя листа, показанного на рисунке 1.14 а, где обрезаются только концевые участки и излишки в области открытого и закрытого зевов будущего инструмента (рисунок 1.14 б), затем заготовку помещают в закрытый штамп (рисунок 1.14 в).

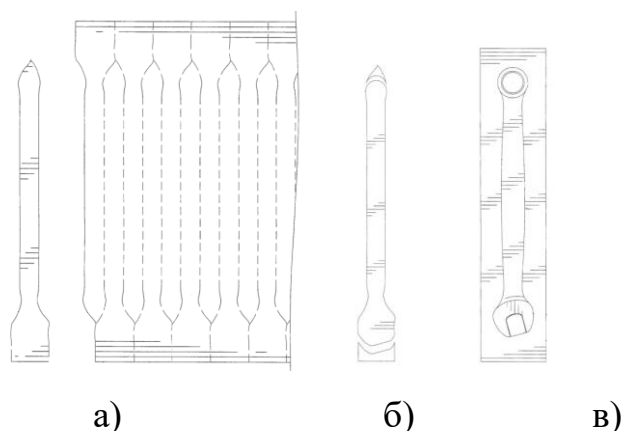


Рисунок 1.14. Способ штамповки комбинированных гаечных ключей: а – схема раскроя; б –отрезка концевых участков; в – расположение поковки в закрытом штампе

Основной недостаток технологии заключается в отсутствии высоких температур нагрева. С одной стороны, не образуется окалина и облой, а с другой – возникает необходимость в оборудовании с относительно высокими энергосиловыми показателями, а также в высокопрочных штампах.

1.4 Обоснование выбора программного комплекса для проведения компьютерных исследований операций ОМД

Моделирование технологических процессов получило широкое распространение в кузнечно-штамповочном производстве по причине минимизации временных и финансовых затрат, а также возможности эффективно корректировать исходные или полученные данные технологических расчетов. Немаловажным является определение закономерностей и прогнозирование течения металла заготовки, проведение анализа НДС как поковки, так и штамповой оснастки. Все это стало осуществимо благодаря конечно-элементному моделированию.

Не так давно виртуальные эксперименты производились с применением двухмерных моделей, что считалось современным уровнем техники, однако возрастающая сложность геометрических параметров деталей с сохранением тенденции к достижению высокой точности результатов делает использование трехмерного моделирования технологических процессов все более востребованным. Ngaile и Altan [131] отмечают, что с возникающей потребностью в использовании трехмерных моделей при моделировании операций ОМД совершенствуются компьютерные алгоритмы и разрабатываются наиболее удобные пользовательские интерфейсы, делая моделирование более практичным.

В течение последних лет разработано множество программ для моделирования операций ОМД на основе МКЭ, использующих как

двухмерные, так и трехмерные модели. Примерами таких программ являются QFORM, ABAQUS, Simufact Forming, FORGE, ANSYS и др.

Qform 2D/3D – программный комплекс, ключевой особенностью которого, в отличие от вышеперечисленных программ, является относительно низкая стоимость лицензии и ориентация ее технической поддержки на русскоязычных пользователей, так как продукт представляет собой российскую разработку. Среди прочих преимуществ программы можно выделить использование всех ядер процессора компьютера, что обеспечивает высокую скорость расчетов процессов ОМД, а также интуитивно понятный интерфейс [132, 133].

К недостаткам программного комплекса при сравнении с DEFORM можно отнести следующее:

- относительно ограниченное моделирование кинематики, особенно при настройке множества одновременно работающих инструментов;
- при моделировании сложных процессов, связанных с вращением инструмента, Qform показывает более низкую точность расчетов;
- более узкий спектр моделей материалов и относительно ограниченные возможности постобработки данных пользователем, что важно для исследований.

ABAQUS, разработанный компанией Dassault Systemes, является программным комплексом, способным решать сложные нелинейные задачи, включая процессы деформирования. Он применяется в различных высокотехнологичных отраслях, таких как оборонная промышленность, автомобилестроение, авиастроение и др., и занимает лидирующие позиции в использовании при нелинейном анализе. Кроме этого, основные преимущества ABAQUS заключаются в способности запускать и рассчитывать масштабные модели без значительных потерь в скорости, гибкости настройки программы пользователями под свои нужды.

Однако при решении задач с большими пластическими деформациями ABAQUS может быть более медленным по сравнению с DEFORM. Также к

недостаткам можно отнести более высокие требования к знаниям в области МКЭ, отсутствие готовых шаблонов, например, для прокатки или штамповки, и данные модели необходимо строить с самого начала [134, 135].

Компания Hexagon владеет программным продуктом Simufact Forming. Отличительной особенностью данного пакета является комплект двух решателей. Явный решатель MSC.Dytran моделирует высокоскоростные процессы, например ковку на молоте, а неявный решатель MSC.Marc специализируется на сложных квазистатических задачах, таких как прессование, штамповка, вальцовка. Такая комбинация выгодна при оптимизации расчетов и положительно влияет на скорость решения задач.

Основные преимущества программы:

интерфейс адаптирован для технолога и не требует наличия глубоких знаний МКЭ;

относительно высокая скорость и точность расчетов. Используется метод конечных объемов для оперативных решений задач горячей штамповки;

широкие возможности: Simufact Forming способен моделировать как отдельные процессы ОМД, так и целые технологические цепочки. Кроме этого, программа позволяет моделировать индукционный нагрев и термообработку. Simufact Forming поддерживает автоматически перестраиваемые гексаэдральные конечные элементы, которые зачастую дают наибольшую точность расчетов, что является характерным отличием от DEFORM, использующем преимущественно тетраэдральную сетку. Архитектура Simufact Forming, базирующаяся на двух решателях, приводит к необходимости их правильного выбора, иначе расчеты не будут корректными. Среди прочих недостатков можно выделить сложность извлечения конкретных данных результатов моделирования, относительно дорогая система лицензирования, а также нестабильность работы решателей при решении особо сложных задач [132, 136, 137].

Автоматически перестраиваемой гексаэдральной сеткой, моделированием всего технологического процесса, включая термообработку,

понятным интерфейсом, ориентированным на технолога, также обладает программа FORGE, созданная компанией Transvalor. Данный программный комплекс позволяет с высокой точностью рассчитывать сложные процессы ОМД, такие как прокатка, вальцовка. К не менее важным преимуществам можно отнести наличие уникальной библиотеки кинематики, возможности прогноза шумового загрязнения в процессе моделированияковки на молотах, благодаря анализу акустических волн.

Однако для расчетов нестандартных научных задач FORGE зачастую уступает DEFORM в стабильности процесса моделирования и предсказуемости результатов. Стоит отметить и относительно высокую стоимость – лицензия на DEFORM в значительной степени дешевле [138-140].

Вместе с программным комплексом ABAQUS пакет ANSYS от одноименной компании ANSYS Inc. является платформой для системного инжиниринга, способной решать значительное количество инженерных задач, включая динамику жидкостей и газов, акустику, теплопередачу и другие. Модули генерации конечно-элементной сетки обладают возможностями высококачественно обрабатывать сложные геометрии объектов моделирования. Благодаря совместимости ANSYS с CAD системами возможен импорт объектов исследования из внушительного ряда CAD – программ без утраты качества.

Но из-за универсальности применения ANSYS отсутствует оптимизация решателей под задачи ОМД, в отличии от DEFORM – специализированного комплекса. Из этого следуют такие недостатки, как более низкая скорость расчетов, отсутствие шаблонов построения исходных моделей, относительно тяжелая настройка параметров и более высокие требования к пониманию нелинейного анализа. Кроме этого, программный продукт ANSYS требователен к ресурсам компьютера. Необходимы относительно более мощные и современные устройства системного блока для эффективной работы [135, 141].

Исходя из поставленных целей диссертации для проведения

компьютерного моделирования принято решение использовать программный комплекс DEFORM, так как он способен обеспечить высокую точность расчетов и достоверность результатов. Пакет предоставляет широкие возможности в выборе моделей пластического материала, моделировании различных видов движения (в том числе с вращающимся инструментом). Большая вариативность осуществляется в том числе за счет самостоятельной генерации конечно-элементной сетки. Также, как и ANSYS у DEFORM есть возможность импортирования объектов исследования из большинства CAD – программ. Еще одним преимуществом, выделяющим программный комплекс среди конкурентов, является способность оперативно обрабатывать длинные технологические цепочки, при этом после окончания расчета первой операции система должна переключаться на следующую операцию и учитывать при этом данные (температуру, размер зерна, степень деформации и т.д.) предыдущей операции с автоматическим позиционированием заготовки относительно инструмента, либо наоборот. Более того при моделировании подобных операций отсутствует необходимость создавать исследование заново, а необходимо лишь внести корректировки в ранее созданный проект, изменяя в нем только геометрические и реологические модели инструмента и заготовки [132, 142, 143].

DEFORM зарекомендовал себя как лидер в области моделирования процессов ОМД, набравший известность и заслуживший уважение в научно-технической среде. Немаловажным обстоятельством является наличие лицензии у ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» на использование данного пакета.

1.5 Выводы по главе 1

1. При разработке технологии производства поковок, относящихся к

группе удлиненных в плане, в значительной степени уделяется внимание повышению КИМ, стойкости штампового инструмента и производительности, что достигается, в том числе, предварительным изменением формы и размеров исходной заготовки заготовительными операциями ГОШ перед окончательной штамповкой.

2. Проанализированы разные способы предварительного профилирования заготовок перед окончательным формоизменением, каждый из которых характеризуется определенными преимуществами и недостатками. К ним относятся использование подкатных, протяжных, гибочно-формовочных ручьев штампа молотовой штамповки, применение машин поперечной прокатки, реализация проката периодического профиля в качестве исходной заготовки, высадка утолщений на ГКМ, а также вальцовка на ковочных вальцах.

3. Способам предварительного формоизменения горячей вальцовкой посвящены работы, в которых рассматривают технологические расчеты, проектирование машин и систем оснастки, исследования кинематики течения металла в процессе операции, а также его напряженно-деформированного состояния, в частности, с помощью компьютерного моделирования. Однако отсутствует сравнительный анализ технологий предварительного профилирования в секторах-штампах в ручьях постоянного и переменного сечения с точки зрения эффективности. Кроме того, наблюдается ограниченный объем научно-технической информации о технологиях окончательного формоизменения на ковочных вальцах.

4. В качестве детали-представителя выбран гаечный ключ, поковка которого относится к группе удлиненных в плане с контуром сложного профиля. Существует множество способов изготовления гаечных ключей, каждый из которых отличается не только применяемым оборудованием в технологической линии КШП, но и формой исходной заготовки.

5. В результате проведенного анализа программных комплексов для компьютерного моделирования процессов ОМД на основе МКЭ принято

решение использовать продукт DEFORM, так как он является наиболее подходящим под задачи диссертации, благодаря широкому ассортименту моделей пластического материала, способности моделировать сложные траектории движения инструмента, в том числе его вращение, обеспечению высокой точности расчетов и наличию лицензии у ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА ГАЕЧНЫХ КЛЮЧЕЙ МЕТОДАМИ ГОШ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВАЛЬЦОВКИ

2.1 Современные и перспективные технологии производства удлиненных поковок, ориентированных на использование горячей вальцовки на ковочных вальцах

Ковочные вальцы зачастую используют в качестве заготовительного оборудования, основная функция которых состоит в предварительном профилировании заготовок перед штамповкой. В таком случае основным оборудованием кузнечно-штамповочной линии являются штамповые молоты или КГШП. Известно [26, 48, 49, 51, 54], что вальцовка способствует ресурсосбережению и положительно сказывается на увеличении стойкости штампов, но из-за отсутствия внушительной разницы в показателях при сравнении с технологиями ГОШ без предварительного профилирования остается актуальной в условиях крупносерийного или массового производства.

Использование КГШП привело к существенному повышению эффективности производства, в том числе в комбинации с индукционными нагревателями и ковочными вальцами.

Согласно источникам [3, 8], штамповка на КГШП по сравнению с молотами обладает следующими преимуществами:

1. Благодаря более жесткой конструкции (наличие направляющих) обеспечивается точное совпадение верхней и нижней части штампа, что минимизирует смещение поковок вдоль плоскости разъема, а постоянство хода пресса гарантирует высокую точность и повторяемость размеров поковок по высоте;
2. Наличие у штампа верхнего и нижнего выталкивателей дает

возможность уменьшения припусков и штамповочных уклонов при разработке поковки, что приводит к экономии металла;

3. Коэффициент полезного действия (КПД) молота ниже, чем у КГШП в 2–4 раза;

4. Конструкция КГШП обеспечивает безударный характер работы с наименьшим шумом и вибрацией, что улучшает условия труда рабочих и дает возможность установки оборудования в производственных зданиях облегченной постройки;

5. Процесс штамповки на КГШП не требует регулировки энергии удара, что упрощает работу, а деформация металла в каждом ручье за один ход обеспечивает относительно высокую производительность;

6. Существует возможность полной автоматизации штамповки при интегрировании систем автоматического перемещения заготовки от устройства к устройству и перекладки в ручьях штампа

7. Надежность КГШП выше, по сравнению с молотами, для которых характерны частые и непредсказуемые поломки штоков.

Недостатки:

1. Жесткий ход движения ползуна исключает наличие подкатного и протяжного ручья у штампа КГШП, что ограничивает применение оборудования;

2. Повышенные требования к очистке заготовок от окалины, которые связаны с деформированием за один ход прессы;

3. Штампы имеют более сложную конструкцию, также возможны трудности в регулировке;

4. Стоимость КГШП значительно выше стоимости молота эквивалентной мощности;

5. Возможность заклинивания и поломки прессы при нижнем положении ползуна в случае перегрузки из-за недопустимых отклонений температуры или объема заготовок от их номинальных значений.

Таким образом, предлагается более эффективная технология, которая

реализуется на производственной линии, содержащей: склад материалов, заготовительный участок, склад заготовок, участок горячей штамповки, участок термообработки поковок, участок очистки от окалины, участок доделочных операций (обрезка облоя) и склад готовых поковок.

Вариант организации производственного участка горячей объемной штамповки показан на рисунке 2.1.

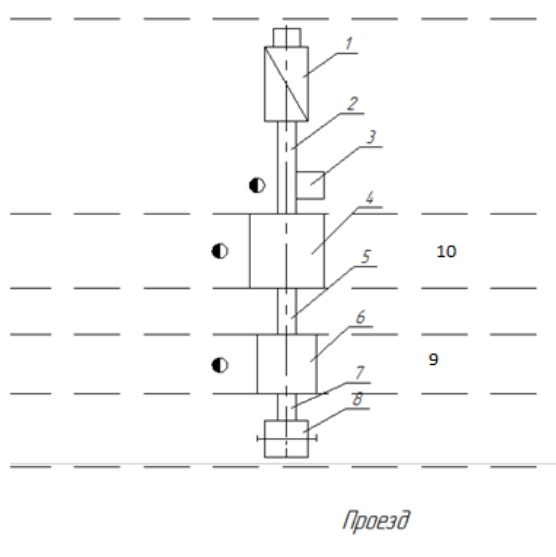


Рисунок 2.1. Схематичное изображение производственной линии участка горячей объёмной штамповки на базе КГШП

Технологический процесс состоит из следующих этапов. Штучная заготовка, предварительно отрезанная на сортовых ножницах, подается в загрузочное устройство индукционного нагревателя 1, где нагревается до температур горячей обработки. Далее поступает на транспортер 2, который передает ее на консольные ковочные вальцы 3, после чего профилированная заготовка направляется непосредственно на штамп КГШП 4. Рабочий, окончив штамповку, откидывает поковку на транспортер 5, который подает ее к обрезному прессу 6. После обрезки поковка с помощью склиза 7 сбрасывается в металлический контейнер 8, а отходы в виде облоя поступают на транспортер, расположенный в траншее 9 параллельно фундаменту 10, на который установлен КГШП.

Главным элементом оснастки рабочих валов ковочных вальцов

являются штампы кольцевого или секторного исполнения [52, 59] (в зависимости от длины вальцуемого участка и диаметра валов), на периферийной поверхности которых располагается ручей. Исходя из формы и размерных параметров выпускаемой продукции, а также возможностей производства в качестве заготовительной операции горячая вальцовка может выполняться в ручьях постоянного или переменного сечения, в частности, первый вариант целесообразен из-за относительной простоты технологических расчетов и достаточно незначительных перепадов объема металла на участках поковки. Технологическая подготовка операции формоизменения штучных заготовок в ручьях переменного сечения является более сложной задачей, так как включает в себя высокую точность выполнения комплексных расчетов с последующим компьютерным моделированием в специализированных программах, основанных на МКЭ. Однако, несмотря на непростую технологическую подготовку, поковка получается с равномерным распределением облоя в плоскости разъема штампа (это связано с высокой точностью перетекания объема металла на участках ручья), а также сравнительно высоким КИМ, что влияет на конечную себестоимость изделия.

Кроме применения ковочных вальцов в качестве специального оборудования для предварительного профилирования под штамповку, горячую вальцовку могут использовать и для конечного формоизменения мелких и средних поковок переменного сечения. Такую вальцовку называют штамповочной [48, 51], где вместо ручьев простой конфигурации деформирование осуществляется в фасонных ручьях – гравюрах. В этом случае технологический процесс исключает использование молотов или прессов, что значительно удешевляет производство и увеличивает производительность. Комплексная подготовка техпроцесса на базе штамповочной вальцовки является относительно непростой, кроме того, к поковкам предъявляются высокие требования по форме и размерам. Например, в процессе вальцовки не осесимметричных деталей велика

вероятность возникновения областей недоштамповки, либо сильного искривления оси, практически не подлежащей правке и калибровке. Также необходимо учитывать фактор пружинения (упругие деформации осей валов ковочных вальцов при формоизменении заготовки), который, как правило, основан на эмпирических данных и существенно зависит от технических характеристик оборудования. Стоит отметить и влияние размерных параметров длины и толщины детали. Чем больше диаметр рабочего вала ковочных вальцов, тем меньше вероятности возникновения «сабельности» (искривления) поковки и использования дальнейшей калибровки. Толщина заготовки оказывает влияние на значения опережения металла в процессе вальцовки, что увеличивает риск возникновения областей не заполнения гравюры. Исходя из вышеперечисленного, для технологического процесса штамповочной вальцовки предпочтительны осесимметричные детали или изделия небольшой длины и высоты по отношению к размеру рабочих валов ковочных вальцов, к которым не предъявляются высокие требования точности.

Кроме продольной вальцовки (очаг деформации перемещается вдоль оси заготовки) применяют поперечную вальцовку, где деформирование происходит поперек оси заготовки. Способом поперечной вальцовки можно обеспечить окончательную штамповку поковки, причем как осесимметричных, так и асимметричных деталей в плоскости воздействия инструмента на заготовку без искривления их осей. При этом существуют недостатки, вызванные ограничениями длины заготовки, длиной валов и высоты поковки, с увеличением которой растет опережение металла и, как следствие, вероятность не полного заполнения гравюры.

В настоящее время имеющаяся научно-техническая литература обладает ограниченным объемом сведений о данном способе горячей вальцовки. Наблюдается дефицит информации о конструктивных решениях для крепления штампов поперечной вальцовки, а также об исследованиях схемы напряженно-деформированного состояния металла поковки.

2.2 Разработка технологии горячей вальцовки секторами-штампами, имеющими ручьи постоянного сечения

Процесс горячей вальцовки в качестве заготовительной операции перед штамповкой на КГШП, является начальным этапом комплексной подготовки технологии изготовления удлиненных в плане поковок, к группе которых относятся гаечные ключи [144]. Ее реализация включает в себя: выбор детали-представителя, разработку чертежа поковки с назначением напусков, припусков и допусков, построение эпюры сечений и диаметров, определение размеров исходной заготовки, выбор системы калибров с последующим проектированием вальцовочных штампов под использование технологии на выбранном оборудовании. Технологическая подготовка горячей вальцовки в ручьях постоянного сечения осуществлялась по рекомендациям технической литературы [3, 48].

В качестве объекта производства, используемого для дальнейшей технологической подготовки и исследований, выбран рожковый двухсторонний гаечный ключ с открытым зевом 17×19 мм, который является одним из наиболее применяемых в границах номенклатуры от $2,5 \times 3,2$ мм до 75×80 мм. Общие технические условия для гаечных ключей указаны в ГОСТ 2838-80 [104], а геометрические параметры и размерные значения разрабатываются в соответствии с ГОСТ 2839-80 [105]. Чертеж детали-представителя изображен на рисунке 2.2. В качестве материала гаечного ключа стандартом [104] назначается конструкционная сталь марки 40ХФА (ГОСТ 4543-2016), который является основным для размерностей зева до 36 мм [145]. Сталь используется в машиностроении для изготовления деталей с повышенной износостойкостью, из нее изготавливают недорогие ключи с характеристиками, удовлетворяющими всем необходимым требованиям пользователей. Механические и физические свойства приведены в источнике [146]:

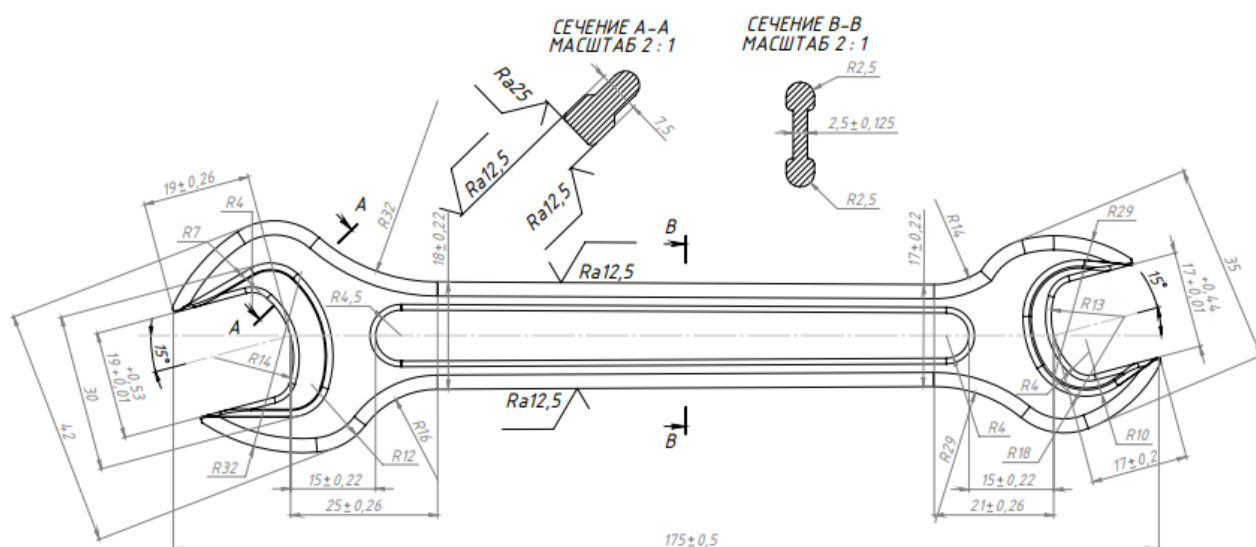


Рисунок 2.2. Чертеж детали «гаечный ключ»

Удельный вес: 7810 кг/м^3 ;

Термообработка: Закалка и отпуск;

Твердость материала: $\text{HB } 10^{-1} = 241 \text{ МПа}$;

Температура горячей обработки °C: начала 1250, конца 860–800.

2.2.1 Разработка чертежа поковки

Чертёж поковки выполняется по чертежу детали (см. рисунок 2.2), руководствуясь указаниями ГОСТ 7505-89 и рекомендациями учебной и справочной литературы [3, 147]. Разработка начинается с определения конструктивно-технологических характеристик поковки: расчетной массы металла; группы стали М, степени сложности С, класса точности Т и конфигурации поверхности разъёма штампа.

В качестве материала заготовки используется легированная конструкционная сталь с содержанием углерода, соответствующим группе М3.

Масса поковки расчетная вычисляется по формуле:

$$M_{\text{п.р.}} = M_{\text{д}} \times K_{\text{р}}, \quad (2.1)$$

где M_d – масса детали, равная 0,12 кг, K_p – расчётный коэффициент, устанавливаемый в зависимости от конфигурации поковки. В данном случае, поковка удлиненной формы, поэтому $K_p = 1,3$. $M_{п.р.} = 0,16$ кг.

Степень сложности C определяется как отношение расчетной массы поковки ($M_{п.р.} = 0,16$ кг) к массе геометрической фигуры, в которую вписывается поковка M_{ϕ} . В данном случае такой фигурой является параллелепипед.

Так как плотность легированной стали 40ХФА $\rho = 7810$ кг/м³ и допускается увеличение линейных размеров детали в 1,05 раза, $M_{\phi} = 0,52$ кг, тогда $\frac{M_{п.р.}}{M_{\phi}} = 0,308$. Принимаем степень сложности $C3$.

Поковка изготавливается с использованием ковочных валцов и последующей штамповкой на КГШП, поэтому выбирается класс точности Т4.

Исходный индекс, определяемый по таблице ГОСТ 7505-89, равен 11.

Припуски на механическую обработку включают в себя основные и дополнительные припуски. Основные припуски устанавливают по таблице ГОСТ 7505-89 на каждую сторону номинального размера детали в зависимости от исходного индекса, линейных размеров по толщине или длине и шероховатости поверхности детали.

Шероховатость наружных поверхностей зевов и области рукоятки принимаем $Ra\ 12,5$, а внутренних поверхностей губок $Ra\ 2,5$.

Так как толщина детали до 25 мм, принимаем припуск равным 1,5 мм; длина детали 175 мм, принимаем припуск равным 1,8 мм;

Ширина в области рукоятки 18 и 17 мм, принимаем припуск равным 1,5 мм.

Определяем номинальные размеры поковки. Толщина в области губок $7,5 + (1,5 + 0,1 + 0,5) \times 2 = 11,7$ мм; толщина рукоятки $5 + (1,5 + 0,1 + 0,5) \times 2 = 9,2$ мм; ширина и глубина открытых зевов ключа принимается 18 мм и 16 мм; длина $175 + (1,8 + 0,1 + 0,5) = 177,4$ мм.

Допускаемые отклонения размеров толщины $11,5^{+1,1}_{-0,5}$; длины $177,4^{+1,6}_{-0,9}$.

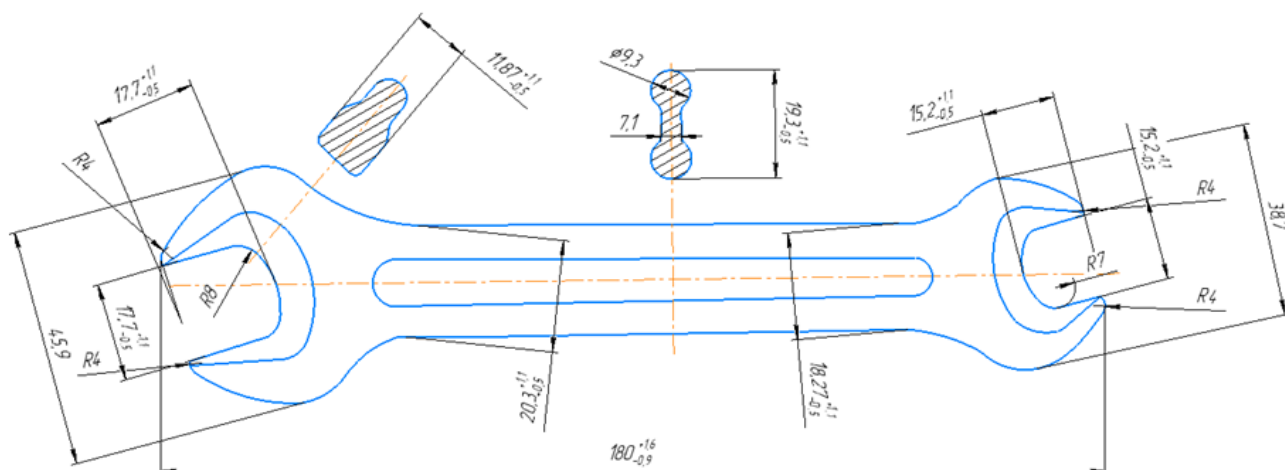


Рисунок 2.4. Чертеж поковки с размерами в горячем состоянии

На чертеже поковки для изготовления штампа, допуски на поковку не указывают, а контуры чистовой детали не наносят.

2.2.2 Обоснование выбора оборудования для операции вальцовки

Следуя данным источников [3, 51, 52], ковочные вальцы выпускают закрытого и консольного типа, а также для поперечно-клиновой вальцовки. Консольные открытые и двухопорные закрытые ковочные вальцы являются наиболее распространенными машинами. Типы вальцов и их применение приведены в таблице 2.1 [3].

Таблица 2.1

Типы вальцов и их применение

Тип	Особенности конструкции и применение
Одноклетьевые. Для формовоч- ной вальцовки	Двухопорные (закрытые) Они имеют до четырех или более ручьев на валках (или в секторах – штампах). Длина деформируемой части заготовок составляет не более $\frac{1}{2}$ длины расчетной окружности сектора – штампа, при нарезании ручьев в валках – не более длины расчетной окружности минус длина рабочей области заготовки.

Окончание таблицы 2.1

Тип	Особенности конструкции и применение
Одноклетьевые. Для штамповочной вальцовки	Консольные Они имеют большой диаметр валков, как правило, с установкой сменных секторов – штампов. По длине барабана валка выполняется один или два установочных ручья для секторов, которые устанавливаются не по всей окружности, а только на ее части: на одном или двух противоположных участках его длины.
Одноклетьевые для формовоч- ной вальцовки	На ковочных вальцах (К.В.) имеются сменные валки – втулки с двумя ручьями или набором колец. Штампы, установленные на кольцах, могут быть секторными штампами. Длина деформируемой части заготовок составляет до $\frac{3}{4}$ окружности ручья штампа.
Двухклетьевые для непрерыв- ной формовоч- ной вальцовки	К.В. имеют две пары валков, расположенных под углом 90°. Передача заготовки с одной пары валков на другую (от клетки к клетке) осуществляется самими валками. Используются в крупносерийном и массовом производстве
Двух-, трех-, и многоклетьевые для последова- тельной формовочной вальцовки	К.В. имеют две, три или более (в настоящее время до девяти) клеток, расположенных под углом 90°. Нагретая заготовка последовательно подается на валки первого и других клеток с помощью толкателя или специального толкающего устройства. Используются в крупносерийном и массовом производстве, в том числе в автоматических линиях

Закрытые ковочные вальцы. В данном оборудовании рабочий инструмент (сектор-штамп) устанавливается на валы, которые расположены между двумя опорами. Такая конструкция обеспечивает большую жесткость за счет чего формоизменение заготовок можно производить с высокой точностью, однако компоновка вызывает затруднения при замене инструмента, поэтому экономически целесообразно использовать оборудование в крупносерийном и массовом производстве.

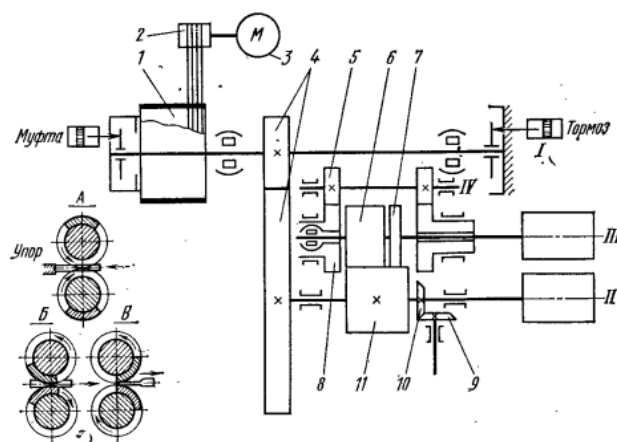
Консольные ковочные вальцы от машин закрытого типа отличаются отсутствием одной опоры, благодаря чему металлоемкость и стоимость оборудования существенно ниже и обеспечивается простота смены секторов-штампов. Главным недостатком консольных ковочных вальцов является их низкая жесткость, которая частично компенсируется использованием специальных стяжек, но их использование для прецизионной вальцовки в большинстве технологий невозможно.

Для исследования операции вальцовки поковки типа «гаечный ключ», не требующей высокой размерной точности, выбраны консольные ковочные вальцы модели СА1335 (рисунок 2.5).

Данное оборудование выпускалось в соответствии с ГОСТ 16434 – 87 [148], подходит под категорию одноклетевых ковочных вальцов с диаметром вальцующих секторов (межосевое расстояние) от 125 — до 400 мм и с номинальной силой от 125 кН до 1 МН, предприятием ООО «ВОРОНЕЖПРЕСС им. М.И. Калинина» [149].



а)



б)

Рисунок 2.5. Внешний вид (а) и кинематическая схема (б) ковочных вальцов консольного типа

Согласно кинематической схеме (рисунок 2.5, б) работа машины осуществляется следующим образом: крутящий момент от электродвигателя 3 передается на маховик 1 через клиноременную передачу 2 со встроенной в нее пневматической фрикционной муфтой, а затем на вал, откуда он сообщается с нижним рабочим валом, посредством шестерни 4. Этот вал соединен парой идентичных шестерен 6 и 11 с верхним рабочим валом III, что обеспечивает точное соответствие углов поворота обоих валов. Это обстоятельство чрезвычайно важно, так как строго выполняется условие равного качения инструмента относительно друг друга.

На вальцах предусмотрена регулировка расстояния между верхним и

нижним рабочими валами. Это делается путем поворота эксцентриковых втулок 8, которые изменяют вертикальное положение оси верхнего вала. Это необходимо для компенсации неточности изготовления штамповочного инструмента и возможности его переточки по мере износа. Втулки 8 имеют зубчатые венцы на консольной части, которые входят в зацепление с шестернями 5, сопряженными с валом IV, проворачивание которого осуществляют вручную.

Привод диска бесконтактного концевого выключателя (для обеспечения остановки валов вальцов в определенном положении) осуществляется от вала 11 через пару конических шестерен 9 и 10.

Изменение расстояния между валами приводит к изменению бокового зазора между зубьями шестерен 6 и 11 на верхнем и нижнем валах. Для обеспечения безударной работы зубчатого зацепления с увеличенным боковым зазором предусмотрено дополнительное зубчатое колесо 7, оснащенное специальными пружинами для компенсации бокового зазора. Вальцы управляются с помощью педали.

Технические параметры ковочных вальцов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Техническая характеристика ковочных вальцов модели СА1335

Наименование параметров		Данные
		СА1335
Номинальное межосевое расстояние, мм		320
Номинальная сила, кН (тс)		800(80)
Посадочные места под инструмент, мм	диаметр	180 ^{-0,029}
	длина	280±2
Частота вращения вала, не менее, с ⁻¹ (об/мин)		1,08 (65)
Диаметр исходной заготовки, не более, мм		95
Величина регулировки межосевого расстояния, мм		±3
Мощность электродвигателя главного привода, кВт		37

Окончание таблицы 2.2

Наименование параметров		Данные
		СА1335
Габаритные размеры вальцов, мм	Длина	2590
	Ширина	2040
Высота вальцов над уровнем пола, мм		2130
Масса, кг		8800

Управление вальцами может осуществляться в режиме нажатия, необходимого для ввода в эксплуатацию, а также в непрерывном и однократном режимах. Вальцы имеют реверс рабочих валов.

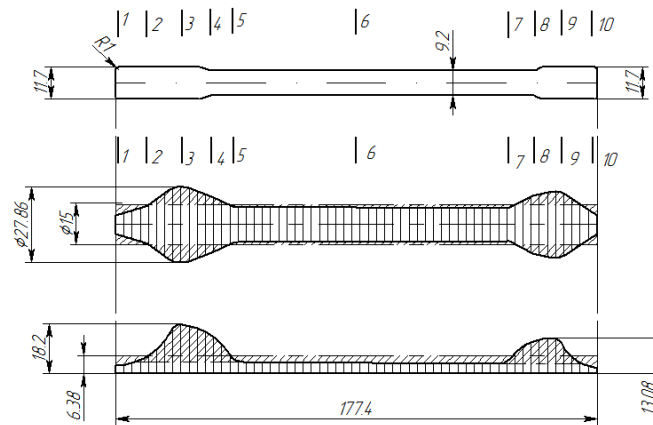
2.2.3 Этапы определения формы и размеров исходной заготовки

Профилированную поковку проектируют на основании построенной эпюры сечений вальцованной заготовки, исходя из эпюры сечений расчетной заготовки в соответствии с рекомендациями [3, 48, 51] (рисунок 2.6).

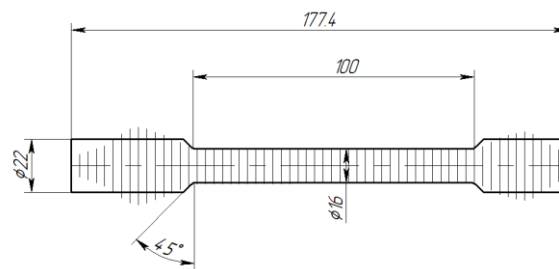
Построение эпюры сечений производится на основе расчетных данных таблицы 2.3. Положение каждого сечения задается путем продления линии секущих плоскостей, нормальных к оси поковки (см. рисунок 2.6). Для каждого сечения на эпюре откладываются отрезки, которые рассчитываются по формуле:

$$h_{\varepsilon} = \frac{S_{\varepsilon}}{M}, \quad (2.2)$$

где M – масштаб, необходимый для удобства построения эпюры. В данном случае разработка эпюры сечений производилась в масштабе 1/30. Это означает, что 1 мм длины ординаты содержит 30 мм² площади поперечного сечения поковки.



а)



б)

Рисунок 2.6. Эпюра сечений: а – расчетной заготовки; б – вальцованной заготовки

Таблица 2.3

Параметры сечений расчетной заготовки (эпюры диаметров)

№ сечения	$S_{э}$, мм ²	$d_{э}$, мм	$h_{э}$, мм	М
1	118,48	12,3	3,95	30
2	173,87	14,9	5,8	
3	608,91	27,86	20,3	
4	313,26	20	10,45	
5	226,53	17	7,55	
6	200,49	16	6,7	
7	215,80	16,6	7,2	
8	395,06	22,46	13,16	
9	485,56	24,9	16,2	
10	94,76	11	3,16	

Расчетный диаметр каждого сечения вычисляется по формуле:

$$d_3 = 1,13 \times \sqrt{S_3} , \quad (2.3)$$

Вальцованный участок, располагающийся в области будущей рукояти поковки гаечного ключа, начинается и заканчивается в местах перехода от головки к стержню и наоборот, а длина его определяется плоскостями 5 и 7.

Средняя площадь поперечного сечения определяется по формуле:

$$S_{\text{ср}} = \frac{V_{\text{п}}}{l_{\text{п.з}}}, \quad (2.4)$$

где $V_{\text{п}}=47511,83 \text{ мм}^3$ – объем поковки; $l_{\text{п.з}}=177,4 \text{ мм}$ – длина профилированной заготовки, определенная по эюре.

$$S_{\text{ср}} = 267,8 \text{ мм}^2.$$

Объем исходной заготовки под вальцовку рассчитывается по формуле:

$$V_3 = V_{\text{п}} \times \frac{(100+\delta_y)}{100}, \quad (2.5)$$

где δ_y – угар металла. При индукционном нагреве $\delta_y = 1\%$.

$$V_3 = 47516,6 \text{ мм}^3.$$

Для обеспечения плавного внедрения секторов-штампов в заготовку, а также окончания процесса вальцовки, на переходных участках предусмотрены углы α_1 и $\alpha_2 = 45^\circ$ и радиусы скругления $R = 5 \text{ мм}$.

Характерной особенностью построения эюры сечений вальцованной заготовки для профилирования в ручьях постоянного сечения является изображение участка вальцовки линиями, параллельными и равноудаленными от оси полуфабриката, которые означают постоянство объема металла в зоне формоизменения. Диаметр такого участка определяется как среднее значение между максимальным и минимальным диаметром области деформирования секторами-штампами.

Размеры исходной заготовки для вальцовки выбираются в соответствии с наибольшей площадью поперечного сечения S_{max} . Принимая во внимание влияние угара и теплового расширения при нагреве на размеры заготовки для вальцовки, можно предположить, что площадь поперечного сечения исходной

заготовки S_3 равна максимальной площади на эпюре сечений S_{max} и при необходимости корректируется, т.е. $S_3 = S_{max}$.

Руководствуясь полученными данными эпюры профилированной заготовки, находим ближайший диаметр Ø22 в источнике ГОСТ 2590-2006 [108] с предельными отклонениями +0,1 мм – верхним и – 0,4 мм – нижним и площадью поперечного сечения 380 мм², тогда:

$$l_3 = \frac{V_3}{S_3}, \quad (2.6)$$

где S_3 – площадь поперечного сечения исходной заготовки; l_3 – длина исходной заготовки. В нашем случае $l_3 = 125$ мм.

Для удержания клещами в процессе вальцовки на одном конце заготовки необходимо дополнительно предусмотреть не обжимаемый участок – клещевину, длина которой составит половину от диаметра исходной заготовки – 11 мм.

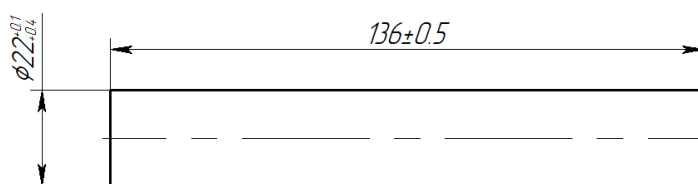


Рисунок 2.7. Чертеж исходной заготовки

Таким образом, общая длина исходной заготовки $l_3 = 136 \pm 0,5$ мм; диаметр заготовки – $D = 22_{-0,4}^{+0,3}$ мм (рисунок 2.7).

2.2.4 Расчет деформации профилированной заготовки и выбор системы ручьев

Номинальное межосевое расстояние между валами $D_0 = 320$ мм, диаметр исходной заготовки $D = 22$ мм с площадью поперечного сечения $S_3 = 380$ мм².

$$\frac{D_0}{\sqrt{S_3}} = 16,4.$$

Общий максимальный коэффициент вытяжки и средний коэффициент вытяжки за каждый пропуск определяется по формулам:

$$\lambda_{\text{общ. макс}} = \frac{S_{\text{э}}}{S_{\text{min}}}, \quad (2.7)$$

где S_{min} – минимальная площадь поперечного сечения на эюре вальцованной заготовки.

$$\lambda_{\text{общ. макс}} = 1,89.$$

Средний коэффициент вытяжки за один проход не должен превышать $\lambda_{\text{ср}} \leq 2$.

Среднее значение коэффициента вытяжки:

$$\lambda_{\text{ср}} = \sqrt{\lambda_{\text{общ. макс}}} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{\text{ср}} = 1,375.$$

Максимальное уширение будет наблюдаться при вальцовке с валами диаметром 320 мм, при температуре заготовки 1250 °С и при коэффициенте трения $\mu = 0,3$.

Размеры заготовки с учетом допусков: $\varnothing 22 \pm 0,5$ мм. Максимальное уширение будет иметь место при $h_0 = 22,5$ мм и $\Delta h = 14$ мм:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta b}{\Delta h} &= \frac{b_0}{h_0} \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0} \right) \times \left(1,27 \mu \sqrt{\frac{\Delta h D_p}{h_0 h_0}} - \frac{\Delta h}{2h_0} \right) = \left(\frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{\text{max}} = \\ &= 1 \left(1 + \frac{14}{22,5} \right) \times \left(1,27 \times 0,3 \sqrt{\frac{14}{22,5} \frac{280}{22,5}} - \frac{14}{2 \times 22,5} \right) = 1,97. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Минимальное уширение будет при диаметре валов 320 мм, $\mu = 0,26$, $h_0 = 21,5$ мм и $\Delta h = 13$ мм.

$$\left(\frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{\text{min}} = 1 \left(1 + \frac{13}{21,5} \right) \times \left(1,27 \times 0,26 \sqrt{\frac{13}{21,5} \frac{260}{21,5}} - \frac{13}{2 \times 21,5} \right) = 0,5; \quad (2.10)$$

где $K_i = 0,78$ – поправочный коэффициент.

Размеры сторон исходной заготовки при круглом сечении равны:

$$h_{0c} = b_{0c} = 0,885d_0; \quad (2.11)$$

$$h_{0c} = b_{0c} = 14,16 \text{ мм.}$$

При выборе системы профилирования заготовок применяется последовательность калибров такая, что первый переход вальцовки

производится в овальном ручье – для разгона металла в будущие головки (зевы) гаечного ключа. Второй переход производится в круглом ручье (рисунок 2.8).

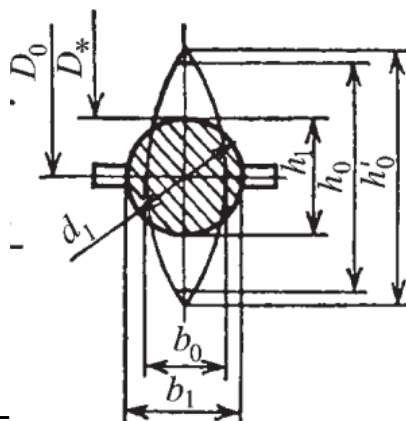


Рисунок 2.8. Последовательность калибров «овал – круг»

В зависимости от используемого калибра при вальцовке в овальном ручье перед профилированием в круглом рекомендуется придерживаться следующих допустимых значений соотношения сторон заготовок $a_0 = 3,5$.

Площадь поперечного сечения овальной полосы (полосы, получаемой в овальном – предшествующем калибре) вычисляется по формуле:

$$S_1 = 0,6h_1^2(2,07 - \delta_1)(a_1 + 0,66\delta_1 - 0,43), \quad (2.12)$$

где δ_1 – степень заполнения овального калибра; h_1 – высота калибра, принимаем 16 мм; a_1 – отношение сторон овальной полосы, принимаем 3,5.

$$S_1 = 620 \text{ мм}^2.$$

2.2.5 Определение размеров овального и круглого калибров

Зазор между секторами-штампами при вальцовке в овальном калибре $s \approx 0,01D_0 = 2,5$ мм, а радиус скругления бурта определяется по формуле:

$$r = 0,2b_k, \quad (2.13)$$

где b_k – ширина калибра, равная 42 мм.

$$r = 8,4 \text{ мм}.$$

Ширина вреза ручья в сектор определяется по формуле:

$$b_{\text{вр}} = (h_1 - s) \sqrt{\frac{4R}{h_1 - s} - 1} = (12 - 2,5) \sqrt{\frac{4 \times 39,75}{12 - 2,5}} = 7,85 \text{ мм. (2.14)}$$

Радиус овального калибра определяется по формуле:

$$R = h_1 \frac{(1 + a^2)}{4}. \quad (2.15)$$

$$R = 12 \frac{(1 + 3,5^2)}{4} = 39,75 \text{ мм.}$$

Для круглого калибра:

$$r \approx 0,2 \times d_1, \quad (2.16)$$

где d_1 – наименьший диаметр профилированной поковки.

$$r = 3,2 \text{ мм, } s = 2,5 \text{ мм.}$$

Параметрические модели и размеры калибров показаны на рисунках 2.9 и 2.10.

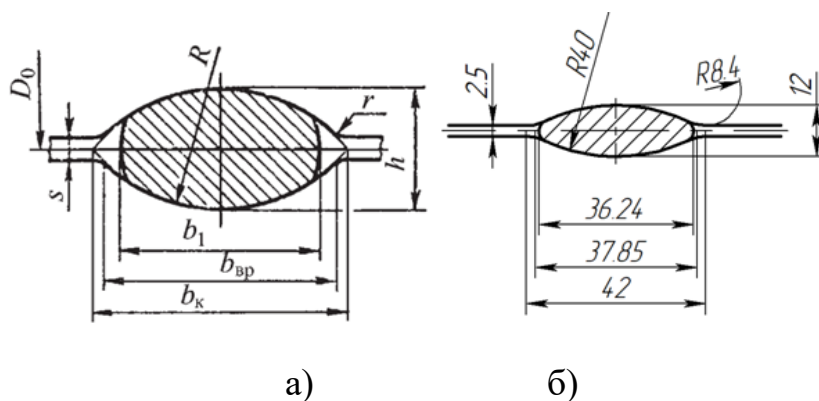


Рисунок 2.9. Размеры овального калибра: а – параметрическая модель; б – размеры ручья

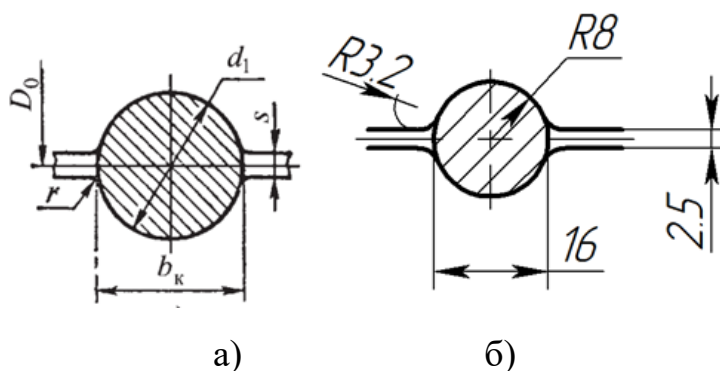


Рисунок 2.10. Размеры круглого калибра: а – параметрическая модель; б – размеры ручья

Конечная длина рабочей поверхности секторов принимается одинаковой у двух переходов и равной длине профилированного участка эпюры вальцовочной заготовки.

2.3 Разработка технологии горячей вальцовки секторами-штампами в ручьях переменного сечения

Технологическая подготовка операции горячей вальцовки в ручьях переменного сечения в значительной степени аналогична этапам разработки процесса профилирования в ручьях постоянного сечения, однако является более сложной, так как конечная профилированная заготовка содержит больше участков обжатия секторами-штампами. Комплексный расчет производился по рекомендациям технической литературы [51], где автор подробно описывает методику расчетов и разработки инструмента.

2.3.1 Выбор детали-представителя для расчетов горячей вальцовки в ручьях переменного сечения

Одним из основополагающих критериев при определении методики расчетов процесса горячей вальцовки в ручьях постоянного или переменного сечения являются формы изделий-представителей. Второй вариант более рационален с точки зрения ресурсосбережения [150] в случае возникновения потребности в изготовлении удлиненной в плане поковки, вдоль оси которой наблюдается значительная неравномерность объема металла из-за чего при вальцовке в ручьях постоянного сечения все равно остаются существенные излишки металла.

Исходя из вышеизложенных соображений, в качестве объекта

производства выбран двухсторонний накладной гаечный ключ с размерами зевов 18×21 мм, чертеж которого разработан в соответствии с ГОСТ 10112-2001 [151] и представлен на рисунке 2.11.

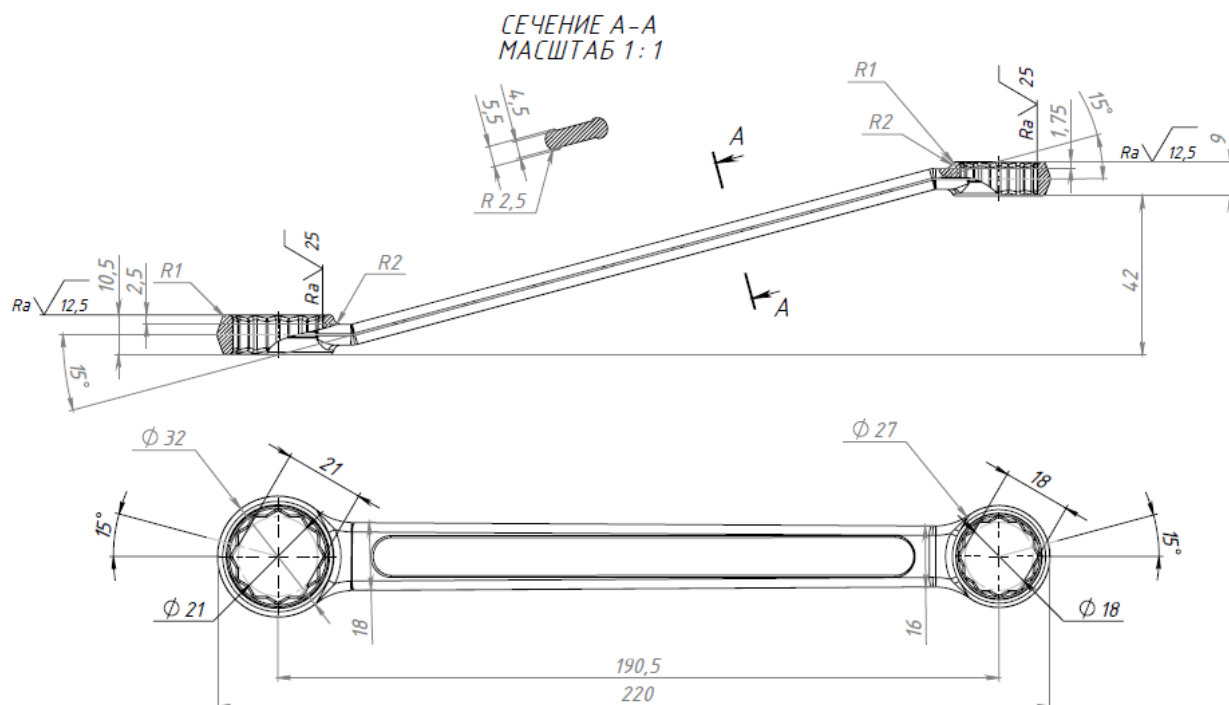


Рисунок 2.11. Чертеж детали «гаечный ключ»

В качестве материала рекомендована та же марка стали 40ХФА, которая назначалась для рожкового гаечного ключа. Кроме этого, для разработки технологии горячей вальцовки в ручьях переменного сечения принято решение выбрать то же оборудование – ковочные вальцы СА1335.

2.3.2 Разработка чертежа поковки для расчетов горячей вальцовки в ручьях переменного сечения

Анализируя расчеты при составлении чертежа поковки рожкового гаечного ключа на основе рекомендаций ГОСТ 7505-89, был сделан вывод о наличии значительного количества лишнего металла преимущественно в области рукояти, что увеличивает процент отходов. Исходя из преимущества вальцовки, заключающегося в постоянстве и точности размеров

полуфабриката, припуски на механическую обработку корректируются назначением класса точности Т2. Так как используется тот же материал, определяется группа стали М3; масса детали $M_d = 0,146$ кг; расчетный коэффициент $K_p = 1,3$.

Тогда масса поковки расчетная $M_{п.р.} = 0,146 \times 1,3 = 0,19$ кг.

Степень сложности $C = \frac{0,19}{0,954} = 0,199$, назначаем С3. По данным таблицы ГОСТ 7505-89 [147] определяем исходный индекс 7.

В таблице 2.4 приведены припуски на механическую обработку, состоящие из основных и дополнительных припусков, а также штамповочных уклонов. Значения припусков назначаются в зависимости от исходного индекса, шероховатости поверхности и номинальных размеров детали.

Размеры поковки и их допускаемые отклонения представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.4

Припуски на механическую обработку

Основные припуски, мм	0,8	
Толщина, мм	Чистота поверхности, Ra	Отклонение от прямолинейности, мм
10,5	12,5	0,2
9		
Диаметр	Чистота поверхности, Ra	
21	25	
18		
Дополнительные припуски, учитывающие смещение поковки на поверхности разъема штампа, мм	0,2	
Отклонение от прямолинейности	0,2 – толщина 10,5; 0,2 – толщина 9	
Отклонение межцентрового расстояния на размер 190,5 мм	0,3	
Штамповый уклон	на наружной поверхности, °	на внутренней поверхности, °
	7	10

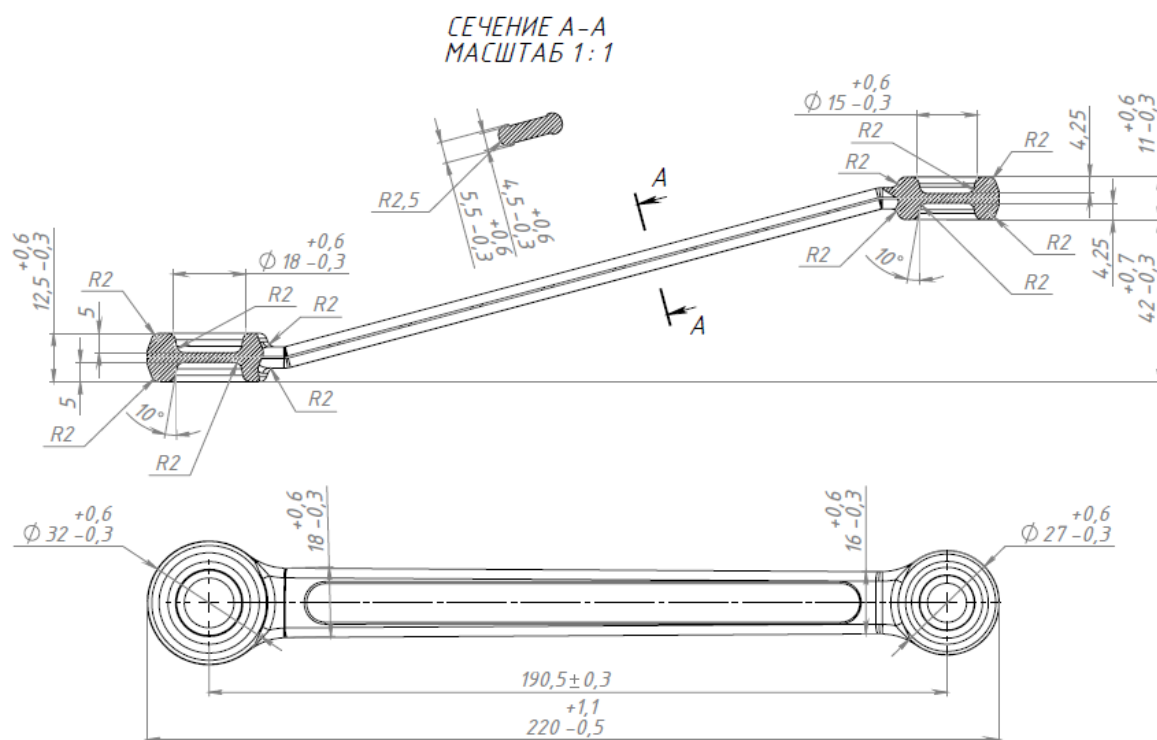
Таблица 2.5

Размеры поковки

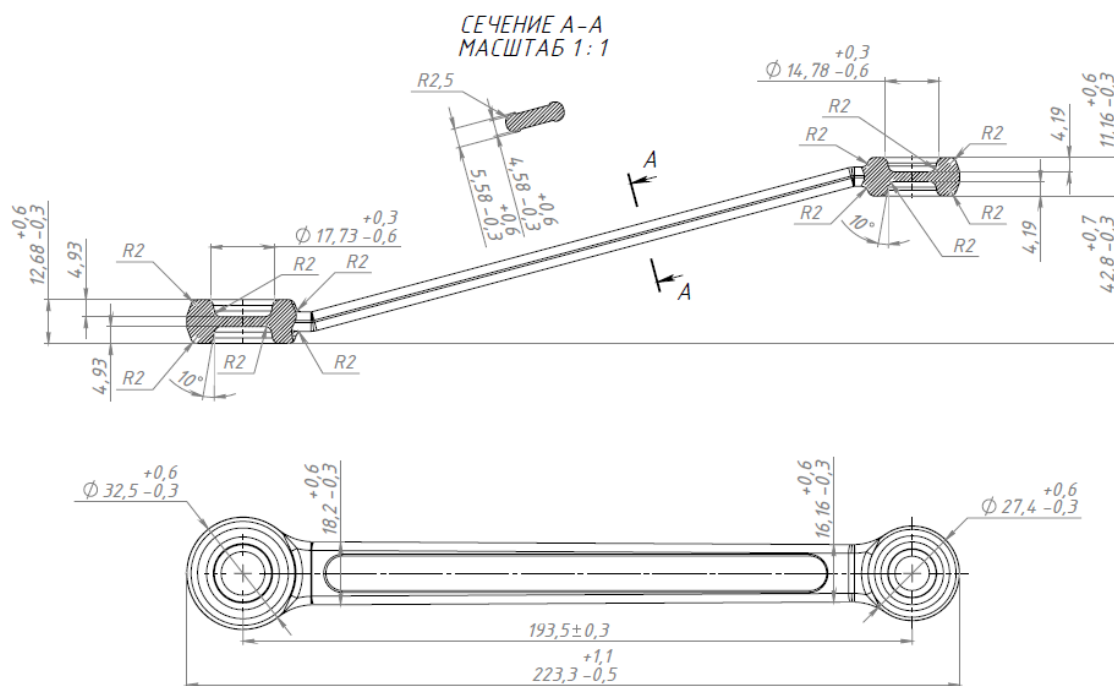
Размер детали, мм	Размер поковки с допускаемыми отклонениями, мм
Толщина 10,5	$12,5^{+0,6}_{-0,3}$
Толщина 9	$11^{+0,6}_{-0,3}$
Диаметр 21	$18^{+0,3}_{-0,6}$
Диаметр 18	$15^{+0,3}_{-0,6}$
Высота 42	$42^{+0,7}_{-0,3}$
Длина 220	$220^{+1,1}_{-0,5}$
Толщина 5,5	$5,5^{+0,6}_{-0,3}$
Ширина 18	$18^{+0,6}_{-0,3}$
Ширина 16	$16^{+0,6}_{-0,3}$

Радиус закругления наружных углов для глубины ручья 10 – 25 мм – 1 мм.

Чертежи поковки гаечного ключа с размерами в холодном состоянии и с учетом температурного расширения 1,5% представлены на рисунке 2.12.



a)



б)

Рисунок 2.12. Чертежи поковки гаечного ключа с размерами в холодном (а) и с размерами в горячем (б) состоянии

Имеем: площадь поковки в плане $S_{\text{п}} = 4365 \text{ мм}^2$; периметр $L_{\text{п}} = 498 \text{ мм}$; Объем $V_{\text{п}} = 262810 \text{ мм}^3$; масса поковки $M_{\text{п}} = 0,194 \text{ кг}$, материал – сталь 40ХФА.

Производство поковки планируется с использованием КГШП. Исходя из этого, определяем площадь поперечного сечения мостика облойной канавки $S_{\text{м}}$ на основании данных таблицы источника [51] по формуле:

$$S_{\text{м}} = h_0 \times l, \quad (2.17)$$

где h_0 – толщина мостика; l – ширина мостика.

$$S_{\text{м}} = 1,5 \times 6 = 9 \text{ мм}^2.$$

Площадь поперечного сечения облоя $S_{\text{о}}$ принимаем равной $2,5 \times S_{\text{м}}$, тогда

$$S_{\text{о}} = 2,5 \times 9 = 22,5 \text{ мм}^2.$$

$S_{\text{з}} = S_{\text{по}} = S_{\text{п}} + 2S_{\text{о}}$, где $S_{\text{з}}$ или $S_{\text{по}}$ – площадь поперечного сечения расчетной заготовки на любом участке; $S_{\text{п}}$ – площадь поперечного сечения поковки.

2.3.3 Эпюра сечений расчетной и вальцованной заготовки, и определение размеров исходной заготовки

Параметры сечений расчетной заготовки и эпюры диаметров приведены в таблице 2.6. Эпюра диаметров и сечений представлена на рисунке 2.12.

Таблица 2.6

Расчет параметров эпюры диаметров и сечений

№ сечения	S_{π}	S_o	$S_{\pi o} = S_{\Sigma}$	d_{Σ}	h_{Σ}	M
1	246,4	22,5	291,4	19,3	29,14	10
2	295,1	22,5	340,1	20,8	34	
3	229,7	22,5	274,7	18,7	27,5	
4	95,6	22,5	140,6	13,4	14,1	
5	80,2	22,5	125,2	12,64	12,5	
6	85	22,5	130	12,9	13	
7	174,3	22,5	219,3	16,7	22	
8	218,4	22,5	263,4	18,4	26,34	
9	182,8	22,5	227,8	17,1	22,8	

Расчет среднего сечения:

Объем облоя определяется по формуле:

$$V_o = \xi S_m (L_{\pi} + \pi \xi l), \quad (2.18)$$

где ξ – коэффициент, учитывающий отклонения фактической площади сечения облоя относительно площади сечения мостика, выбираемого в зависимости от качества профилируемой заготовки и от сложности поковки.

При штамповке на КГШП $\xi = 1,5 - 2,5$.

$$V_o = 8617 \text{ мм}^3.$$

Объем поковки с облом равен:

$$V_{\pi o} = V_{\pi} + V_o = 26281 + 8617 = 34900 \text{ мм}^3.$$

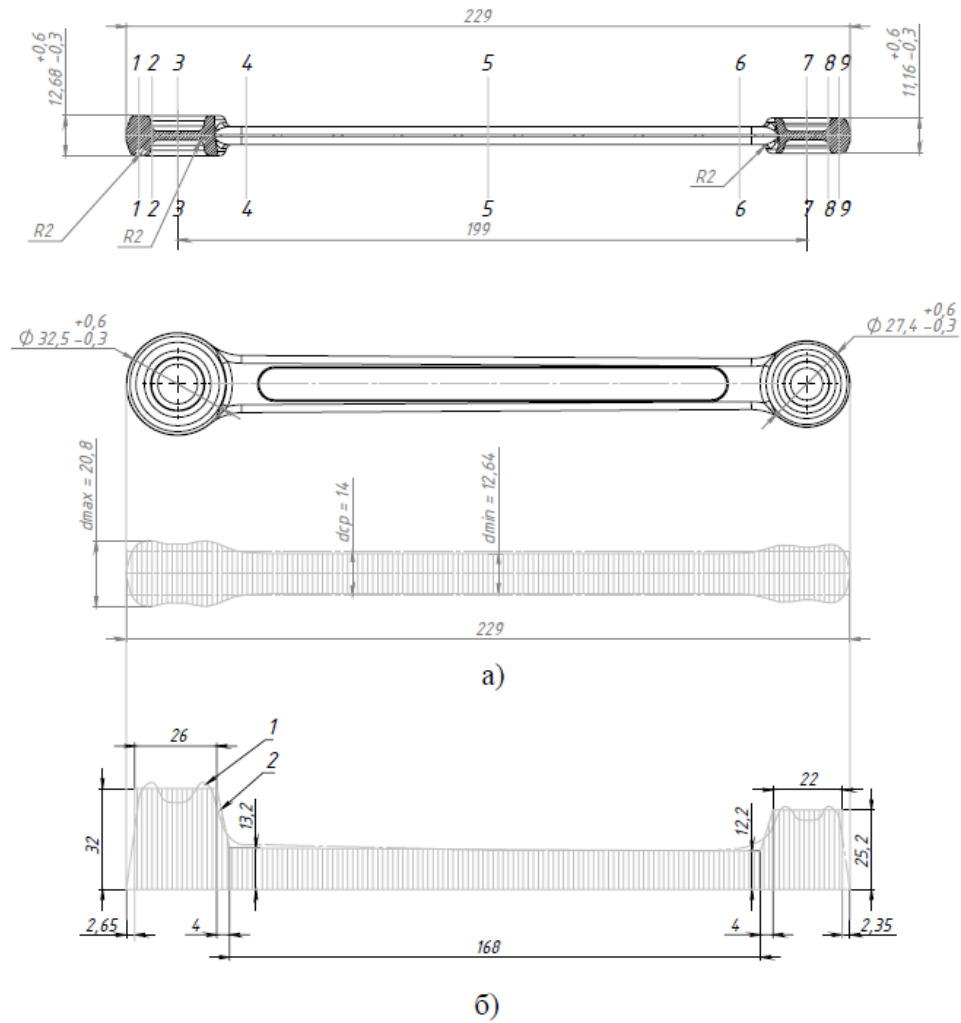


Рисунок 2.12. Эпюры диаметров и сечений: а – развертка поковки гаечного ключа и расчетная заготовка (эпюра диаметров); б – эпюры поперечных сечений (1 – поковки, 2 – вальцованной заготовки)

Площадь сечения средней расчетной заготовки:

$$S_{\text{ср}} = \frac{V_{\text{по}}}{l_3}, \quad (2,19)$$

где l_3 – длина поковки на эпюре сечений.

$$S_{\text{ср}} = \frac{34900}{229} = 152,4 \text{ мм.}$$

Средний диаметр:

$$d_{\text{ср}} = 1,13 \times \sqrt{S_{\text{ср}}}, \quad (2,20)$$

$$d_{\text{ср}} = 1,13 \times \sqrt{152,4} = 14 \text{ мм.}$$

Установление необходимости применения вальцовки.

Коэффициент α и β определяем по формулам:

$$\alpha = \frac{d_{max}}{d_{cp}}; \beta = \frac{l_3}{d_{cp}}, \quad (2.21)$$

$$\alpha = 20,8/14 = 1,49; \beta = 229/14 = 16,36.$$

По диаграмме источника [51] и полученным данным определяем, что находимся в области необходимости применения вальцовки.

Поперечные размеры исходной заготовки определяются по максимальной площади поперечного сечения эпюры с учетом потери металла на угар δ :

$$S'_{max} = \delta \times S_{max}, \quad (2.22)$$

при индукционном нагреве $\delta = 1,006$.

$$S'_{max} = 1,006 \times 315 = 317 \text{ мм}^2.$$

В качестве исходной заготовки выбирается пруток круглого сечения:

$$d'_{зг} = 1,13 \times \sqrt{S'_{max}} = 1,13 \times \sqrt{317} = 20,12 \text{ мм}.$$

Определяем площади поперечных сечений на переходных участках с учетом потери металла на угар.

Участок перехода от большой головки к стержню:

$$S'_1 = \delta \times S_1 = 1,006 \times 132 = 132,8 \text{ мм}^2.$$

Участок перехода от стержня к малой головке:

$$S'_{min} = \delta \times S_{min} = 1,006 \times 122 = 122,7 \text{ мм}^2.$$

Участок малой головки:

$$S'_{мг} = 253,7 \text{ мм}^2;$$

$$d'_{мг} = 1,13 \times \sqrt{253,7} = 18 \text{ мм}.$$

По ГОСТ 2590-2006 выбираем круглую заготовку диаметром $\varnothing 21$ мм в холодном состоянии и $S_{зг} = 346,4 \text{ мм}^2$.

В горячем состоянии $d'_{зг} = 21,3 \text{ мм}$, $S'_{зг} = 351,6 \text{ мм}^2$.

$$V'_{зг} = V_{по} \times \frac{(100+y)}{100}, \quad (2.23)$$

где y – угар металла в %. При индукционном нагреве $y = 0,5 \dots 1$ %.

$$V'_{3\Gamma} = 35075 \text{ мм}^3.$$

Длина заготовки в горячем состоянии:

$$l'_{3\Gamma} = \frac{V'_{3\Gamma}}{S'_{3\Gamma}}, \quad (2.24)$$

$$l'_{3\Gamma} = 101 \text{ мм.}$$

В холодном состоянии:

$$l_{3\Gamma} = 0,985 \times l'_{3\Gamma} = 0,985 \times 101 = 100 \text{ мм.}$$

Для удобства удержания профилированной заготовки клещами принимаем решение увеличить длину исходной заготовки на $0,7D$. С учетом этой корректировки исходная горячая заготовка имеет размеры:

$$l_{3\Gamma} = 115 \text{ мм; } d_{3\Gamma} = 21,3 \text{ мм.}$$

Отношение межосевого расстояния валков к толщине заготовки:

$$\frac{A}{h_0} = \frac{320}{\sqrt{S'_{3\Gamma}}} = 17,1.$$

Общий максимальный коэффициент вытяжки и средний коэффициент вытяжки за каждый пропуск определяется по формулам:

$$\lambda_{\text{общ.мах}} = \frac{S'_{3\Gamma}}{S'_{\min}}, \quad (2.25)$$

$$\lambda_{\text{ср}} = \sqrt{\lambda_{\text{общ.мах}}} = 1,7.$$

Количество пропусков:

$$n = \frac{\lambda_{\text{общ.мах}}}{\lambda_{\text{ср}}}, \quad (2.26)$$

принимаем $n = 2$.

2.3.4 Выбор системы переходов с определением поперечных и продольных размеров профилированной заготовки

Горячая вальцовка будет производиться за два перехода. Выбрана система ручьев «круг – овал – квадрат», которая обеспечивает наилучшую устойчивость и большую вытяжку в процессе операции [3, 48, 51, 53, 57].

Одними из основных параметров, влияющими на процесс вальцовки, являются коэффициент трения и угол захвата валков. Основываясь на экспериментальных исследованиях и опыте предприятий [48, 50-52], известно, что при вальцовке заготовок в овальных ручьях коэффициент трения $\mu = 0,25$; в квадратных ручьях – $\mu = 0,6$. В ходе разработки технологии вальцовки углы захвата между заготовкой и секторами-штампами, как правило, принимают $33\text{--}35^\circ$. Если предусматривать технологические упоры – угол захвата можно увеличить.

Конструирование профилированной заготовки для двух переходов и определение их размеров основывается на данных эпюр сечений и исходной заготовки.

Отношение осей поперечного сечения в конкретном сечении профилированной заготовки:

$$a = \frac{b}{h}. \quad (2.27)$$

Размеры поперечного сечения овала вычисляются по формулам:

$$h_{\text{ов}} = \sqrt{\frac{S_{\text{ов}}}{aq}}; \quad (2.28)$$

$$b_{\text{ов}} = a \times h_{\text{ов}}; \quad (2.29)$$

$$R_{\text{ов}} = \frac{a+1}{4} h_{\text{ов}}, \quad (2.30)$$

где $h_{\text{ов}}$ – высота овального сечения, мм; $b_{\text{ов}}$ – ширина овального сечения, мм; $R_{\text{ов}}$ – радиус овального сечения, мм; коэффициент q определен по графику [51].

Длину участка профилируемой заготовки находят по формуле:

$$l_{\text{уч}} = \frac{V_{\text{уч}}}{S_{\text{ср}}}, \quad (2.31)$$

где объем участка $V_{\text{уч}} = S_{\text{эс}} \times M$; $S_{\text{ср}}$ – средняя площадь; $S_{\text{эс}}$ – площадь переходного участка на эпюре сечений.

Определение поперечных и продольных размеров профилированной заготовки после первого перехода представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7

Определение поперечных и продольных размеров профилированной заготовки после горячей вальцовки в овальном ручье

Параметр	Характерные сечения заготовки			
	Участок перехода от большой головки к стержню	Участок стержня, примыкающий к малой головке	Участок стержня	Участок малой головки
Общий коэффициент вытяжки $\lambda_{\text{общ}}$	$\frac{S'_{32}}{S'_1} = 2,65$	$\frac{S'_{32}}{S'_{\min}} = 2,87$		$\frac{S'_{32}}{S'_{\text{м.г}}} = 1,39$
Отношение осей $a; \lambda$	4,7; 1,5	5,1; 1,7		1,19; 1,16
Площадь поперечного сечения овала, мм ²	$\frac{S'_{32}}{\lambda_1} = 234,4$	$\frac{S'_{32}}{\lambda_2} = 206,8$		$\frac{S'_{32}}{\lambda_3} = 303,1$
Коэффициент q	0,673	0,672		0,752
Размеры поперечного сечения овала $h_{\text{ов}}; b_{\text{ов}}; R_{\text{ов}}$, мм	8,6; 40,4; 49,6	7,8; 39,8; 52,7		18,35; 20,7; 11,1
Длина участка, мм	$l_{\text{п1}} = 3,05$	$l_{\text{п2}} = 2,98$	$l_{\text{с}} = 96,7$	$l_{\text{м.г}} = 18,3$

Второй переход. Размеры поперечного сечения квадрата на профилируемом участке определяют по формулам, показанным на примере участка стержня, примыкающем к большой головке:

$$c = 1,02 \times \sqrt{S'_1}; \quad (2.32)$$

$$r_{\text{кв}} = 0,22 \times c; \quad (2.33)$$

$$h_{\text{кв}} = 1,414 \times c - 0,828 \times r_{\text{к}} , \quad (2.34)$$

где c – сторона квадрата; $r_{\text{кв}}$ – радиус квадрата; $h_{\text{кв}}$ – ширина квадрата по диагонали.

$$c = 11,75 \text{ мм}; r_{\text{кв}} = 2,6 \text{ мм}; h_{\text{кв}} = 14,46 \text{ мм}.$$

На участке стержня, примыкающим к малой головке:

$$c = 11,3 \text{ мм}; r_{\text{кв}} = 2,5 \text{ мм}; h_{\text{кв}} = 14 \text{ мм}.$$

Участок малой головки имеет круглое сечение, где $d = 1,13 \times \sqrt{S'_{\text{мг}}} = 18 \text{ мм}$.

Продольные размеры профилированной заготовки равны горизонтальным участкам на эпюре сечений (см. рисунок 2.12).

Длина большой головки $l_{б.г.} = 36$ мм; длина первого переходного участка $l_{п1} = 4$ мм; длина стержня $l_{с.} = 168$ мм; длина второго переходного участка $l_{п2} = 4$ мм; длина малой головки $l_{м.г.} = 22$ мм.

Чертежи профилированных заготовок после вальцовки в первом и втором переходах представлены на рисунке 2.13.

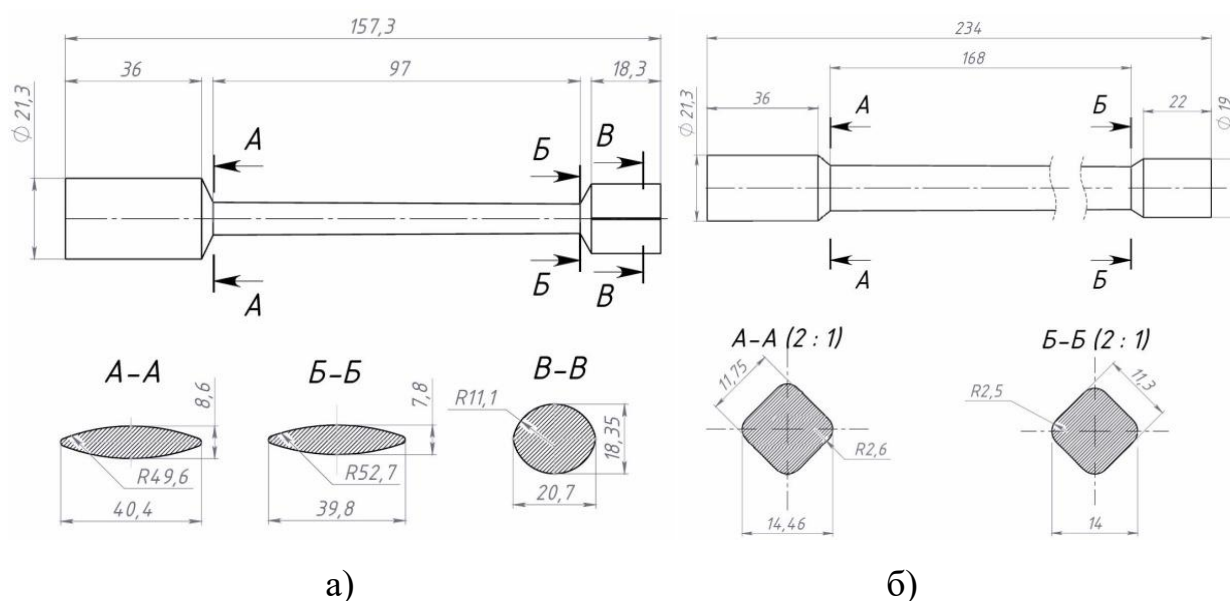


Рисунок 2.13. Форма и размеры заготовки после горячей вальцовки в ручьях переменного сечения: а – первый переход; б – второй переход

2.3.5 Расчет силовых параметров вальцовки

Определим силу вальцовки на разных участках деформирования заготовки секторами-штампами. Воспользуемся методикой расчетов, Атрошенко А. П. [51], которая позволит определить следующие параметры: размеры соответствующей полосы и средней полосы, величину абсолютного обжатия, рабочий радиус валка, длину очага деформации, площадь контактной поверхности в горизонтальной проекции между сектором-штампом и

заготовкой, скорость деформации и удельную силу.

Первый переход. Для участка стержня, примыкающего к малой головке:

$$h_{0c} = b_{0c} = \sqrt{S'_{3г}} = 18,75 \text{ мм.}$$

Размеры соответственной полосы после вальцовки:

$$h_{1c} = \sqrt{\frac{S_{обmin}}{a_1}}; \quad (2.35)$$

$$b_{1c} = a_1 \times h_{1c}. \quad (2.36)$$

Средняя ширина полосы:

$$b_{ср} = \frac{(b_{0c} + b_{1c})}{2}. \quad (2.37)$$

Величина обжатия $\Delta h_c = h_{0c} - h_{1c} = 18,75 - 6,4 = 12,35 \text{ мм.}$

Рабочий радиус определим по формуле:

$$R_p = \frac{(A - h_{1c})}{2}. \quad (2.38)$$

Длина очага деформации – по формуле:

$$l = \sqrt{R_p \Delta h_c}. \quad (2.39)$$

Контактная поверхность – по формуле:

$$S_k = b_{ср} \times l. \quad (2.40)$$

Скорость деформации – по формуле:

$$u = 0,105 \frac{nl}{h_{0c}}, \quad (2.41)$$

где n – скорость вращения валков ковочных вальцов 65 об/мин.

При скорости деформации $u = 16 \text{ с}^{-1}$, температуре вальцовки $t = 1250 \text{ °C}$ и стали 40ХФА по опытному графику источника [39, 41] определяем истинный предел текучести σ_u .

Средняя удельная сила при горячей вальцовке выражается уравнением:

$$\rho_1 = \beta \times n_\sigma \times \sigma_u, \quad (2.42)$$

где β – коэффициент, учитывающий влияние среднего главного напряжения. Согласно источнику [51], в условиях влияния боковых стенок, что имеет место при операции вальцовки, $\beta = 1,08$; n_σ – коэффициент, учитывающий влияние контактного трения между секторами-штампами и заготовкой, и влияние

внешних зон. Определяется по графику $n_{\sigma} = f\left(\frac{l}{\sqrt{h_{0c}h_{1c}}}\right)$ [51].

Данные для расчета силы вальцовки на участке стержня, примыкающего к малой головке, в процессе операции в овальном ручье сведены в таблицу 2.8.

Таблица 2.8

Данные технологического расчета силы вальцовки на участке стержня, примыкающего к малой головке, на первом переходе

h_{1c} , мм	b_{1c} , мм	b_{cp} , мм	R_p , мм	l , мм	S_k , мм ²	u , с ⁻¹	σ_u , МПа	$\frac{l}{\sqrt{h_{0c}h_{1c}}}$	n_{σ}	ρ_1 , МПа
6,4	30	24,4	156,8	44	1076	16	70,6	4,05	1,8	137,3

Сила вальцовки определяется по формуле:

$$P_1 = \rho_1 \times S_k. \quad (2.43)$$

$P_1 = 147$ кН.

Таким же образом определяется сила вальцовки на участке перехода стержня в большую головку и на участке малой головки, которые соответственно равны 148 кН и 33 кН.

Второй переход. Данные для расчета силы вальцовки на участке стержня, примыкающего к малой головке, в процессе операции в квадратном ручье сведены в таблицу 2.9.

Таблица 2.9

Данные технологического расчета силы вальцовки на участке стержня, примыкающего к малой головке, на втором переходе

h_{2c} , мм	b_{2c} , мм	b_{cp} , мм	R_p , мм	l , мм	S_k , мм ²	u , с ⁻¹	σ_u , МПа	$\frac{l}{\sqrt{h_{1c}h_{2c}}}$	n_{σ}	ρ_2 , $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$
11,1	11,1	9,45	154,5	66,6	668,7	11,4	66,7	3,17	1,57	11,5

Сила вальцовки $P_2 = \rho_2 \times S_k = 75,4$ кН.

Таким же образом определяется сила вальцовки во втором переходе на участке перехода стержня в большую головку и на участке малой головки, величины которой соответственно равны 76 кН и 55 кН.

2.3.6 Ручьи секторов-штампов двух переходов переменного сечения и их поперечные размеры

Размерные параметры поперечных сечений секторов-штампов находят с учетом пружинения валов, возникающего в процессе горячей вальцовки. Известно [48, 51, 86, 94], что величину пружинения валов можно определить только опытным путем для машин с разными техническими характеристиками. Для консольных ковочных вальцов, чьи диаметр валов, длина и межосевое расстояние соответствуют параметрам машины СА1335.

Первый ручей. Пружинение валов на конкретном участке определяется по формуле:

$$\Delta A = \frac{(0,4 \times (280 - x) \times P)}{1000}, \quad (2.44)$$

где x – расстояние от торца вала ковочных вальцов до оси ручья, мм; P – сила в ручье, кН.

На участке стержня, примыкающем к малой головке:

$$\Delta A_1 = \frac{(0,4 \times (280 - 202,5) \times 15)}{1000} = 0,435 \text{ мм.}$$

Пружинение остальных участков определяется таким же образом. На участке стержня, примыкающем к большой головке $\Delta A_1 = 0,435$ мм; на участке малой головки $\Delta A_1 = 0,1$ мм.

Определение глубины вреза для первого ручья по формуле:

$$h'_{\text{ов}} = \frac{(h_{\text{ов}} - \Delta A_1)}{2}. \quad (2.45)$$

На участке стержня, примыкающем к малой головке:

$$h'_{\text{ов}} = \frac{(7,8 - 0,435)}{2} = 3,7 \text{ мм.}$$

На участке стержня, примыкающем к большой головке:

$$h'_{\text{ов}} = \frac{(8,6 - 0,435)}{2} = 4,1 \text{ мм.}$$

На участке малой головки:

$$h'_{\text{ов}} = \frac{(18,35 - 0,1)}{2} = 9,1 \text{ мм.}$$

Второй ручей. Пружинение на участке стержня, примыкающем к малой головке:

$$\Delta A_2 = \frac{(0,4 \times (280 - 67,5) \times 7,7)}{1000} = 0,64 \text{ мм.}$$

Величина пружинения остальных участков вычисляется аналогичным образом. На участке стержня, примыкающем к большой головке $\Delta A_2 = 0,64$ мм; на участке малой головки $\Delta A_2 = 0,46$ мм.

Определение глубины вреза для второго ручья.

На участке стержня, примыкающем к малой головке:

$$h'_{\text{КВ}} = \frac{(h_{\text{КВ}} - \Delta A_2)}{2} = \frac{(13,94 - 0,64)}{2} = 6,65 \text{ мм.}$$

На участке стержня, примыкающем к большой головке:

$$h'_{\text{КВ}} = \frac{(14,46 - 0,64)}{2} = 6,91 \text{ мм.}$$

На участке малой головки:

$$h'_{\text{КВ}} = \frac{(18 - 0,46)}{2} = 8,77 \text{ мм.}$$

2.3.7 Центральные углы характерных участков овального и квадратного калибров

Отношение осей поперечного сечения на разных участках можно определить по формуле:

$$a_{\text{уч}} = \frac{b_{\text{max}} + b_{\text{min}}}{h_{\text{max}} + h_{\text{min}}}. \quad (2.46)$$

Центральный угол на конкретном участке определяется по формуле:

$$\alpha_{\text{уч}} = \frac{l_{\text{уч}} 57,3^\circ}{0,5 \left(A - \sqrt{\frac{S_{\text{ср}}}{a_{\text{уч}}}} \right)}, \quad (2.47)$$

где $l_{\text{уч}}$ – длина участка, мм; $S_{\text{ср}}$ – средняя площадь поперечного сечения на конкретном участке, мм².

Значения $a_{\text{уч}}$, $S_{\text{ср}}$, $\alpha_{\text{уч}}$ каждого характерного участка вальцовки первого и второго перехода сведены в таблицу 2.10 и таблицу 2.11 соответственно.

Таблица 2.10

Данные технологического расчета для определения центральных углов на характерных участках поковки при вальцовке в овальном ручье

Параметр	Участок перехода стержня в большую головку	Участок стержня	Участок перехода стержня в малую головку	Участок малой головки
$a_{уч}, \text{мм}$	2,07	4,9	2,31	1,19
$S_{ср}, \text{мм}^2$	293	220,6	255	303,1
$\alpha_{уч}, ^\circ$	$1^\circ 7'$	$35^\circ 24'$	$1^\circ 6'$	$6^\circ 54'$

Таблица 2.11

Данные технологического расчета для определения центральных углов на характерных участках поковки при вальцовке в квадратном ручье

Параметр	Участок перехода стержня в большую головку	Участок стержня	Участок перехода стержня в малую головку	Участок малой головки
$a_{уч}, \text{мм}$	1	1	1	1
$S_{ср}, \text{мм}^2$	242,2	127,8	188,2	253,7
$\alpha_{уч}, ^\circ$	$1^\circ 3'$	$62^\circ 22'$	$1^\circ 3'$	$8^\circ 18'$

На первом пропуске из-за малой длины переходных участков, опережением S можно пренебречь. Тогда суммарный рабочий угол равен:

$$\alpha_p = \alpha_{n1} + \alpha_c + \alpha_{n2} + \alpha_{м.г.} = 1,13 + 35,4 + 1,1 + 6,9 = 44,53^\circ = 44^\circ 31'.$$

Общий рабочий угол:

$$\alpha_{общ} = \alpha_p + (10 \dots 15^\circ) = 44,53 + 15 = 59,53^\circ = 59^\circ 31'.$$

Принимаем $\alpha_{общ} = 60^\circ$.

На втором пропуске в зоне стержня по номограмме [51] опережение $S = 0,022$.

Суммарный рабочий угол:

$$\alpha_p = \alpha_{n1} + \alpha_c + \alpha_{n2} + \alpha_{м.г.} = 1,5 + 62,37 + 1,5 + 8,3 = 73,67^\circ = 73^\circ 4'.$$

Общий рабочий угол:

$$\alpha_{общ} = \alpha_p + (10 \dots 15^\circ) = 73,67 + 15 = 88,67^\circ = 88^\circ 4'.$$

Принимаем $\alpha_{общ} = 90^\circ$.

2.3.8 Определение продольного профиля овального и квадратного ручьев

Продольный профиль ручья на конкретном участке определяется по рабочим радиусам и вычисляется по формуле:

$$R_p = \frac{(A - 2h_p)}{2}, \quad (2.48)$$

где h_p – постоянная глубина ручья по дну вреза на дуге, центр которого совпадает с центром вала.

Значения продольного профиля ручья на разных характерных участках на первом переходе представлены в таблице 2.12.

Таблица 2.12

Данные продольного профиля ручья на характерных участках при вальцовке
в овальном ручье

Параметр	Участок перехода стержня в большую головку	Участок перехода стержня в малую головку	Участок малой головки
R_p , мм	156	156,3	152,6

Значения продольного профиля ручья на разных характерных участках после второго пропуска представлены в таблице 2.13.

Таблица 2.13

Данные продольного профиля ручья на характерных участках при вальцовке
в квадратном ручье

Параметр	Участок перехода стержня в большую головку	Участок перехода стержня в малую головку	Участок малой головки
R_p , мм	153,1	153,4	151,2

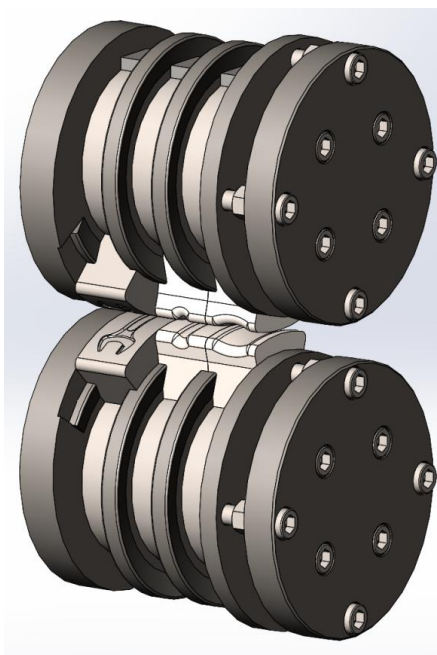
Разработанные чертежи секторов представлены в приложении А.

Таким образом, с помощью полученных результатов технологических расчетов можно переходить к этапу компьютерного моделирования и физического моделирования для проверки их достоверности и возможности внесения корректировок.

2.4 Разработка конструкции крепления секторов-штампов на валки консольных ковочных вальцов

Зная поперечные и продольные размеры ручьев, а также модель оборудования, на котором планируется процесс горячей вальцовки, по рекомендациям справочной литературы [48, 51, 52, 59] проектируются системы оснастки валов ковочных вальцов. При выборе вариантов крепления и фиксации оснастки обработчикам металлов давлением следует руководствоваться такими критериями, как: надежность, простота установки и замены основного инструмента, приемлемая стойкость и ресурс эксплуатации системы крепления, универсальность применения на подобном оборудовании, малая металлоемкость [66-69, 152, 153].

В рамках решения целей и задач диссертации разработаны патенты на способы крепления секторов-штампов к рабочим валам консольных ковочных вальцов модели СА1335 [154-156], а также для их реализации оригинальные конструкции оснастки [157-159]. Один из вариантов конструкции представлен на рисунке 2.14.



а)

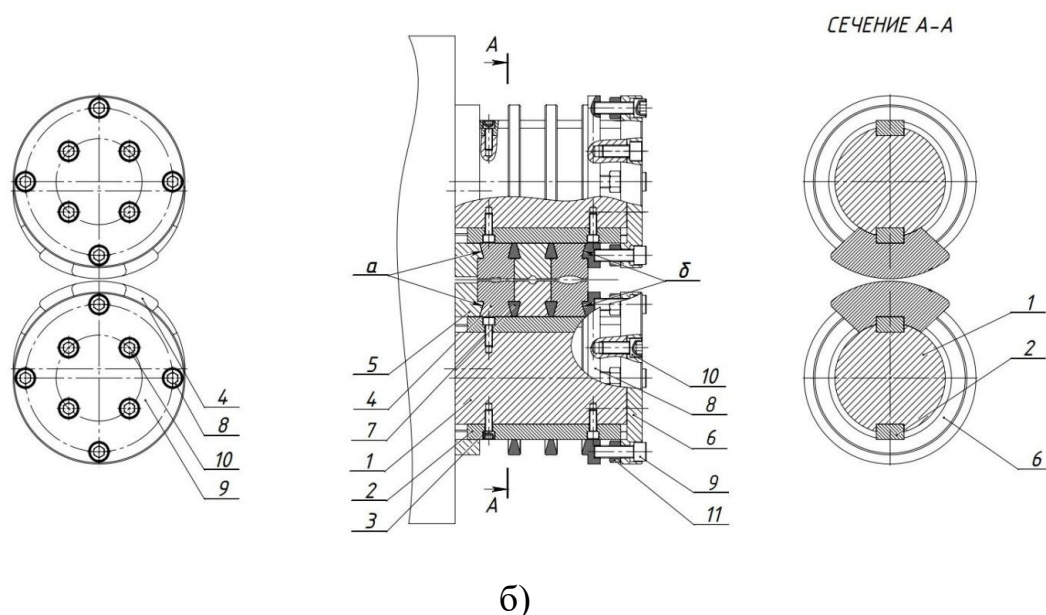


Рисунок 2.14. Вариант крепления секторов-штампов на валы консольных ковочных вальцов согласно патенту № 2827191: а – пространственный вид; б – схема, поясняющая последовательность установки и крепления

Последовательность установки и наладки рабочего вала ковочных вальцов опишем основными тезисами:

Консольный вал 1 содержит пазы со шпонками 2, которые фиксируются винтами 3 (см. рисунок 2.14). Данное шпоночное соединение передает крутящий момент через ответный паз сменного сектора-штампа 4 и другого инструмента, реализуя несколько переходов вальцовки.

Фиксация в радиальном направлении осуществляется за счет выступа «а» упорного кольца 5, входящего в паз сектора-штампа 4. Кроме этого, фиксация происходит кольцевыми замками 7, расположенными между секторами-штампами и имеющими трапецевидное сечение (отношение оснований 1:3) и прижимным кольцом 8. Выступы оснастки («б») также сопряжены с пазами секторов-штампов.

Осевая фиксация осуществляется тем, что через торцевую крышку 6, закрепленную винтами 10, проходят упорные винты 9, которые создают давление в осевом направлении на прижимное кольцо, тем самым, ограничивая весь блок секторов-штампов вдоль оси валков. С целью

предотвращения перекосов концы винтов 9 позиционируются в глухих отверстиях прижимного кольца. Контргайки 11 необходимы для предотвращения от самопроизвольного отворачивания упорных винтов 9 в процессе эксплуатации.

Подобную последовательность имеют остальные разработанные варианты крепления секторов-штампов (таблица 2.14).

Таблица 2.14

Варианты крепления секторов-штампов к валам консольных ковочных вальцов

№ патента	Схема	Характерные отличия
2827189 Рабочий вал ковочных вальцов [157] 2828337 Способ крепления и фиксации секторов-штампов на валах ковочных вальцов консольного типа [154]		Форма поперечного сечения «тор» фиксирующих выступов упорного, прижимного колец и кольцевых замков
2827191 Рабочий вал ковочных вальцов [158] 2828456 Способ крепления и фиксации секторов-штампов на валах ковочных вальцов консольного типа [156]		Форма поперечного сечения «трапеция» фиксирующих выступов упорного, прижимного колец и кольцевых замков
2828455 Рабочий вал ковочных вальцов [159] 2827967 Способ крепления и фиксации секторов-штампов на валах ковочных вальцов консольного типа [155]		Форма шпоночного соединения типа «ласточкин хвост», позволяющая исключить кольцевые замки. Отсутствуют выступы у прижимного и упорного колец

2.5 Определение силы штамповки КГШП и выбор оборудования

При выборе КГШП очень важно определять силу штамповки с максимальной точностью, чтобы избежать нерациональных затрат использования прессы чрезмерно высокой мощности, либо исключить риск поломки из-за недостатка силовых характеристик.

Сила штамповки осаживанием удлиненных в плане поковок в открытых штампах рассчитывается по формуле:

$$P = 1,115 \times \sigma_b^{t,\dot{\epsilon}} \left\{ \left(1 + \mu_0 \frac{b}{h_0} \right) F_0 + \left(\frac{2\mu_0 b}{h_0} - 0,25 + 1,25 \ln \frac{B_{\text{ср}}}{h_0} \right) F_{\text{п}} \right\}, \quad (2.49)$$

где $\sigma_b^{t,\dot{\epsilon}}$ – временное сопротивление при соответствующих температуре и скорости деформации, МПа; μ_0 – коэффициент внешнего трения (на мостике облоя), максимальное значение которого 0,5; b и h_0 – соответственно ширина и толщина мастика облоя, мм²; F_0 – площадь проекции мостика облоя, мм²; $B_{\text{ср}}$ – ширина поковки, мм; $F_{\text{п}}$ – площадь проекции поковки на плоскость разреза, мм².

Временное сопротивление определяется по формуле:

$$\sigma_b^{t,\dot{\epsilon}} = \sigma_b^t \times \lambda, \quad (2.50)$$

где σ_b^t – предел прочности материала при температуре обработки. При $t = 1100$ °С, $\sigma_b^t = 51$ МПа; λ – скоростной коэффициент = 1,7.

$$\sigma_b^{t,\dot{\epsilon}} = 86,7 \text{ МПа.}$$

Необходимо найти среднюю ширину удлиненных в плане поковок:

$$B_{\text{ср}} = \frac{F_{\text{п}}}{L_{\text{п}}}, \quad (2.51)$$

где $L_{\text{п}}$ – максимальный габаритный размер вдоль оси поковки в плане, мм.

$$B_{\text{ср}} = 24,55 \text{ мм.}$$

$$P = 3644 \text{ кН.}$$

Руководствуясь величиной расчетной силы штамповки, выбираем кривошипный горячештамповочный пресс КА8538 [160] (рисунок 2.15),

технические характеристики которых представлены в таблице 2.15.

Таблица 2.15

Техническая характеристика КГШП модели КА8538

Параметр	Значение
Номинальная сила, кН	6300
Ход ползуна, мм	200
Число непрерывных ходов, мин ⁻¹	100
Число одиночных включений, мин ⁻¹	600
Штамповая высота, мм	600
Величина регулировки ползуна, мм	10
Размер подштамповой плиты, мм	760×850
Размер ползуна Р×Q	650×700
Мощность привода, кВт	37
Габаритные размеры, мм	4350×3215×4785



Рисунок 2.15. Внешний вид КГШП модели КА8538

2.6 Разработка технологии поперечной горячей штамповочной вальцовки

Одной из разновидностей технологии производства поковок гаечных ключей является вариант использования в качестве оборудования только ковочные вальцы, что обеспечивает компактность технологической линии. Так, например, рассматривается вариант изготовления профилированной заготовки на консольных ковочных вальцах для последующего окончательного формоизменения методом горячей поперечной штамповочной вальцовки (ГПпШВ) (рисунок 2.16).

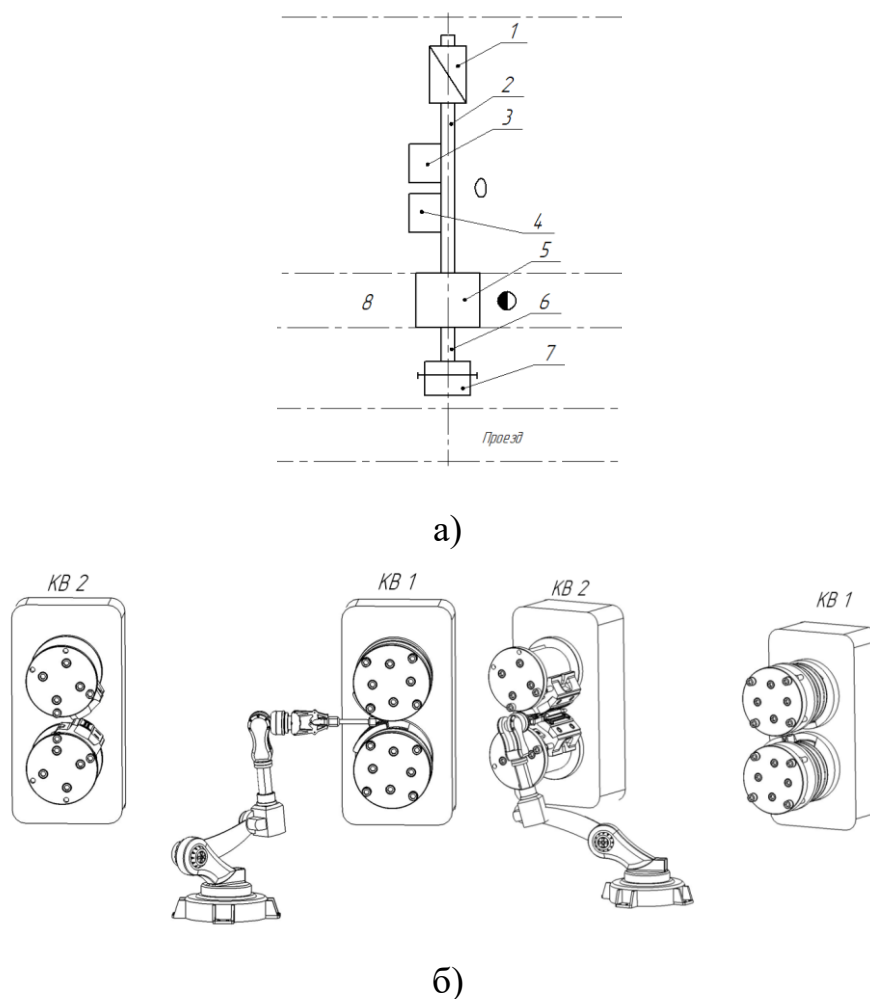


Рисунок 2.16. Схема производственной линии участка ГОШ на базе процесса ГПпШВ (а) и визуализация предварительного и окончательного профилирования заготовки (б)

Изготовление поковок гаечных ключей методом горячей поперечной штамповочной вальцовки происходит следующим образом (см. рисунок 2.16): Предварительно отрезанная на сортовых ножницах штучная заготовка нагревается в индукционном нагревателе 1 до ковочных температур, затем поступает на транспортер 2, который перемещает ее на консольные ковочные вальцы 3. Робот-манипулятор при окончании процесса предварительного профилирования заготовки, перемещает ее к консольным ковочным вальцам 4, где точным позиционированием окончательно формирует поковку штамповочной поперечной вальцовкой и перекладывает на транспортер, перемещающий ее на обрезной пресс 5. После обрезки поковка с помощью склиза 6 перемещается в металлический контейнер 7, а отходы в виде облоя поступают на транспортер, расположенный в траншее 8.

Технологическая подготовка процесса горячей вальцовки перед окончательной штамповочной поперечной вальцовкой производится по аналогичной методике, как при разработке технологии вальцовки в секторах-штампах переменного сечения. Профилированная заготовка должна иметь такую форму и размеры поперечного сечения, которые позволят обеспечить надежный захват секторами-штампами в процессе поперечной вальцовки, при этом гарантируя полное заполнение гравюры и точность конечной поковки, а также наименьшее количество облоя.

2.6.1 Разработка чертежа поковки гаечного ключа и определение размеров исходной заготовки

Анализ предыдущих технологических расчетов поковок гаечных ключей позволяет сделать вывод о возможности уменьшения величины припусков на механическую обработку с целью экономии материала и снижения силовых нагрузок в процессе обработки давлением. Технологические расчеты процесса горячей вальцовки выполняются по

методикам, описанным ранее [51].

В качестве детали-представителя предлагается использовать двухсторонний рожковый гаечный ключ с открытым зевом 17×19 мм (см. рисунок 2.2). В качестве материала используется конструкционная легированная сталь 40ХФА.

Конструктивно-технологические характеристики поковки определены в разделе 2.2.1, однако для уменьшения припусков на обработку выбран класс точности Т2. Тогда исходный индекс по таблице в ГОСТ 7505-89 [147], равен 7.

Припуски на механическую обработку гаечного ключа с открытым зевом представлены в таблице 2.16.

Таблица 2.16

Припуски на механическую обработку гаечного ключа с открытым зевом

Основные припуски, мм	0,8	
Толщина, мм	Чистота поверхности, Ra	Отклонение от прямолинейности, мм
7,5	12,5	0,2
5		
Расстояние между губками	Чистота поверхности, Ra	
19	2,5	
17		
Дополнительные припуски, учитывающие смещение поковки на поверхности разъема штампа, мм	0,2	
Отклонение от прямолинейности	0,2 – толщина 7,5; 0,2 – толщина 5	
Отклонение межцентрового расстояния на размер 150 мм	0,2	
Штамповый уклон	на наружной поверхности, °	на внутренней поверхности, °
	7	10

Размеры поковки и их допускаемые отклонения представлены в таблице 2.17.

Таблица 2.17

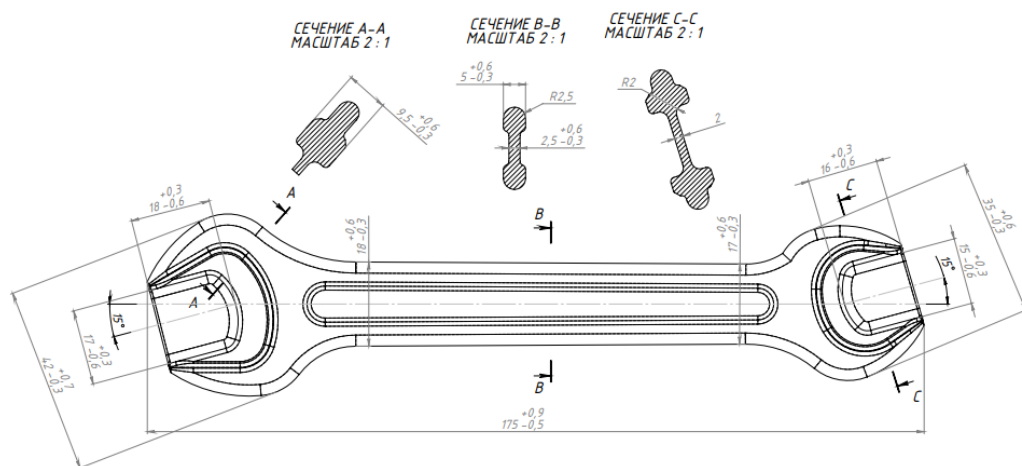
Размеры поковки гаечного ключа с открытым зевом

Размер детали, мм	Размер поковки с допускаемыми отклонениями, мм
Толщина 7,5	$9,5^{+0,6}_{-0,3}$
Толщина 5	$5^{+0,6}_{-0,3}$
Толщина 2,5	$2,5^{+0,6}_{-0,3}$
Расстояние между губками 19	$17^{+0,3}_{-0,6}$
Расстояние между губками 17	$15^{+0,3}_{-0,6}$
Ширина 42	$42^{+0,7}_{-0,3}$
Ширина 35	$35^{+0,6}_{-0,3}$
Ширина 18	$18^{+0,6}_{-0,3}$
Ширина 17	$17^{+0,6}_{-0,3}$
Глубина 19	$18^{+0,3}_{-0,6}$
Глубина 17	$16^{+0,3}_{-0,6}$
Длина 175	$175^{+0,9}_{-0,5}$

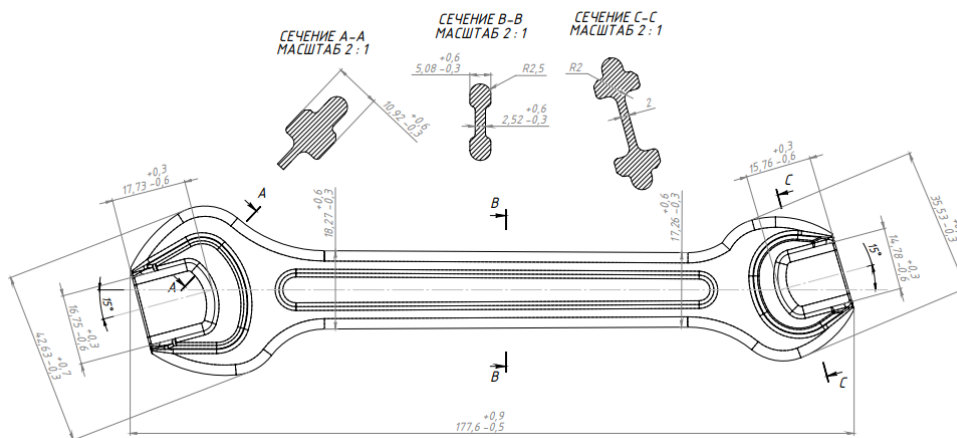
Радиус закругления наружных углов для глубины ручья 10 – 25 мм: 1 мм.

В области открытых зевов предусмотрена перемычка толщиной 2 мм, размеры внутренних скруглений 2 мм.

Чертежи поковки рожкового гаечного ключа с размерами в холодном состоянии и с учетом температурного расширения 1,5% представлены на рисунке 2.17.



а)



6)

Рисунок 2.17. Чертеж поковки гаечного ключа с открытым зевом:

а – с размерами в холодном состоянии; б – с размерами в горячем состоянии

Определяем дополнительные параметры: Площадь поковки в плане $S_{\text{п}} = 4083 \text{ мм}^2$; периметр $L_{\text{п}} = 404 \text{ мм}$; объем $V_{\text{п}} = 19199 \text{ мм}^3$; масса поковки $M_{\text{п}} = 0,15 \text{ кг}$; $S_{\text{м}} = 9 \text{ мм}^2$; $S_{\text{о}} = 22,5 \text{ мм}^2$.

Значения сечений расчетной заготовки и эпюры диаметров приведены в таблице 2.18. Эпюра диаметров и сечений представлена на рисунке 2.18.

Расчет среднего сечения:

Объем облоя $V_0 = 7100 \text{ мм}^3$.

Объем поковки с облоем равен:

$$V_{\Pi 0} = V_{\Pi} + V_0 = 19199 + 7100 = 26300 \text{ мм}^3$$

Площадь сечения средней расчетной заготовки $S_{\text{ср}} = 148 \text{ мм}^2$.

Средний диаметр $d_{\text{ср}} = 13,75$ мм.

Таблица 2.18

Расчет эпюры диаметров и сечений

№ сечения	F_{Π}	$F_{\circ}$	$F_{\Pi\circ} = F_{\circ}$	$d_{\circ}$	$h_{\circ}$	М
	мм ²			мм	мм	
1	135,07	22,5	180	15,2	18	10
2	215,12	22,5	260	18,2	26	
3	322,83	22,5	367,8	21,7	37	

Окончание таблицы 2.18

№ сечения	F_{Π}	F_o	$F_{\Pi o} = F_{\Sigma}$	d_3	h_3	M
	мм ²			мм	мм	10
4	319,53	22,5	364,5	21,6	36,5	
5	148,84	22,5	193,8	15,8	20	
6	69,1	22,5	114	12,1	12	
7	101,98	22,5	147	13,7	15	
8	173,86	22,5	218,9	16,8	22	
9	280,08	22,5	325	20,4	33	
10	203,05	22,5	248	17,8	25	
11	130,5	22,5	176	15	18	

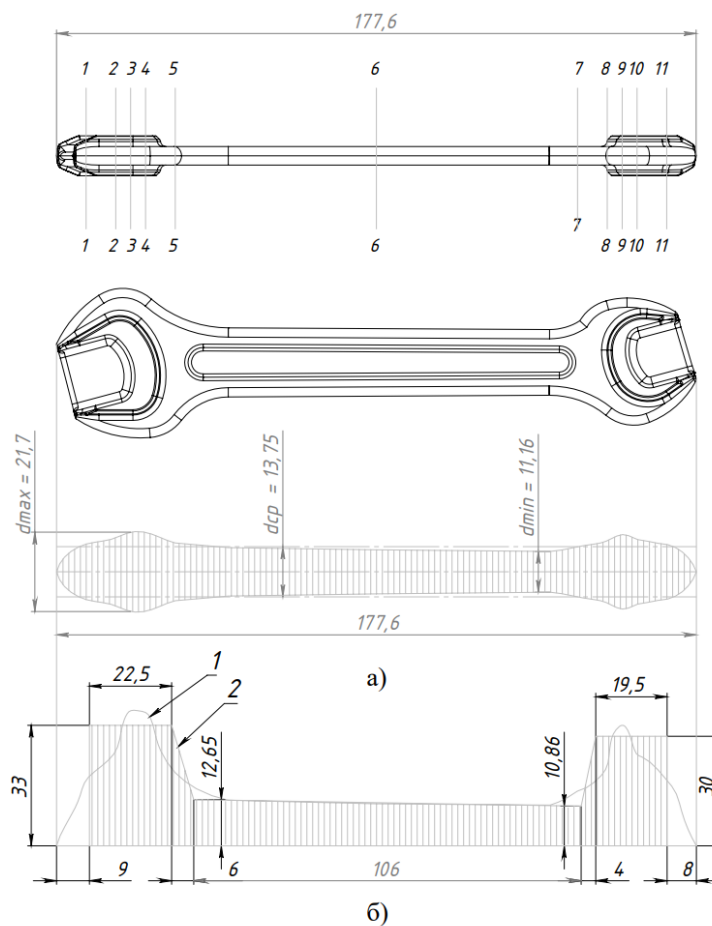


Рисунок 2.18. Эпюра диаметров и сечений: а – развертка поковки рожкового гаечного ключа и расчетная заготовка (эпюра диаметров); б – эпюра поперечных сечений (1 – поковки, 2 – вальцованной заготовки)

Установление необходимости применения вальцовки:

$$\alpha = 20,8/14 = 1,6; \beta = 229/14 = 12,9.$$

Исходя из данных диаграммы источника [53] определяем, что находимся в области необходимости применения вальцовки.

Определение размеров исходной заготовки:

$$S'_{max} = 1,006 \times 330 = 332 \text{ мм}^2;$$

$$c = \sqrt{S'_{max}} = \sqrt{332} = 18,3 \text{ мм}^2;$$

$$S'_1 = 127,3 \text{ мм}^2;$$

$$S'_{min} = 109,3 \text{ мм}^2;$$

$$S'_{мг} = 293,8 \text{ мм}^2.$$

С целью обеспечения точности позиционирования заготовки и отсутствия проворачивания вокруг ее оси при удержании в клещах манипулятора по ГОСТ 2591-2006 выбираем квадратную заготовку со стороной квадрата 19 мм в холодном состоянии и $S_{зг} = 361 \text{ мм}^2$.

В горячем состоянии $c'_{зг} = 19,3 \text{ мм}$, $S'_{зг} = 366,5 \text{ мм}^2$.

Объем заготовки с учетом угара металла $V'_{зг} = 26563 \text{ мм}^3$.

Тогда длина заготовки в горячем состоянии $l'_{зг} = 73 \text{ мм}$; В холодном – $l'_{зг} = 72 \text{ мм}$.

Участок длины для удержания клещами принимаем равным параметру c , тогда исходная заготовка имеет длину $l_{зг} = 91 \text{ мм}$.

Профилирование заготовки будет производиться на консольных ковочных вальцах модели СА1335 с межосевым расстоянием рабочих валков 320 мм.

Отношение межосевого расстояния валков к толщине заготовки:

$$\frac{A}{h_0} = \frac{320}{\sqrt{366,5}} = 16,7.$$

Исходя из расчета общего и среднего коэффициента вытяжки за каждый пропуск, соответственно равные 3,35 и 1,83, определяем количество пропусков $n = 2$.

2.6.2 Обоснование выбора системы калибров для поперечной горячей штамповочной вальцовки

Технологию горячей поперечной штамповочной вальцовки следует разрабатывать с учетом толщины поковки, так как от данного параметра зависит опережение металла, высокие значения которого могут привести к неполному заполнению ручья, следовательно – к браку. Профилированные заготовки значительной толщины в процессе поперечной вальцовки могут не захватываться секторами-штампами. Поэтому головки полуфабриката под будущие зевы гаечного ключа следует деформировать, приведя их толщину к размеру, при котором обеспечивается незначительное опережение и гарантированный захват заготовки инструментом, а также качественное заполнение гравюры секторов-штампов. Не менее значимым является ширина полуфабриката. В процессе разработки чертежа поковки и эпюры сечений обнаружено, что разница в объемах большой и малой головки гаечного ключа невелика. Это означает, что при предварительной вальцовке их в секторах до одинаковой толщины, значения ширины также будут равны. Таким образом, в процессе поперечной вальцовки момент внедрения сектора-штампа в профилированную заготовку будет происходить одновременно в местах расположения двух головок под будущие зевы гаечного ключа, что увеличит контактную площадь и вероятность захвата заготовки инструментом, а также минимизирует возможность искривления поковки.

Учитывая сказанное, определена последовательность калибров. В процессе горячей вальцовки на первом пропуске участки головок под зевы деформируются в плоскоовальном калибре, а область рукоятки – в овальном. На втором пропуске после поворота заготовки на 90° участок рукояти овального поперечного сечения деформируется в квадратном калибре из соображений устойчивости и стабильности протекания процесса при одновременном значительном удлинении заготовки вдоль ее оси.

2.6.3 Определение размеров вальцованной заготовки после каждого перехода

Определяем размеры окончательной профилированной заготовки. На участке стержня, примыкающим к большой головке:

$$c = 1,02 \times \sqrt{126,5} = 11,5 \text{ мм}; r_k = 0,22 \times 11,5 = 2,5 \text{ мм};$$

$$h_{\text{кв}} = 1,414 \times 11,5 - 0,828 \times 2,5 = 14,2 \text{ мм}.$$

На участке стержня, примыкающим к малой головке:

$$c = 1,02 \times \sqrt{108,6} = 10,65 \text{ мм}; r_k = 0,22 \times 10,65 = 2,35 \text{ мм};$$

$$h_{\text{кв}} = 1,414 \times 10,65 - 0,828 \times 2,35 = 13 \text{ мм}.$$

Для получения формы плоского овала на участках большой и малой головок определяем отношение сторон поперечного сечения. Высоту плоского овала принимаем равной 11 мм – соответствующее значение является максимальным значением толщины головок зевов поковки гаечного ключа в горячем состоянии (см. рисунок 2.18 б). Так как площадь поперечного сечения головок необходимо привести к одной величине с ориентиром на большую головку, где $S'_{\text{б.г.}} = S'_{\text{м.г.}} = S'_{\text{max}} = 332 \text{ мм}^2$, то отношение сторон можно вывести из формулы для определения высоты сечения плоскоовального участка заготовки:

$$h_{\text{ов}} = \sqrt{\frac{S'_{\text{б.г.}}}{a - 0,215}}, \quad (2.52)$$

$$\text{тогда } a = \frac{S'_{\text{б.г.}}}{h_{\text{ов}}^2} + 0,215 = 2,955.$$

$$\text{Ширина } b_{\text{ов}} = a \times h_{\text{ов}} = 32,5 \text{ мм. Радиус } r_{\text{ов}} = \frac{h_{\text{ов}}}{2} = 5,5 \text{ мм}.$$

В процессе вальцовки в плоскоовальном калибре некоторое количество металла перетекает вдоль оси заготовки, из-за чего фактическая площадь поперечного сечения меньше расчетной. Поэтому выбираем квадратную заготовку со стороной квадрата 20 мм и площадью сечения $S_{\text{зг}} = 400 \text{ мм}^2$; с учетом температурного расширения $c'_{\text{зг}} = 20,3 \text{ мм}$, $S'_{\text{зг}} = 412 \text{ мм}^2$.

Длина заготовки в горячем состоянии $l'_{зг} = \frac{26563}{412} = 64,5$ мм; в холодном – 63,5 мм. С участком для захвата клещами принимаем $l_{зг} = 85$ мм.

Тогда $\frac{A}{h_0} = \frac{320}{\sqrt{412}} = 15,76$; $\lambda_{общ, max} = 3,77$; $\lambda_{ср} = 1,94$; $n = 2$.

Так как окончательное формоизменение гаечного ключа будет производиться методом поперечной штамповочной вальцовки, то учитывая конструкцию сектора-штампа, увеличиваем длину плоскоовального участка большой головки зева за счет длины участка под клещевину.

Длина участка под захват клещами $l_k = 10$ мм; длина первого переходного участка $l_{п1} = 5$ мм (равен длине внедряемой области сектора-штампа); длина большой головки $l_{б.г.} = 32,5$ мм; длина второго переходного участка $l_{п2} = 6$ мм; длина стержня $l_c = 106$ мм; длина третьего переходного участка $l_{п3} = 4$ мм; длина малой головки $l_{м.г.} = 22,5$ мм.

Определение поперечных и продольных размеров профилированной заготовки после первого перехода представлены в таблице 2.19.

Таблица 2.19

Определение поперечных и продольных размеров профилированной заготовки после горячей вальцовки в овальном ручье

Параметр	Характерные сечения заготовки		
	Участок стержня, примыкающий к большой головке	Участок стержня, примыкающий к малой головке	Участок стержня
Общий коэффициент вытяжки $\lambda_{общ}$	$\frac{S'_{зг}}{S'_1} = 3,24$	$\frac{S'_{зг}}{S'_{min}} = 3,77$	
Отношение осей a ; λ	4,6; 1,85	5,1; 1,95	
Площадь поперечного сечения овала, мм ²	$\frac{S'_{зг}}{\lambda_1} = 222,7$	$\frac{S'_{зг}}{\lambda_2} = 211,3$	
Коэффициент q	0,674	0,672	
Размеры поперечного сечения овала $h_{ов}$; $b_{ов}$; $R_{ов}$, мм	8,5; 39; 47	7,85; 40; 53	
Длина участка, мм	$l_{п1} = 4,9$	$l_{п2} = 3$	$l_c = 58$

Чертежи профилированных заготовок после вальцовки в двух переходах представлены на рисунке 2.19.

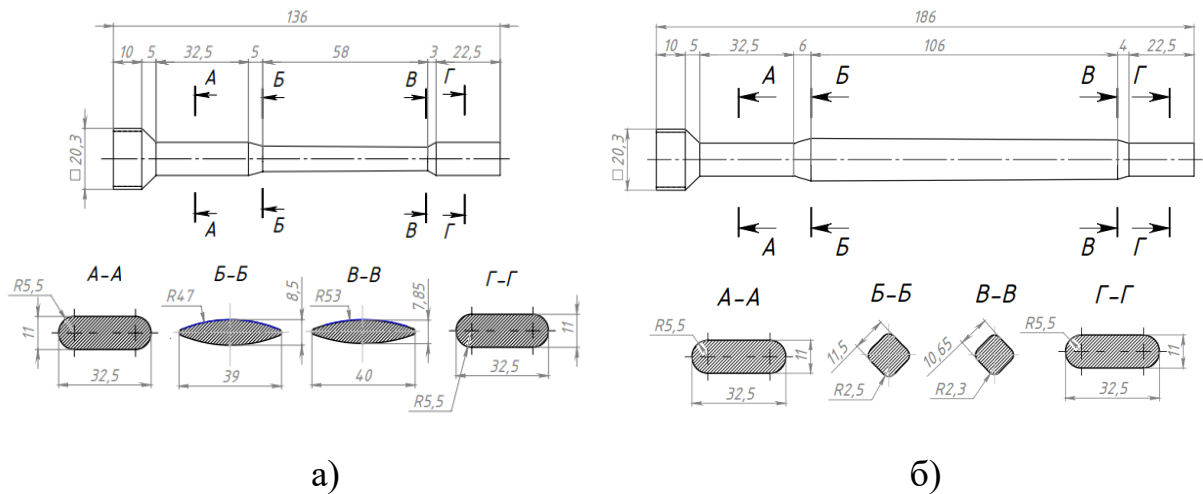


Рисунок 2.19. Форма и размеры заготовки после горячей вальцовки в ручьях переменного сечения: а – первый переход; б – второй переход

2.6.4 Определение силы вальцовки

Данные для расчета силы вальцовки по формулам (2.35–2.43) на характерных участках двух переходов сведены в таблицы 2.20, 2.21.

Таблица 2.20

Данные технологических расчетов силы вальцовки для первого перехода (плоскоовальный ручей)

Параметр	Участок большой и малой головок	Участок стержня, примыкающий к малой головке	Участок стержня, примыкающий к большой головке
h , мм	-	6,44	6,96
b , мм	-	32,8	32
b_{cp} , мм	-	26,55	26,15
Δh , мм	-	13,86	13,34
R_p , мм	154,5	156,78	156,5

Окончание таблицы 2.20

Параметр	Участок большой и малой головок	Участок стержня, примыкающий к малой головке	Участок стержня, примыкающий к большой головке
l , мм	38	46,6	45,7
S_k , мм ²	573	1237	1195
u , с ⁻¹	12,75	15,67	15,36
σ_u , МПа	68,7	71	70,6
$\frac{l}{\sqrt{h_a h_b}}$	1,48	4	3,84
n_σ	1,16	1,78	1,75
ρ , МПа	86	136,7	133,4
P , кН	49,3	169	159,5

Таблица 2.21

Данные технологических расчетов силы вальцовки для второго перехода
(квадратный ручей)

Параметр	Участок стержня, примыкающий к малой головке	Участок стержня, примыкающий к большой головке
h , мм	10,45	11,28
b , мм	10,45	11,28
b_{cp} , мм	8,45	9,12
Δh , мм	22,35	20,72
R_p , мм	154,8	154,35
l , мм	58,8	56,55
S_k , мм ²	497	515,7
u , с ⁻¹	12,24	12
σ_u , МПа	68,15	67,7
$\frac{l}{\sqrt{h_a h_b}}$	3,18	2,98
n_σ	1,58	1,41
ρ , МПа	116,3	103
P , кН	57,8	53,1

2.6.5 Определение размеров секторов-штампов

Определим поперечные размеры первого перехода. Значения пружинения согласно формуле (2.44):

На участке большой и малой головок:

$$\Delta A_1 = \frac{(0,4 \times (280 - 202,5) \times 5)}{1000} = 0,155 \text{ мм.}$$

На участке стержня, примыкающем к малой головке $\Delta A_1 = 0,533$ мм; на участке стержня, примыкающем к большой головке: $\Delta A_1 = 0,5$ мм.

Определение глубины вреза для первого ручья по формуле (2.45):

На участке большой и малой головок:

$$h'_{\text{ов}} = \frac{(11 - 0,155)}{2} = 5,42 \text{ мм.}$$

На участке стержня, примыкающем к малой головке: $h'_{\text{ов}} = 3,66$ мм; на участке стержня, примыкающем к большой головке: $h'_{\text{ов}} = 4$ мм.

Определим поперечные размеры второго перехода.

Значения пружинения:

На участке стержня, примыкающем к малой головке:

$$\Delta A_2 = \frac{(0,4 \times (280 - 67,5) \times 5,9)}{1000} = 0,5 \text{ мм.}$$

На участке стержня, примыкающем к большой головке $\Delta A_2 = 0,46$ мм.

Определение глубины вреза для второго ручья:

На участке стержня, примыкающем к малой головке:

$$h'_{\text{кв}} = \frac{(13 - 0,5)}{2} = 6,25 \text{ мм.}$$

На участке стержня, примыкающем к большой головке $h'_{\text{кв}} = 6,87$ мм.

Определение центральных углов.

Отношение осей поперечного сечения и центральные углы на разных участках можно определить по формулам (2.46, 2.47).

Значения $\alpha_{\text{уч}}$, $S_{\text{ср}}$, $\alpha_{\text{уч}}$ каждого характерного участка вальцовки второго перехода сведены в таблицу 2.22.

Таблица 2.22

Данные технологического расчета для определения центральных углов на характерных участках поковки при вальцовке в плоскоовальном калибре

Параметр	Участок перехода большой головки к исходной заготовке	Участок большой головки	Участок перехода стержня в большую головку	Участок стержня	Участок перехода стержня в малую головку	Участок малой головки
$a_{уч}, \text{ мм}$	1,7	1,16	3,66	4,83	3,85	1,16
$S_{ср}, \text{ мм}^2$	372	332	277,35	244,33	271,65	332
$\alpha_{уч}, ^\circ$	$1^\circ 52'$	$12^\circ 17'$	$1^\circ 5'$	$24^\circ 4'$	$1^\circ 6'$	$8^\circ 3'$

Из-за малой длины переходных участков, опережением S можно пренебречь. Тогда суммарный рабочий угол:

$$\alpha_p = \alpha_{n1} + \alpha_{б.г} + \alpha_{n2} + \alpha_c + \alpha_{n3} + \alpha_{м.г} = 1,87 + 12,28 + 1,08 + 24,07 + 1,1 + 8,05 = 48,45^\circ = 48^\circ 27'.$$

Общий рабочий угол $\alpha_{общ}$ принимаем 60° .

Значения $a_{уч}$, $S_{ср}$, $\alpha_{уч}$ каждого характерного участка вальцовки второго перехода сведены в таблицу 2.23.

Таблица 2.23

Данные технологического расчета для определения центральных углов на характерных участках поковки при вальцовке в квадратном ручке

Параметр	Участок перехода стержня в большую головку	Участок стержня	Участок перехода стержня в малую головку
$a_{уч}, \text{ мм}$	1	1	1
$S_{ср}, \text{ мм}^2$	232,4	127,75	227,35
$\alpha_{уч}, ^\circ$	$2^\circ 15'$	$39^\circ 21'$	$1^\circ 3'$

Суммарный рабочий угол:

$$\alpha_p = \alpha_{n1} + \alpha_c + \alpha_{n2} = 2,26 + 39,35 + 1,5 = 43,11^\circ = 43^\circ 6'.$$

Общий рабочий угол $\alpha_{общ}$ принимаем 60° .

Продольный профиль ручья на конкретном участке определяется по

рабочим радиусам и вычисляется по формуле (2.48).

Значения продольного профиля ручья на разных характерных участках при вальцовке в плоскоовальном калибре представлены в таблице 2.24.

Таблица 2.24

Данные продольного профиля ручья на характерных участках при вальцовке в плоскоовальном ручье

Параметр	Участок большой и малой головок	Участок перехода стержня в большую головку	Участок перехода стержня в малую головку
R_p , мм	154,6	156	156,34

Значения продольного профиля ручья на разных характерных участках при вальцовке в квадратном калибре представлены в таблице 2.25.

Таблица 2.25

Данные продольного профиля ручья на характерных участках при вальцовке в квадратном ручье

Параметр	Участок перехода стержня в большую головку	Участок перехода стержня в малую головку
R_p , мм	153,75	153,13

2.6.6 Разработка конструкции крепления ручьевой вставки для поперечной горячей штамповочной вальцовки на валах консольных ковочных вальцах

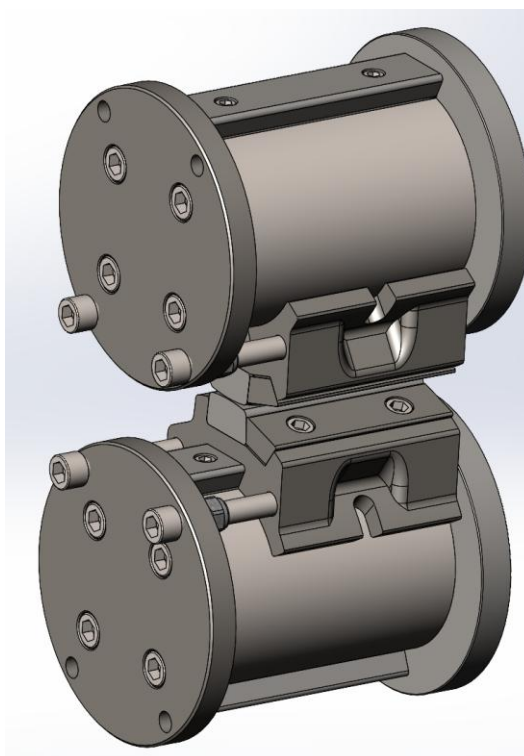
Консольные ковочные вальцы позволяют размещать заготовку, удерживая ее со стороны торцов рабочих валов, что лучше с точки зрения трудоемкости процесса, однако ввиду недостатков таких как пружинение и относительно малая мощность вальцов, поперечная вальцовка на таком оборудовании ограничена малыми размерами деталей или изделий с низкими требованиями к точности.

Предлагаемую технологию изготовления поковки гаечного ключа

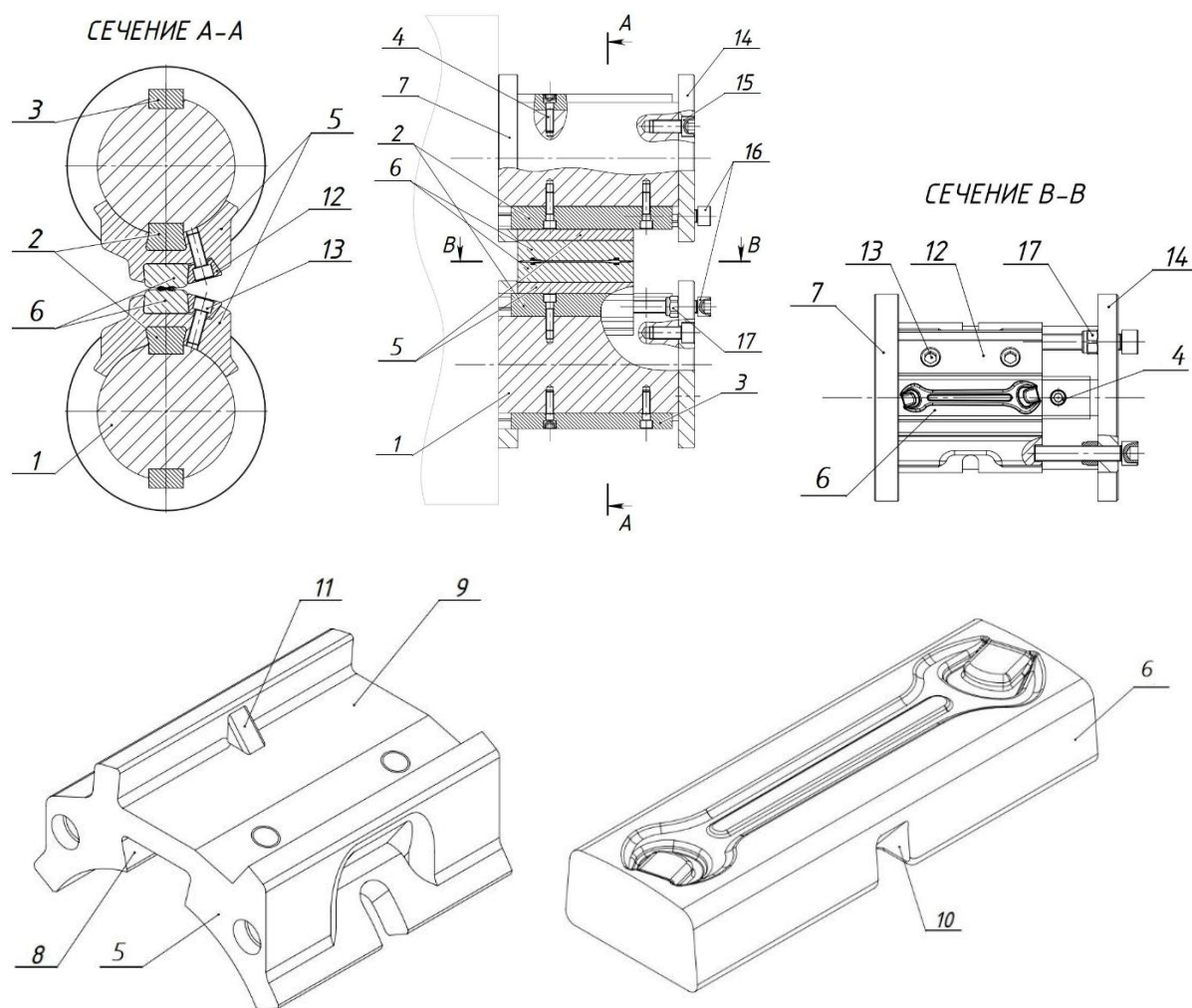
поперечной горячей штамповочной вальцовкой возможно осуществить в закрытых ковочных вальцах. Из преимуществ можно выделить большую жесткость, благодаря замкнутой конструкции валков, что минимизирует пружинение и увеличивает точность геометрии поковки. Кроме того, при сравнении с консольным расположением валов, ковочные вальцы закрытого типа в целом мощнее, что важно с точки зрения ограниченности размеров поковок, так как в ходе процесса в момент максимального обжатия в области контакта с ручьевыми вставками оказывается практически вся профилированная заготовка. В это время наблюдаются пиковые силовые значения, зачастую гораздо выше в сравнении с классической вальцовкой, где происходит локальное деформирование заготовки вдоль ее оси.

К недостаткам поперечной вальцовки в закрытых ковочных вальцах в сравнении с консольным типом можно отнести сложность установки оснастки и ограниченность пространства для позиционирования профилированной заготовки.

Для ранее выбранных ковочных вальцов модели CA1335 разработана оснастка, предназначенная для поперечной вальцовки. (рисунок 2.20 а, б).



а)



б)

Рисунок 2.20. Конструкция крепления ручьевого вставки для поперечной вальцовки на валах ковочных вальцов консольного типа:

а – 3D- модель; б – схема, поясняющая последовательность установки

Основная задача конструктивного исполнения заключается в повышении технологичности оснастки без внесения изменений в конструкцию рабочих валов. Элементы конструкции спроектированы с учетом выполнения таких условий, как унификация, металлоемкость и относительно невысокая сложность установки и наладки.

Установка оснастки реализуется в следующей последовательности: у консольного вала 1, одна из двух шпонок прямоугольного сечения 3 заменяется на шпонку типа «ласточкин хвост» 2 посредством откручивания и

закручивания винтов фиксации 4. Затем на консольный вал 1 устанавливается упорная втулка 7, пазы которой совпадают по форме с поперечными сечениями шпонок 2 и 3, а также держатель 5 с предварительно зафиксированной ручьевой вставкой 6 в посадочном гнезде 10. Выступающие участки шпонки 2 совпадают по размерам и форме с шпоночным пазом 8 держателя 5, тем самым, фиксируя последний на консольном валу 1 в радиальном и тангенциальном направлениях. Закрепление в осевом направлении осуществляется регулировочными винтами 16, проходящими через торцевую крышку 14. Их регулировка позволяет обеспечить вариативность держателей 5 с ручьевыми вставками 6 по длине. С целью предотвращения откручивания в процессе вальцовки регулировочных винтов 16 они дополнительно фиксируются контргайками 17. Установка торцевой крышки осуществляется винтами 15. Выступ 11, расположенный в центре посадочного гнезда 9 держателя 5, фиксирует ручьевую вставку 6 в осевом направлении через паз 10. Закрепление в тангенциальном направлении обеспечивается клиновыми планками 12 и винтами 13.

2.7 Выводы по главе 2

1. Разработанные способы изготовления удлиненных поковок, реализуемые с использованием операции горячей вальцовки обладают следующими преимуществами:

– технология предварительного профилирования на ковочных вальцах перед штамповкой на молоте уступает в эффективности в сравнении со штамповкой вальцованной заготовки на КГШП, что следует из логики сравнения специфик работы оборудования для окончательного формирования поковки;

– горячая вальцовка может осуществляться в секторах-штампах в ручьях постоянного и переменного сечения. Второй вариант является наиболее

точным и ресурсосберегающим, но и более сложным в технологических расчетах;

– применение горячей вальцовки возможно не только в качестве заготовительной операции, но и для окончательного формоизменения, как правило, мелких и средних поковок, удлиненных в плане, с помощью штамповочной вальцовки;

– конечное формоизменение способом поперечной вальцовки в плоско-прокатных, валково-сегментных, консольных или закрытых вальцах может обеспечить высокую точность и исключить искривление оси поковки, однако существует недостаток, связанный с ограничением длины поковок и необходимости учета пружинения.

2. Разработаны новые технологические процессы продольной горячей вальцовки в секторах-штампах с ручьями различной конфигурации для представителей гаечных ключей двух исполнений: двухсторонний гаечный ключ с открытым зевом и двухсторонний накидной, что позволило повысить производительность и КИМ.

3. Для консольных ковочных вальцов модели СА1335 разработаны новые способы и оригинальные конструкции крепления секторов-штампов на рабочих валах для продольной вальцовки, техническая новизна которых защищена 6 патентами на изобретения.

4. Разработан технологический процесс предварительной горячей вальцовки для последующей поперечной штамповочной вальцовки. Обоснован выбор системы калибров двух переходов для изготовления профилированной заготовки.

5. Разработана конструкция крепления секторов-штампов для поперечной вальцовки на консольных ковочных вальцах, подходящей для вальцовки поковок небольших размеров и относительно невысокими требованиями к точности.

ГЛАВА 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ И ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ГОРЯЧЕЙ ВАЛЬЦОВКИ ПОКОВКИ ГАЕЧНОГО КЛЮЧА

3.1 Особенности проектирования инструмента для моделирования предварительной горячей вальцовки

Исходя из данных технологических расчетов, проектируем оснастку для последующего моделирования в программном комплексе для автоматизации работ на этапах конструкторской и технологической подготовки производства SolidWorks [161, 162].

Для обеспечения максимальной скорости машинного вычисления модель упрощается, как показано на рисунке 3.1 а, исключением отверстий, пазов и дополнительных элементов крепления [144].

В программном комплексе DEFORM-3D инструмент позиционируется по межосевому расстоянию (рисунок 3.1 б) консольных вальцов CA1335 и учитываются основные параметры технической характеристики.

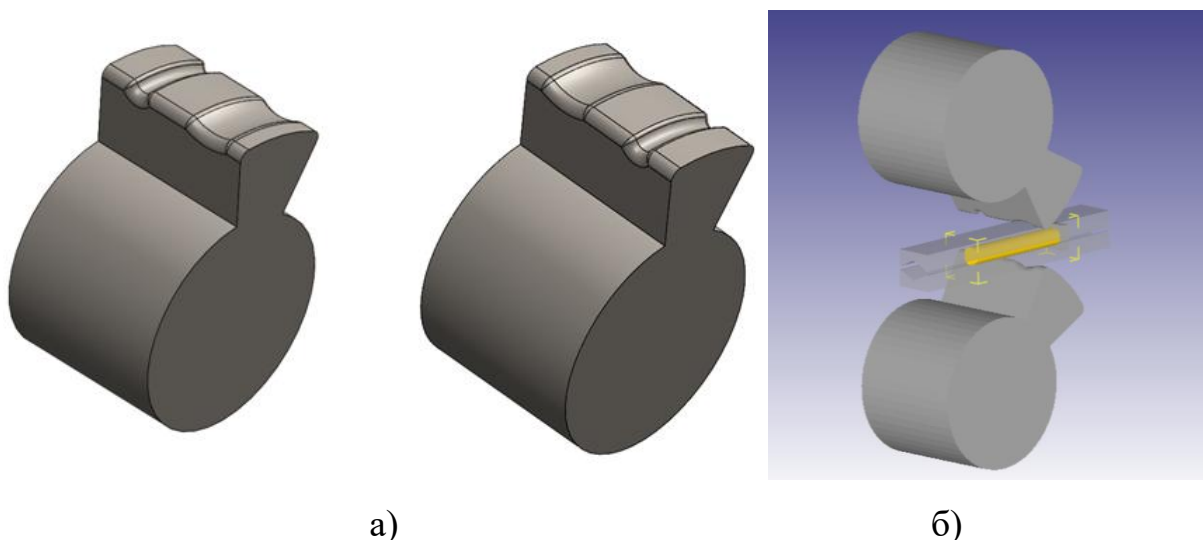


Рисунок 3.1. Модели инструментов для проведения компьютерных исследований: а – верхний и нижний валки; б – позиционирование инструментов и заготовки

Для имитации вытягивания поковки клещами и удерживания ее в равновесии в процессе компьютерного эксперимента, используются вспомогательные инструменты, такие как толкатель и направляющие. Толкатель обеспечивает начальное перемещение заготовки до момента захвата валками, а направляющие удерживают ее в направлении вектора скорости перемещения. Скорость толкателя сопоставляется со скоростью вращения валков. В данном случае, при скорости вращения валков $1,08 \text{ с}^{-1}$ или 65 об/мин, скорость толкателя равна 2,08 мм за шаг. Ограничение хода толкателя необходимо обеспечить в момент захвата заготовки секторами-штампами.

Также перед началом моделирования определены и назначены следующие исходные данные: материалом заготовки является конструкционная легированная сталь марки 40ХФА. В качестве аналога из базы данных программного комплекса выбирается материал AISI 5140 (860 – 1250 °С). Материал секторов-штампов 5ХНМ ГОСТ 5950-2000 [163] (в базе программы аналог AISI H13). Начальная температура исходной заготовки и инструмента 1250 °С и 200 °С соответственно.

3.2 Исследование процесса вальцовки в секторах-штампах в ручьях постоянного сечения

Компьютерное моделирование операции горячей вальцовки двух переходов на основе данных технологических расчетов позволяет произвести анализ формы и размеров профилированной заготовки, вывести графики зависимости силы от времени вальцовки в овальном калибре (рисунок 3.2 а) и круглом калибре (рисунок 3.2 б) [164].

В ходе анализа графика силы при горячей вальцовке в овальном калибре установлено, что значения сил на валах практически совпадают (на верхнем валке 105 кН; на нижнем – 100 кН). Нагрузка возрастает, когда секторы-

штампы приближаются к крайнему нижнему (верхний вал) и крайнему верхнему (нижний вал) положению, после чего сила деформирования уменьшается. Это связано с изменением площади контактной поверхности между инструментом и заготовкой, рост которой приводит к увеличению силы.

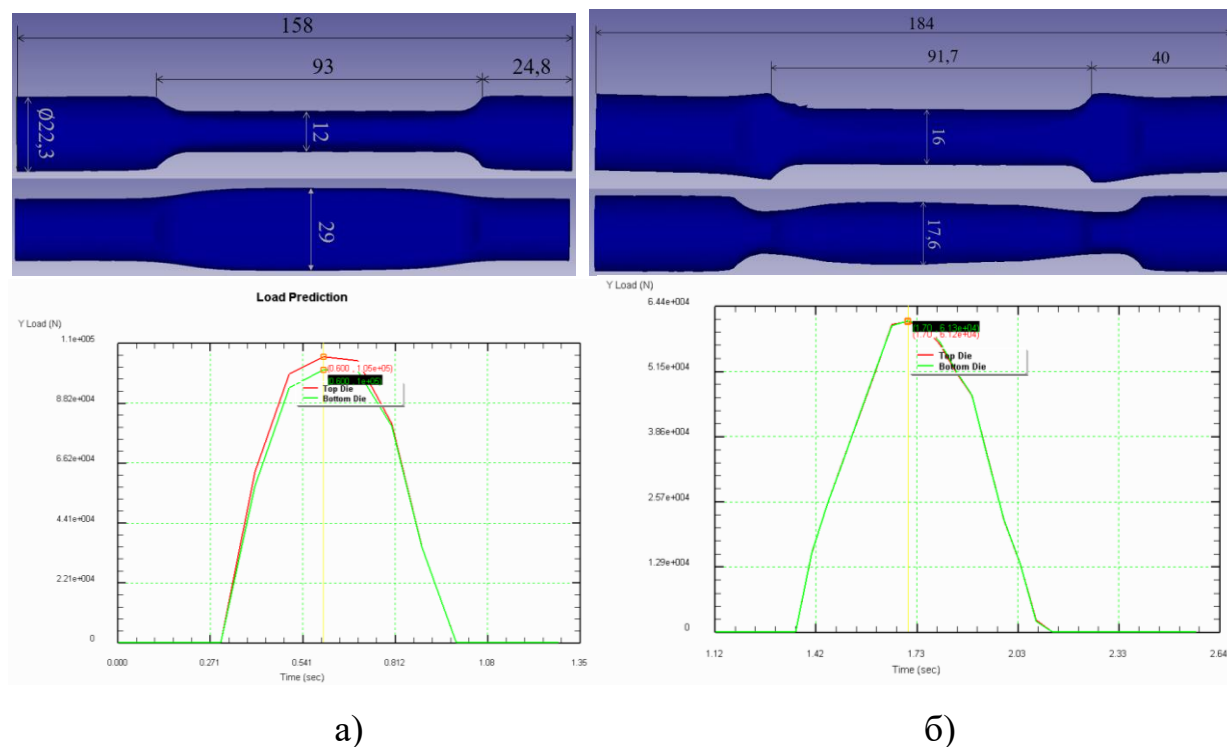


Рисунок 3.2. Форма, размеры и силовые параметры при профилировании заготовок горячей вальцовкой в ручьях постоянного сечения: а – в овальном калибре; б – в круглом калибре

Оценка силовых параметров при вальцовке в круглом калибре позволяет сделать вывод о том, что значения сил значительно ниже вальцовки в первом переходе и также совпадают (на нижнем вале 61,3 кН; на верхнем – 61,2 кН). Стоит обратить внимание на наличие областей, не подвергнутых деформированию во втором переходе. Это обусловлено одинаковой длиной овального и круглого ручьев, из соображений упрощения изготовления инструмента. Данная особенность не влияет на заполнение ручьев штампа при окончательном формоизменении на КГШП.

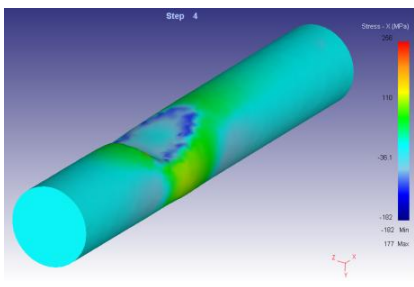
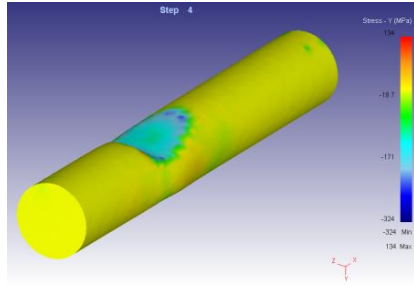
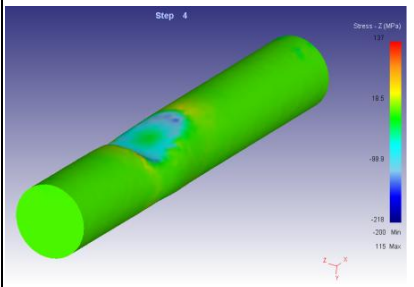
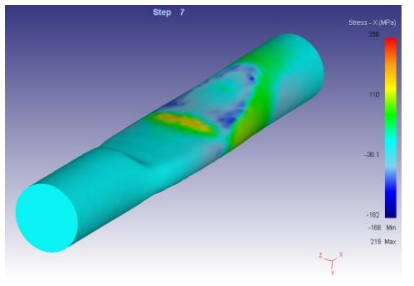
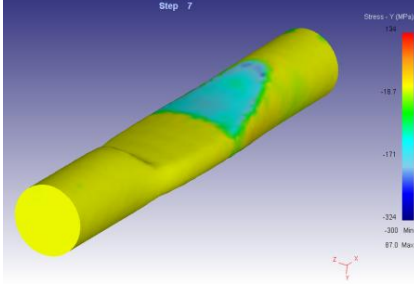
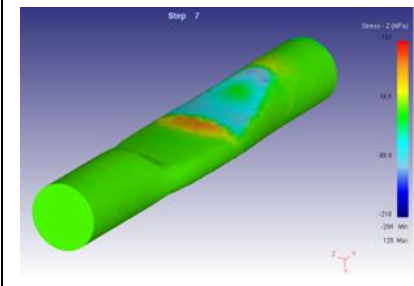
Программный комплекс позволяет проанализировать напряженно-

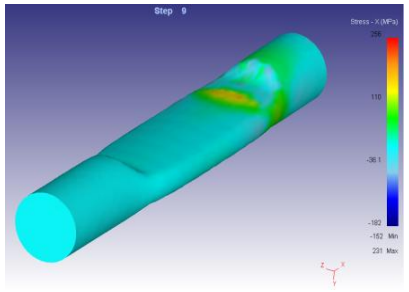
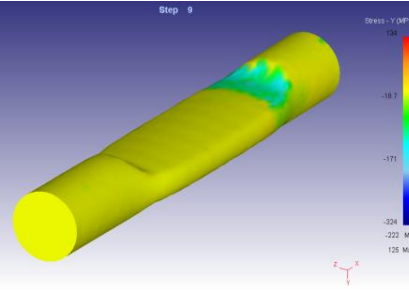
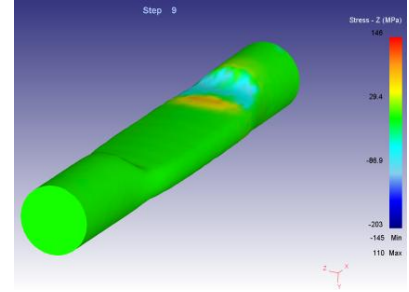
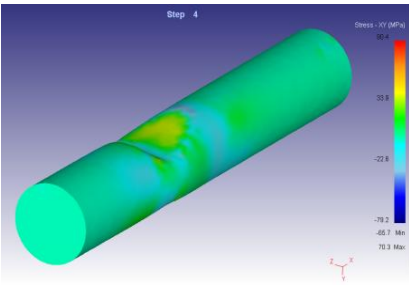
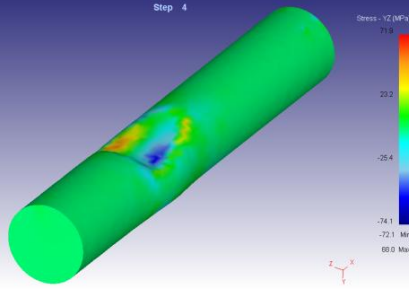
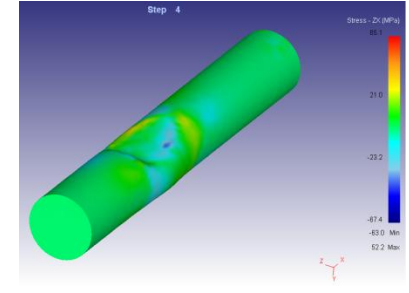
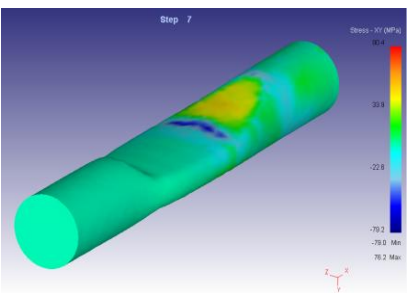
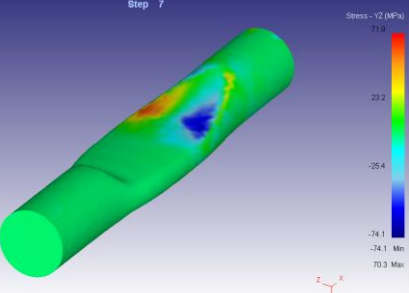
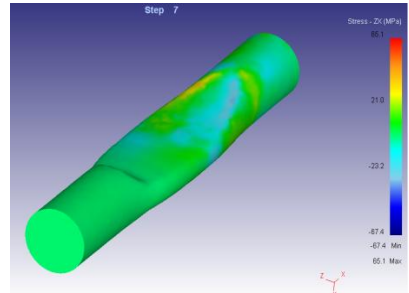
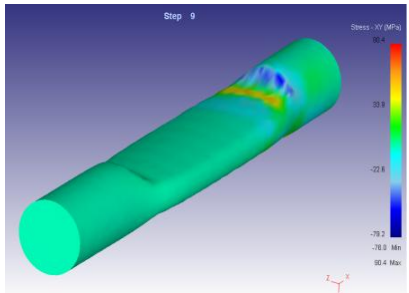
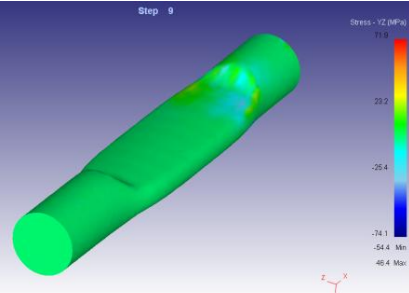
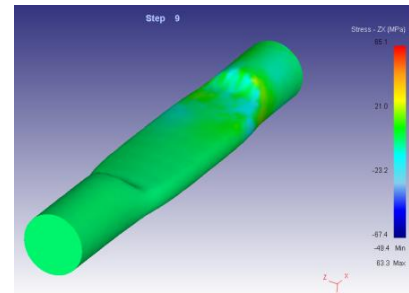
деформированное состояние (НДС) металла поковки. Компоненты тензора напряжений при вальцовке в овальном и круглом калибрах представлены в таблицах 3.1 и 3.2 соответственно.

По длине заготовки, в зоне контакта с секторами, преобладают сжимающие нормальные напряжения. В направлении оси X (см. таблицу 3.1) действуют преимущественно растягивающие нормальные напряжения, так как в данном направлении секторы растягивают поковку, увеличивая ее длину. Максимальные значения не превышают 231 МПа. Максимальные значения сжимающих напряжений, достигающие значения 324 МПа, наблюдаются в направлении, перпендикулярном оси поковки в направлении Y . В течение всего периода перемещения пятна контакта секторов-штампов с заготовкой распределение нормальных напряжений по объему непрерывно меняется. В направлении осей валов Z преобладают сжимающие напряжения.

Таблица 3.1

Значения нормальных и касательных напряжений в профилированной заготовке на разных этапах вальцовки в овальном ручье постоянного сечения

Нормальные напряжения		
σ_x	σ_y	σ_z
		
Шаг 4 ($t=0,1$ с)	Шаг 4 ($t=0,1$ с)	Шаг 4 ($t=0,1$ с)
		
Шаг 7 ($t=0,4$ с)	Шаг 7 ($t=0,4$ с)	Шаг 7 ($t=0,4$ с)

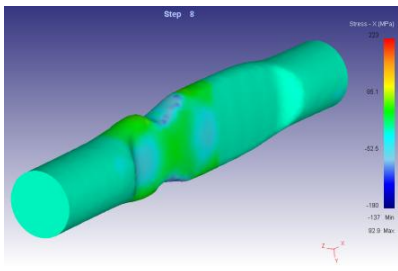
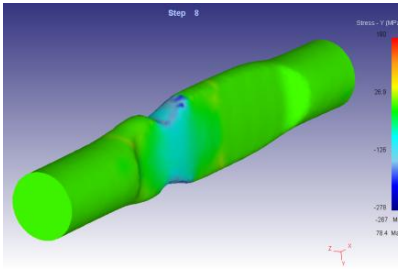
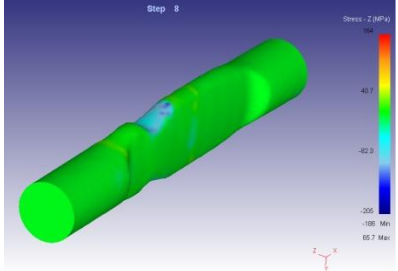
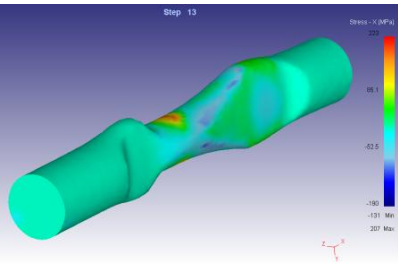
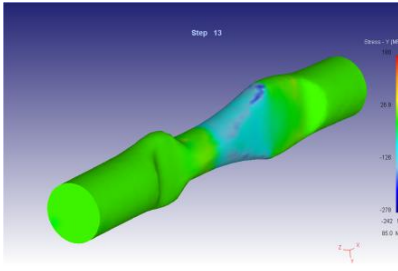
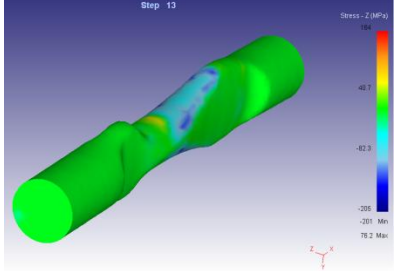
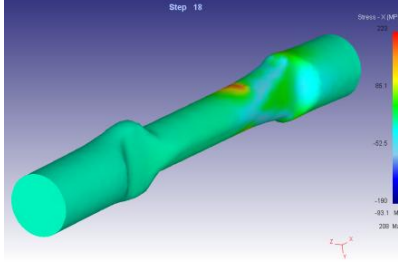
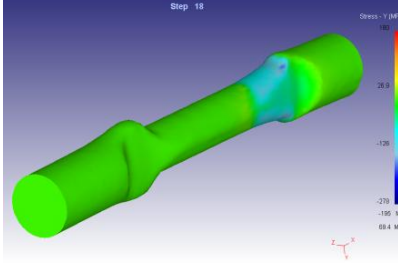
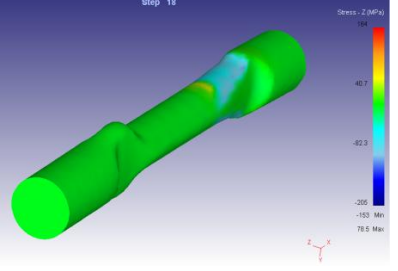
Нормальные напряжения		
σ_x	σ_y	σ_z
		
Шаг 9 (t=0,6 с)	Шаг 9 (t=0,6 с)	Шаг 9 (t=0,6 с)
Касательные напряжения		
τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
		
Шаг 4 (t=0,1 с)	Шаг 4 (t=0,1 с)	Шаг 4 (t=0,1 с)
		
Шаг 7 (t=0,4 с)	Шаг 7 (t=0,4 с)	Шаг 7 (t=0,4 с)
		
Шаг 9 (t=0,6 с)	Шаг 9 (t=0,6 с)	Шаг 9 (t=0,6 с)

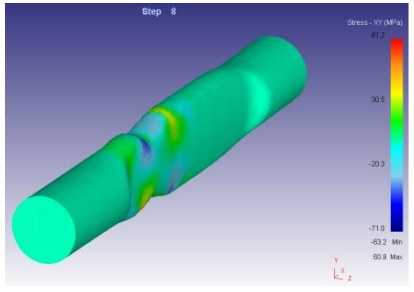
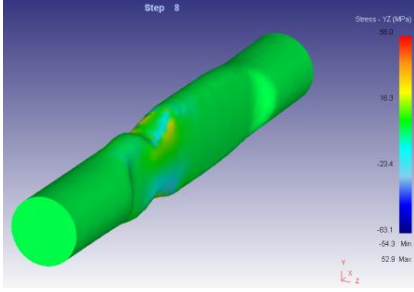
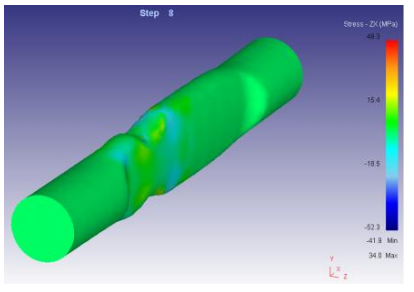
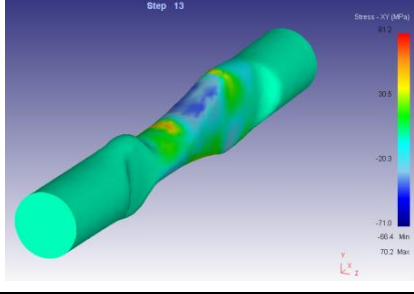
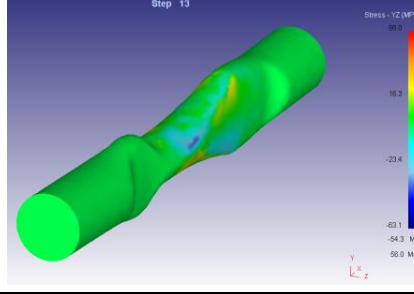
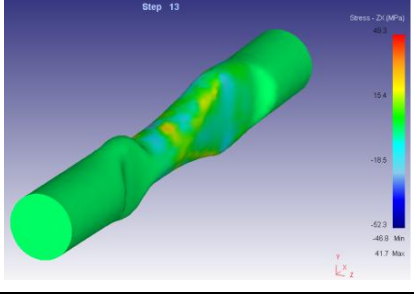
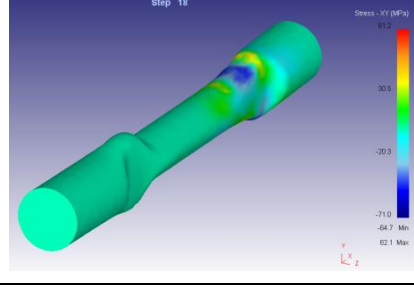
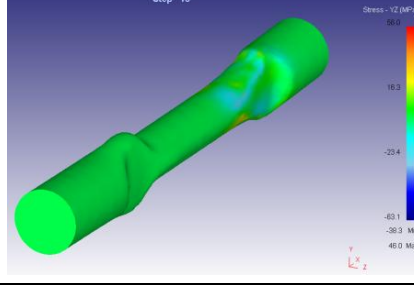
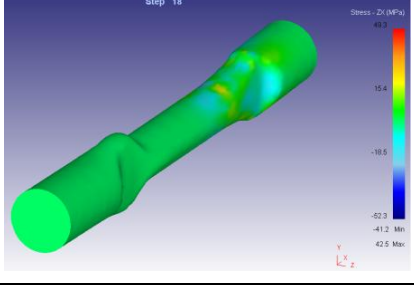
При оценке компонентов тензора напряжений, стоящих на главной

диагонали, в процессе горячей вальцовки в круглом калибре установлено, что максимальное нормальное растягивающее напряжение наблюдается в направлении оси X , значение которого - 208 МПа (таблица 3.2). Максимальные значения нормальных сжимающих напряжений, не превышающие 267 МПа, действуют в направлении, перпендикулярном оси поковки, т.е. в направлении оси Y . По оси Z максимальные нормальные напряжения в зоне растяжения - 76,2 МПа, а в зоне сжатия 201 МПа со знаком «минус».

Таблица 3.2

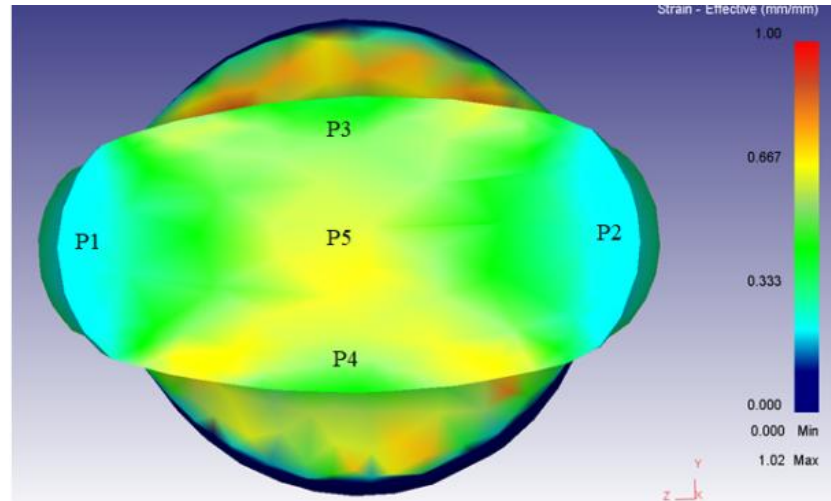
Значения нормальных и касательных напряжений в профилированной заготовке на разных этапах вальцовки в круглом ручье постоянного сечения

Нормальные напряжения		
σ_x	σ_y	σ_z
		
Шаг 8 ($t=0,1$ с)	Шаг 8 ($t=0,1$ с)	Шаг 8 ($t=0,1$ с)
		
Шаг 13 ($t=0,34$ с)	Шаг 13 ($t=0,34$ с)	Шаг 13 ($t=0,34$ с)
		
Шаг 18 ($t=0,56$ с)	Шаг 18 ($t=0,56$ с)	Шаг 18 ($t=0,56$ с)

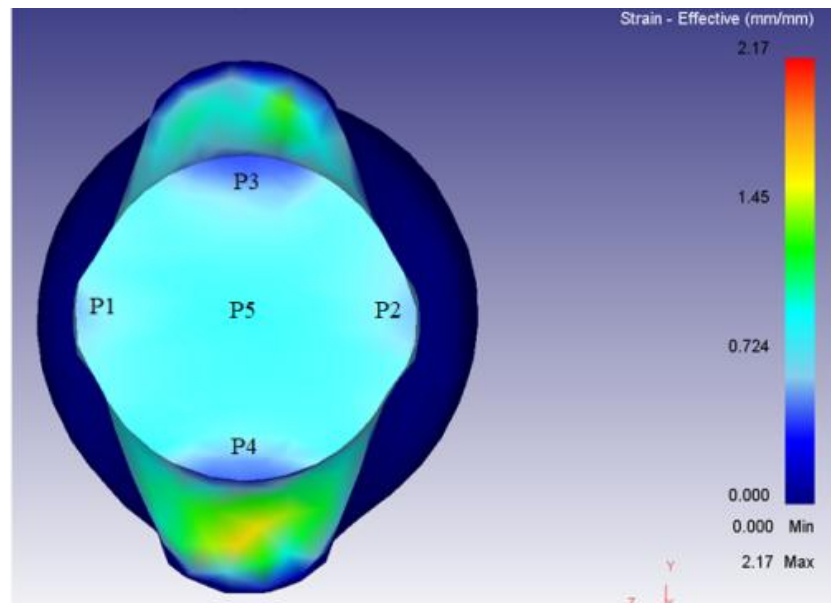
Касательные напряжения		
τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
		
Шаг 8 ($t=0,1$ с)	Шаг 8 ($t=0,1$ с)	Шаг 8 ($t=0,1$ с)
		
Шаг 13 ($t=0,34$ с)	Шаг 13 ($t=0,34$ с)	Шаг 13 ($t=0,34$ с)
		
Шаг 18 ($t=0,56$ с)	Шаг 18 ($t=0,56$ с)	Шаг 18 ($t=0,56$ с)

Интенсивности напряжений и деформаций являются производными инвариантами соответствующих тензоров при анализе формоизменения металла обработкой давлением [83-85, 93, 165]. Наличие функциональных связей между этими величинами позволяет выявить закономерности их изменения в деформационных процессах и прогнозировать момент перехода металла в пластическое состояние и особенности его дальнейшего течения, в том числе возможности разрушения. Так как пятно контакта инструментов с заготовкой перемещается вдоль ее оси, для детального анализа интенсивности напряжений и деформаций участок формоизменения заготовки на каждом

переходе делится на характерные сечения, соответствующие конкретному времени процесса горячей вальцовки, при этом, каждое сечение разделено на пять зон, где выбирается контрольная точка (рисунок 3.3). Точки 1 и 2 расположены у свободных поверхностей заготовки, где не происходит контакта с секторами-штампами, а точки 3 и 4 – в областях, близких к воздействию инструмента. Точка 5 отмечена в центральной области сечения.



а)



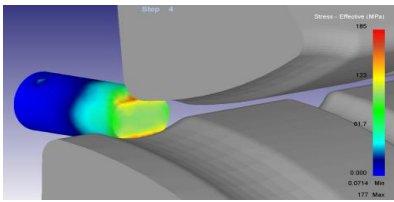
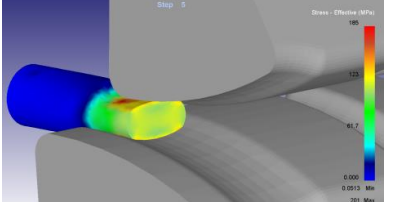
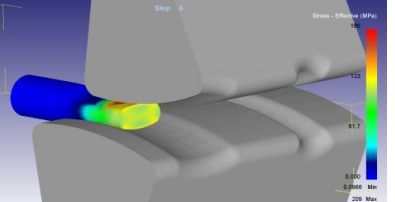
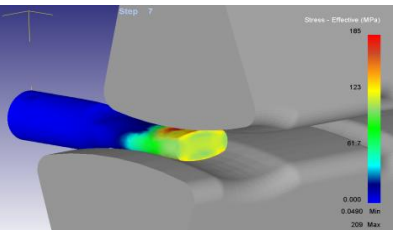
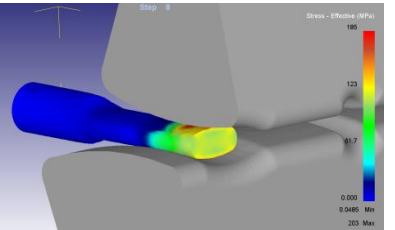
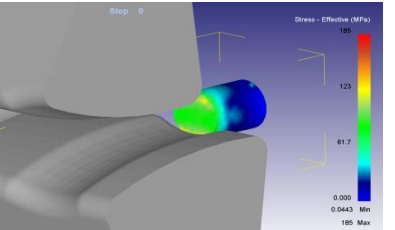
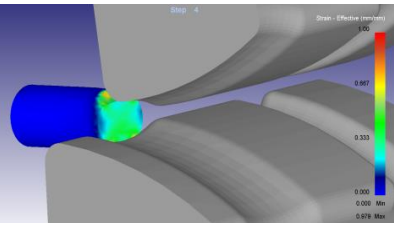
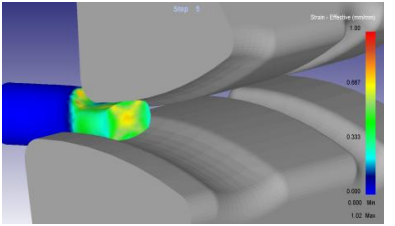
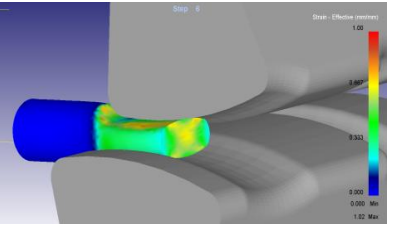
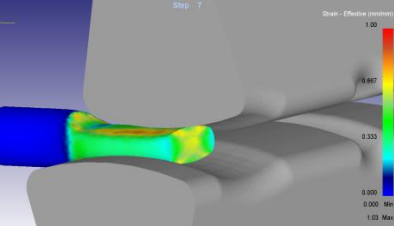
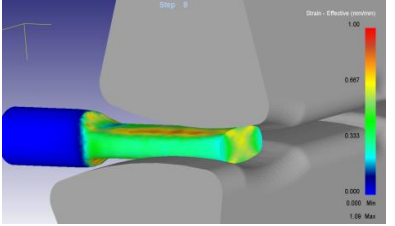
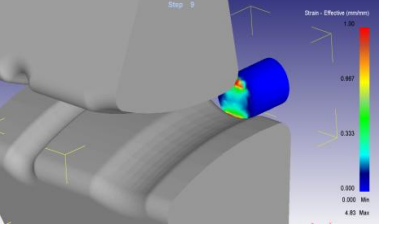
б)

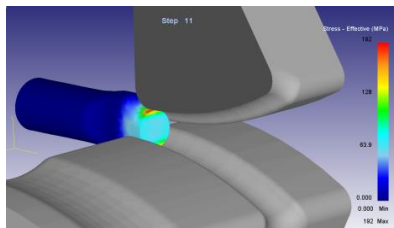
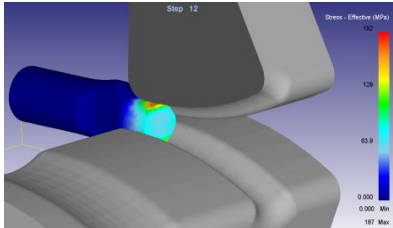
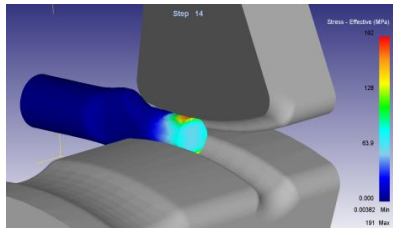
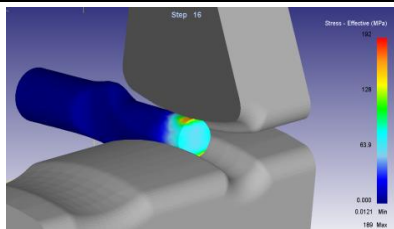
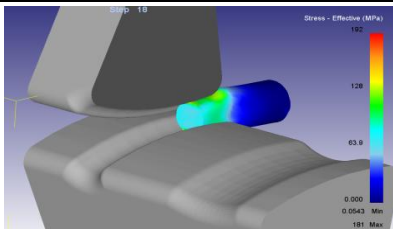
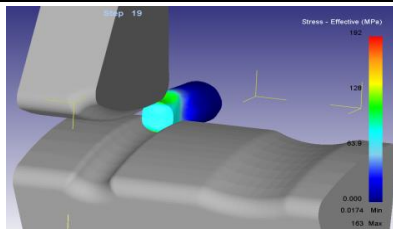
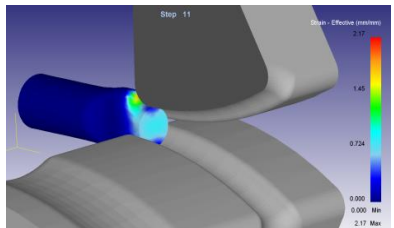
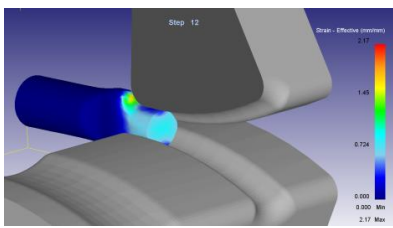
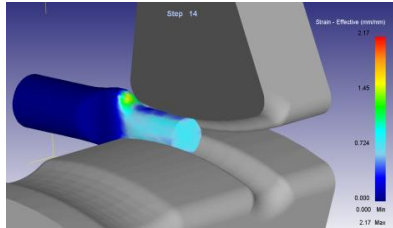
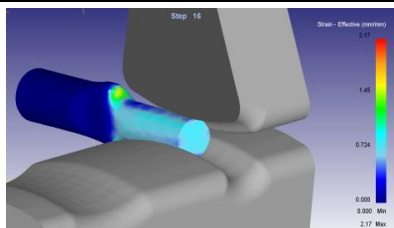
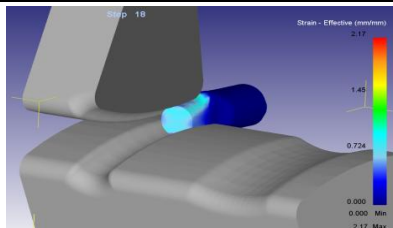
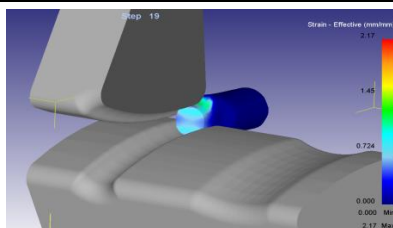
Рисунок 3.3. Пример расположения контрольных точек в сечении на конкретном участке формоизменения заготовки: а – первый переход; б – второй переход

В таблице 3.3 представлена информация о значениях интенсивностей напряжений и деформаций с помощью проведенного компьютерного моделирования, где изменение положения очага деформации проиллюстрировано шестью этапами, соответствующими определенным отрезкам времени воздействия секторов-штампов на заготовку.

Таблица 3.3

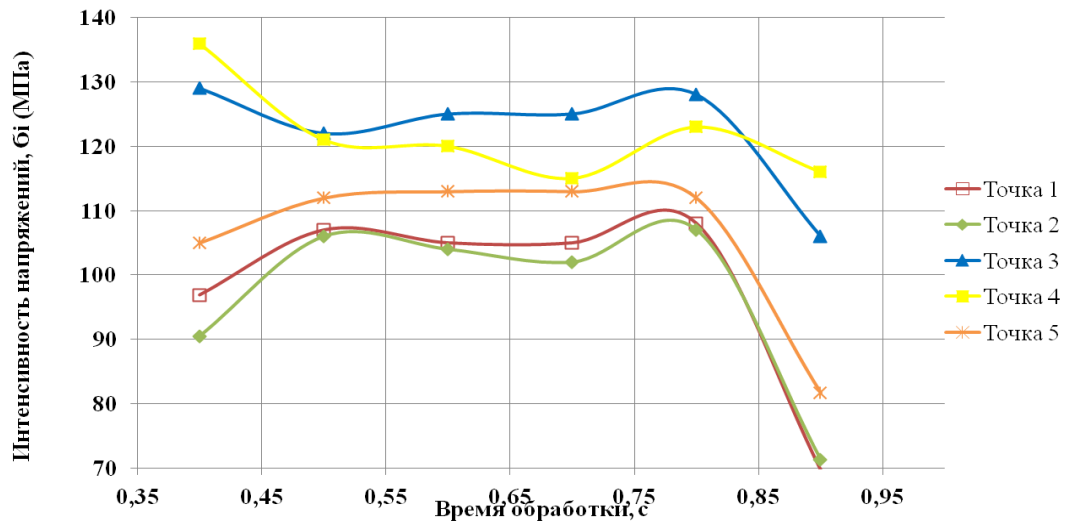
Изменение формы деформируемого участка заготовки и значения интенсивности напряжений и деформаций в ее сечениях на шести временных этапах горячей вальцовки в ручьях постоянного сечения

Интенсивность напряжений при обработке в овальном ручье		
		
Шаг 4 (0,1 с)	Шаг 5 (0,2 с)	Шаг 6 (0,3 с)
		
Шаг 7 (0,4 с)	Шаг 8 (0,5 с)	Шаг 9 (0,6 с)
Интенсивность деформаций при обработке в овальном ручье		
		
Шаг 4 (0,1 с)	Шаг 5 (0,2 с)	Шаг 6 (0,3 с)
		
Шаг 7 (0,4 с)	Шаг 8 (0,5 с)	Шаг 9 (0,6 с)

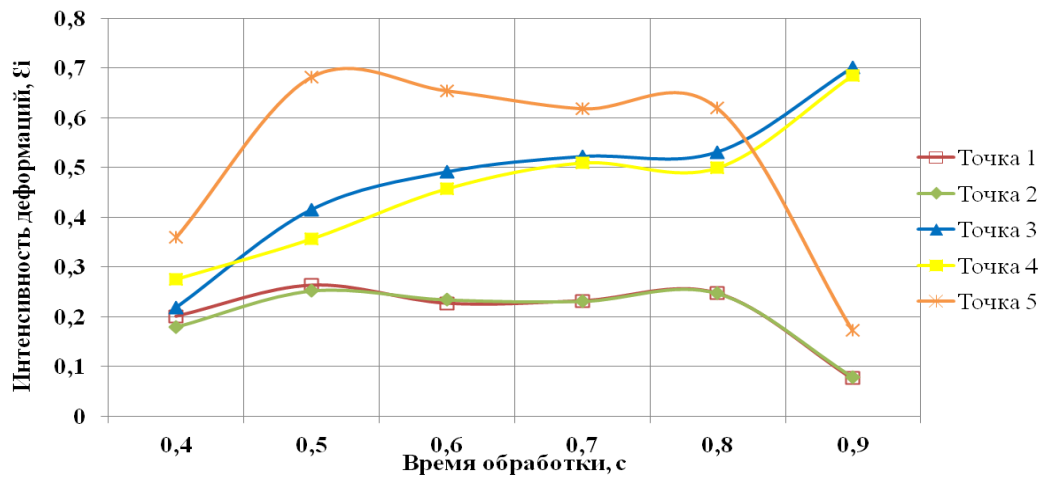
Интенсивность напряжений при обработке в круглом ручье		
		
Шаг 11 (0,26 с)	Шаг 12 (0,31 с)	Шаг 14 (0,41 с)
		
Шаг 16 (0,51 с)	Шаг 18 (0,58 с)	Шаг 19 (0,66 с)
Интенсивность деформаций при обработке в круглом ручье		
		
Шаг 11 (0,26 с)	Шаг 12 (0,31 с)	Шаг 14 (0,41 с)
		
Шаг 16 (0,51 с)	Шаг 18 (0,58 с)	Шаг 19 (0,66 с)

Исходя из полученных значений производных инвариантов тензоров напряжений в контрольных точках («точка» 1 – «точка» 5 см. рисунок 3.5) на разных временных интервалах деформирования сформированы графики обобщенных характеристик, представляющих собой общую картину изменения интенсивностей напряжений и деформаций (рисунок 3.4). Каждая линия на графиках соответствует изменению исследуемого параметра в

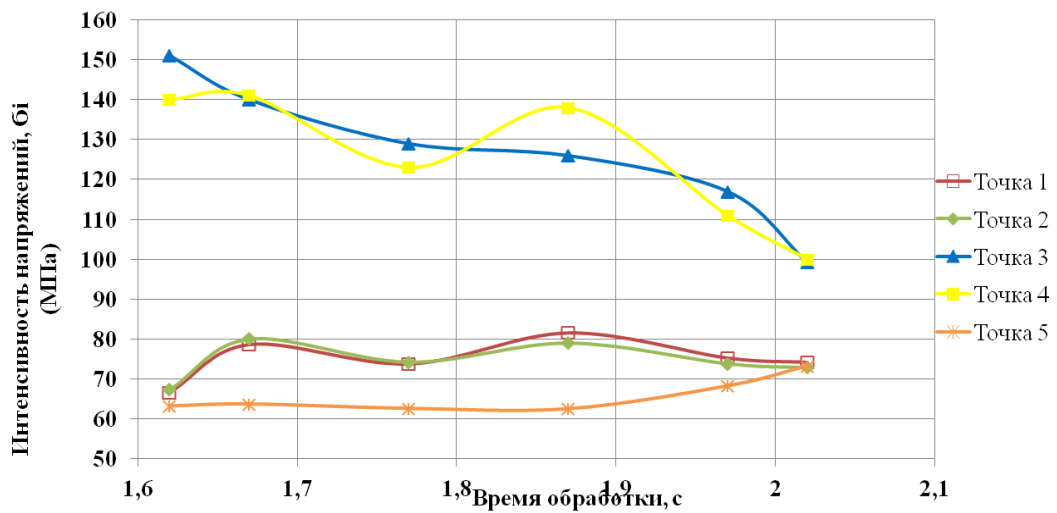
отслеживаемой точке поперечного сечения заготовки за цикл ее обработки в ручьях секторов-штампов с овальным и круглым ручьями.



а)



б)



в)

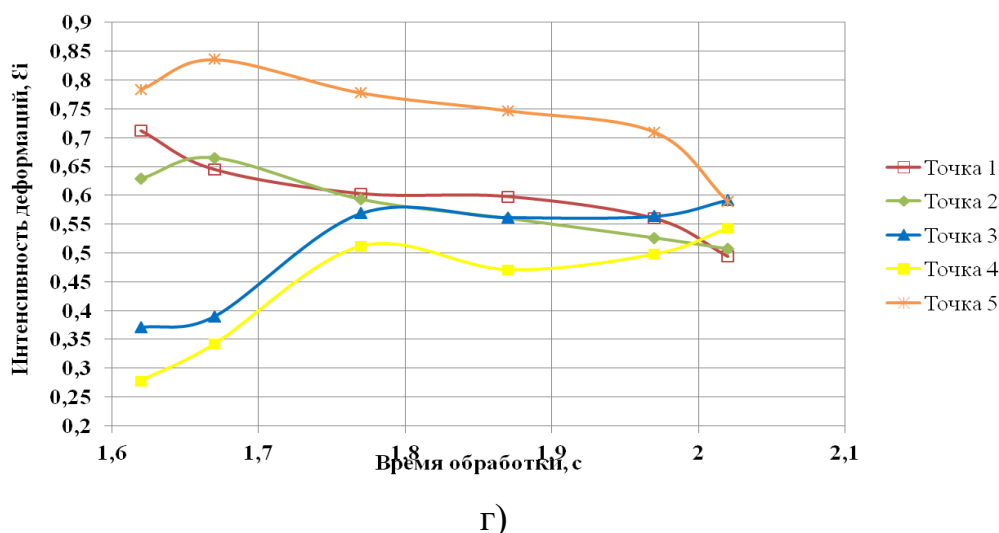


Рисунок 3.4. Изменение интенсивности напряжений и интенсивности деформаций в сечениях профилируемой заготовки в изменяемом во времени локальном очаге воздействия секторов-штампов:
а, б – овальный калибр; в, г – круглый калибр

В контрольных точках 1, 2 и 5, расположенных в поперечном сечении заготовки на одной горизонтальной прямой, характер изменения отслеживаемых параметров является схожим. Интенсивность напряжений в металле заготовки, обрабатываемой в овальном ручье в точках 1 и 2, находящихся ближе к свободной поверхности, и в точке 5, расположенной по центру поперечного сечения, имеет разброс значений, не превышающий 9 %. В точках 3 и 4, находящихся в зонах контакта заготовки с секторами-штампами, максимальные значения интенсивности напряжений 129 МПа и 136 МПа соответственно при внедрении инструмента в заготовку на начальном этапе вальцовки. При уменьшении размеров поперечного сечения заготовки в круглом ручье максимальные значения интенсивности напряжений возникают в точке 3 (начало процесса 150 МПа; в конце обработки 100 МПа) и точке 4 (начало процесса 140 МПа; в конце обработки 110 МПа) на протяжении цикла вальцовки. Что касается интенсивности деформаций, то наибольшие значения сопровождают формоизменение в точке 5 (начало процесса 0,78; в конце обработки 0,58). При окончании операции

вальцовки в круглом ручье интенсивность деформаций характеризуются значением 0,55 в точке 4; в точках 3 и 5 - значением 0,58, а в точках 1 и 2 – значением 0,50. Другими словами разброс для интенсивности деформаций в конце обработки в круглом ручье не превышает 8% для точек, расположенных в разных зонах поперечного сечения деформируемой заготовки.

Таким образом, анализ результатов компьютерного моделирования показал, что процессы деформирования в овальном и круглом калибрах являются нестационарными и для контрольных точек, расположенных в различных зонах поперечного сечения заготовки, значения интенсивности напряжений в овальном калибре вписывается в диапазон 70 – 136 МПа, для круглого калибра этот показатель изменяется в пределах 62 – 150 МПа. Для интенсивности деформаций значения следующие: в овальном калибре 0,09 – 0,7; в круглом калибре – 0,27 – 0,88.

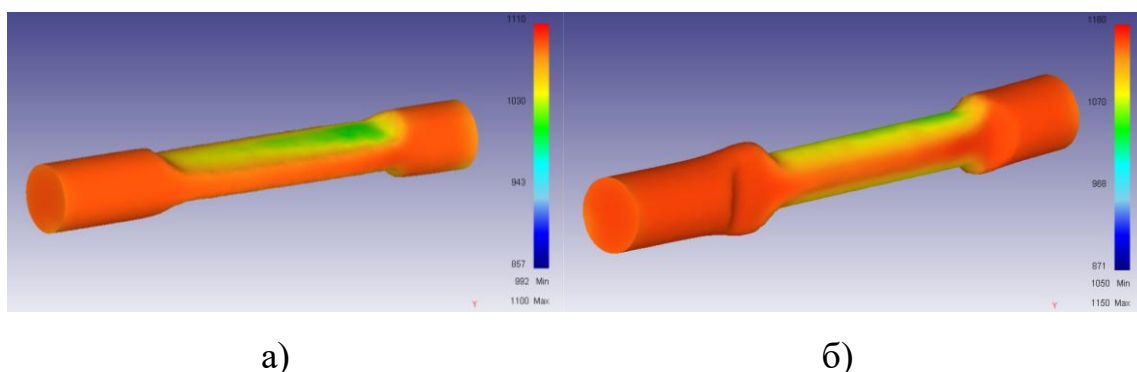


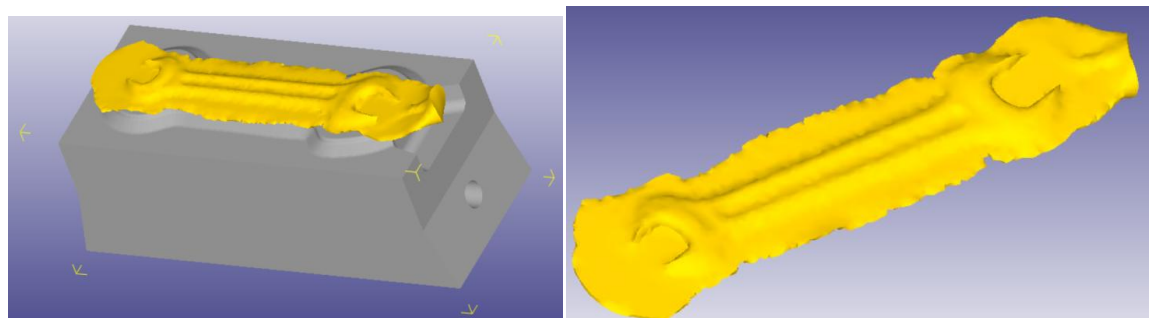
Рисунок 3.5. Температурное поле профилированных заготовок при горячей вальцовке в ручьях постоянного сечения: а – овальный калибр; б – круглый калибр

Анализ температурного поля (рисунок 3.5) позволяет заключить, что в результате горячей вальцовки в двух переходах температура не выходит за пределы допустимого интервала горячей обработки, при этом дополнительный нагрев под штамповку на КГШП не требуется. Стоит отметить, что на поверхности контакта заготовки с инструментом температура ниже.

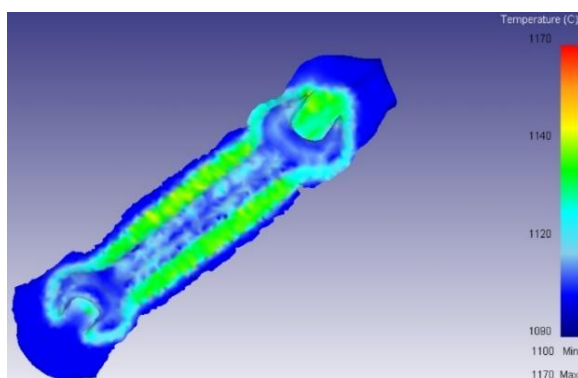
3.3 Технология штамповки на КГШП профилированной заготовки, полученной вальцовкой в ручьях постоянного сечения

Исследование поковки после окончательного формоизменения на КГШП проходит по таким параметрам, как оценка заполняемости ручья штампа (рисунок 3.6 а) и температурного поля (рисунок 3.6 б), а также определение силы штамповки (рисунок 3.6 в) с последующим сравнением с расчетными данными [113, 165].

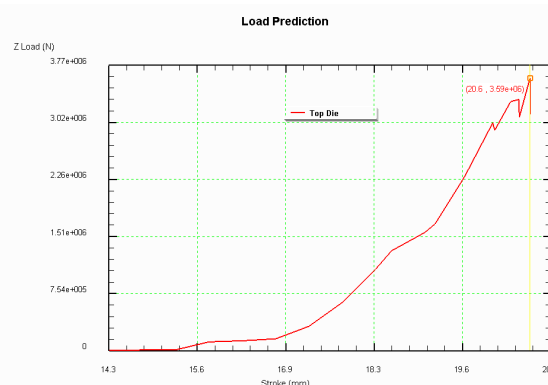
Форма окончательной поковки гаечного ключа указывает на качественное заполнение ручья штампа, а интервал температур 1100 °С – 1170 °С позволяет дополнительно убедиться в том, что технологический процесс рентабелен при однократном нагреве исходной заготовки.



а)



б)



в)

Рисунок. 3.6. Результаты моделирования штамповки гаечного ключа на КГШП: а – математическая модель вставки КГШП и поковка с облоем после окончательного ручья; б – температурное поле; в – график зависимости силы от хода пресса

Оценка силовых параметров дает возможность сделать вывод о том, что модель прессы выбрана правильно (по технологическим расчетам сила равна 3644 кН, а в результате моделирования – 3710 кН)

Таким образом, можно заключить, что профилированная заготовка, полученная операцией вальцовки, имеет корректные размеры. Однако, в области рукояти гаечного ключа присутствует избыточное количество облоя, которое можно уменьшить, скорректировав размеры ручьев секторов-штампов.

3.4 Рационализация горячей вальцовки методом моделирования для повышения ресурсосбережения

В ходе проведения компьютерного моделирования горячей вальцовки в ручьях постоянного сечения был спрогнозирован повышенный выход металла в облой преимущественно в центральной области профилированной заготовки. С помощью виртуальных экспериментов в программе DEFORM-3D удалось скорректировать поперечные размеры калибров таким образом, чтобы обеспечить необходимое перетекание объема металла на характерных участках ручья, при этом, длины ручьев секторов-штампов и исходные данные сохраняются. Скорректированные размеры сечений калибров представлены на рисунке 3.7.

Визуальное представление профилированных заготовок и силовые параметры вальцовки изображены на рисунке 3.8. Максимальная сила при вальцовке в овальном калибре на верхнем валке равна 80,5 кН, на нижнем валке равна 80,3 кН (рисунок 3.8 а). Значения сил на валах практически совпадают. В начале операции вальцовки, когда сектора начинают соприкасаться с поковкой, происходит рост силы с большой интенсивностью, соответственно растут и напряжения.

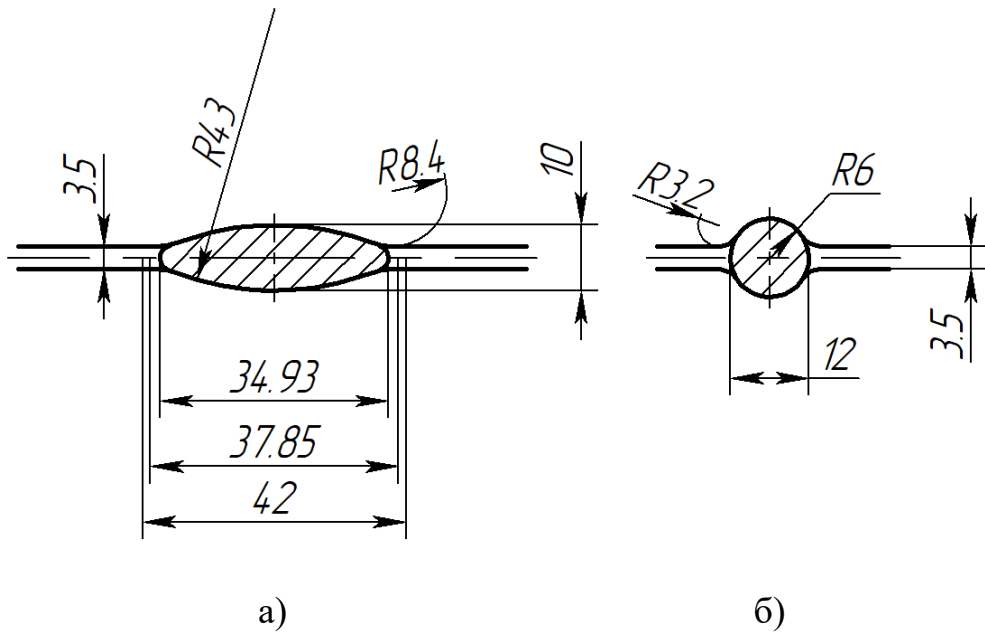


Рисунок 3.7. Скорректированные размеры овального (а) и круглого (б) калибров

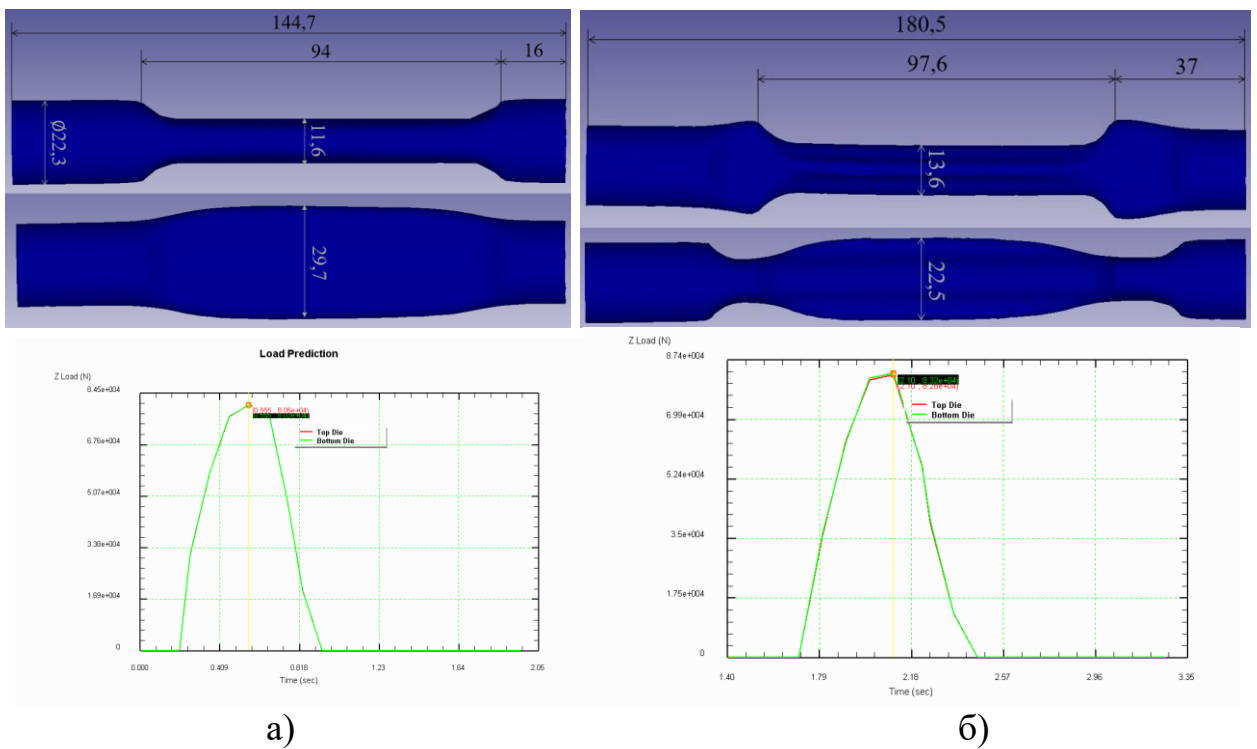


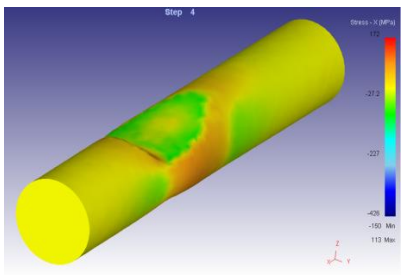
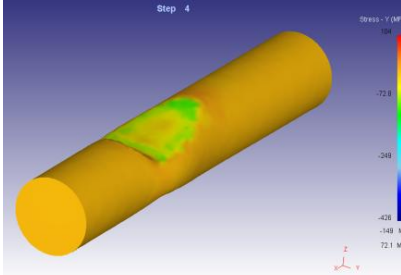
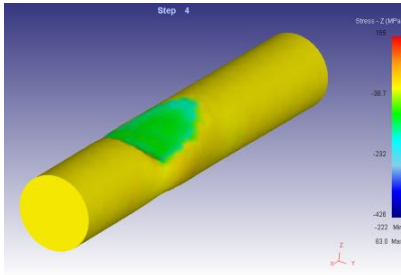
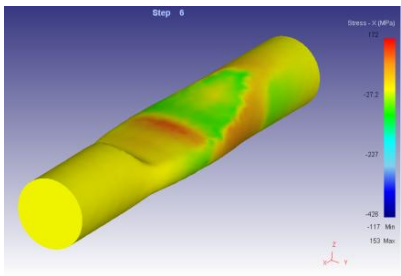
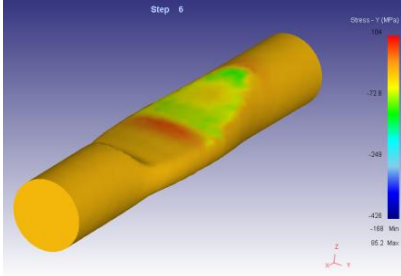
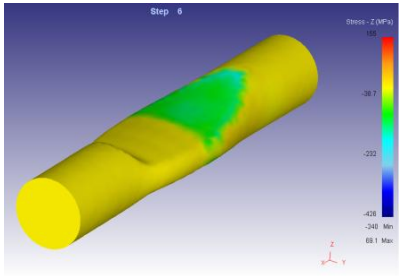
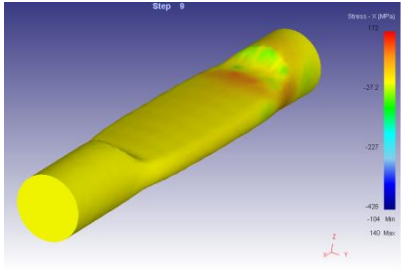
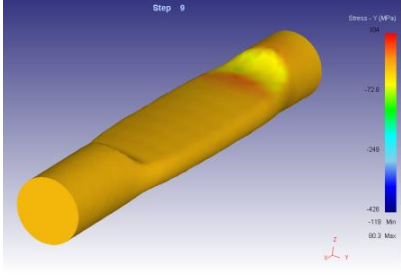
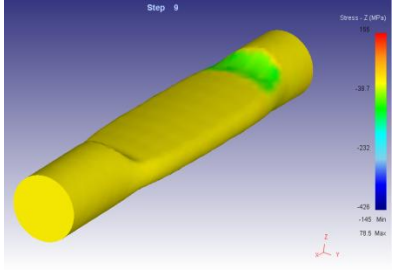
Рисунок 3.8. Форма, размеры в плане и силовые параметры при профилировании заготовок вальцовкой: а – в овальном калибре; б – в круглом калибре

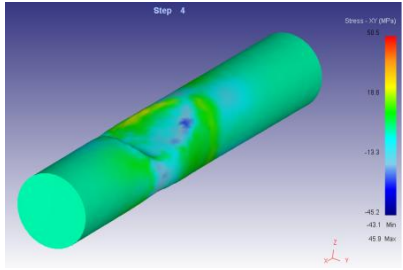
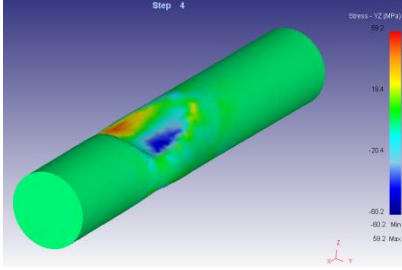
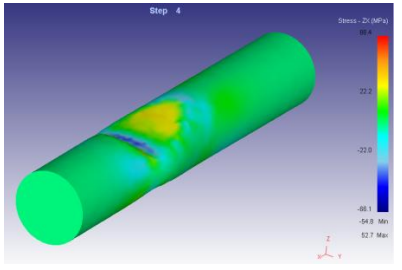
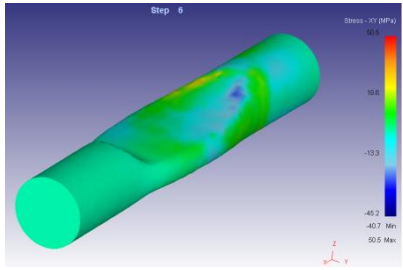
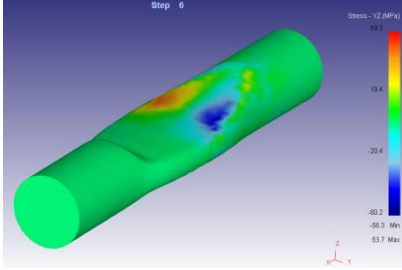
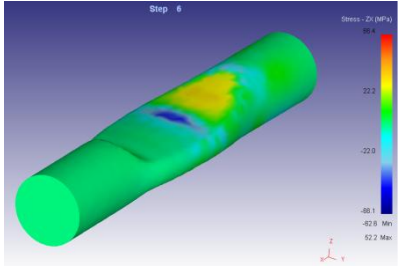
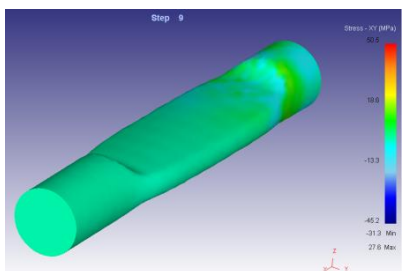
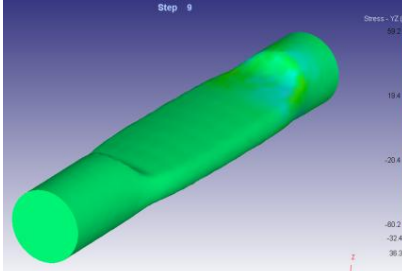
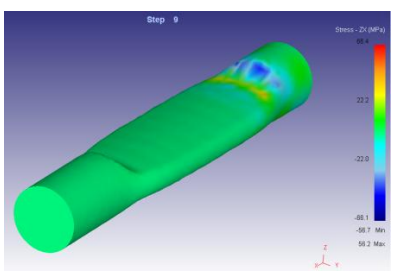
График зависимости силы от времени вальцовки в круглом калибре (рисунок 3.8 б) показывает, что горячая вальцовка в круглом калибре проходит с тем же уровнем силовых параметров, что и в овальном калибре (на верхнем валке сила равна 82,6 кН; на нижнем валке сила равна 83,2 кН).

В результате проведенного анализа нормальных и касательных напряжений при вальцовке в овальном калибре (таблица 3.4) установлено, что в зоне касания инструментов вдоль длины заготовки преобладают сжимающие нормальные напряжения.

Таблица 3.4

Значения нормальных и касательных напряжений в профилированной заготовке на разных этапах вальцовки в овальном ручье постоянного сечения

Нормальные напряжения		
σ_x	σ_y	σ_z
		
Шаг 4 ($t=0,16$ с)	Шаг 4 ($t=0,16$ с)	Шаг 4 ($t=0,16$ с)
		
Шаг 6 ($t=0,36$ с)	Шаг 6 ($t=0,36$ с)	Шаг 6 ($t=0,36$ с)
		
Шаг 9 ($t=0,63$ с)	Шаг 9 ($t=0,63$ с)	Шаг 9 ($t=0,63$ с)

Касательные напряжения		
τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
		
Шаг 4 ($t=0,16$ с)	Шаг 4 ($t=0,16$ с)	Шаг 4 ($t=0,16$ с)
		
Шаг 6 ($t=0,36$ с)	Шаг 6 ($t=0,36$ с)	Шаг 6 ($t=0,36$ с)
		
Шаг 9 ($t=0,63$ с)	Шаг 9 ($t=0,63$ с)	Шаг 9 ($t=0,63$ с)

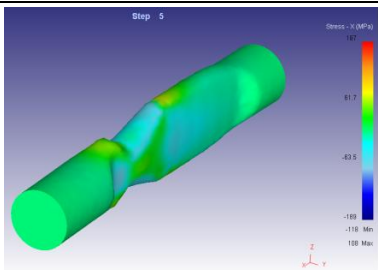
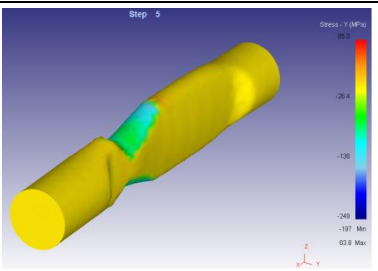
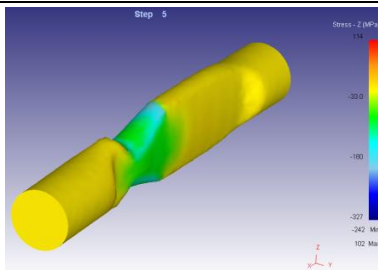
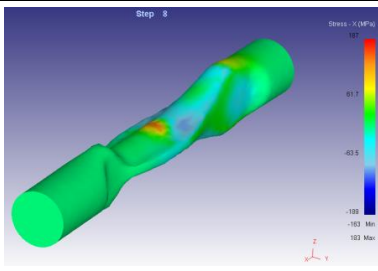
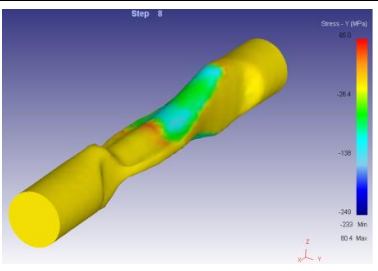
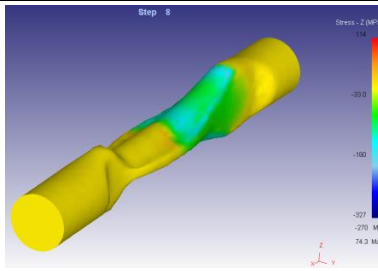
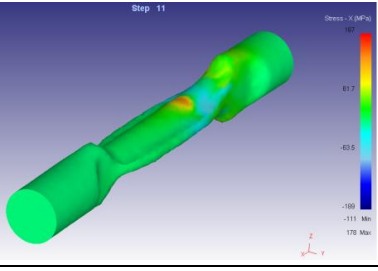
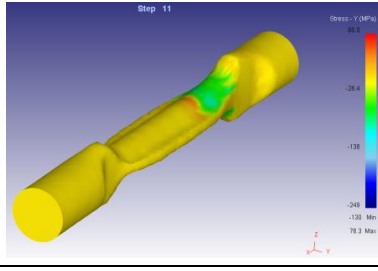
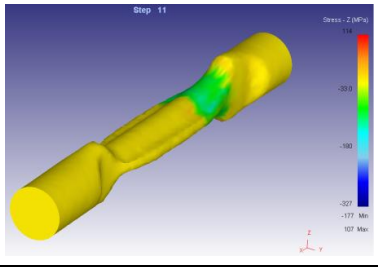
В направлении оси X секторы протягивают заготовку и преобладают растягивающие напряжения, не превышающие 153 МПа. Вдоль перемещающегося пятна контакта распределение нормальных напряжений непрерывно меняется. В направлении, совпадающем с направлением осей валков Y , преобладают сжимающие напряжения. В направлении Z также преобладают сжимающие нормальные напряжения с большими значениями, но не превышающими 240 МПа. В данном направлении происходит сжатие заготовки. Уровень касательных напряжений по стадиям вальцовки в овальном калибре также представлен в таблице 3.4.

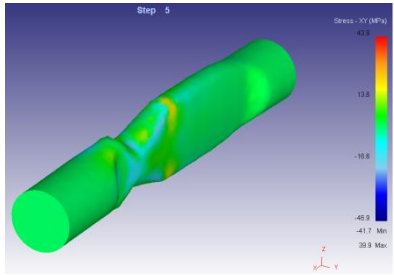
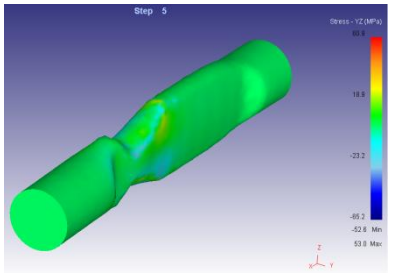
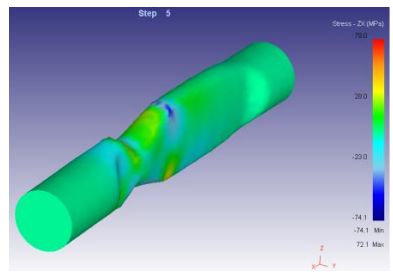
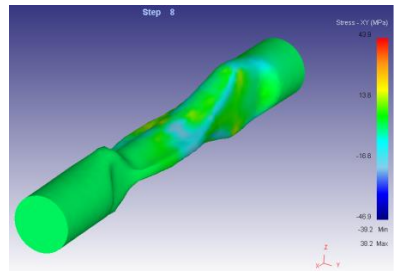
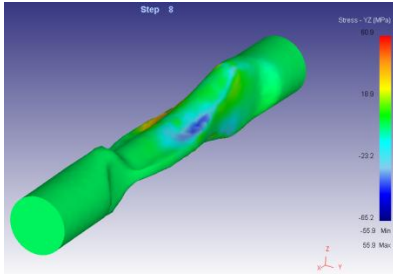
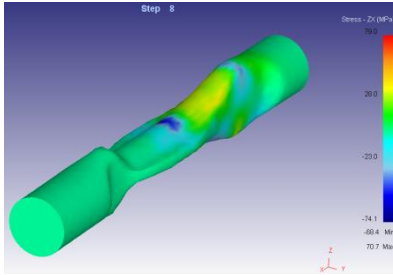
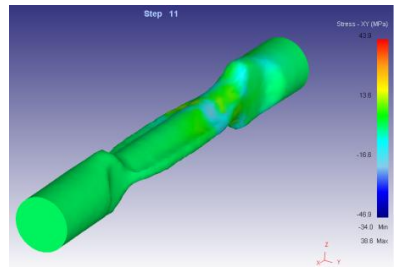
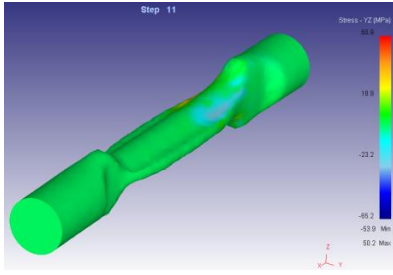
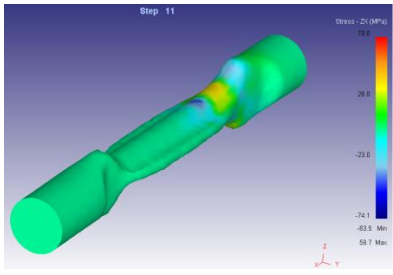
Анализируя значения напряжений в металле профилированной заготовки на разных этапах вальцовки в круглом калибре (таблица 3.5) вдоль осей координат установлено, что максимальное растягивающее напряжение наблюдается в направлении оси X , совпадающей с осью заготовки, и равно 193 МПа.

По оси Y при вальцовке в овальном ручье преобладают нормальные сжимающие напряжения, которые меньше по сравнению с направлением, перпендикулярным оси полуфабриката, т. е. оси Z , где их значения не превышают 270 МПа.

Таблица 3.5

Значения нормальных и касательных напряжений в профилированной заготовке на разных этапах вальцовки в круглом ручье постоянного сечения

Нормальные напряжения		
σ_x	σ_y	σ_z
		
Шар 5 ($t=0,1$ с)	Шар 5 ($t=0,1$ с)	Шар 5 ($t=0,1$ с)
		
Шар 8 ($t=0,4$ с)	Шар 8 ($t=0,4$ с)	Шар 8 ($t=0,4$ с)
		
Шар 11 ($t=0,56$ с)	Шар 11 ($t=0,56$ с)	Шар 11 ($t=0,56$ с)

Касательные напряжения		
τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
		
Шар 5 ($t=0,1$ с)	Шар 5 ($t=0,1$ с)	Шар 5 ($t=0,1$ с)
		
Шар 8 ($t=0,4$ с)	Шар 8 ($t=0,4$ с)	Шар 8 ($t=0,4$ с)
		
Шар 11 ($t=0,56$ с)	Шар 11 ($t=0,56$ с)	Шар 11 ($t=0,56$ с)

Анализ касательных напряжений показал, что значимые изменения происходят только в моменты начала и окончания контакта секторов-штампов с поковкой, поскольку значительных колебаний величины этих напряжений не обнаружено.

Рисунок 3.9 иллюстрирует изменение деформированного состояния профилируемой заготовки, оцениваемое интенсивностью деформаций, а также температурных поле профилированных заготовок двух переходов вальцовки в овальном и круглом калибрах. Максимальная интенсивность деформации сопровождается вальцовку в овальном и круглом калибрах в начальный и конечный моменты контакта инструмента с заготовкой.

Наибольшие значения интенсивности составили 1,33 (овальный калибр) и 3,72 (круглый калибр).

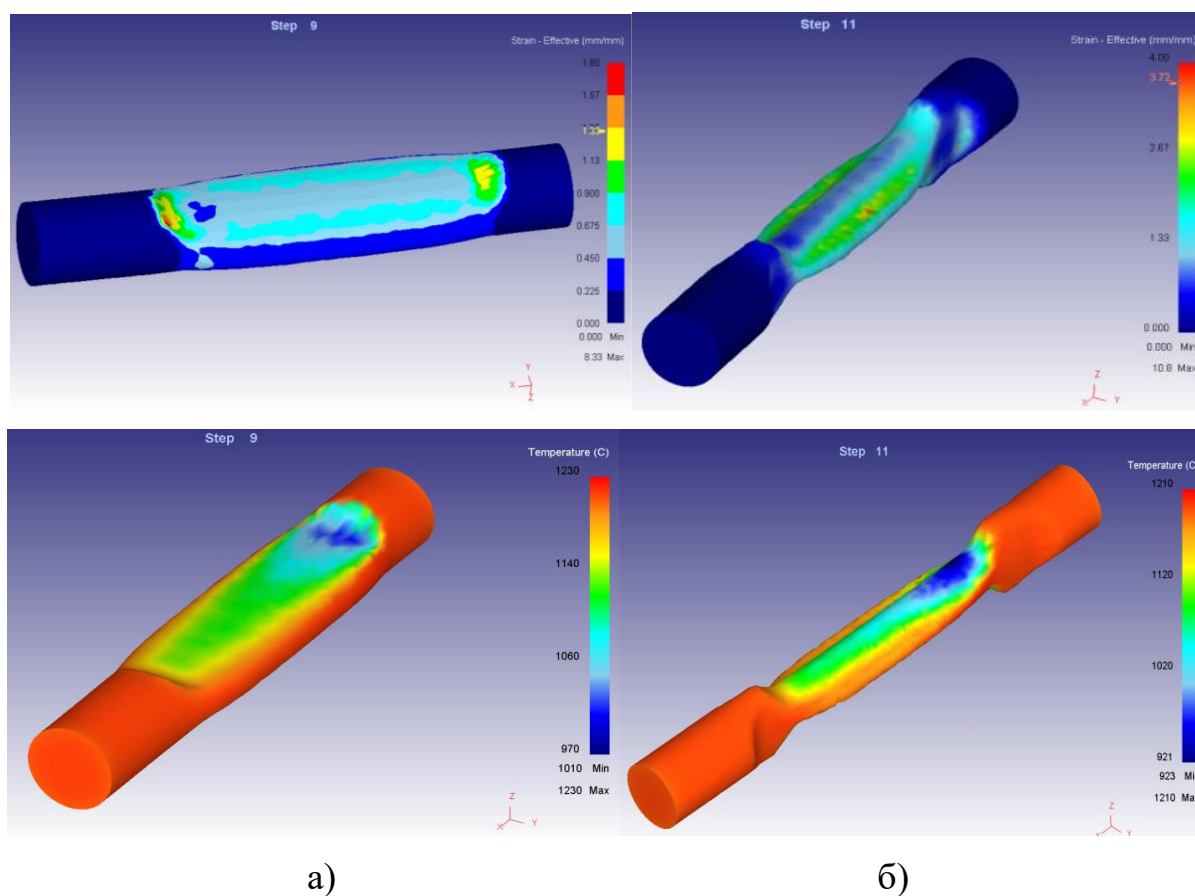
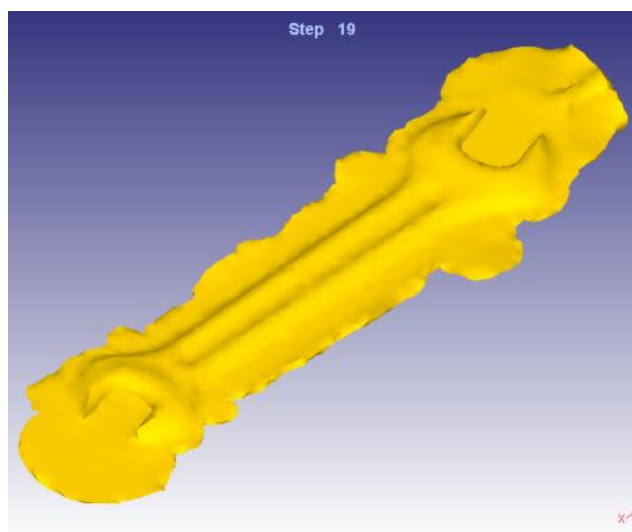


Рисунок 3.9. Интенсивность деформации и температурные поля вальцованных заготовок в овальном (а) и круглом (б) калибрах

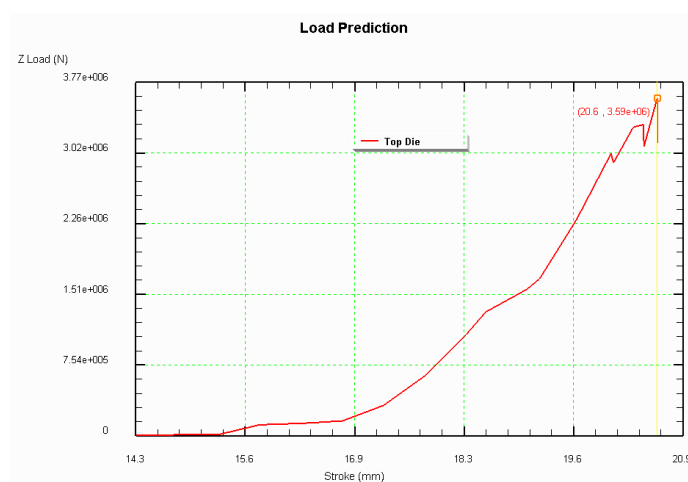
Остаточная температура заготовки после вальцовки в овальном и круглом калибрах не выходит за пределы нижней границы допустимого интервала горячей штамповки (860 °С) и не требует дополнительного нагрева под окончательную штамповку.

Компьютерное моделирование штамповки на КГШП показало, что в ходе исследования не выявлено дефектов, связанных с недоштамповкой, что подтверждает достаточный объем исходной заготовки, и также это свидетельствует о корректности формы и размеров профилированной заготовки, полученной вальцовкой (рисунок 3.10 а). Анализ силовых параметров при штамповке профилированной заготовки в окончательном

ручье, показал, что максимальное значение силы при горячей штамповке составляет 3590 кН, что также допустимо для выбранного пресса (рисунок 3.10 б).



а)



б)

Рисунок 3.10. Модель поковки гаечного ключа с облоем (а) и график изменения силы по ходу пресса (б) при горячей штамповке профилированной заготовки на КГШП

По результатам технологических расчетов и компьютерного моделирования исследованы три варианта профилированных заготовок, размеры которых приведены в таблице 3.6. Первый и второй варианты профилированных полуфабрикатов получены из исходной заготовки,

имеющей длину 136 мм и диаметр 22 мм. Третий вариант - деформирование из исходной заготовки такого же диаметра, но меньшей длины 122 мм [166].

Таблица 3.6

Размеры профилированных заготовок по вариантам технологии вальцовки

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
	Расчетная профилированная заготовка	Профилированная заготовка, полученная в результате моделирования в секторах, размеры которых вычислены аналитическими расчетами	Профилированная заготовка, полученная в результате моделирования в секторах со скорректированными ручьями
Длина поковки, мм	177,4	184	180,5
Ширина вальцованной части, мм	Круг Ø16мм	17,6	22,5
Высота вальцованной части, мм		16	13,6
Длина вальцованной части, мм	100	91,7	97,6
Диаметр утолщений, мм	22	22	22

3.5 Моделирование процесса вальцовки в секторах-штампах в ручьях переменного сечения

Профилированные заготовки после горячей вальцовки в овальном и квадратном калибре и графики зависимости силы от времени вальцовки представлены на рисунке 3.11. По результатам моделирования двух переходов было принято решение увеличить длину вальцуемой области в зоне стержня на 18 мм (разница в сравнении с технологическими расчетами 15%) у первого перехода, чтобы обеспечить геометрию окончательной профилированной заготовки, максимально приближенную к данным эпюры диаметров и

сечений. Полученные полуфабрикаты имеют минимальные отклонения оси от прямолинейности, что говорит об устойчивом характере процесса вальцовки, а размерные параметры окончательной профилированной заготовки близки к расчетным данным.

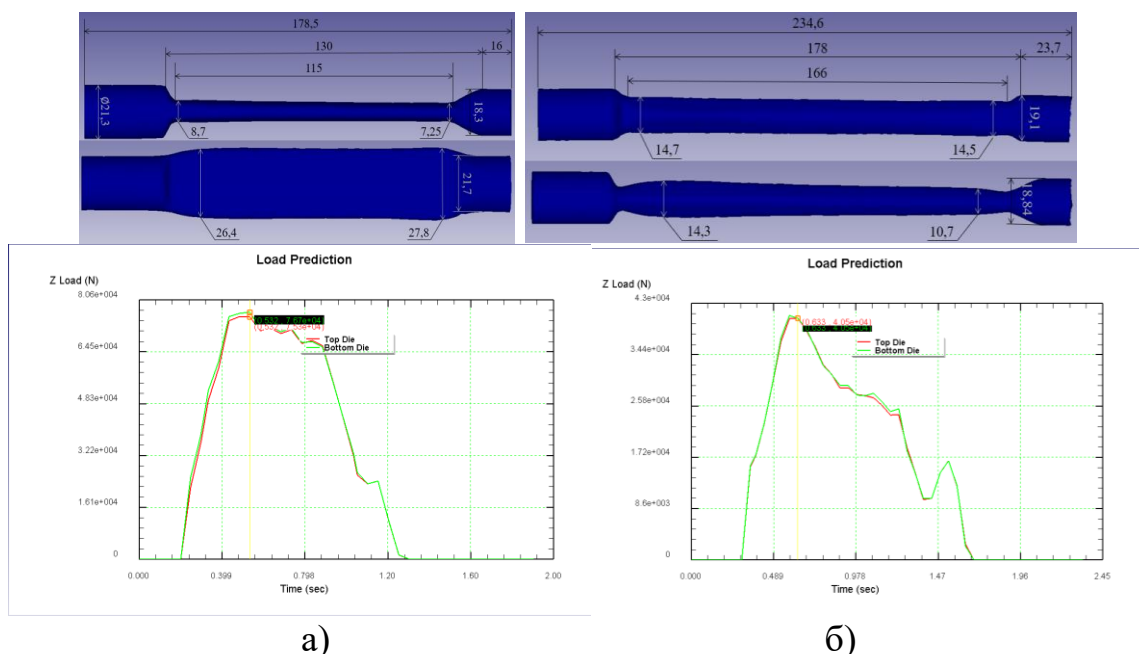


Рисунок 3.11. Форма, размеры и силовые параметры в процессе профилирования заготовки вальцовкой в ручьях переменного сечения:
а – в овальном калибре; б – в квадратном калибре

Графическое представление зависимости силы от времени вальцовки в ручьях переменного сечения отличается от графиков вальцовки в ручьях постоянного сечения плавным изменением параметра после внедрения инструмента в заготовку и характерными перепадами в моменты резкого преобразования формы и размеров заготовки в ручьях секторов-штампов.

В ходе более подробного анализа графиков можно сделать вывод о том, что значения сил невелики (максимальная сила при вальцовке в овальном калибре равна 75,3 кН на верхнем валке и 76,7 кН на нижнем валке; в процессе вальцовки в квадратном калибре – 40,5 кН на обоих валках) и находятся в пределах силовых возможностей ковочных вальцов СА 1335. В целом, профилирование в квадратном ручье протекает с меньшей силой из-за меньшей площади пятна контакта секторов-штампов с заготовкой.

Представленные графики компонентов тензоров напряжений в изменяющемся во времени локальном очаге деформации в процессе вальцовки (таблицы 3.7 и 3.8) позволяют оценить напряженное состояние металла за время полного цикла профилирования заготовки на первом и втором переходах.

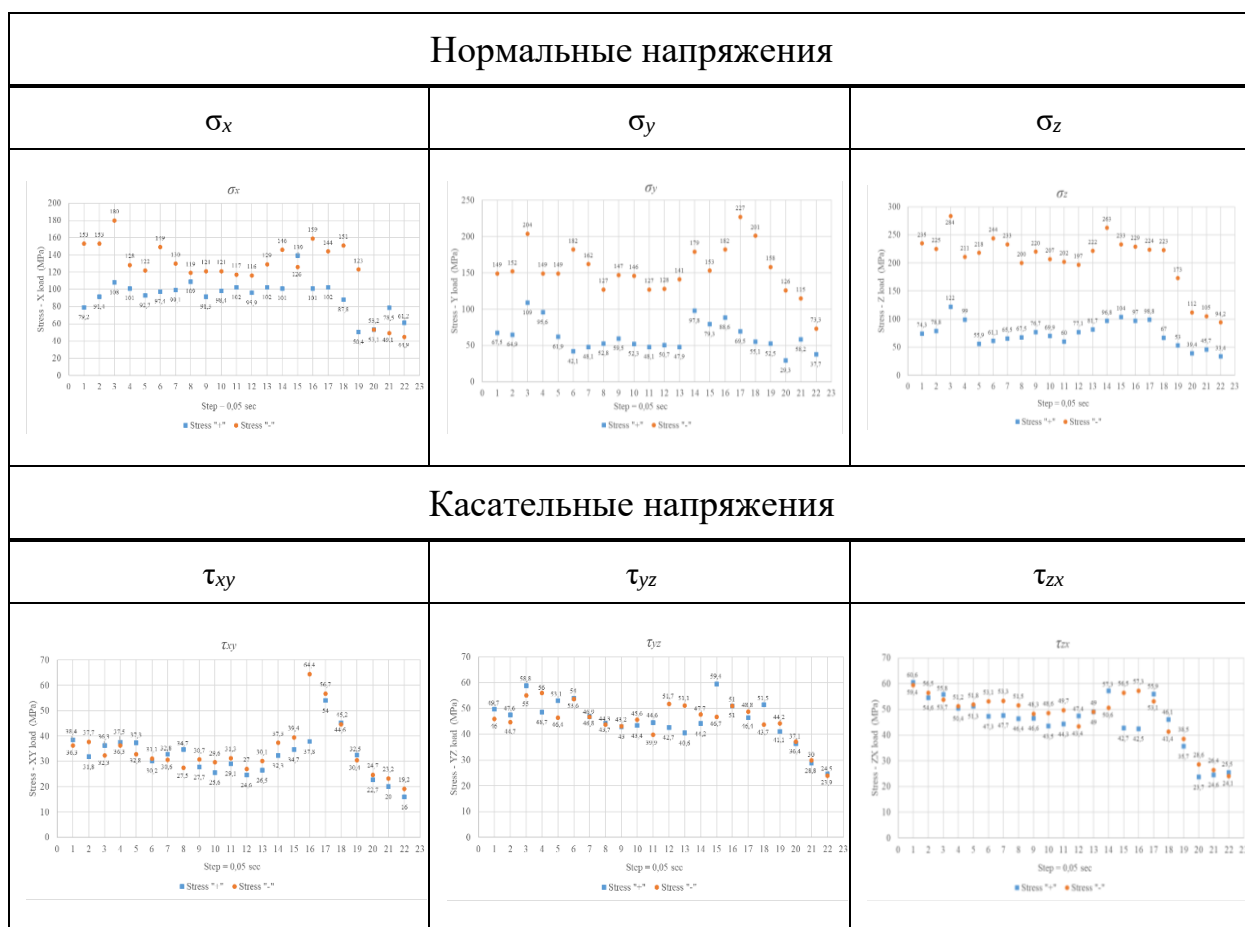
При анализе напряженного состояния и построении графиков его изменения значения сжимающих напряжений со знаком «–» отображены абсолютной величиной и имеют вид круглой точки красного цвета, а напряжения растяжения со знаком «+» отображены квадратной точкой синего цвета. Общий промежуток времени воздействия секторов-штампов на заготовку, начиная с внедрения и заканчивая выходом инструмента из контакта, разделен на шаги, каждый из которых равен 0,05 секунды. Таким образом, вальцовка в овальном калибре происходит с продолжительностью $\approx 1,1$ с., в квадратном – $\approx 1,35$ с. Характерные особенности распределения напряжений в металле на двух переходах дополняются изображениями, представленными в таблице 3.9, где ось заготовки совпадает с осью X , направление оси валков совпадает с осью Y , а направление Z – перпендикулярно оси заготовки – также дает возможность провести детальный анализ графиков.

На графиках можно обнаружить характерные зоны резкого изменения формы и размеров ручьев. В направлении оси X (см. таблицу 3.7) преобладают сжимающие нормальные напряжения, однако разница в значениях напряжений невелика, так как секторы-штампы деформируют заготовку вдоль ее оси, тем самым протягивая ее, причем максимальные значения не превышают 180 МПа. Нормальные напряжения непрерывно изменяются в объеме заготовки по мере перемещения пятна контакта при вальцовке секторами. В ходе профилирования переходного участка от стержня к малой головке значение напряжения растяжения в момент становится равным абсолютной величине напряжения сжатия (таблица 3.9 а), затем опережает его. В направлении Y также преобладают сжимающие напряжения, где самый

большой показатель в 227 МПа наблюдается перед переходом от стержня к головке (таблица 3.9 б). В направлении Z, перпендикулярном оси заготовки и валков, обнаружены наибольшие значения напряжений сжатия, так как секторы-штампы сдавливают заготовку в большей степени, чем растягивают. Здесь на начальном этапе вальцовки напряжение сжатия максимальное на протяжении всего цикла вальцовки в овальном ручье, равно 284 МПа (таблица 3.9 в). Уровень касательных напряжений невысок, по сравнению с нормальными напряжениями, причем их значения по осям близки друг к другу.

Таблица 3.7

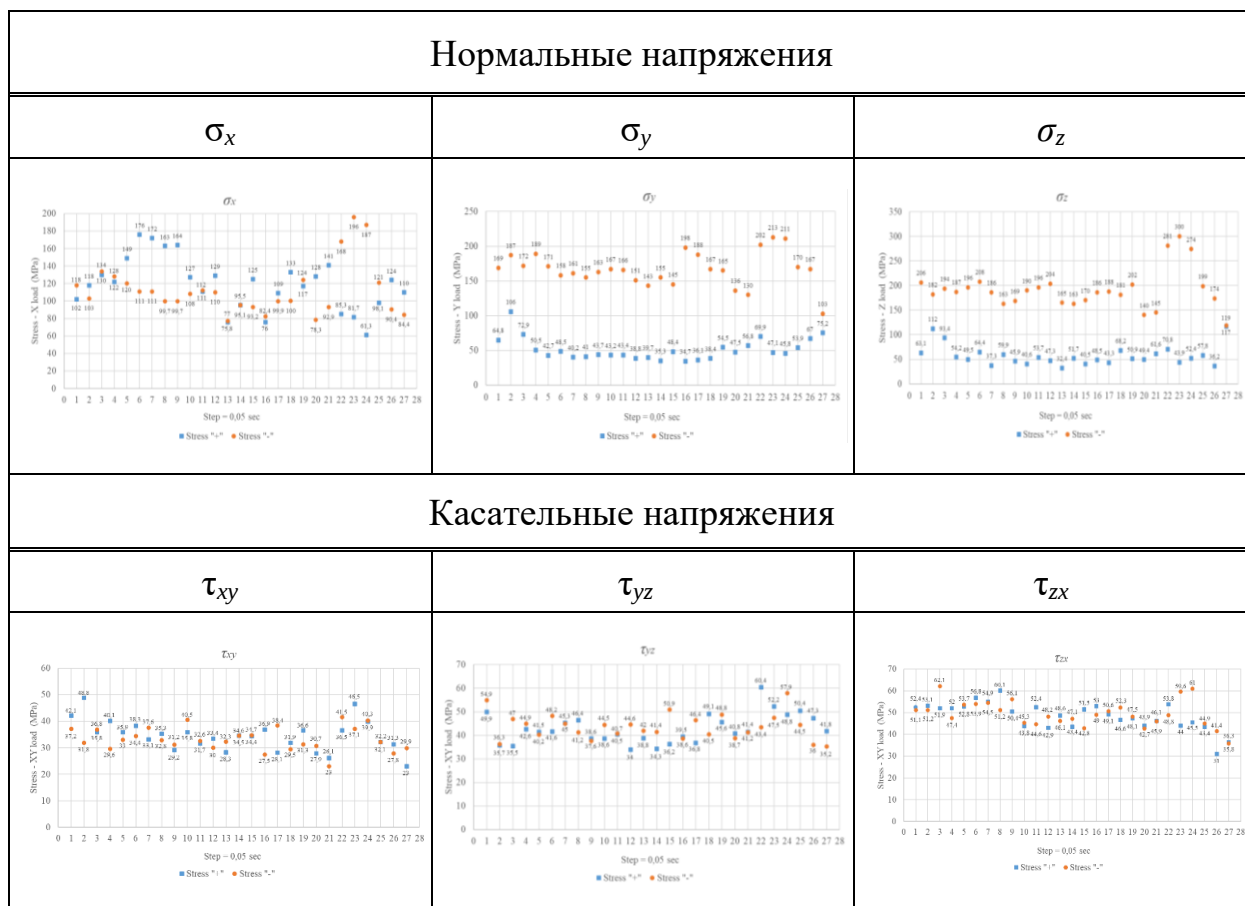
Значения нормальных и касательных напряжений, в изменяющемся во времени локальном очаге деформации в процессе вальцовки в ручьях переменного сечения на первом переходе (овальный калибр)



Анализ напряженного состояния по нормальным напряжениям в процессе вальцовки в квадратном калибре (см. таблицу 3.8) показал, что по направлению оси заготовки (ось X) преобладают растягивающие напряжения практически на протяжении всего времени контакта секторов-штампов с заготовкой, кроме участка перехода от стержня к малой головке. В этой области напряжение сжатия достигает 196 МПа (таблица 3.9 г). В направлении, параллельном оси валков ковочных вальцов (ось Y), также превалируют напряжения сжатия, как на первом переходе вальцовки. Максимальные значения 213 МПа (таблица 3.9 д) и 300 МПа – в направлении Z (таблица 3.9 е), ярко выражены на графиках на отрезке времени перехода от стержня к малой головке профилированной заготовки.

Таблица 3.8

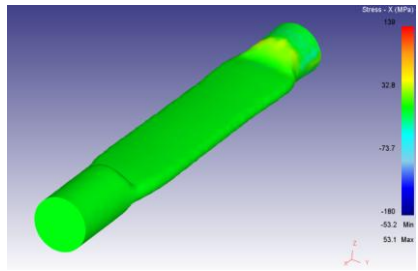
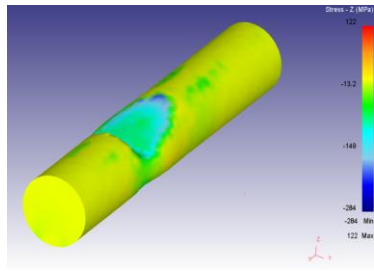
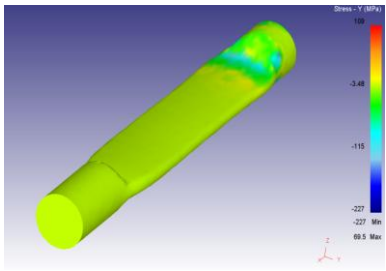
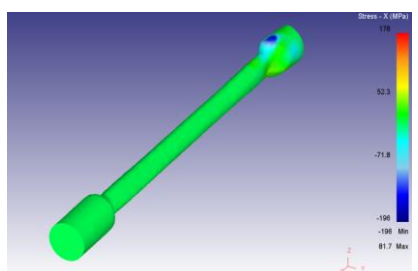
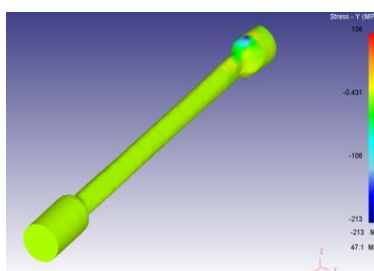
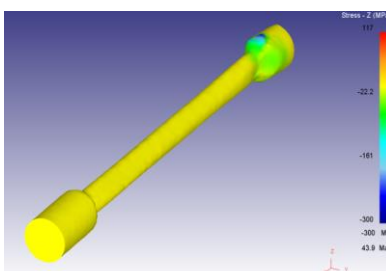
Значения нормальных и касательных напряжений, в изменяющемся во времени локальном очаге деформации в процессе вальцовки в ручьях переменного сечения на втором переходе (квадратный калибр)



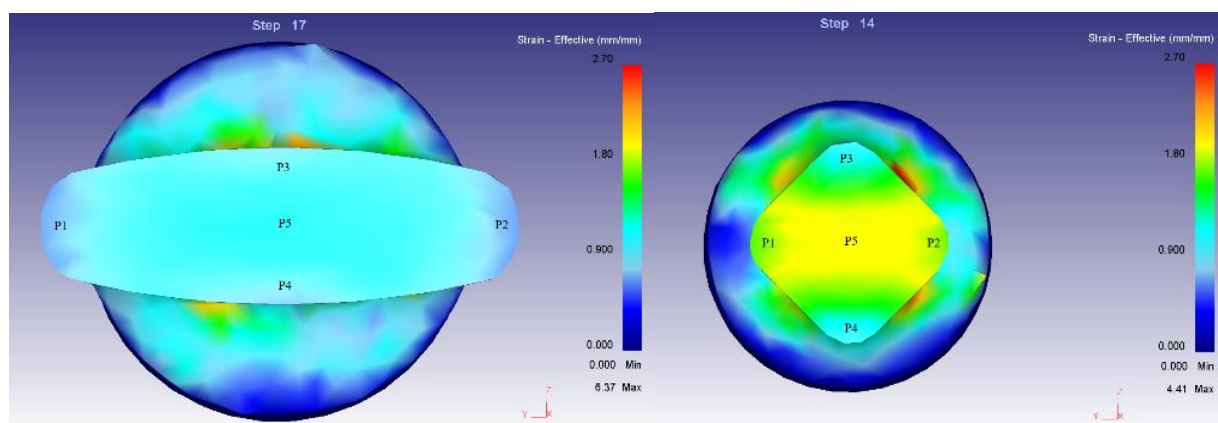
Графики касательных напряжений при вальцовке в квадратном ручье по характеру схожи с графиками нормальных напряжений первого пропуска. Значительных колебаний величины этих напряжений не обнаружено.

Таблица 3.9

Визуальное представление характерных особенностей напряженного состояния в процессе моделирования горячей вальцовки двух переходов

Первый переход		
		
а)	б)	в)
Второй переход		
		
г)	д)	е)

Кроме анализа напряженного состояния профилированных заготовок с помощью графиков компонентов тензоров напряжений в изменяемом во времени локальном очаге деформации, характеристики НДС можно детально изучить по графикам изменения производных инвариантов тензоров напряжений и деформаций в процессе операции (рисунок 3.13). В их построении лежит принцип, приведенный в источнике [165], заключающийся в делении каждого сечения очага деформации на пять зон с последующим выбором контрольных точек (рисунок 3.12).



а)

б)

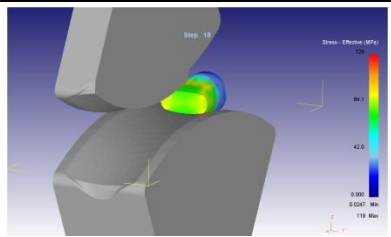
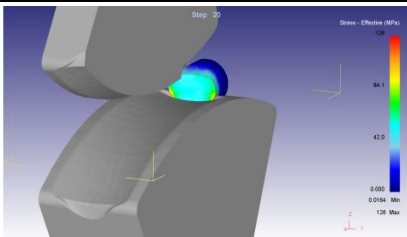
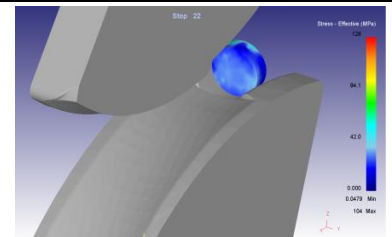
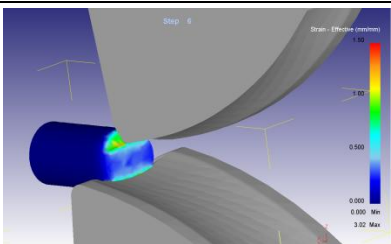
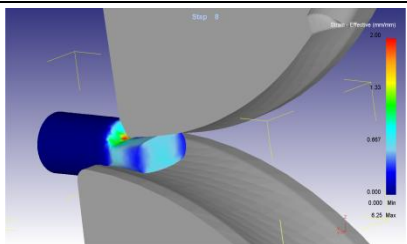
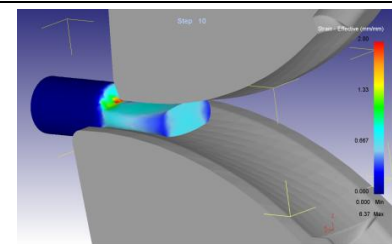
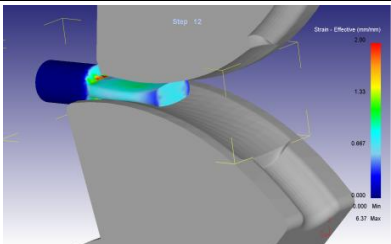
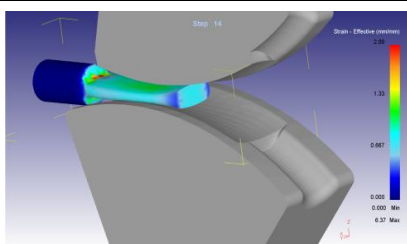
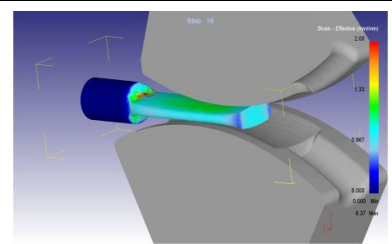
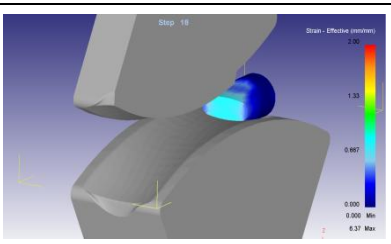
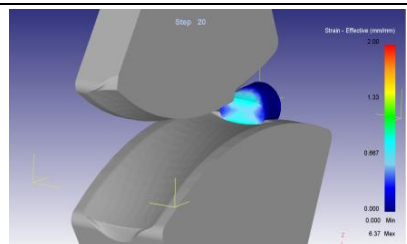
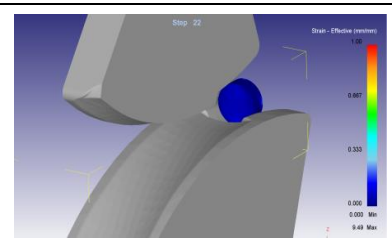
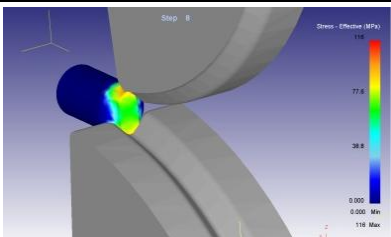
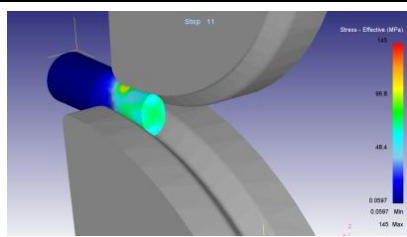
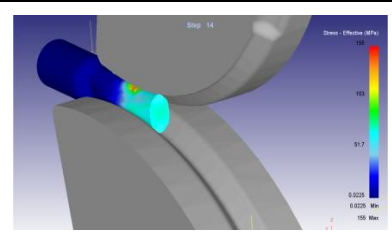
Рисунок 3.12. Контрольные точки в конкретном сечении очага деформации профилируемой заготовки: а – овальный ручей; б – квадратный ручей

Девять последовательных этапов горячей вальцовки каждого перехода сведены в таблицу 3.10 и наглядно демонстрируют, как преобразуется форма и перемещается очаг деформации. Каждому этапу соответствует конкретное время контакта секторов-штампов с заготовкой.

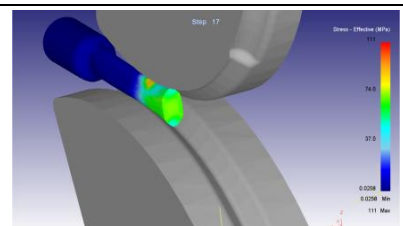
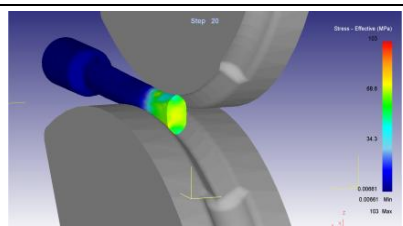
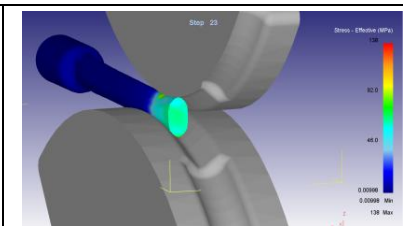
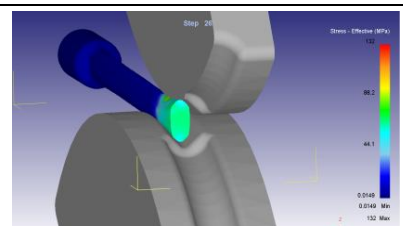
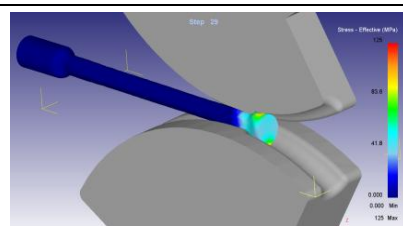
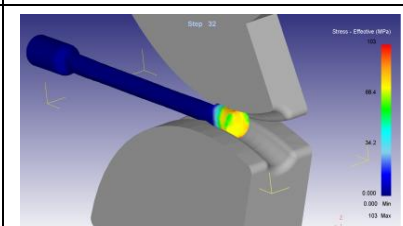
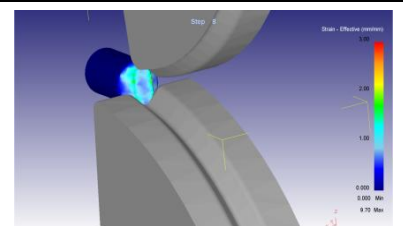
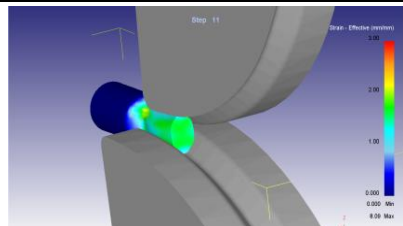
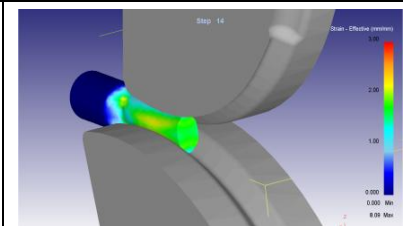
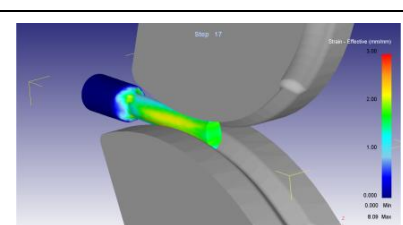
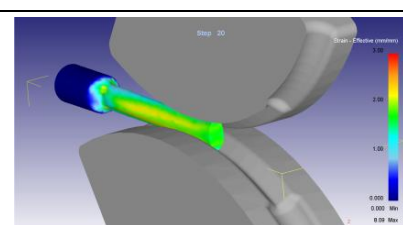
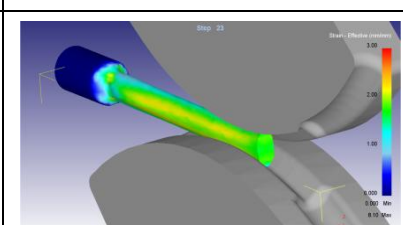
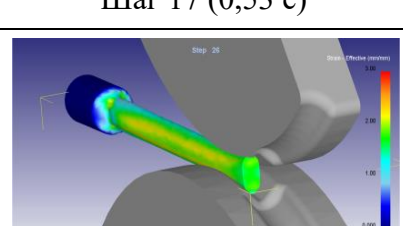
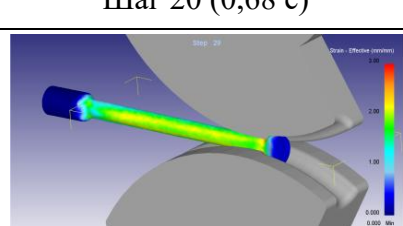
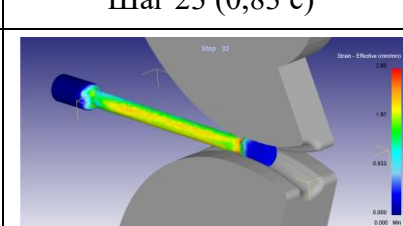
Таблица 3.10

Изменение формы деформируемого участка заготовки и значения интенсивности напряжений и деформаций в ее сечениях на девяти временных этапах горячей вальцовки в ручьях переменного сечения

Интенсивность напряжений при обработке в овальном ручье					
Шаг 6 (0,1 с)		Шаг 8 (0,18 с)		Шаг 10 (0,28 с)	
Шаг 12 (0,38 с)		Шаг 14 (0,48 с)		Шаг 16 (0,58 с)	

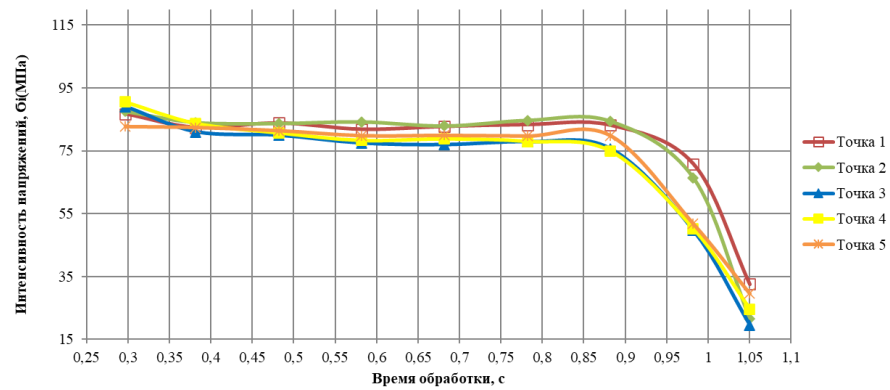
Интенсивность напряжений при обработке в овальном ручье		
		
Шаг 18 (0,68 с)	Шаг 20 (0,78 с)	Шаг 22 (0,85 с)
Интенсивность деформаций при обработке в овальном ручье		
		
Шаг 6 (0,1 с)	Шаг 8 (0,18 с)	Шаг 10 (0,28 с)
		
Шаг 12 (0,38 с)	Шаг 14 (0,48 с)	Шаг 16 (0,58 с)
		
Шаг 18 (0,68 с)	Шаг 20 (0,78 с)	Шаг 22 (0,85 с)
Интенсивность напряжений при обработке в квадратном ручье		
		
Шаг 8 (0,08 с)	Шаг 11 (0,23 с)	Шаг 14 (0,38 с)

Окончание таблицы 3.10

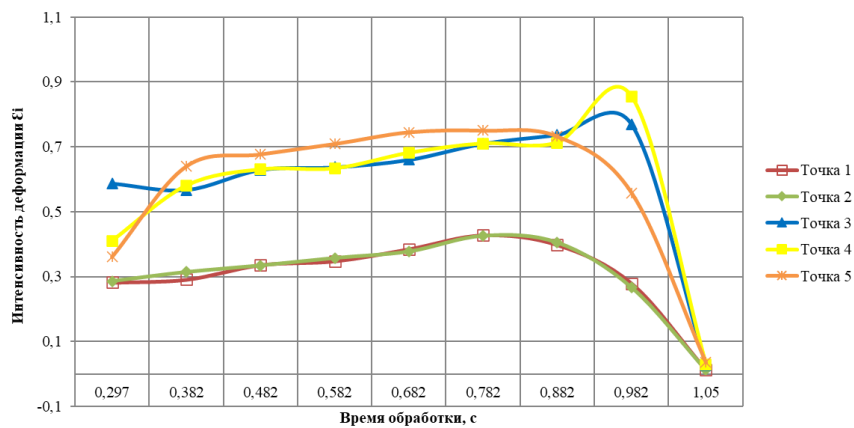
		
Шаг 17 (0,53 с)	Шаг 20 (0,68 с)	Шаг 23 (0,83 с)
		
Шаг 26 (0,98 с)	Шаг 29 (1,13 с)	Шаг 32 (1,28 с)
Интенсивность деформаций при обработке в квадратном ручье		
		
Шаг 8 (0,08 с)	Шаг 11 (0,23 с)	Шаг 14 (0,38 с)
		
Шаг 17 (0,53 с)	Шаг 20 (0,68 с)	Шаг 23 (0,83 с)
		
Шаг 26 (0,98 с)	Шаг 29 (1,13 с)	Шаг 32 (1,28 с)

В результате анализа графиков установлено, что значения интенсивности напряжений и интенсивности деформаций непрерывно меняются на протяжении всего участка воздействия инструмента на заготовку

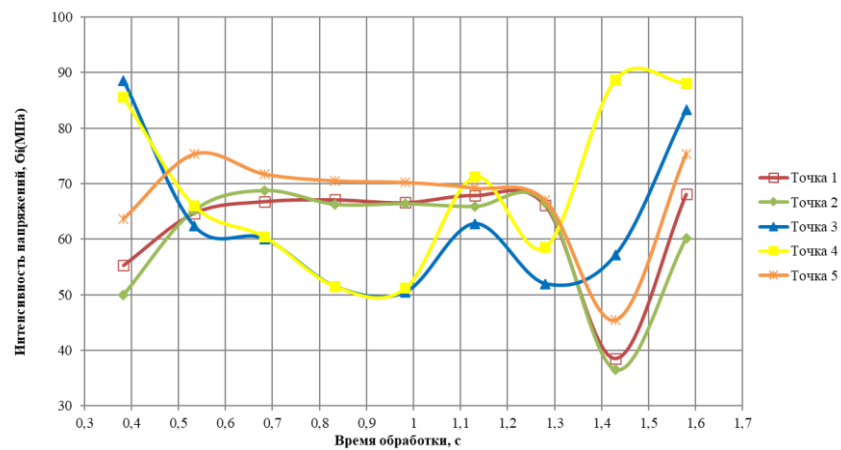
в первом и втором переходе. Также на графиках отчетливо прослеживаются участки внедрения секторов-штампов в материал заготовки, наиболее устойчивого процесса вальцовки будущей рукояти гаечного ключа и значительное падение параметров рассматриваемых показателей в области вальцовки малой головки.



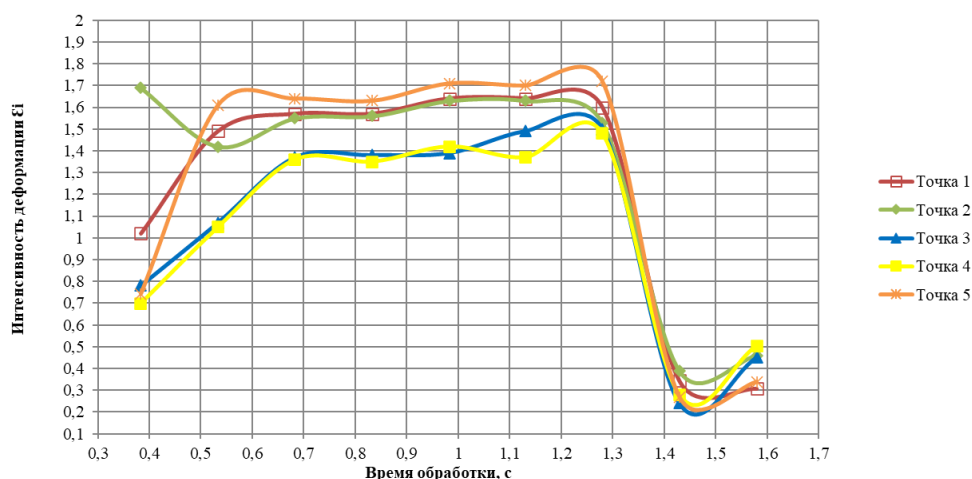
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.13. Изменение интенсивности напряжений и интенсивности деформаций в сечениях вальцуемой заготовки в изменяемом во времени локальном очаге формоизменения секторами-штампами: а, б – овальный ручей; в, г – квадратный ручей

Изменение интенсивности напряжений при вальцовке в овальном калибре (см. рисунок 3.13 а) протекает в узком диапазоне значений в рассматриваемых контрольных точках (на начальном и среднем этапах вальцовки показатели сосредоточены в интервале 75 – 95 МПа, далее прослеживается спад значений в результате резкого преобразования формы и площади поперечного сечения ручья). Наибольшее значение наблюдается в момент внедрения секторов-штампов в заготовку в контрольных точках 3 и 4 (89 МПа и 90,5 МПа, соответственно).

В начале процесса горячей вальцовки в квадратном калибре (см. рисунок 3.13 в) интенсивность напряжений в контрольных точках 3 и 4, расположенных наиболее близко к деформирующим инструментам, падает, а в точках 1 и 2 возрастает. Также наблюдаются низкие показатели на участке перехода от стержня к малой головке, затем происходит рост значений. Максимальные показатели наблюдаются в контрольной точке 3 (в начале 88,6 МПа и в конце 83,3 МПа) и в точке 4 (в начале 85,5 МПа и в конце 88 МПа).

На среднем этапе вальцовки в двух переходах значения интенсивности деформаций постепенно возрастают (см. рисунок 3.13 б, г). Это связано с постепенным уменьшением площади поперечных сечений вдоль оси стержня. При этом, самые низкие значения на протяжении всего процесса вальцовки в овальном ручье присутствуют в точках 1 и 2, а при вальцовке в квадратном ручье – в точках 3 и 4. Кроме этого, небольшие значения во всех контрольных точках наблюдаются в области перехода от стержня к малой головки и на участке малой головки.

Остаточная температура профилированной заготовки (см. рисунок 3.14) составляет 1090 °С и остается в пределах нижней границы допустимого диапазона горячей штамповки (860 °С), что исключает необходимость дополнительного нагрева перед штамповкой в окончательном ручье штампа прессы.

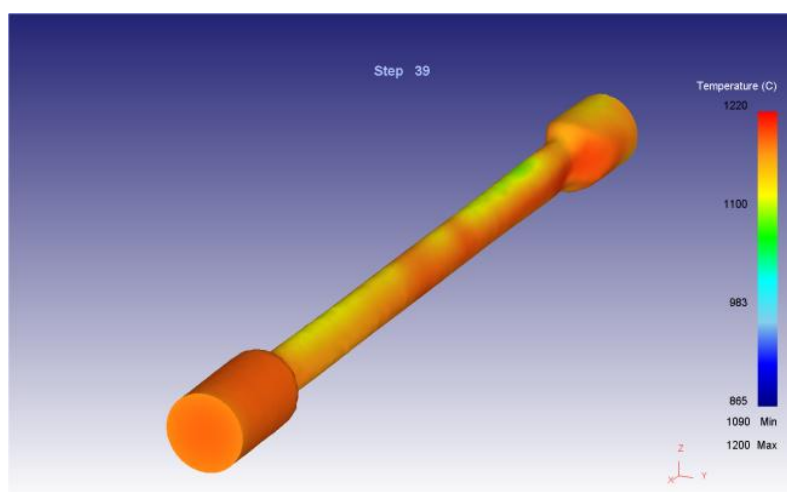
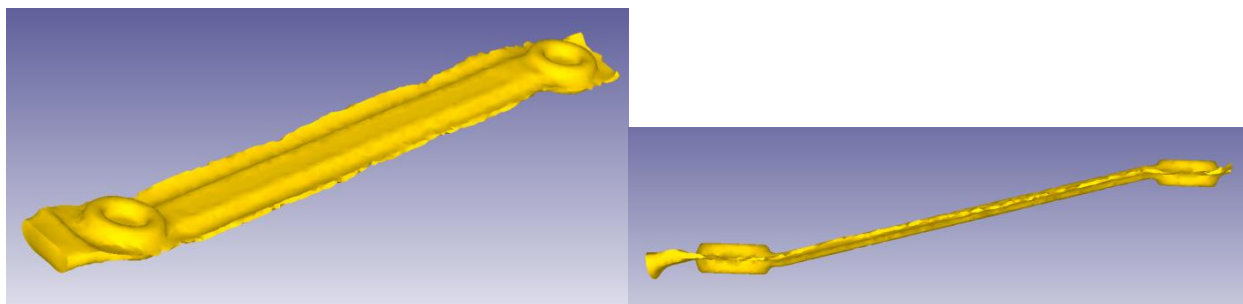
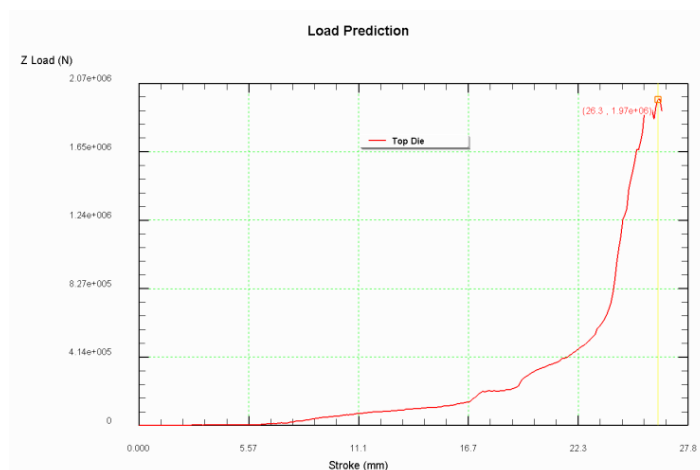


Рисунок 3.14. Температурное поле окончательно профилированной заготовки в секторах-штампах в ручьях переменного сечения

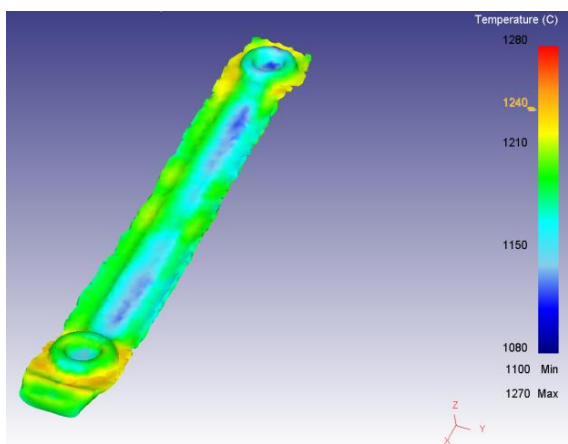
Для оценки правильности технологических расчетов, подтверждения наличия необходимого объема металла на участках профилированной заготовки, анализа его течения и температурного поля, а также возможности дальнейшей корректировки расчетов при минимальных ресурсозатратах, проведено компьютерное моделирование процесса штамповки на КГШП в окончательном ручье штампа (рисунок 3.15).



а)



б)



в)

Рисунок 3.15. Модель поковки гаечного ключа (а), график изменения силы деформирования (б) и температурное поле (в) при операции ГОШ профилированной заготовки вальцовкой секторами-штампами в ручьях переменного сечения

Форма поковки гаечного ключа (рисунок 3.15 а), полученная моделированием в программе DEFORM-3D, свидетельствует о наличии

достаточного объема металла для того, чтобы исключить незаполнение периферийных участков ручья при минимальных отходах в виде облоя, равномерно распределенного в плоскости разъема штампа.

График изменения силы по ходу ползуна прессы (рисунок 3.15 б) показывает максимальное значение силы, равное 1970 кН, что значительно ниже штамповки, не профилированной заготовки, так как меньше пятно контакта, преимущественно в области будущей рукояти гаечного ключа. Температура поковки гаечного ключа находится в пределах допустимых значений горячего деформирования.

3.6 Исследование стойкости секторов-штампов и работоспособности системы их крепления на валах ковочных вальцов консольного типа

Важным этапом технологической подготовки является проектирование инструментальной оснастки с ее последующим испытанием и проверкой на стойкость и работоспособность. При этом математическое моделирование аналитическими методами [12, 167-169] или конечно-элементным моделированием в специальных программных комплексах, таких как QFORM, DEFORM, FORGE и других [152, 153] наиболее предпочтительны, относительно, например, натурных экспериментов, так как в разы экономически эффективнее и требуют меньше временных затрат.

Исследование прочностных параметров и НДС рабочего вала консольных ковочных вальцов производится в SolidWorks Simulation [170-172], основанной на МКЭ. Для оптимизации расчетной модели конструкция получила следующие упрощения: исключены контргайки, которые необходимы для фиксации упорных винтов. Вместо этого применено решение с жесткой заделкой резьбовых соединений, обеспечиваемое плотной посадкой и силами трения. Аналогичным образом осуществлена замена крепежных винтов, соединяющих шпонки и боковую крышку с валом ковочных вальцов.

Исходные данные моделирования процесса горячей вальцовки, упомянутые в разделе 3.1, включают в себя материал секторов-штампов 5ХНМ ГОСТ 5950-2000 [163], который необходимо заменить аналогом Х38CrMoV5-3, имеющимся в базе SolidWorks Simulation. Фиксирующая оснастка выполнена из материала 40Х ГОСТ 4543-2016 [145]. Значения температур исходной заготовки и секторов-штампов 1250 °С и 250 °С соответственно.

В рамках работы разрабатывались технологические процессы с применением горячей вальцовки в калибрах овального, круглого и квадратного сечений. В результате исследований методом МКЭ анализа в программе DEFORM-3D получены графики зависимости силы от времени вальцовки (см. рисунки 3.2 а, б и 3.13 б). Установлено, что в момент максимальных нагрузок на участке взаимодействия главного инструмента с заготовкой в овальном ручье значение температуры (T) достигает 477 °С и площадь контакта ($S_{п.к.}$) 885 мм²; в круглом ручье $T = 503$ °С; $S_{п.к.} = 632$ мм²; в квадратном ручье $T = 333$ °С; $S_{п.к.} = 632$ мм².

При вальцовке в овальном ручье распределенная по площади нагрузка в 106 кН создает давление, равное 188 МПа. Тогда эквивалентные напряжения в секторе-штампе и крепежной оснастке ($\approx 92,4$ МПа) не превышают предел текучести их материала (рисунок 3.16 а). Из наиболее уязвимых областей можно выделить зону приложения нагрузки и участки сопряжения сектора-штампа с кольцевым замком, который крепится шпонкой к валам ковочных вальцов.

Оценка конструкции на эквивалентные деформации при вальцовке в овальном ручье позволяет сделать вывод о том, что максимальные значения ($\epsilon_i = 3,4 \times 10^{-3}$) сосредоточены в области контакта сектора-штампа с заготовкой (рисунок 3.16 б).

Используя метод анализа статических нагрузок, проведено исследование на прочность, которое показало коэффициент запаса 2,8 –

существенно превышающий предел, при котором возникает пластическая деформация (рисунок 3.16 в). Наибольший запас прочности наблюдается у крепежных элементов (упорных винтов) – $3,7 \times 10^{10}$.

В момент наибольшей нагрузки в 64,5 кН при профилировании в круглом ручье возникает давление 208 МПа. Максимальная величина эквивалентного напряжения составляет ≈ 105 МПа (рисунок 3.17 а).

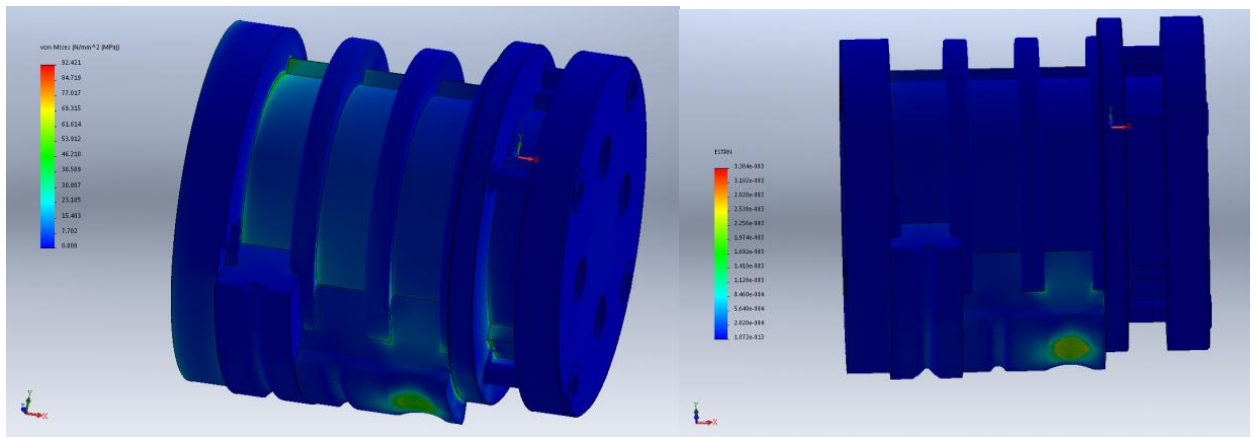
Значение эквивалентной деформации в момент пиковых нагрузок составляет $3,85 \times 10^{-3}$ (рисунок 3.17 б).

Минимальный коэффициент запаса прочности при формоизменении в круглом ручье равен 8,5 (рисунок 3.17 в), что в разы превышает единицу – границу, ниже которой конструкция может перейти в предельное состояние, соответствующее переходу к пластической деформации в локальных зонах. При этом, наибольшее значение характеристики сосредоточено у упорных винтов, сопряженных с торцевой крышкой и прижимным кольцом и равно $1,7 \times 10^{10}$.

В процессе вальцовки в квадратном ручье в момент пиковой нагрузки 40,5 кН на участке контакта сектора-штампа с заготовкой возникает давление 218 МПа. Возникающее эквивалентное напряжение, значением в 123,2 МПа, не превышает предела текучести материалов главных и вспомогательных элементов оснастки (рисунок 3.18 а).

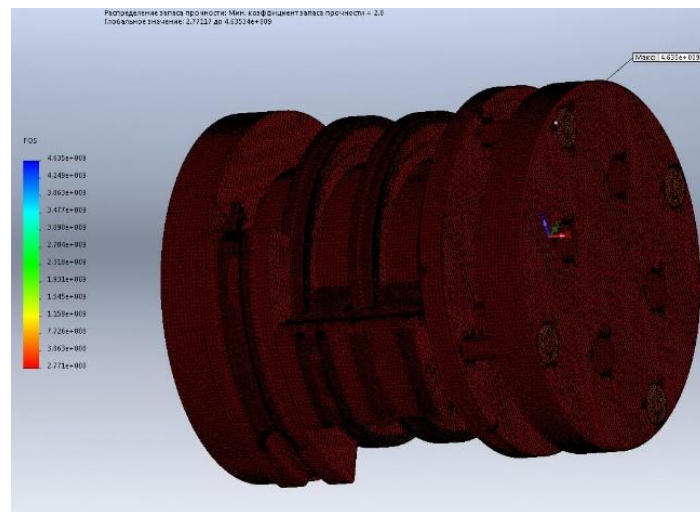
На участке контакта сектора-штампа с заготовкой наблюдается наибольшая эквивалентная деформация, равная 416×10^{-3} (рисунок 3.18 б).

Исследование конструкции на прочность при горячей вальцовке в квадратном ручье позволяет заключить, что минимальный коэффициент запаса равен 6,87 (рисунок 3.18 в), что существенно выше границы перехода в предельное состояние. Максимальный коэффициент запаса наблюдается у элементов фиксации (упорных винтов) и составляет 49,6.



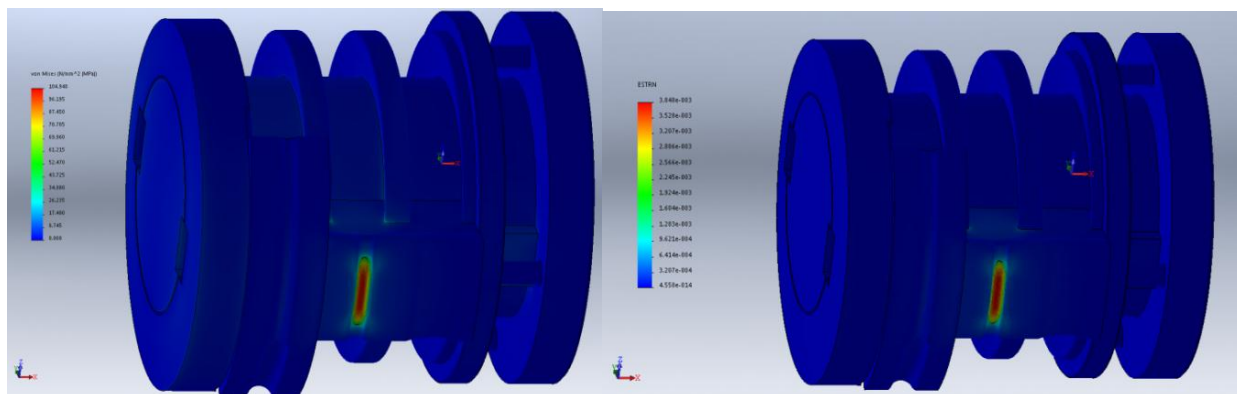
а)

б)



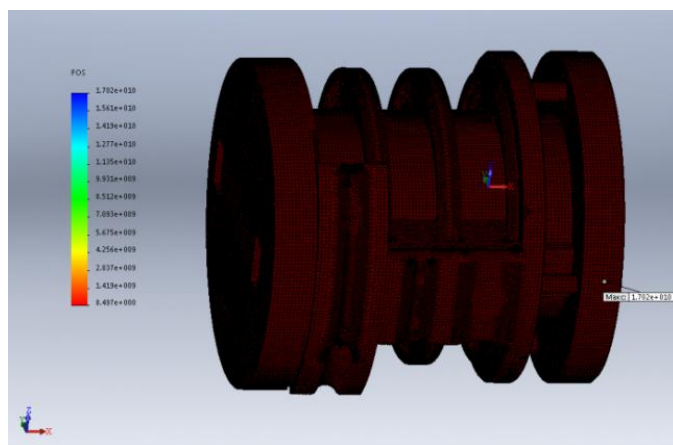
в)

Рисунок 3.16. Оценка стойкости конструкции при воздействии максимальной нагрузки на овальный ручей: а – эквивалентные напряжения; б – эквивалентные деформации; в – коэффициент запаса прочности



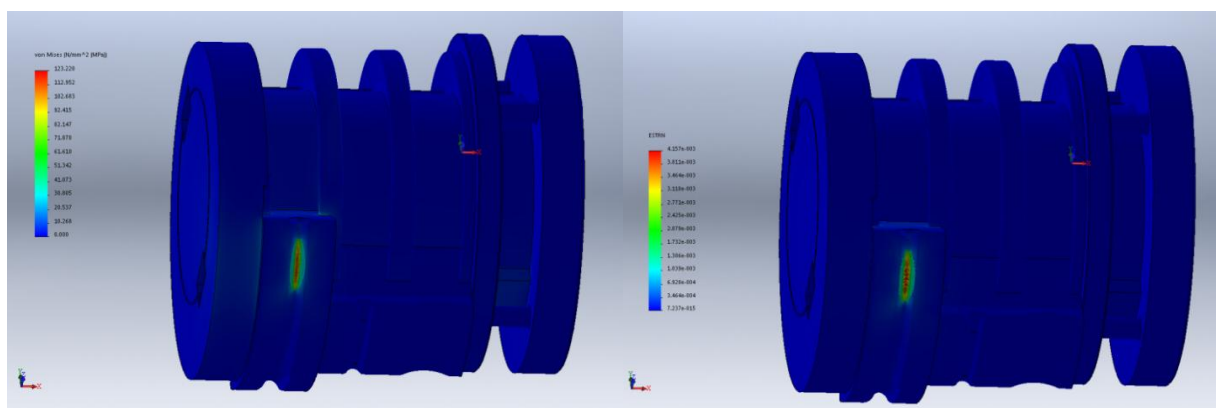
а)

б)



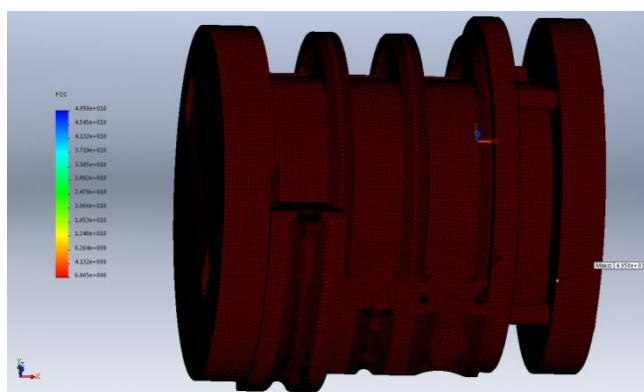
в)

Рисунок 3.17. Оценка стойкости конструкции при воздействии максимальной нагрузки на круглый ручей: а – эквивалентные напряжения; б – эквивалентные деформации; в – коэффициент запаса прочности



а)

б)



в)

Рисунок 3.18. Оценка стойкости конструкции при воздействии максимальной нагрузки на квадратный ручей: а – эквивалентные напряжения; б – эквивалентные деформации; в – коэффициент запаса прочности

Таким образом, по результатам компьютерного исследования процесса горячей вальцовки в калибрах разной геометрии в программном модуле SolidWorks Simulation можно сделать вывод о том, что наибольшие значения эквивалентных напряжений и эквивалентных деформаций наблюдаются в ручье квадратного сечения. Данный факт объясняется возникновением наибольшего давления на площадь контакта инструмента с заготовкой при наличии относительно невысокого показателя приложенной силы – 40,5 кН.

Наименьший коэффициент запаса прочности в области деформирования наблюдается в овальном ручье (2,8), что связано с наибольшей площадью пятна контакта между сектором-штампом с заготовкой, а также самым дальним расположением сектора от станины ковочных вальцов. Стоит обратить внимание на то, что коэффициент запаса прочности достаточен для всех трех видов секторов-штампов и наибольшее значение сосредоточено у элементов крепления и фиксации. Наивысший показатель исследуемой характеристики на участке контакта инструмента с заготовкой имеет сектор-штамп с ручьем круглого сечения.

Аналитическая модель, позволяющая количественно оценить влияние ключевых факторов (сила деформирования, концентрация напряжений, температура) на уровень напряжений в секторе-штампе, построена по разработанной методике, состоящей из следующих этапов [173]:

- определение аппроксимирующей функции, описывающей зависимость модуля упругости стали X38CrMoV5-3 от температуры;
- расчёт нормального контактного напряжения с учётом изменения модуля упругости материала под влиянием рабочей нагрузки на сектор-штамп;
- определение расчетного коэффициента концентрации напряжений в области контакта инструмента с заготовкой на основе результатов МКЭ;
- уточнение коэффициента концентрации напряжений с помощью полного факторного эксперимента (ПФЭ);

- проведение проверки достоверности модели с использованием критерия Фишера и Стьюдента, а также с помощью тестов Шапиро-Уилка, Броуша – Пагана и Уайта.

Для подготовки и апробации модели используются результаты МКЭ-анализа в программных комплексах DEFORM-3D и SolidWorks. Каждый из трех калибров получает такие параметры, как рассчитанные значения нагрузок, площадей контакта, температуры штампа и максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу.

Зависимость модуля упругости от температуры аппроксимирована квадратичным полиномиальным законом, в основании которого лежат экспериментальные данные из исследований инструментальных сталей для штампов ГОШ [174-176]. Для стали X38CrMoV5-3 в диапазоне 20 – 600 °C модуль упругости рассчитывается по зависимости:

$$E(T) = E_0[1 - a_1(T - 20) + a_2(T - 20)]^2, \quad (1)$$

где $E_0 = 215\,000$ МПа – модуль упругости материала при $T=20$ °C, $a_1=1,2 \times 10^{-4}$ K⁻¹ – коэффициент линейного снижения модуля упругости, $a_2=1 \times 10^{-7}$ K⁻² – коэффициент квадратичного члена, который учитывает нелинейную зависимость, характерную для диапазона 20 – 600 °C.

Тогда для $T = 477$ °C, $\Delta T = 457$ °C.

$$E(477) = 215 \times 10^9 [1 - 1,2 \times 10^{-4} \times 457 + 1 \times 10^{-7} \times 457^2] = 2,080 \times 10^5 \text{ МПа.}$$

Из этого следует, что при 477 °C модуль упругости снижается на 3,4 % относительно E_0 .

$$E(503) = 2,075 \times 10^5 \text{ МПа; } E(333) = 2,091 \times 10^5 \text{ МПа.}$$

Такая аппроксимация с большей точностью учитывает нелинейное падение значения модуля упругости при повышении температуры и исключает грубые погрешности линейных моделей.

Квадратичная модель зависимости модуля упругости от температуры выявила высокую точность аппроксимации (ошибка менее 2 % на интервале 20 – 600 °C). Нормальное напряжение в области пятна контакта сектора-

штампа и заготовки при пересчете вычислялось как отношение приложенной нагрузки к площади контакта, скорректированное на относительное снижение модуля упругости при текущей температуре инструмента:

$$\sigma(T) = \frac{P}{S_{п.к.}} \times \frac{E(T_{сек.шт.})}{E_0}, \quad (2)$$

где P – приложенная сила, МН; $S_{п.к.}$ – площадь пятна контакта между сектором-штампом и заготовкой, $м^2$; $\frac{E(T_{сек.шт.})}{E_0}$ – поправочный коэффициент, учитывающий снижение упругости при нагреве.

Поправочный коэффициент позволяет привести контактное напряжение к уровню, соответствующему изменённым упругим свойствам материала при данной температуре.

Для овального калибра при значениях $P = 0,105$ МН; $S_{п.к.} = 8,85 \times 10^{-4}$ $м^2$; $T = 477$ °С:

$$\sigma_{н.ов} = \frac{0,105}{8,85 \cdot 10^{-4}} \times 0,9695 = 1,146 \times 10^8 \text{ Па} \approx 114 \text{ МПа.}$$

Для остальных калибров рассчитываем аналогичным образом:

Круглый калибр:

$$\sigma_{н.кр} = \frac{0,0645}{6,32 \cdot 10^{-4}} \times 0,9656 \approx 98 \text{ МПа.}$$

Квадратный калибр:

$$\sigma_{н.кв} = \frac{0,0405}{5,57 \cdot 10^{-4}} \times 0,9722 \approx 70 \text{ МПа.}$$

С целью корректировки базового расчета введен коэффициент концентрации напряжений, определяемый как отношение пикового эквивалентного напряжения, к скорректированному значению нормального напряжения:

$$K_k = \frac{\max \sigma_{\text{экв}}}{\sigma(T)}, \quad (3)$$

где $\max \sigma_{\text{экв}}$ – максимальное эквивалентное напряжение в опасной точке модели.

Результаты расчёта:

$$K_k^{\text{ов}} = 0,804, K_k^{\text{кр}} = 1,071, K_k^{\text{кв}} = 1,742.$$

Чем выше значение K_k , тем сильнее локальная концентрация напряжений и тем выше риск усталостного разрушения. Из полученных данных видно, что квадратный калибр отличается наибольшим уровнем концентрации, что соответствует результатам МКЭ.

Проверка математической модели через обратный расчет максимальных эквивалентных напряжений отражает связь коэффициента концентрации с нормальным напряжением и температурным состоянием сектора-штампа.

$$\max \sigma_{\text{ЭКВ}} = K_k \sigma_n (T_{\text{сек.шт.}}), \quad (4)$$

$$\max \sigma_{\text{ЭКВ,ОВ}} = 0,804 \times 114 \approx 92 \text{ МПа};$$

$$\max \sigma_{\text{ЭКВ,КР}} = 1,071 \times 98 \approx 104 \text{ МПа};$$

$$\max \sigma_{\text{ЭКВ,КВ}} = 1,742 \times 70 \approx 123 \text{ МПа}.$$

Результаты анализа МКЭ в программных комплексах DEFORM-3D и Solid Works сведены в таблицу 3.11.

Таблица 3.11

Параметры, полученные МКЭ-анализом

Калибр	P , МН	$S_{\text{п.к.}}$, м ²	$T_{\text{сек.-шт.}}$, °С	$\max \sigma_{\text{ЭКВ.}}$, МПа	K_k
Овальный	0,105	$8,85 \times 10^{-4}$	477	92	0,804
Круглый	0,0645	$6,32 \times 10^{-4}$	503	104	1,071
Квадратный	0,0405	$5,57 \times 10^{-4}$	333	123	1,742

В результате анализа МКЭ получены значения коэффициента концентрации, отличающиеся по трём калибрам в диапазоне от 0,80 до 1,75. Это связано с различием геометрических параметров и значений локальных пиковых напряжений.

Для количественной оценки связи максимальных эквивалентных напряжений $\max \sigma_{\text{ЭКВ}}$ в опасных участках сектора-штампа с ключевыми технологическими параметрами проведен развернутый трехфакторный эксперимент с тремя уровнями каждого фактора:

$$T_{\text{сек.шт.}} \in \{333, 477, 503\}, K_k \in \{0,804, 1,071, 1,742\}, P \in \{40,5, 64,5, 105\}.$$

Матрица плана размером $3^3 = 27$ комбинаций (таблица 3.12) обеспечивает сбалансированную выборку всех возможных сочетаний уровней. Каждое значение одного фактора встречается во всех сочетаниях уровней остальных факторов ровно по одному разу, что гарантирует ортогональность плана и равные веса при оценке влияния каждого фактора на отклик и позволяет восстановить полный вид статистической модели [177, 178].

Таблица 3.12

Комбинации для ПФЭ $3^3=27$

№	$T_{\text{сек.-шт.}}, ^\circ\text{C}$	K_k	$P, (\text{МН})$	$\max \sigma_{\text{ЭКВ.}}, \text{МПа}$
1	333	0,803	0,0405	35,7
2	333	0,803	0,0645	56,9
3	333	0,803	0,1050	92,6
4	333	1,056	0,0405	47,2
5	333	1,056	0,0645	75,1
6	333	1,056	0,1050	122,4
7	333	1,750	0,0405	77,1
8	333	1,750	0,0645	122,8
9	333	1,750	0,1050	200
10	477	0,803	0,0405	36,7
11	477	0,803	0,0645	58,4
12	477	0,803	0,1050	95,1
13	477	1,056	0,0405	48,5
14	477	1,056	0,0645	77,2
15	477	1,056	0,1050	125,7
16	477	1,740	0,0405	79,5
17	477	1,740	0,0645	126,6
18	477	1,740	0,1050	206,1
19	503	0,803	0,0405	36,8
20	503	0,803	0,0645	58,5

Окончание таблицы 3.12

№	$T_{\text{сек.-шт.}}, ^\circ\text{C}$	K_k	$P, (\text{МН})$	$\max \sigma_{\text{экв.}}, \text{МПа}$
21	503	0,803	0,1050	95,2
22	503	1,056	0,0405	48,6
23	503	1,056	0,0645	77,3
24	503	1,056	0,1050	125,8
25	503	1,740	0,0405	79,6
26	503	1,740	0,0645	126,7
27	503	1,740	0,1050	206,2

Введена матрица проектирования $X \in R^{27 \times 4}$ и вектор откликов $y \in R^{27}$:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & T_1 & K_{k1} & P_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & T_{27} & K_{k27} & P_{27} \end{bmatrix}_{27 \times 4} \quad y = \begin{bmatrix} \sigma_{\max} 1 \\ \vdots \\ \sigma_{\max} 27 \end{bmatrix}$$

Каждый столбец матрицы X характеризуется параметром: свободный член (единица), температура $T (^\circ\text{C})$, коэффициент концентрации K_k , сила P .

Оценка параметров модели методом наименьших квадратов (МНК):

$$\hat{b} = (X^T X)^{-1} X^T y.$$

Для корректной оценки ковариационной матрицы факторы были предварительно центрированы:

$$T_c = T - \bar{T}, \quad T_{kc} = K_k - \bar{K}_k, \quad P_c = P - \bar{P}.$$

Центрирование делает интерпретацию свободного члена удобной ($b_0 = \bar{y}$).

На основании данных таблицы 3.12 построена линейная модель зависимости максимальных эквивалентных напряжений $\max \sigma_{\text{экв}}$ от температуры T , коэффициента концентрации напряжений K_k и силы деформирования P .

Математическая модель описывается в виде:

$$\max \sigma_{\text{ЭКВ}} = b_0 + b_1 T + b_2 K_k + b_3 P + \varepsilon, \quad (5)$$

где ε – случайная составляющая (остаток), имеющая математическое ожидание $E_{[\varepsilon]} = 0$ и постоянную дисперсию $D_{[\varepsilon]} = \sigma_{\varepsilon}^2$.

Матрица наблюдений:

$$y = Xb + \varepsilon,$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & T_1 & K_{k1} & P_1 \\ 1 & T_2 & K_{k2} & P_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & T_{27} & K_{k27} & P_{27} \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}.$$

Используя метод наименьших квадратов, получаем:

$$(X^T X)b = X^T y, \quad \hat{b} = (X^T X)^{-1} X^T y.$$

Построение статистической модели:

$$(X^T X)_{ij} = \sum_{k=1}^{27} x_{ki} x_{kj},$$

где

$$\sum 1 = 27, \sum T = 11817, \sum P = 1,89, \sum TK_k = 14176.$$

Суммы из полного факторного плана равны:

$$(X^T X) = \begin{pmatrix} 27 & 11817 & 32,39 & 1,89 \\ 11817 & 5,322,843 & 14,176 & 827,2 \\ 32,39 & 14,176 & 43,09 & 2,27 \\ 1,89 & 827,2 & 2,27 & 0,151 \end{pmatrix}$$

Вектор $X^T y$ (суммы пар столбец $X \times y$) равен:

$$X^T y = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{27} y_i \\ \sum_{i=1}^{27} T_i y_i \\ \sum_{i=1}^{27} K_{k,i} y_i \\ \sum_{i=1}^{27} P_i y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2538 \\ 1113500 \\ 3375 \\ 203,4 \end{pmatrix}$$

Решение системы уравнений МНК:

$$(X^T X)^{-1} = \begin{pmatrix} 1,903 & -0,0029 & -0,284 & -3,659 \\ -0,0029 & 0,0000066 & 0 & 0 \\ -0,284 & 0 & 0,236 & 0 \\ -3,659 & 0 & 0 & 52,28 \end{pmatrix}$$

$$b_0 = -100,97; b_1 = 0,0170; b_2 = 77,97; b_3 = 1343.$$

Итоговая оценка:

$$\max \hat{\sigma}_{\text{эКВ}} = -100,97 + 0,0170T + 77,97K_k + 1343P + \varepsilon.$$

Суммы квадратов и статистическая оценка модели:

Предсказанные значения:

$$\hat{y}_i = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 T_i + \hat{b}_2 K_{k,i} + \hat{b}_3 P_i.$$

$$SST = \sum_{i=1}^{27} (y_i - \bar{y})^2 = 63981.$$

$$SSE = \sum_{i=1}^{27} (y_i - \hat{y}_i)^2 = 3736.$$

$$SSR = SST - SSE = 60245.$$

Коэффициент детерминации:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{60245}{63981} \approx 0,9416.$$

Средние квадраты:

$$MSR = \frac{SSR}{p - 1} = \frac{60245}{3} \approx 20081.$$

$$MSE = \frac{SSE}{n - p} = \frac{3736}{23} \approx 162,44.$$

Итого: $SST = 63981$; $SSE = 3736$; $SSR = 60245$; $R^2 = 0,9416$; $MSR = 20082$; $MSE = 162,4$.

F – статистика (критерий Фишера) [179]:

$F = \frac{MSR}{MSE}$ – это отношение сигнала (что модель объясняет) к шуму (необъяснённое). Если F большое, значит объяснённая часть явно превышает

шум – модель полезна. Если p мало для F – это вероятность получить такое большое значение F , если на самом деле ничего не объясняется, т. е. все коэффициенты T, K_k, P равны нулю.

$$F = \frac{MSR}{MSE} = \frac{20081}{162,44} \approx 123,6 \gg F_{3,23;0,05} = 3,07;$$

$$F = 123,6 \gg 3,07 \rightarrow p < 10^{-13}.$$

Значение p мало ($p < 10^{-13}$), следовательно отклоняется нулевая гипотеза о том, что все коэффициенты равны нулю, и модель в целом значима.

Ковариационная матрица оценок выражается формулой:

$$\widehat{Var}(\hat{b}) = MSE \cdot (X^T X)^{-1}. \quad (6)$$

Для b_0 :

$$Var(b_0) = 162,44 \times 1,9025573326 = 308;$$

$$SE(b_0) = \sqrt{308,99722213} = 17,58.$$

Для b_1 :

$$Var(b_1) = 162,44 \times 6,6245831218 \times 10^{-6} = 0,0010750717445;$$

$$SE(b_1) = \sqrt{0,0010750717445} = 0,0328.$$

Для b_2 :

$$Var(b_2) = 162,44 \times 0,23643445939 = 38,39111244;$$

$$SE(b_2) = \sqrt{38,39111244} = 6,20.$$

Для b_3 :

$$Var(b_3) = 162,44 \times 52,2752816037 = 8491,579;$$

$$SE(b_3) = \sqrt{8491,579} = 92,15.$$

Диагональ матрицы даёт оценки дисперсий коэффициентов, а корни диагонали – стандартные ошибки:

$$SE(\hat{b}) = (17,58, 0,0328, 6,20, 92,15).$$

На основе полученных средних ошибок (SE) рассчитываются t – статистики критерия Стьюдента (МНК):

$$t_i = \frac{\hat{b}_i}{SE(\hat{b}_i)} \approx (-5,74, 0,52, 12,58, 14,57).$$

Произведенный статистический анализ показал, что коэффициенты b_2 и b_3 обладают высокой статистической значимостью при уровне доверия 95 %, что подтверждается большими по модулю значениями t – статистики и малыми $p \ll 0,05$. Это говорит о существенном влиянии данных факторов на результирующие эквивалентные напряжения

Диагностика Шапиро – Уилка (проверка нормальности остатков e_i):

Проверяется распределение остатков $e_i = y_i - \hat{y}_i$ нормально.

Нулевая гипотеза H_0 заключается в том, что остатки подчиняются нормальному распределению $N(0, \sigma^2)$. Альтернатива H_1 – распределение отличное от нормального.

Вектор остатков:

$$e = (e_1, e_2, \dots, e_n), n = 27.$$

Сортировка по возрастанию:

$$e_{(1)} \leq e_{(2)} \leq \dots \leq e_{(n)}.$$

Коэффициенты a_i заранее табулированы (в зависимости от числа наблюдений n) и выражаются через математические ожидания и дисперсии порядковых статистик стандартного нормального распределения:

$$a = \frac{m^T V^{-1}}{\sqrt{m^T V^{-1} V^{-1} m}}, \quad (7)$$

где $m = E_{[z_{(i)}]}$ – средние значения порядковых статистик для $N(0,1)$, V – ковариационная матрица статистик.

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i e_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}, \quad (8)$$

где W – статистика критерия Шапиро – Уилка; коэффициенты a_i – фиксированные числа (зависят от n) и получаются из ожидаемых значений упорядоченных нормальных размеров, $\bar{e}$ – среднее значение остатков.

Для нормальных остатков W близко к 1. При существенном отклонении $W < 1$. Критическое значение определяется таблично или по p – значению.

$W = 0,943$, $p = 0,145$ – нормальность остатков не отвергается.

Проверка зависимости дисперсии ошибок от значения параметров (гетероскедастичности) методом Броуша – Пагана:

$$u_i = e_i^2. \quad (9)$$

Выводится вспомогательная линейная модель:

$$u_i = \alpha_0 + \alpha_1 T_i + \alpha_2 K_{k,i} + \alpha_3 A_i + v_i; \quad (10)$$

$$LM \text{ (Lagrange Multiplier)} = n \cdot R_{\text{всп}}^2, \quad (11)$$

где $R_{\text{всп}}^2$ – коэффициент детерминации этой вспомогательной линейной модели. При справедливости H_0 величина LM имеет распределение χ^2 с k степенями свободы ($k = 3$).

Для 27 наблюдений:

$$R_{\text{всп}}^2 = 0,009; n = 27;$$

$$LM = 27 \times 0,009 = 0,243.$$

$$\text{Критическое значение } \chi_{(3;0,05)}^2 = 7,81.$$

Так как $0,243 < 7,81$, гипотеза H_0 не отвергается $p = 0,97$. Для критерия Броуша – Пагана вспомогательная линейная модель дала $\approx 0,009$, откуда $LM = 27 \times 0,009 = 0,243$. При $\chi^2(3)$ это соответствует $p \approx 0,97$, следовательно, гетероскедастичность отсутствует.

Тест Уайта (альтернативная проверка гомоскедастичности и нелинейности):

Уайт-тест проверяет не только зависимость дисперсии от факторов, но и от их комбинаций (например, $T^2, K_k^2, P^2, T \times K_k$ и т. д.).

Если Броуш – Паган тестирует только линейную зависимость факторов, то Уайт – общую форму гетероскедастичности, включающую квадратичные и перекрёстные члены.

Исходные данные (квадраты остатков):

$$u_i = e_i^2.$$

Вспомогательная линейная модель Уайта:

$$u_i = \alpha_0 + \alpha_1 T_i + \alpha_2 K_{k,i} + \alpha_3 P_i + \alpha_4 T_i^2 + \alpha_5 K_{k,i}^2 + \alpha_6 P_i^2 + \alpha_7 T_i K_{k,i} + \alpha_8 T_i P_i + \alpha_9 K_{k,i} P_i + v_i \quad (12)$$

Статистика LM :

$$LM = n \cdot R_{\text{всп, Уайт}}^2$$

При H_0 распределена χ^2 с числом степеней свободы равным количеству факторов во вспомогательной модели ($k = 9$).

$R_{\text{всп, Уайт}}^2 = 0,030$; $n = 27$; $LM = 27 \times 0,030 = 0,81$; $\chi_{(9;0,05)}^2 = 16,9$; $p = 0,999$.

Так как $p=0,999$ – нулевая гипотеза о гомоскедастичности не отвергается, и существенных признаков нелинейности дисперсии остатков не выявлено. Таким образом, модель сохраняет устойчивость, и применение робастных оценок будет являться факультативной проверкой:

$$\widehat{Var}_{\text{РБ}}(\hat{b}) = (X^T X)^{-1} (X^T D X) (X^T X)^{-1}; D = \left(\frac{e_i^2}{(1-h_{ii})^2} \right), \quad (13)$$

где h_{ii} – диагональные элементы матрицы проекции $H = (X^T X)^{-1} X^T$, D – диагональная матрица, e_i^2 – остатки.

$$SE_{\text{РБ}} = (22,07, 0,0376, 8,66, 128,3).$$

Результаты диагностики сведены в таблицу 3.13.

Таблица 3.13

Итоговые результаты диагностики

Тест	Проверка	Нулевая гипотеза	Статистика	p – значение	Вывод
Шапиро – Уилк	Нормальность остатков	$e_i \sim N(0, \sigma^2)$	$W = 0,943$	0,145	Нормальность не отвергается
Броуш – Паган	Гомоскедастичность (линейная форма)	Дисперсия постоянна	$LM = 0,243$	0,97	Гомоскедастичность отсутствует
Уайт	Гомоскедастичность (нелинейная форма)	Дисперсия постоянна	$LM = 0,81$	0,999	Гомоскедастичность отсутствует
РБ (робастная ковариация)	Робастная коррекция	–	–	–	Учитывает отклонения

Анализ полученной статистической зависимости показал, что повышение температуры T на 1°C приводит к увеличению $\max\sigma_{\text{экв}}$ в среднем на $+0,017\text{МПа}$. Рост коэффициента концентрации напряжений K_k на единицу повышает напряжение на 78 МПа , а на каждый $0,1\text{ МН}$ возрастания силы деформирования P приходится напряжение $+13,4\text{ МПа}$.

Таким образом, итоговая статистическая модель имеет вид:

$$\max\hat{\sigma}_{\text{экв}} = -100,97 + 0,0170T + 77,97K_k + 1343P + \varepsilon$$

Модель объясняет $94,16\%$ дисперсии отклика ($R^2=0,9416$), что свидетельствует об адекватности модели.

Наиболее статически значимым является коэффициент концентрации напряжений K_k ,

Средняя абсолютная ошибка (MAE) составила менее 5% от среднего значения $\max\sigma_{\text{экв}}$.

Оценка усталостной долговечности S производилась на основе обобщенной модели Баскина [180-182]. Температурная поправка параметра осуществлялась по эмпирической зависимости, известной из технической литературы [174] при высокотемпературных испытаниях инструментальных сталей. Приведенные в работе экспериментальные данные стали X38CrMoV5-3 относятся к области малоциклового и термомеханической усталости и представлены в деформационной постановке, где характерные значения долговечности составляют $10^2 - 10^4$ циклов при амплитудах деформации порядка $0,4 - 1\%$. Произведена оценка стойкости инструмента в области высокоциклового усталости на основе напряженной модели Баскина, что соответствует условиям работы инструмента. Таким образом, сопоставление носит качественный характер и подтверждает корректность тенденций изменения ресурса при снижении амплитуды нагружения [183-185].

Усталостная долговечность интерпретируется как эффективная усталостная характеристика материала при циклическом нагружении, определяющая начальный уровень сопротивления накоплению усталостных

повреждений при экстремальном нагружении. С учетом корректировки на рабочую температуру сектора-штампа определяется по формуле:

$$C(T_{\text{сек.шт}}) = C_0[1 - \gamma(T_{\text{сек.шт}} - 20)], \quad (14)$$

где $C_0 = 600$ МПа – номинальная усталостная константа при базовой температуре; $\gamma = 5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ – температурный коэффициент, характеризующий скорость снижения усталостной прочности материала с ростом температуры штампа.

Для овального калибра:

$$C(477) = 463 \text{ МПа.}$$

Для круглого калибра:

$$C(503) = 455 \text{ МПа.}$$

Для квадратного калибра:

$$C(333) = 506 \text{ МПа.}$$

Ресурс работы калибров определяется по формуле:

$$N = \left(\frac{C(T_{\text{сек.шт}})}{\sigma_{\text{экв.}}} \right)^{1/b}, \quad (15)$$

где $b = 0,1$ – экспоненциальный показатель усталости (безразмерный).

Тогда предельное количество циклов наработки для каждого из калибров:

$$N_{\text{ов}} = 1,28 \times 10^8; N_{\text{кр}} = 3,65 \times 10^7; N_{\text{кв}} = 5,90 \times 10^6.$$

Исходя из полученных данных при сравнении с результатами МКЭ анализа можно заключить следующее:

1. Из-за наибольших показателей эквивалентных деформаций и эквивалентных напряжений квадратный калибр имеет наименьший ресурс работы по сравнению с калибрами другой формы;
2. Несмотря на наименьший показатель коэффициента запаса прочности секторы-штампы с овальным калибром характерны наибольшим ресурсом работы.

3.7 Исследование процесса горячей продольной штамповочной вальцовки

Значительным преимуществом горячей продольной штамповочной вальцовки (ГПрШВ) является повышение производительности и уменьшение себестоимости производства изделия за счет исключения из технологического процесса операции штамповки, которую осуществляют на относительно дорогостоящем оборудовании, таком как КГШП или штамповочный молот.

Методика проектирования технологии ГПрШВ описывается в главе 5.

Участок производственной линии ГОШ представлен на рисунке 3.19.

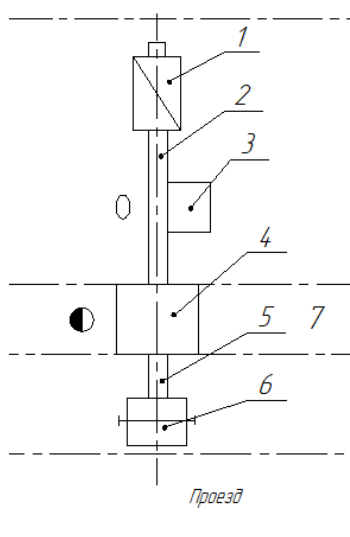


Рисунок 3.19. Схематичное исполнение участка производственной линии ГОШ на базе процесса ГПрШВ

Изготовление поковок гаечных ключей методом горячей продольной штамповочной вальцовки происходит следующим образом (см. рисунок 3.19).

Предварительно отрезанная на сортовых ножницах штучная заготовка нагревается в индукционном нагревателе 1 до ковочных температур, затем поступает на транспортер 2, который перемещает ее на консольные ковочные вальцы 3. Робот-манипулятор точным позиционированием осуществляет предварительные переходы продольной вальцовки, а также окончательное формоизменение поковки и перекладывает на транспортер, перемещающий ее на обрезной пресс 4. После обрезки поковка с помощью склиза 5 перемещается в металлический контейнер 6, а отходы в виде облоя поступают на транспортер, расположенный в траншее 7.

По итогу анализа результатов компьютерного моделирования предварительной горячей вальцовки наковального гаечного ключа в ручьях переменного сечения в DEFORM-3D [186], с помощью метода последовательных приближений разработана математическая модель ГПрШВ профилированной заготовки, форма и размеры которой показаны на рисунке 3.20 а, б. В качестве исходной заготовки выбран прутки круглого сечения диаметром $\varnothing 26$ мм. Предварительное формоизменение предполагается в ручьях переменного сечения двух переходов по системе калибров «круг – овал – квадрат», обеспечивающих наиболее устойчивое протекание процесса вальцовки. Объемы металла на всех участках позволяют компенсировать фактор вытяжки при полном заполнении ручья-гравюры сектора-штампа и наиболее равномерном распределении облоя по периметру поковки. В итоге профилированная заготовка под последующую штамповочную вальцовку получается короче - 116 мм, относительно полуфабриката, разработанного для штамповки на КГШП, чья длина сопоставима с длиной конечной поковки с учетом участка под клещевину (см. рисунок 3.11 б). Стоит отметить, что объем исходной заготовки у двух вариантов одинаковый.

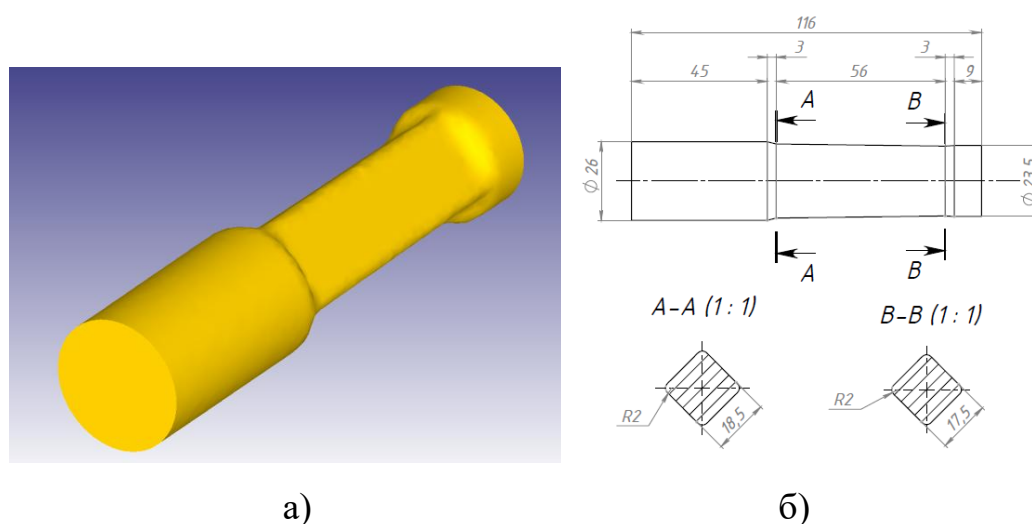


Рисунок 3.20. Профилированная заготовка под штамповочную вальцовку: а – трехмерное изображение; б – чертеж полуфабриката

В процессе проведения компьютерных экспериментов ГПрШВ поковки

двухстороннего гаечного ключа 17×19 мм ГОСТ 2839–80 (см. рисунок 2.2) выявлен ряд критичных проблем, возникающих из-за особенностей формы изделия, что говорит о наличии ограничений при выборе данной технологии. Открытые зевы гаечного ключа, имеющие отклонение относительно оси на 15 градусов, негативно влияют на распределение металла при окончательном формоизменении горячей вальцовкой. На рисунке 3.21 продемонстрировано какие дефекты возможны, а именно – искривление оси вдоль плоскости ручьев секторов-штампов, чрезмерно неравномерное распределение облоя, не заполнение ручья в области открытых зевов.

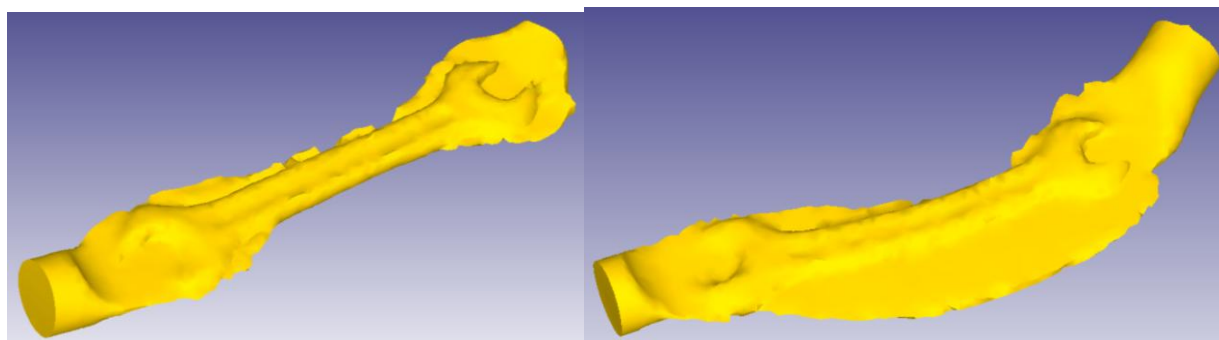
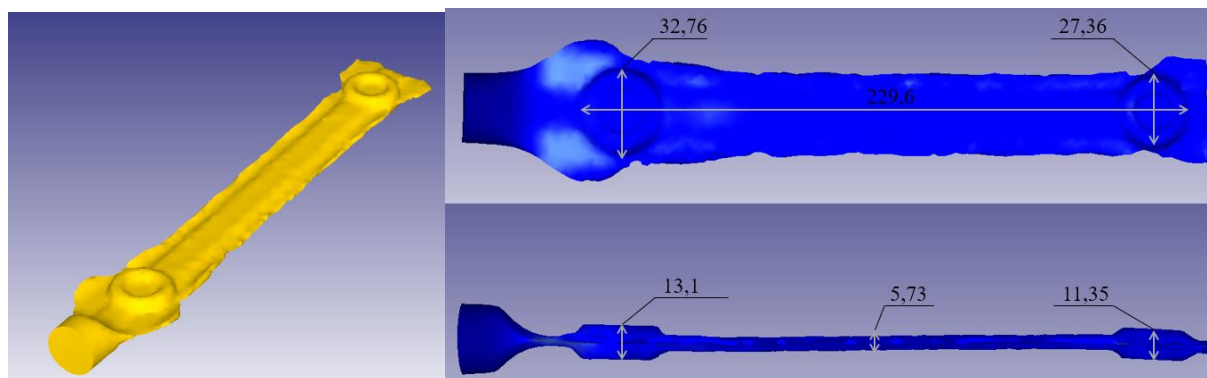


Рисунок 3.21. Дефекты, возникающие при продольной штамповочной вальцовке поковки гаечного ключа с открытым зевом ГОСТ 2839–80

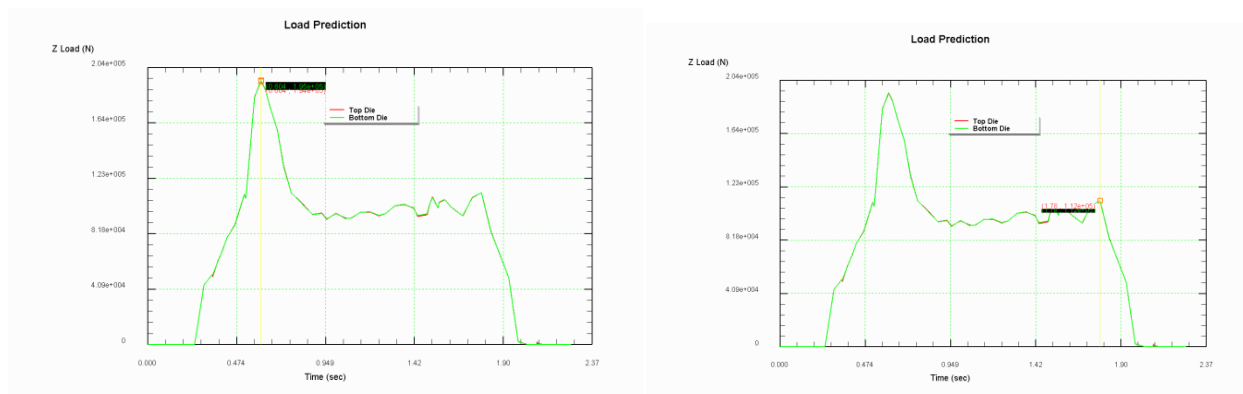
Визуальное представление поковки накладного гаечного ключа после реализации ГПрШВ (рисунок 3.22 а) демонстрирует малое искривление оси перпендикулярно плоскости разъема сектора-штампа. Это обусловлено значительной длиной при малом объеме металла в сечениях на участке рукояти и отсутствием элементов, моделирующих удержание поковки клещами в процессе компьютерного эксперимента. Поэтому для обеспечения качества выпускаемых поволок технологический процесс подразумевает наличие прессы, оснащенного штампом, который позволяет обрезать облой с последовательной правкой оси и отгибанием головок закрытого зева гаечного ключа.

График зависимости силовых параметров от времени вальцовки

накидного гаечного ключа характерен тремя выраженными участками (рисунок 3.22 б), первый из которых имеет пиковое значение силы, достигающее 195 кН. В данном промежутке осуществляется горячая вальцовка большого закрытого зева гаечного ключа. На протяжении всего цикла наблюдается совпадение сил на нижнем и верхнем валах, что говорит об одинаковом угле вальцовки при внедрении секторов-штампов в профилированную заготовку и об устойчивом протекании процесса. При окончательном формоизменении полотна поковки наблюдаются незначительные отклонения сил, а в момент вальцовки малой головки показатели достигают 112 кН. Общее время цикла горячей вальцовки от момента внедрения секторов в заготовку до выхода из нее составляет 1,75 с.



а)



б)

Рисунок 3.22. Поковка накидного гаечного ключа (а) и график изменения силы горячей штамповочной вальцовки профилированной заготовки (б)

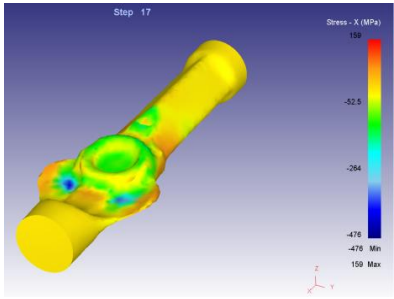
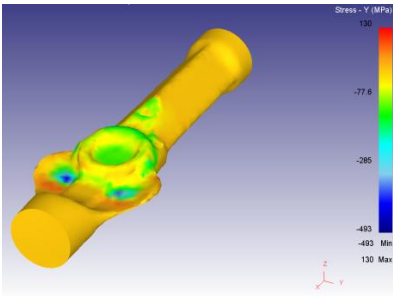
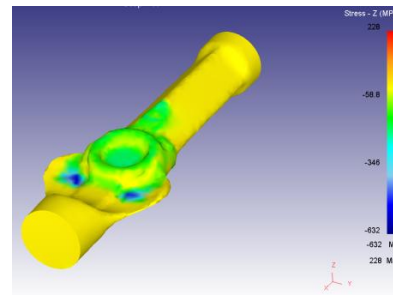
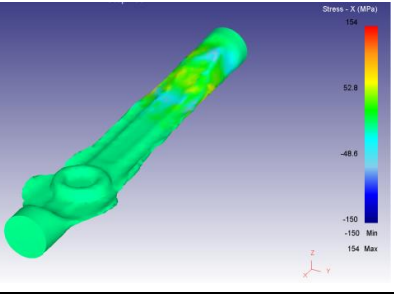
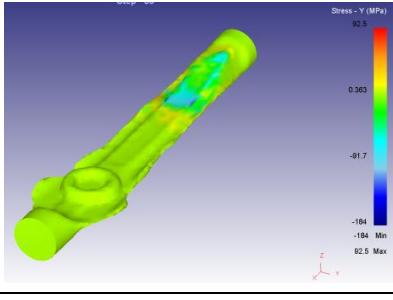
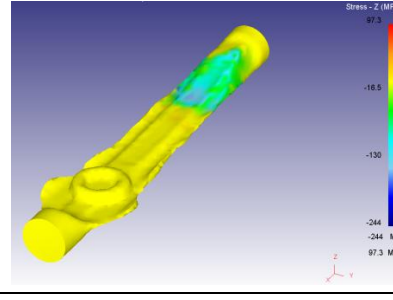
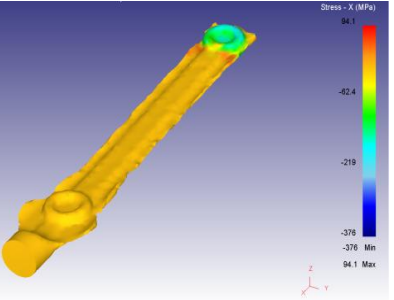
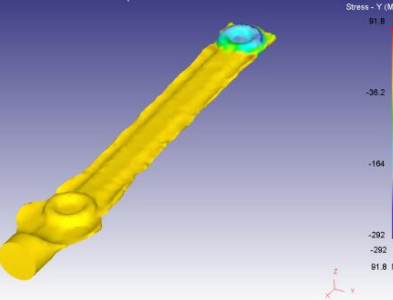
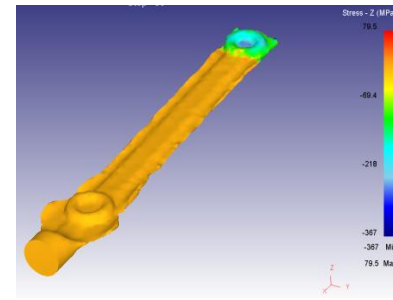
Анализ графика позволяет сделать вывод о том, что предварительное

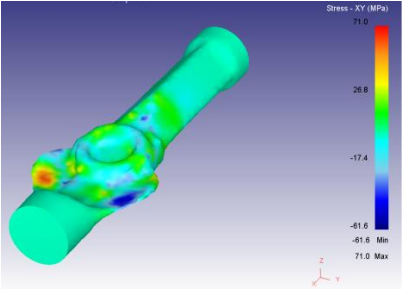
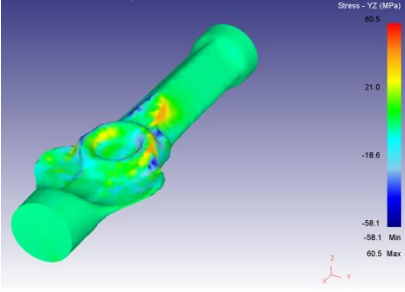
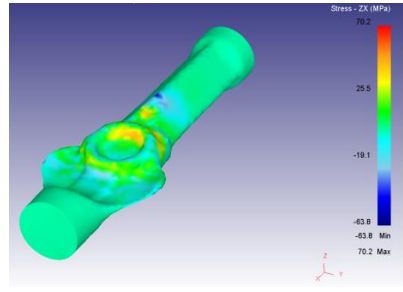
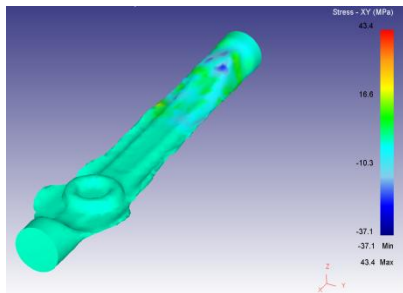
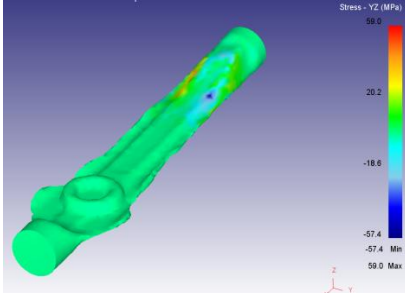
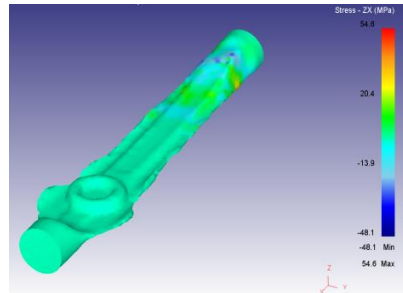
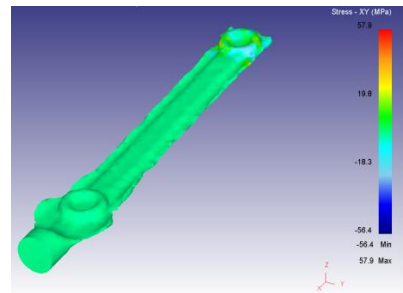
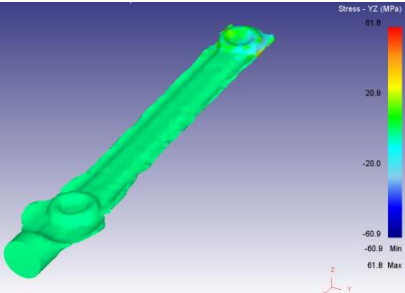
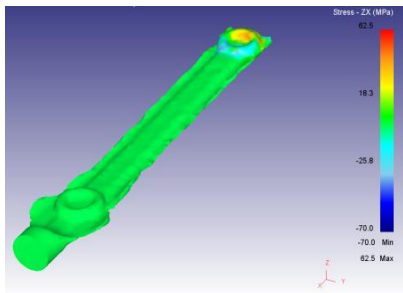
профилирование заготовки под штамповку на КГШП и штамповочную вальцовку можно осуществить на ранее выбранном оборудовании – консольных коловых вальцах модели СА1335, предельное значение силы которых согласно источнику [148] равно 800 кН.

С помощью определения компонентов тензора напряжений на трех этапах штамповочной вальцовки можно проанализировать напряженное состояние металла поковки (таблица 3.14).

Таблица 3.14

Значения нормальных и касательных напряжений на разных этапах штамповочной вальцовки поковки наковального гаечного ключа

Нормальные напряжения		
σ_x	σ_y	σ_z
		
Шаг 17 (0,35 с)	Шаг 17 (0,35 с)	Шаг 17 (0,35 с)
		
Шаг 33 (0,98 с)	Шаг 33 (0,98 с)	Шаг 33 (0,98 с)
		
Шаг 50 (1,53 с)	Шаг 50 (1,53 с)	Шаг 50 (1,53 с)

Касательные напряжения		
τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
		
Шаг 17 (0,35 с)	Шаг 17 (0,35 с)	Шаг 17 (0,35 с)
		
Шаг 33 (0,98 с)	Шаг 33 (0,98 с)	Шаг 33 (0,98 с)
		
Шаг 50 (1,53 с)	Шаг 50 (1,53 с)	Шаг 50 (1,53 с)

На всем протяжении процесса напряженное состояние непрерывно меняется. В зоне перемещения пятна контакта вдоль оси поковки преобладают сжимающие нормальные напряжения (ось Z), наибольшее значение которого наблюдается при формоизменении участка большой головки, равное 632 МПа. Стоит отметить, что в той же области показатели сжимающих напряжений вдоль осей X и Y практически совпадают (476 МПа и 493 МПа соответственно). При этом растягивающие напряжения также выше, чем на других участках.

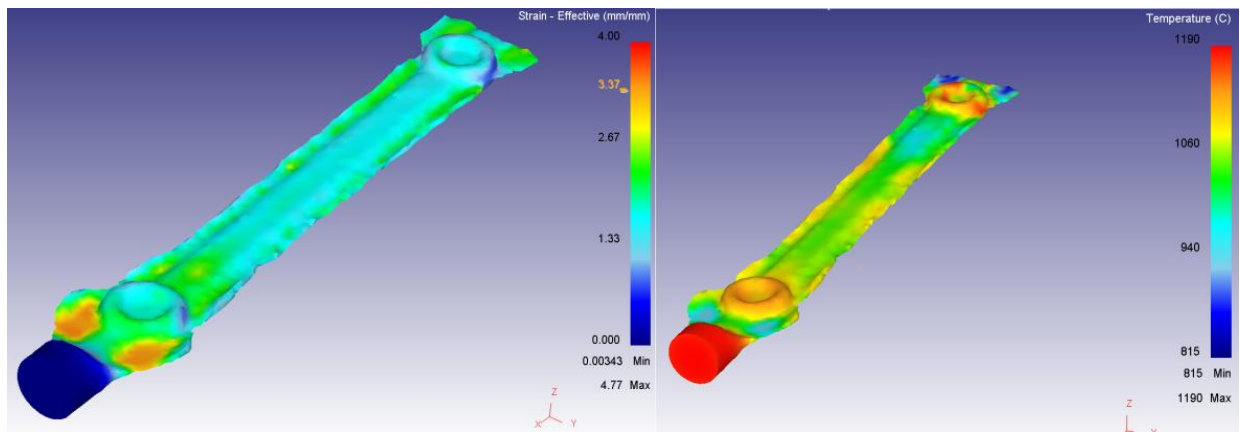
В процессе вальцовки участка стержня в направлении оси поковки (ось

X) значения сжимающих и растягивающих нормальных напряжений практически совпадают (150 МПа и 154 МПа соответственно). Наибольшее значение сжимающего нормального напряжения 244 МПа наблюдается в направлении Z.

В области формоизменения малой головки наибольший показатель сжимающего нормального напряжения по абсолютной величине (376 МПа) наблюдается в направлении оси X, совпадающей с осью поковки. В направлении, перпендикулярном плоскости разъема сектора-штампа (ось Z), значение сжимающего нормального напряжения немного ниже и составляет 367 МПа. Растягивающие нормальные напряжения при формировании малой головки гаечного ключа демонстрируют наименьшие показатели на всем цикле горячей вальцовки по всем трем направлениям X, Y и Z (94 МПа, 92 МПа и 79,5 МПа соответственно).

Максимальные значения касательных напряжений наблюдаются на начальном этапе горячей продольной штамповочной вальцовки по всем трем направлениям при формировании большой головки гаечного ключа. Значимых колебаний величин напряжений не обнаружено, что свидетельствует об устойчивом протекании всего цикла процесса профилирования в ручье-гравюре.

Интенсивность деформаций, приведенная на рисунке 3.23 а, позволяет оценить изменение деформированного состояния поковки. Максимальные значения наблюдаются на начальном этапе штамповочной вальцовки при внедрении секторов-штампов в профилированную заготовку и расположены в местах облоя, где достигают величины 3,37. На участке большой головки, начала полотна и облоя вокруг малой головки показатели интенсивности деформаций находятся в диапазоне 2 – 2,7. Наименьшие показатели расположены на конечном участке рукояти и малой головки (диапазон 1,3 – 1,9).



а)

б)

Рисунок 3.23. Интенсивность деформации (а) и температурное поле (б) поковки накидного гаечного ключа

Температура поковки после ГПрШВ (рисунок 3.23 б) находится в допустимом диапазоне температур горячей обработки. Наименьшие значения локализованы в зонах облоя.

3.8 Исследование процесса предварительного профилирования на ковочных вальцах и моделирование горячей поперечной штамповочной вальцовки

Проведенное компьютерное моделирование двух переходов по системе «квадрат – плоский овал – квадрат» дает возможность произвести оценку формы, размерных параметров и вывести графики силы от времени вальцовки (рисунок 3.24). Окончательная профилированная заготовка имеет малое искривление оси, что является важным для последующей поперечной вальцовки, а ее размеры соответствуют расчетным данным. О равномерном протекании процесса свидетельствуют близкие значения силовых показателей графиков, причем сила возрастает с увеличением пятна контакта между секторами-штампами и заготовкой.

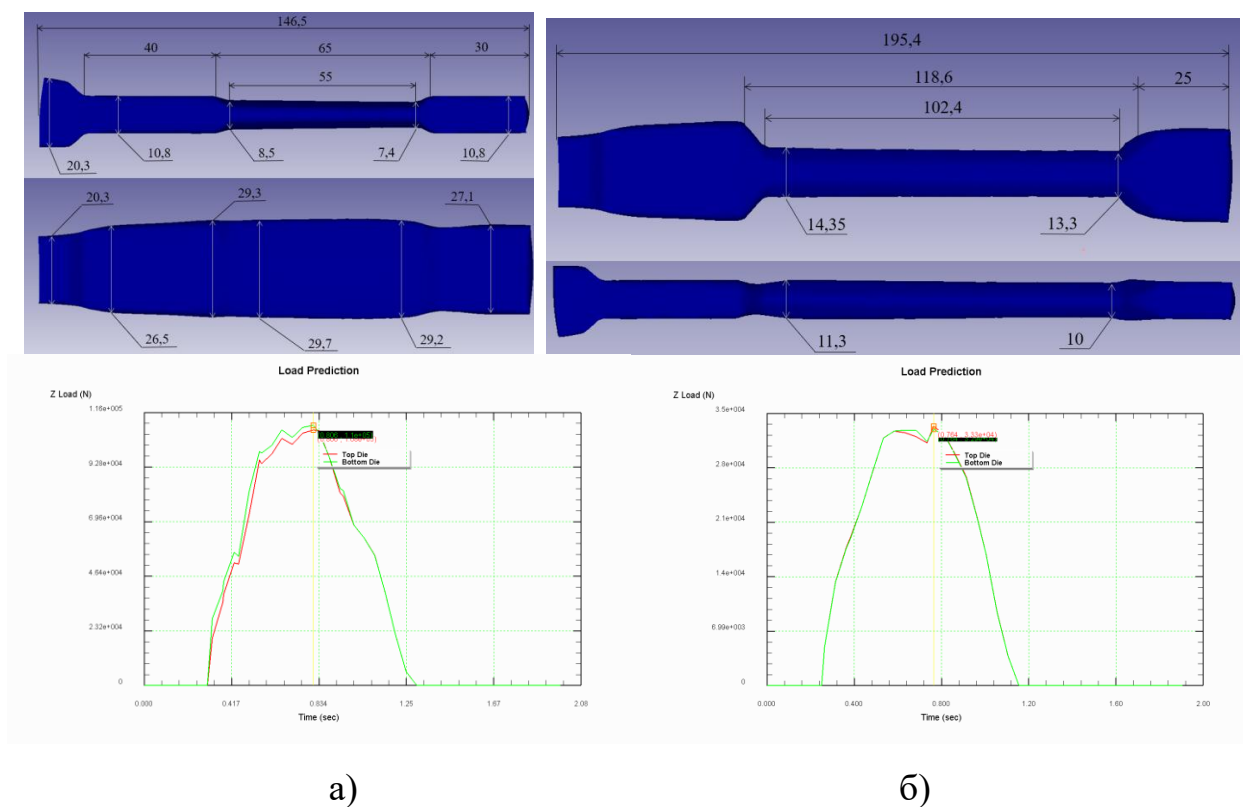


Рисунок 3.24. Форма, размеры и силовые параметры при предварительном профилировании заготовки горячей вальцовкой: а – в плоскоовальном калибре; б – в квадратном калибре

Из-за разницы площади контактной поверхности при вальцовке в плоскоовальном ручье пиковые значения силы значительно выше (110 кН), чем в квадратном ручье (33,3 кН). Время полного цикла вальцовки, определенное по графикам, на первом переходе равно 1 с.; на втором – 0,9 с.

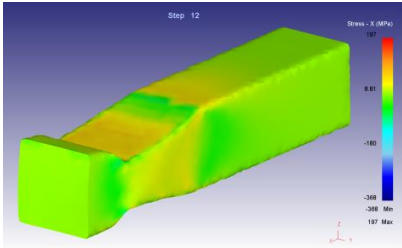
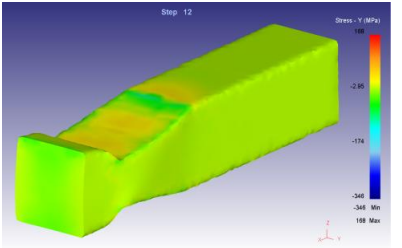
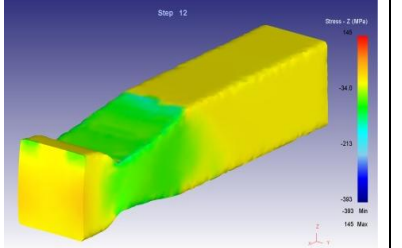
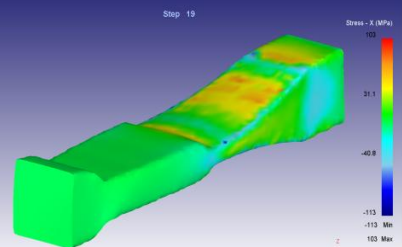
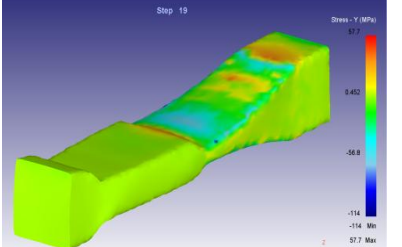
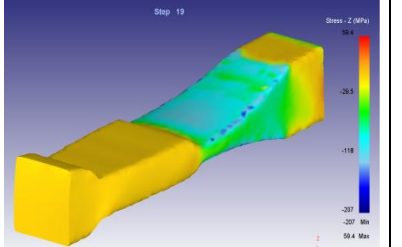
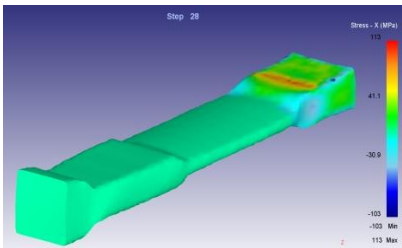
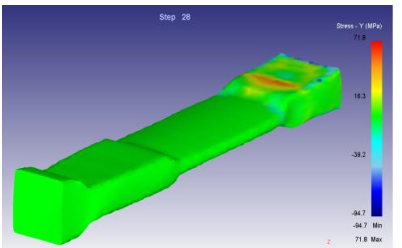
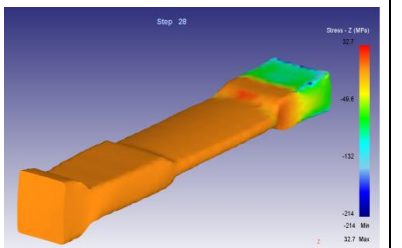
С помощью компонентов тензора напряжений, продемонстрированных в таблицах 3.15 и 3.16 можно проанализировать напряженное состояние металла заготовки при горячей вальцовке двух переходов.

Секторы-штампы протягивают заготовку вдоль оси полуфабриката, совпадающей с осью X , поэтому в данном направлении у двух переходов преобладают растягивающие нормальные напряжения. Максимальное значение при вальцовке в плоскоовальном ручье (см. таблицу 3.15) наблюдается на начальном этапе вальцовки и составляет 197 МПа. В направлении Z происходит обжатие заготовки, поэтому преобладают

преимущественно сжимающие нормальные напряжения. Максимальное значение на первом переходе, абсолютное значение равное 393 МПа, определено на начальном этапе вальцовки. В направлении Y также преобладают сжимающие напряжения, достигающие максимальных значений преимущественно в начале профилирования секторами-штампами (346 МПа).

Таблица 3.15

Значения нормальных и касательных напряжений в профилированной заготовке на разных этапах вальцовки в плоскоовальном ручье переменного сечения

Нормальные напряжения		
σ_x	σ_y	σ_z
		
Шар 12 ($t = 0,15$ с)	Шар 12 ($t = 0,15$ с)	Шар 12 ($t = 0,15$ с)
		
Шар 19 ($t = 0,46$ с)	Шар 19 ($t = 0,46$ с)	Шар 19 ($t = 0,46$ с)
		
Шар 28 ($t = 0,85$ с)	Шар 28 ($t = 0,85$ с)	Шар 28 ($t = 0,85$ с)

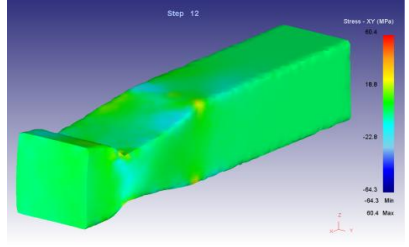
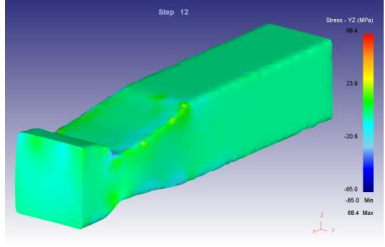
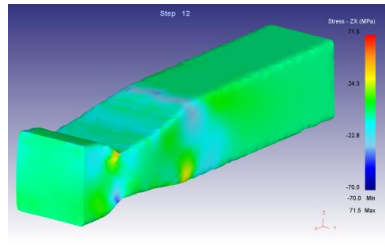
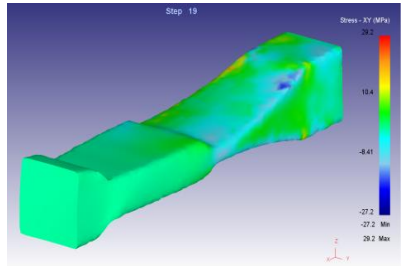
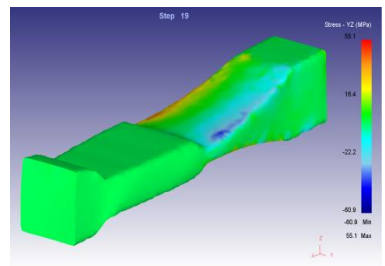
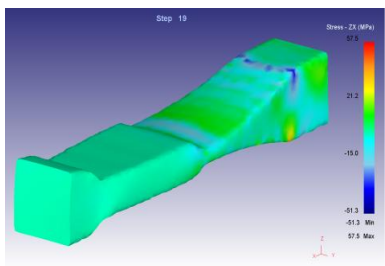
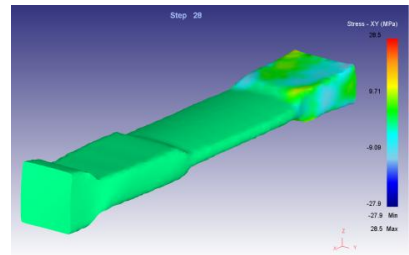
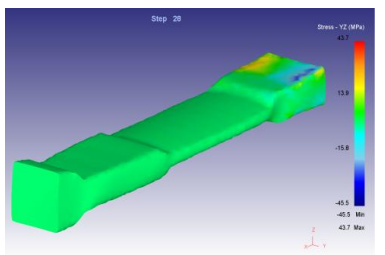
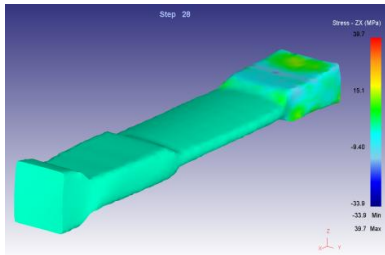
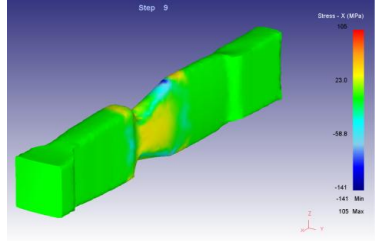
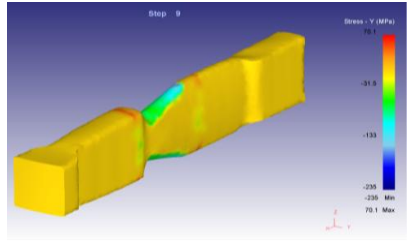
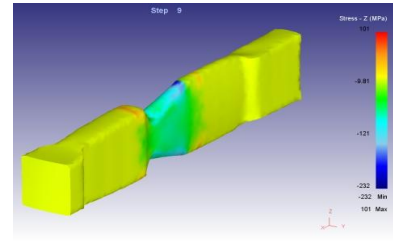
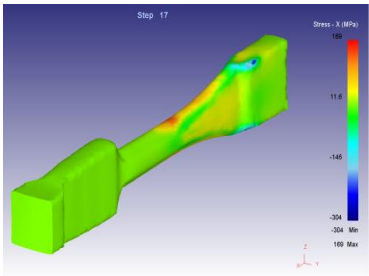
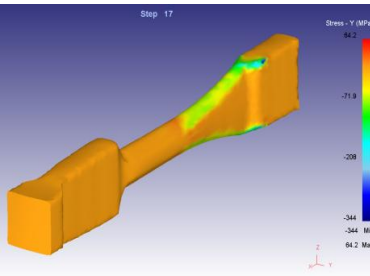
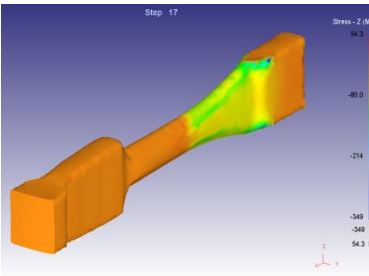
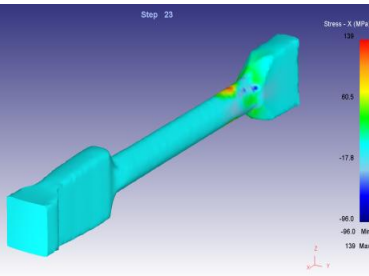
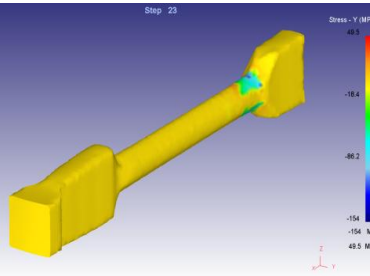
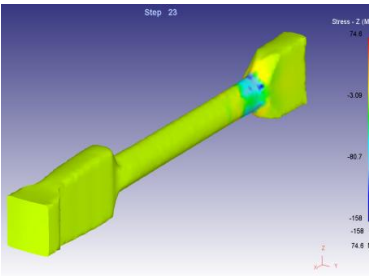
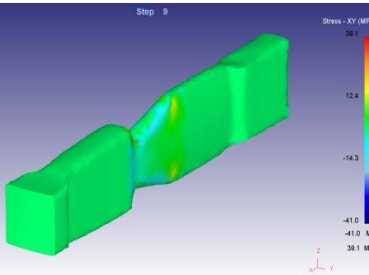
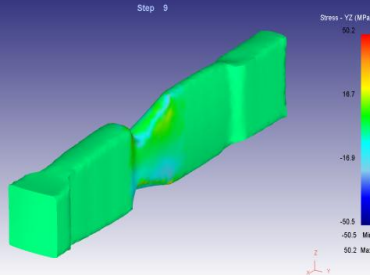
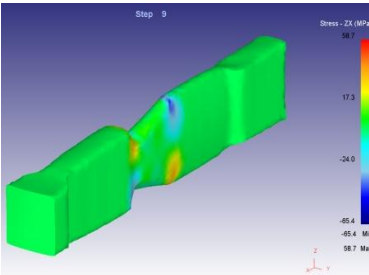
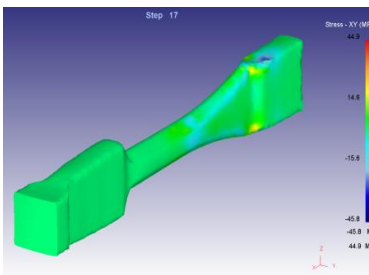
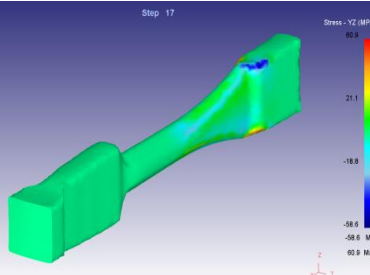
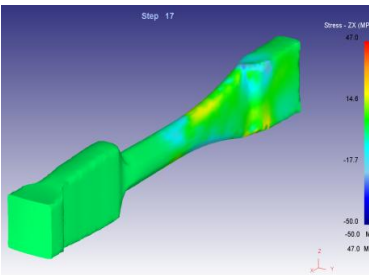
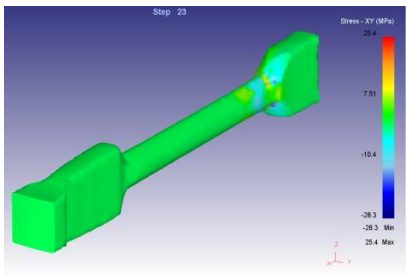
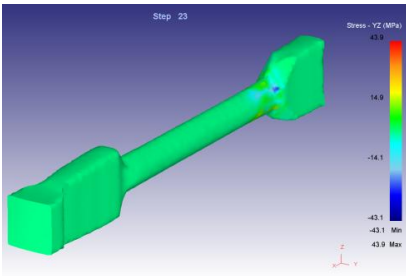
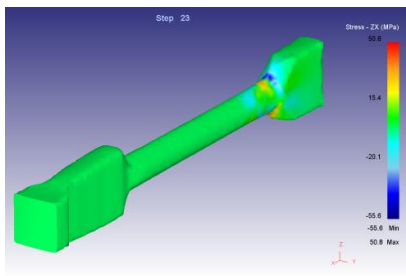
Касательные напряжения		
τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
		
Шар 12 (t= 0,15 с)	Шар 12 (t= 0,15 с)	Шар 12 (t= 0,15 с)
		
Шар 19 (t= 0,46 с)	Шар 19 (t= 0,46 с)	Шар 19 (t= 0,46 с)
		
Шар 28 (t= 0,85 с)	Шар 28 (t= 0,85 с)	Шар 28 (t= 0,85 с)

Таблица 3.16

Значения нормальных и касательных напряжений в полуфабрикате на разных этапах вальцовки в квадратном ручье переменного сечения

Нормальные напряжения		
σ_x	σ_y	σ_z
		
Шар 9 (t= 0,13 с)	Шар 9 (t= 0,13 с)	Шар 9 (t= 0,13 с)

Нормальные напряжения		
σ_x	σ_y	σ_z
		
Шар 17 (t= 0,52 c)	Шар 17 (t= 0,52 c)	Шар 17 (t= 0,52 c)
		
Шар 23 (t= 0,8 c)	Шар 23 (t= 0,8 c)	Шар 23 (t= 0,8 c)
Касательные напряжения		
τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
		
Шар 9 (t= 0,13 c)	Шар 9 (t= 0,13 c)	Шар 9 (t= 0,13 c)
		
Шар 17 (t= 0,52 c)	Шар 17 (t= 0,52 c)	Шар 17 (t= 0,52 c)

Касательные напряжения		
τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}
		
Шаг 23 (t= 0,8 с)	Шаг 23 (t= 0,8 с)	Шаг 23 (t= 0,8 с)

В квадратном ручье (см. таблицу 3.16) наибольшие показатели растягивающего нормального напряжения вдоль оси X приходятся на среднюю фазу вальцовки и достигают 169 МПа. Максимальные показатели сжимающего нормального напряжения присутствуют как в направлении, параллельном осям валков, так и перпендикулярно им, причем значения σ_y и σ_z близки друг к другу на всех трех этапах вальцовки (по оси Y пиковый показатель равен 344 МПа, а вдоль оси Z – 349 МПа).

Близкие друг к другу значения растягивающих и сжимающих касательных напряжений у двух переходов подтверждают равномерное протекание процесса горячей вальцовки и минимальное искривление оси профилированной заготовки.

По результатам моделирования вальцованные области двух переходов условно поделены на девять сечений, находящихся в моменте формоизменения сегментами в определенное время. В каждом сечении выделены пять зон и выбраны контрольные точки («точка» 1 – «точка» 5 см. рисунок 3.25).

Визуальное представление перемещающего очага деформации и преобразования формы в определенный момент времени вальцовки профилированной заготовки двух переходов продемонстрировано в таблице 3.17.

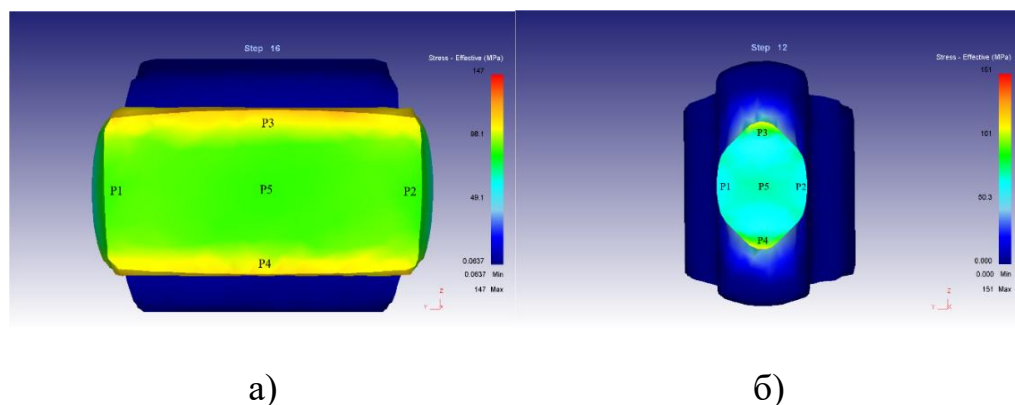
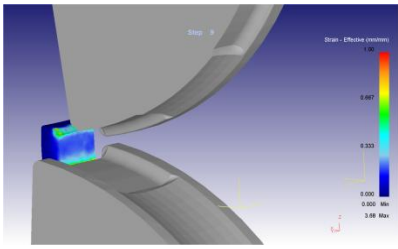
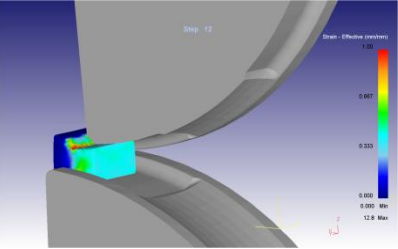
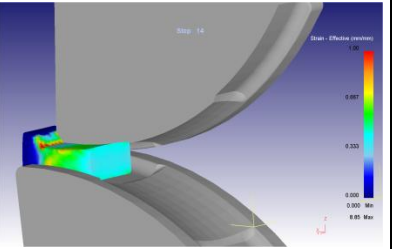
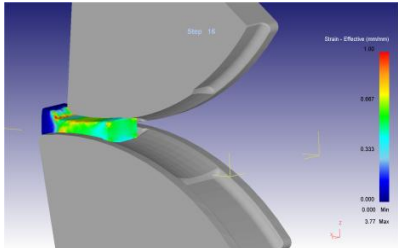
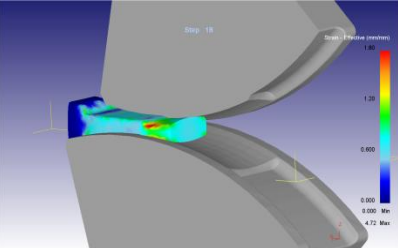
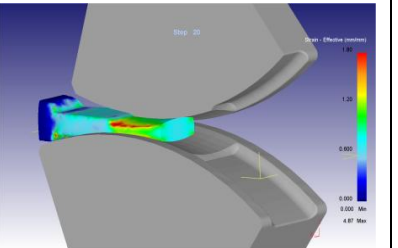
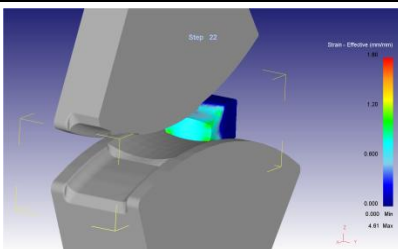
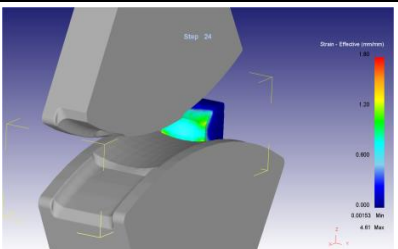
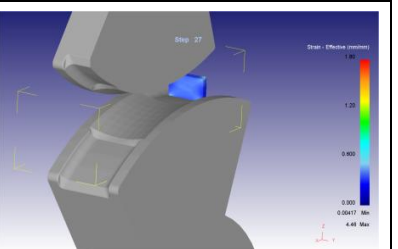
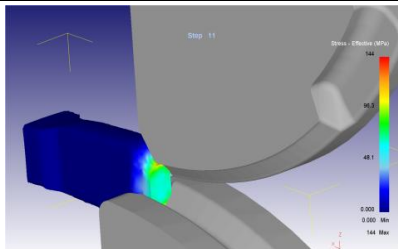
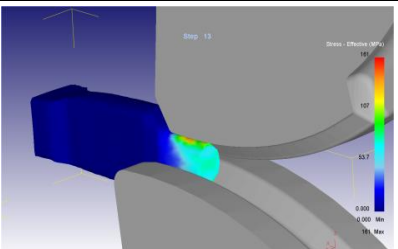
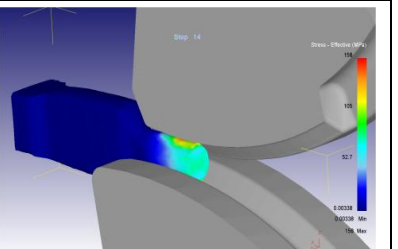
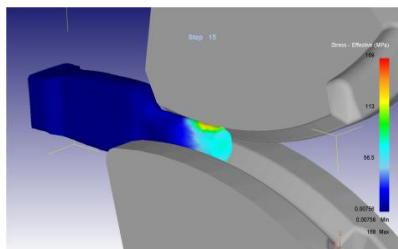
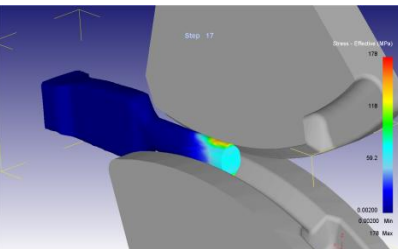
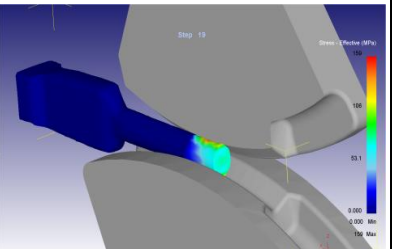


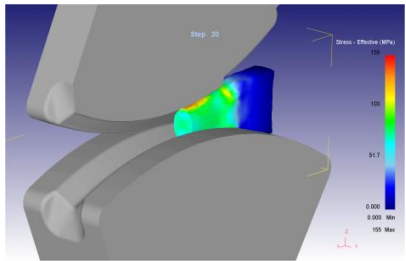
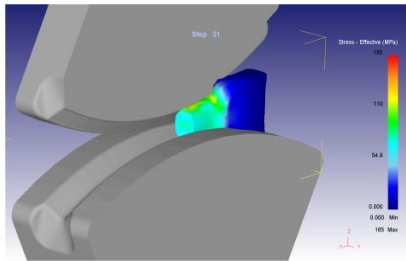
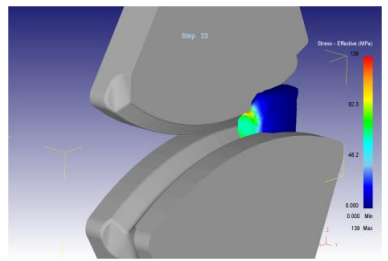
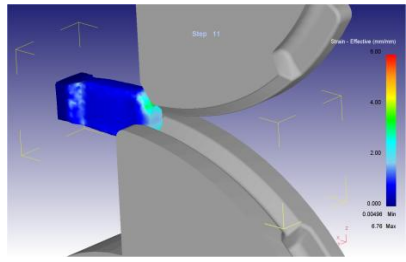
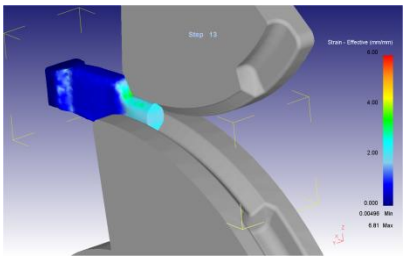
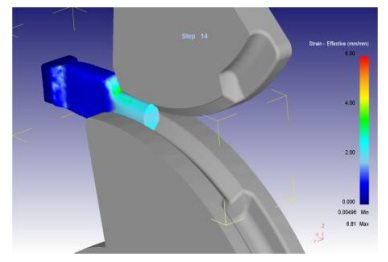
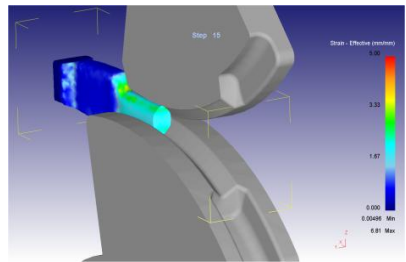
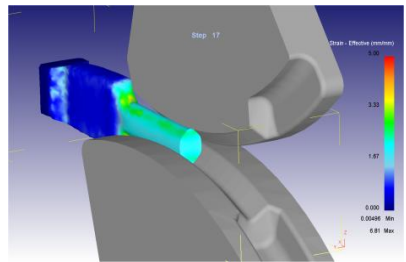
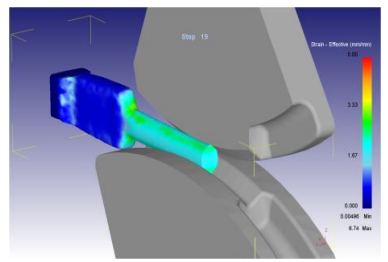
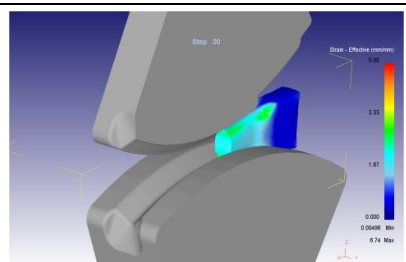
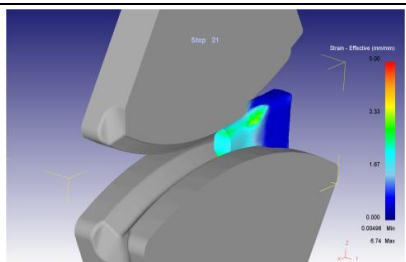
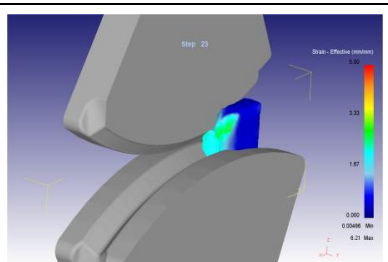
Рисунок 3.25. Контрольные точки в конкретном сечении очага деформации профилируемой заготовки: а – плоскоовальный ручей; б – квадратный ручей

Таблица 3.17

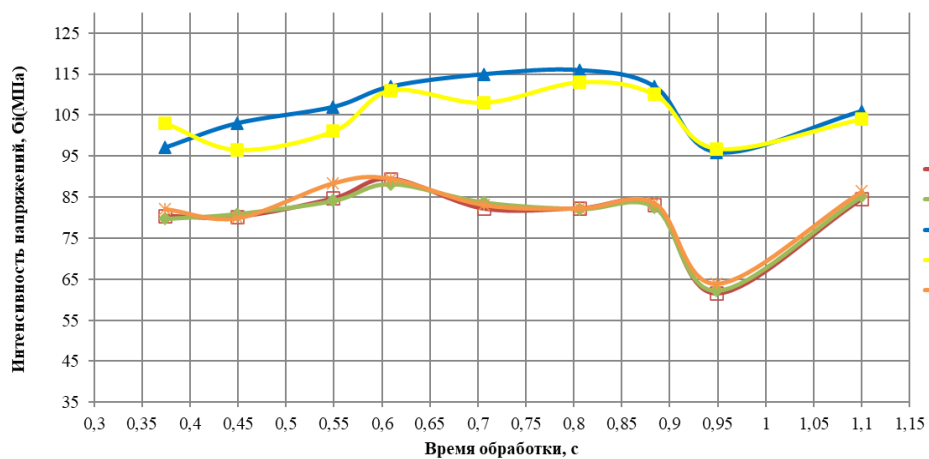
Изменение формы деформируемого участка заготовки и значения интенсивности напряжений и деформаций в ее сечениях на девяти временных этапах горячей вальцовки в ручьях переменного сечения

Интенсивность напряжений при обработке в плоскоовальном ручье		
Шаг 9 (0,12 с)	Шаг 12 (0,2 с)	Шаг 14 (0,3 с)
Шаг 16 (0,36 с)	Шаг 18 (0,46 с)	Шаг 20 (0,56 с)
Шаг 22 (0,63 с)	Шаг 24 (0,7 с)	Шаг 27 (0,85 с)

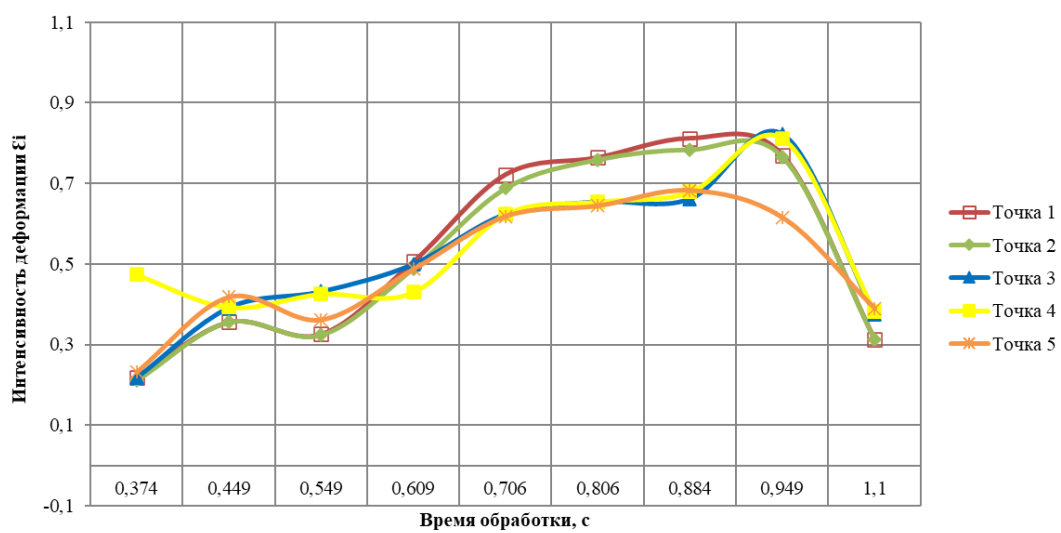
Интенсивность деформаций при обработке в плоскоовальном ручье		
		
Шаг 9 (0,12 с)	Шаг 12 (0,2 с)	Шаг 14 (0,3 с)
		
Шаг 16 (0,36 с)	Шаг 18 (0,46 с)	Шаг 20 (0,56 с)
		
Шаг 22 (0,63 с)	Шаг 24 (0,7 с)	Шаг 27 (0,85 с)
Интенсивность напряжений при обработке в квадратном ручье		
		
Шаг 11 (0,23 с)	Шаг 13 (0,33 с)	Шаг 14 (0,38 с)
		
Шаг 15 (0,43 с)	Шаг 17 (0,5 с)	Шаг 19 (0,6 с)

Интенсивность напряжений при обработке в квадратном ручье		
		
Шаг 20 (0,66 с)	Шаг 21 (0,71 с)	Шаг 23 (0,8 с)
Интенсивность деформаций при обработке в квадратном ручье		
		
Шаг 11 (0,23 с)	Шаг 13 (0,33 с)	Шаг 14 (0,38 с)
		
Шаг 15 (0,43 с)	Шаг 17 (0,5 с)	Шаг 19 (0,6 с)
		
Шаг 20 (0,66 с)	Шаг 21 (0,71 с)	Шаг 23 (0,8 с)

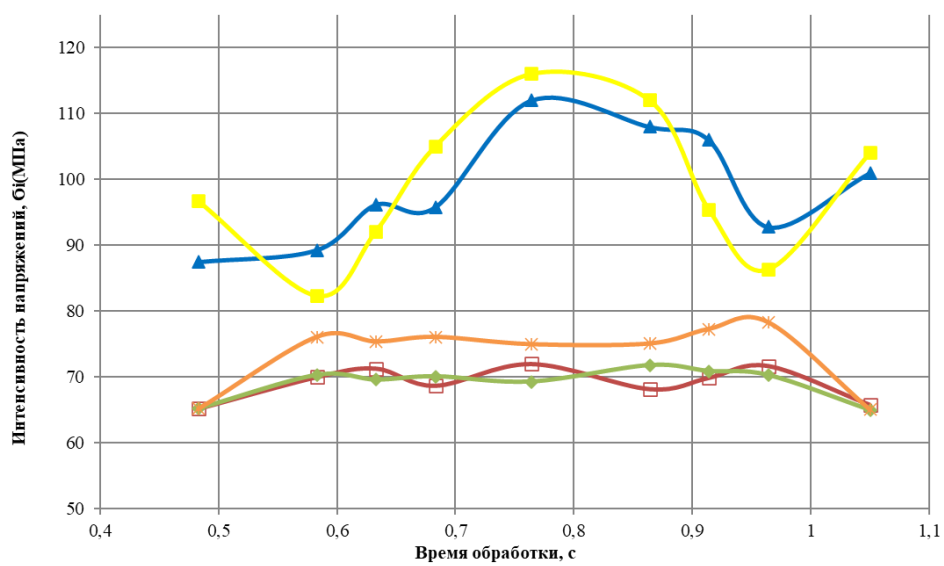
По значениям интенсивности напряжений и интенсивности деформаций в контрольных точках построены графики данных характеристик в изменяемом во времени локальном очаге деформации между секторами-штампами и заготовкой (рисунок 3.26), позволяющие детально изучить НДС металла в динамике процесса.



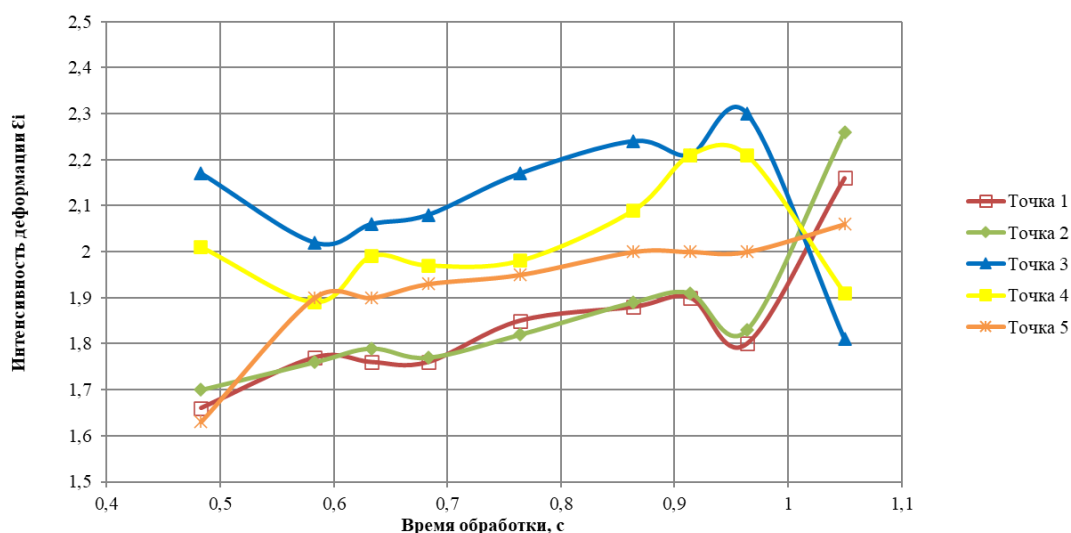
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.26. Изменение интенсивности напряжений и интенсивности деформаций в сечениях вальцуемой заготовки в изменяемом во времени локальном очаге формоизменения секторами-штампами:

а, б – плоскоовальный ручей; в, г – квадратный ручей

Графики устанавливают уровень интенсивности напряжений в точках, близких к воздействию секторов-штампов с заготовкой (3 и 4) выше, чем в точках, расположенных в свободных от контакта с инструментами зонах (1 и 2) и центре (точка 5), а близость их значений друг к другу говорит о равномерности процесса горячей вальцовки и минимальном искривлении оси заготовки (см. рисунок 3.26 а, в). Максимальные значения наблюдаются на среднем этапе вальцовки (на первом и на втором переходах значения достигают 117 МПа). Интенсивность напряжений и интенсивность деформаций характерны непрерывным изменением значений на всем протяжении двух этапов горячей вальцовки. Стоит отметить прослеживаемость моментов преобразования формы и размеров профилированной заготовки, однако из-за небольшой разницы в геометрии и размеров сечений плоскоовального калибра колебания показателей незначительны относительно второго пропуса.

В целом, показатели интенсивности деформаций в процессе вальцовки в

плоскоовальном калибре значительно ниже, чем в квадратном (рисунок 3.26 б, г). Средний этап вальцовки характерен постепенным возрастанием значений. Это происходит из-за уменьшения объема металла в сечениях зоны полотна. Максимальные показатели наблюдаются на этапе перехода от полотна к малой головке в точках 3 и 4 (в плоскоовальном калибре значения достигают 0,83, в квадратном – 2,32).

Остаточная температура профилированной заготовки находится в пределах температур горячей объемной штамповки (см. рисунок 3.27) и колеблется в диапазоне 1010–1190 °С, что исключает необходимость дополнительного нагрева перед поперечной вальцовкой.

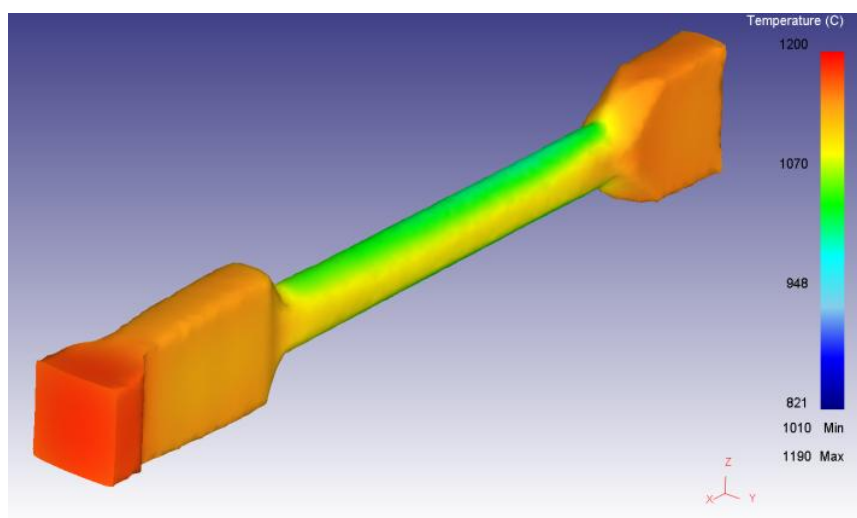


Рисунок. 3.27. Температурное поле профилированной заготовки после горячей вальцовки в секторах-штампах в ручьях переменного сечения

Для подтверждения корректности геометрических и размерных характеристик полученного полуфабриката проведено компьютерное моделирование процесса горячей поперечной штамповочной вальцовки. Позиционирование заготовки происходит параллельно валам на равноудалённом расстоянии от их осей и с небольшим отведением в сторону захода ручьевых вставок (вправо) таким образом, чтобы обеспечить наилучшие условия обжатия (рисунок 3.28 а). Скорость вращения валов остается равной 65 об/мин, температура ручьевых вставок 200 °С.

Форма полученной поковки рожкового гаечного ключа (рисунок 3.28 б) отличается заполненностью участков полотна, малой и большой головок, что говорит о достаточности объема металла на данных участках. При этом поковка не нуждается в дополнительной правке, так как отсутствует искривление ее оси.

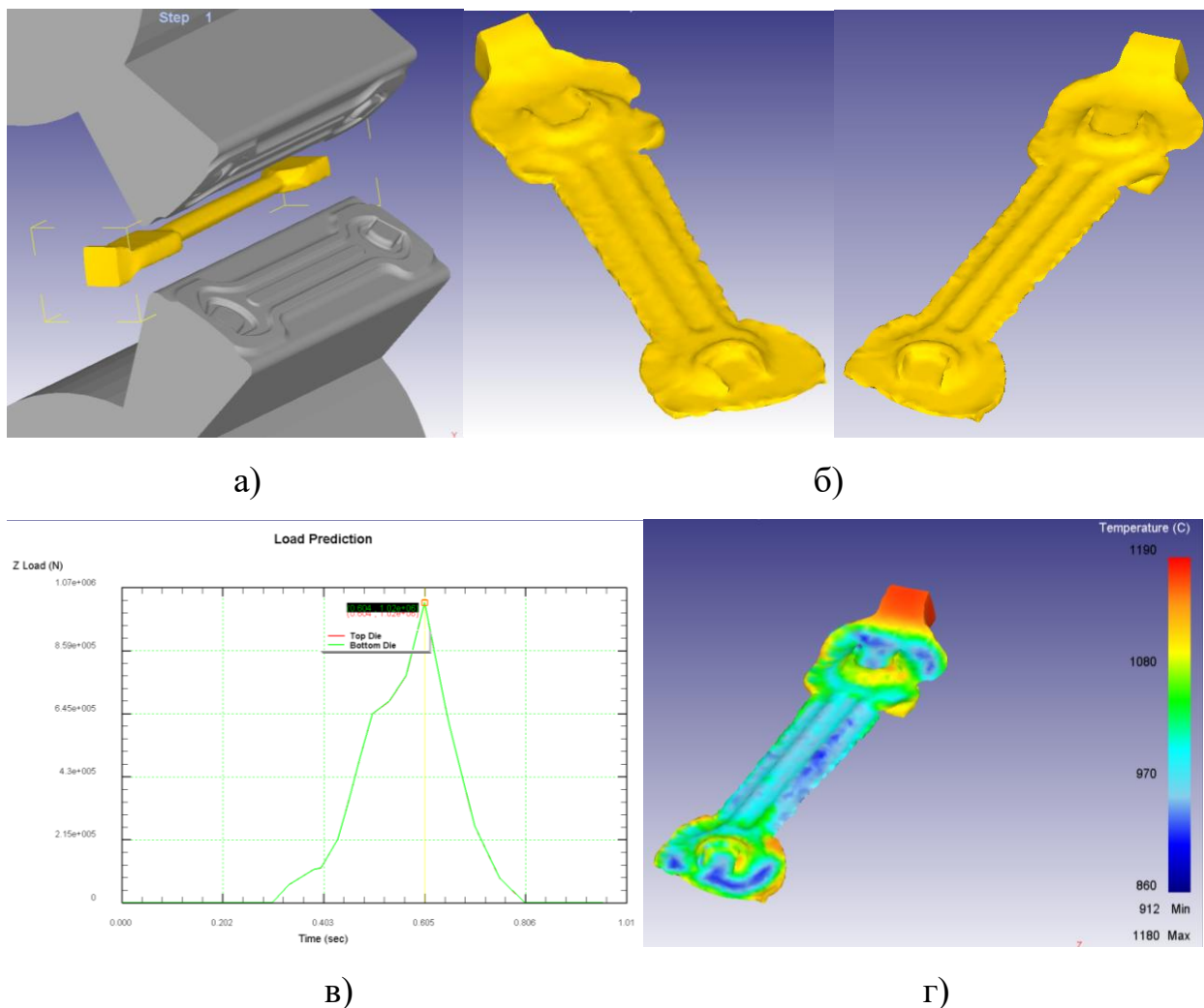


Рисунок 3.28. Моделирование горячей поперечной вальцовки: а – исходная постановка моделей рабочих валков и профилированной заготовки; б – внешний вид поковки гаечного ключа после операции; в – силовые параметры; г – температурное поле поковки

При этом график силы по времени вальцовки (см. рисунок 3.28 в) демонстрирует значения, достигающие 1020 кН, что выше предельного значения силы консольных ковочных вальцов модели CA1335, равного

800 кН. Это свидетельствует о невозможности использования данной модели оборудования для поперечной вальцовки поковок с такими размерами и следует выбрать машину большей мощности. Температурное поле поковки, иллюстрируемое на рисунке 3.28 г, находится в допустимых пределах температур горячей штамповки стальных поковок и показывает локализацию относительно низких значений в области рукояти и облоя поковки.

3.9 Результаты моделирования штамповки на КГШП профилированной заготовки, разработанной для горячей поперечной штамповочной вальцовки

Горячая вальцовка в ручьях переменного сечения по системе калибров «квадрат – плоский овал – квадрат» позволяет применять полученную профилированную заготовку для окончательного формирования поковки как на ковочных вальцах методом поперечной вальцовки, так и штамповкой на КГШП. Среди преимуществ полуфабриката можно выделить использование в качестве исходной заготовки прутка квадратного поперечного сечения, более удобного для удерживания клещами или рукой манипулятора на всех этапах обработки давлением, по сравнению с прутком круглого сечения. Кроме того, полученная форма головок более устойчива при позиционировании полуфабриката на нижней вставке КГШП (рисунок 3.39 а), что положительно сказывается на точности штамповки.

Стоит отметить, что появление бокового заусенца в области стержня профилированной заготовки негативно влияет на ее окончательное формоизменение из-за трудности размещения полуфабриката на ручье вставки, поэтому при технологических расчетах секторов-штампов необходимо следовать требованиям по точности, в отличие от горячей вальцовки по системе «круг – овал – круг».

Форма поковки гаечного ключа, полученной моделированием

штамповки на КГШП (см. рисунок 3.29 б), демонстрирует качественное заполнение ручья вставок штампа, что свидетельствует о достаточном объеме металла на всех участках профилированной заготовки.

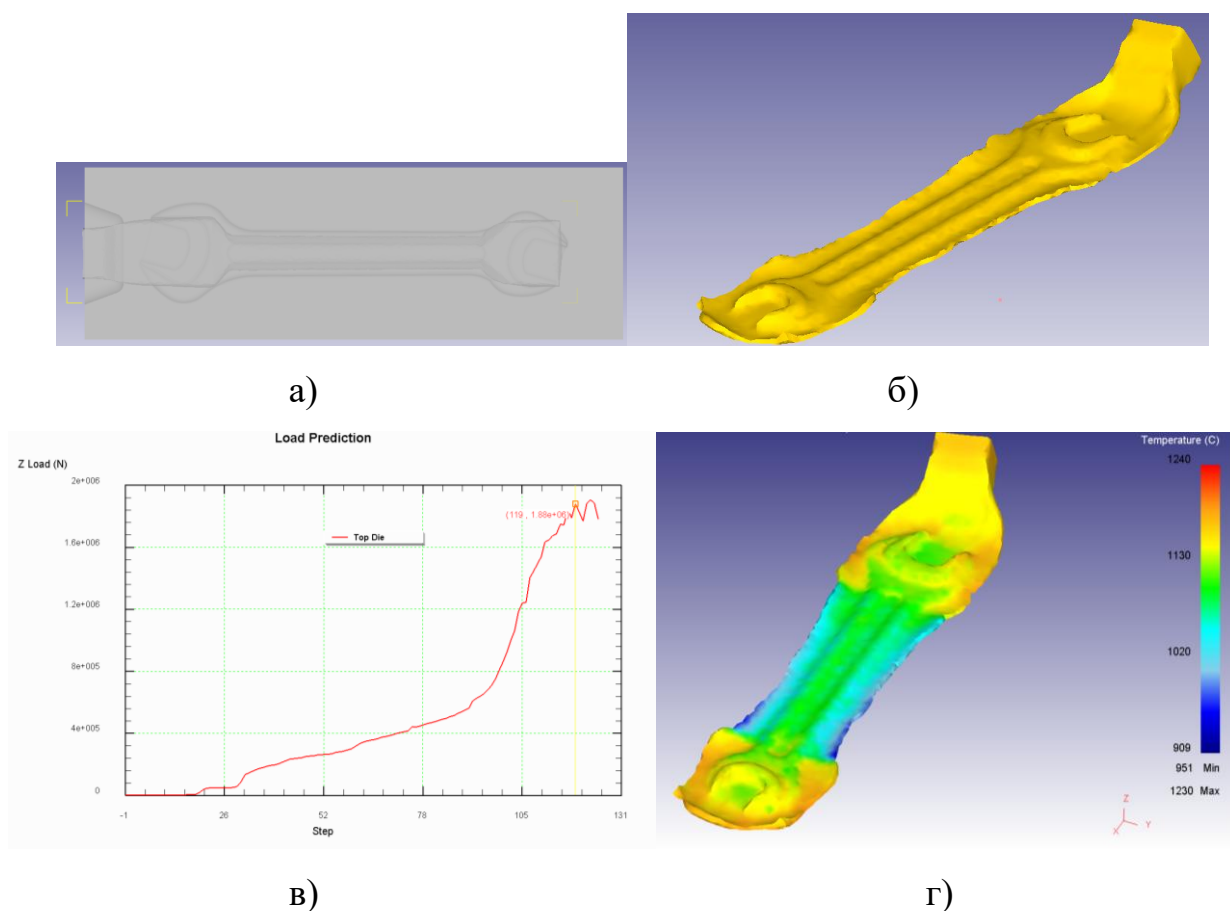


Рисунок 3.29. Моделирование штамповки гаечного ключа на КГШП:
а – размещение полуфабриката на ручьевой вставке; б – внешний вид поковки с облоем; в – график изменения силы по ходу прессы;
г – температурное поле поковки

Максимальное значение силы (см. рисунок 3.29 в), равное 1880 кН, находится в пределах технической характеристики выбранного оборудования КГШП модели КА8538 [160].

По результатам технологических расчетов и компьютерного моделирования штамповки поковки рожкового двухстороннего гаечного ключа ГОСТ 2839–80 [105] на КГШП (таблица 3.18) максимальная сила при деформировании полуфабриката, полученного горячей вальцовкой по системе

«квадрат – плоский овал – квадрат» является наименьшей. Это связано не только с геометрией профилированной заготовки, но и с уменьшением припусков на обработку конечной поковки.

Таблица 3.18

Максимальные показатели силы штамповки на КГШП рожкового
двухстороннего гаечного ключа

	Максимальная сила, кН
Технологические расчеты	3644
Моделирование штамповки полуфабриката, полученного горячей вальцовкой по системе «круг – овал – круг» в ручьях постоянного сечения	3710
Моделирование штамповки полуфабриката, полученного горячей вальцовкой по системе «круг – овал – круг» в скорректированных ручьях постоянного сечения	3590
Моделирование штамповки полуфабриката, полученного горячей вальцовкой по системе «квадрат – плоский овал – квадрат» в ручьях переменного сечения	1880

Температура поковки (см. рисунок 3.29 г) не превышает минимального значения интервала горячей штамповки (850 °С). Наименьшая температура наблюдается в области рукояти и облоя.

3.10 Выводы по главе 3

1. Моделированием технологического процесса горячей вальцовки в ручьях постоянного сечения по системе «круг – овал – круг» установлено, что объема металла достаточно для качественного заполнения окончательного ручья, однако наблюдается избыточное количество облоя в области рукояти, которое было уменьшено с помощью корректировки секторов-штампов двух переходов эмпирическим методом. В итоге удалось увеличить КИМ на 8%

(67% против 59%). Боковой заусенец, присутствующий в зоне полотна окончательной профилированной заготовки, не влияет на формирование поковки гаечного ключа штамповкой в открытом штампе, но лучше не допускать его образования настройкой зазора между секторами-штампами.

2. Установлено, что операция горячей вальцовки в секторах-штампах в ручьях переменного сечения расширяет возможности достижения повышенных показателей ресурсосбережения по сравнению с вальцовкой в ручьях постоянного сечения и особенно рационально ее использовать при необходимости изготовления поволоок с большими перепадами объемов на характерных участках. В случае моделирования вальцовки накидного двухстороннего гаечного ключа КИМ достигает 70% по сравнению со штамповкой на молоте с использованием подкатного ручья (42%) при отсутствии дефектов формы профилированной заготовки, что исключает возможность недоштамповки в окончательном ручье вставок штампа КГШП и подтверждает корректность технологических расчетов.

3. Компьютерные модели оснастки позволили проанализировать силовые параметры, воспринимаемые деформирующим инструментом и системой его крепления и фиксации, оценить величины коэффициентов запаса прочности с последующим расчетом стойкости секторов-штампов по разработанной статистической модели.

Аналитическая модель усовершенствована за счёт учета влияния температуры на упругие свойства материала инструмента. Использование уточненной зависимости модуля упругости $E(T)$, аппроксимированной полиномом второй степени, позволило уменьшить расхождение расчётных напряжений с данными компьютерного моделирования при температурах выше 400 °C. Разработанная модель позволяет конструкторам и технологам кузнечных цехов, наряду с моделированием процессов деформирования, оперативно оценивать ресурс работы инструментов по представленным статистическим моделям и вносить изменения в геометрию калибров, энергосиловые и температурные режимы вальцовки.

4. Технология горячей продольной штамповочной вальцовки в фасонном ручье сектора-штампа более эффективна по сравнению со штамповкой профилированной заготовки осаживанием за счет исключения из технологической цепочки дорогостоящего оборудования КГШП или штамповочного молота при существующих ограничениях, связанных с размерами и геометрическими особенностями объектов производства.

Проведенное моделирование ГПрШВ рожкового двухстороннего гаечного ключа ГОСТ 2839–80 показало наличие недоштамповки в областях открытых зевов и искривления оси, подлежащего правке. Положительный результат ГПрШВ двухстороннего накидного гаечного ключа ГОСТ 10112–2001 согласуется со значительным влиянием на процесс формоизменения симметричности поковки в плоскости воздействия секторов-штампов.

5. Проведенное моделирование горячей вальцовки по системе «квадрат – плоский овал – квадрат» по результатам технологических расчетов показало достаточность объема металла на всех участках профилированной заготовки как при окончательном формоизменении поковки технологией поперечной вальцовки, так и при ее штамповке на КГШП, что говорит об универсальности профилированной заготовки.

Температурное поле всех исследованных профилированных заготовок и окончательных поковок находится в пределах интервала температур горячей объемной штамповки, что позволяет проводить все технологические процессы без дополнительного нагрева.

6. Компьютерное моделирование позволило проанализировать НДС исследованных объектов и убедиться в устойчивости протекания процессов деформирования без возникновения дефектов. Анализ интенсивности напряжений и интенсивности деформаций в сечениях профилированных заготовок в изменяемом во времени локальном очаге воздействия секторов-штампов в процессе предварительной горячей вальцовки позволил выявить следующие закономерности:

- исследуемые параметры на предварительной вальцовке не имеют

существенных различий в значениях, так как используются одинаковые исходные данные моделирования, а именно материал, температура, скорость вращения валов;

– при малых степенях обжатия значения интенсивности напряжений в областях, близких к воздействию секторов-штампов на заготовку (контрольные точки 3 и 4) выше, чем в свободных от контакта зонах (точки 1, 2 и 5). С увеличением степени обжатия секторами-штампами заготовки в процессе вальцовки уменьшаются различия исследуемых параметров в контрольных точках сечений;

– во всех рассмотренных технологических процессах предварительной горячей вальцовки наибольшие показатели интенсивности деформаций наблюдаются на втором переходе, когда после овального калибра заготовку перемещают в круглый калибр, либо в квадратный с меньшими поперечными сечениями;

– при вальцовке прутка круглого сечения значения интенсивности деформаций в зонах с контрольными точками 1 и 2 ниже на первом пропуске по схеме «круг – овал» и выше на втором пропуске по схеме «овал – круг» или «овал – квадрат». Однако при вальцовке исходной заготовки квадратного сечения наблюдается обратная ситуация – интенсивность деформаций в точках 1 и 2 на первом переходе по схеме «квадрат – плоский овал» выше, чем на втором переходе по схеме «плоский овал – квадрат».

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЯЧЕЙ ВАЛЬЦОВКИ ПОКОВКИ ГАЕЧНОГО КЛЮЧА

Физическое моделирование процессов ОМД получило широкое распространение, так как оно способно дать объективную информацию о форме и размерных параметрах исследуемого объекта при соблюдении условий подобия модели и реального объекта [16, 187, 188].

Экспериментальные исследования процесса предварительной горячей вальцовки используются для анализа достоверности не только геометрических параметров профилированных заготовок, но и корректности инженерных расчетов при проектировании калибров, а также результатов компьютерного моделирования.

Основное влияние на окончательную геометрию профилируемой заготовки оказывает форма и размеры калибров секторов-штампов, зазор между ними, скорость вращения валов, температура обработки и точность позиционирования заготовки. Проектирование ручьев секторов велась на основе данных проведенного компьютерного моделирования, по итогам которого выявлены недостатки технологических расчетов и внесены необходимые изменения. Корректность геометрии профилированного полуфабриката дополнительно подтверждалась оценкой результатов компьютерного эксперимента процесса окончательной штамповки во вставках штампа КГШП. Натурный эксперимент проводился на консольных ковочных вальцах модели СА1335 [148], установленных в лаборатории технологий пластического деформирования материалов Технологического полигона инжинирингового центра «Цифровые технологии машиностроения» «МГТУ «СТАНКИН».

В качестве модельного материала исходной заготовки выбран свинец марки С0 ГОСТ 3778-98 [189], особенности течения которого при деформировании инструментом в условиях комнатной температуры

имитируют штамповку стали в горячем состоянии.

4.1 Разработка конструкции и методика изготовления штамповой оснастки для физического моделирования процессов вальцовки

В процессе подготовки к проведению физического моделирования операции вальцовки с использованием консольных ковочных вальцов СА1335 была обнаружена проблема, связанная с отсутствием дополнительной оснастки, позволяющей надежно зафиксировать секторы-штампы на рабочих валах машины. Поэтому, кроме изготовления секторов, возникла необходимость в разработке конструкции и производстве системы, надежно удерживающей их на рабочих валах.

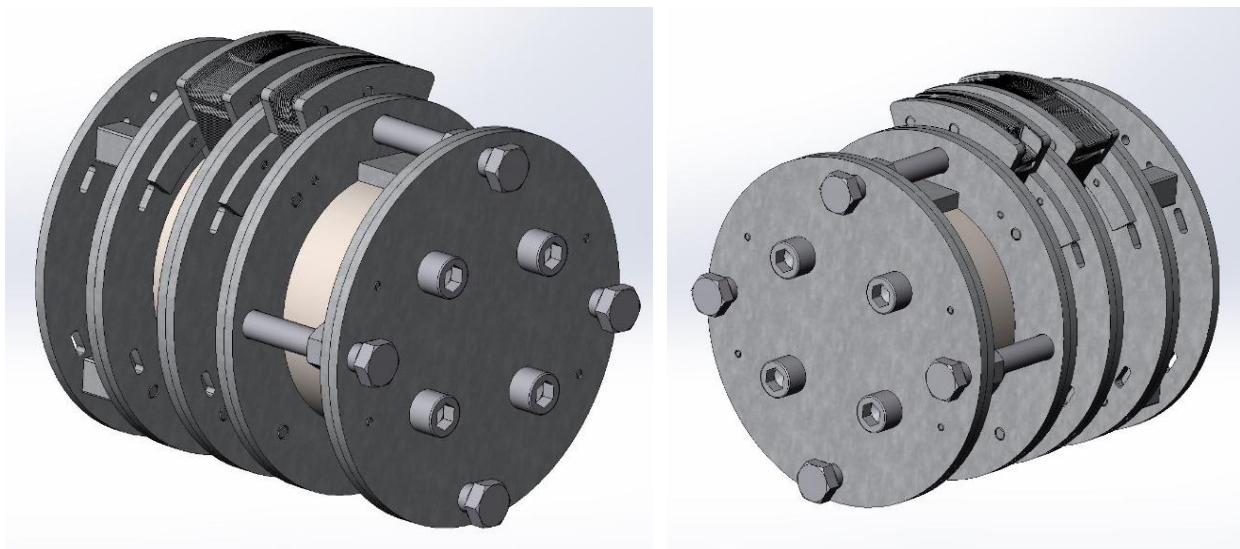
В рамках решения инженерной задачи к конструкции крепления секторов-штампов выдвинуты следующие требования:

1. Простота и доступность материалов и оборудования при изготовлении;
2. Легкость установки и наладки;
3. Надежность крепления секторов;
4. Возможность применения секторов-штампов разных типоразмеров;
5. Экономическая рентабельность.

Основу разработанной оснастки (см. рисунок 4.1) составляли патенты автора [154-159].

В качестве инструмента для проектирования моделей конструкции использовалось программное обеспечение SolidWorks [170-172]. Для экономической эффективности принято решение отказаться от применения дорогостоящей штамповой стали и использовать конструкционную сталь марок Ст3пс и Ст20 ГОСТ 380-2005 [190], удовлетворяющую прочностным требованиям при возникающих относительно невысоких нагрузках в процессе вальцовки свинцовых заготовок. В качестве исходных материалов

использовался листовой прокат и сортовой прокат круглого сечения (позиционирующие штифты).



а)

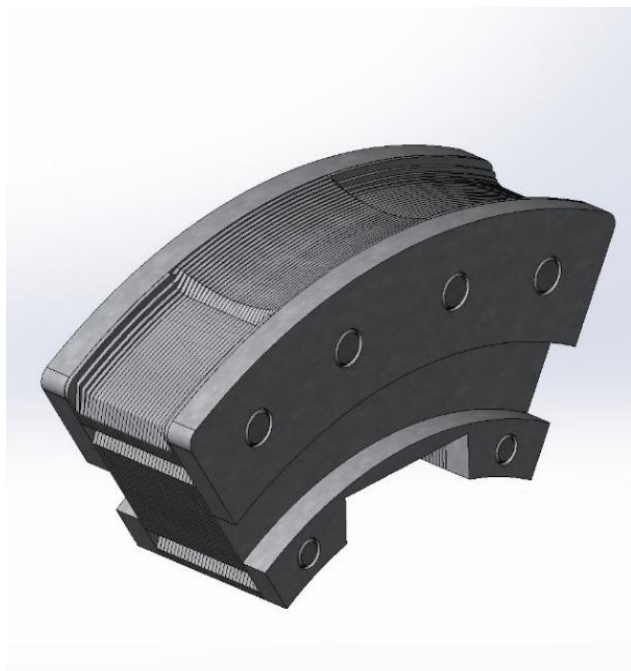


б)

Рисунок 4.1. Конструкция системы крепления секторов-штампов на рабочих валах ковочных вальцов СА1335: а – компьютерная модель; б – конструкция в металле

Методика изготовления элементов конструкции поясняется рисунком 4.2 на примере производства секторов-штампов и реализуется в следующем порядке.

Твердотельная модель сектора-штампа, спроектированная в программе SolidWorks, разбивалась на послойные элементы разной толщины, в зависимости от геометрии сектора и номенклатуры толщин листового проката (рисунок 4.2 а). Для каждого слоя формировался файл формата DXF для отправки оператору комплекса листовой лазерной резки. Полученный комплект файлов раскладывался программой управления лазера на листовом прокате, обеспечивая рациональный раскрой с высоким КИМ, затем производилась операция резки с последующим назначением каждому слою номера, соответствующего последовательности сборки (рисунок 4.2 б). Полученный комплект плоских заготовок собирался в пакет (рисунок 4.2 в), слои которого позиционировались относительно друг друга с помощью штифтов и сваривались в специальном кондукторе (рисунок 4.2 г). Сваренный блок пластин подвергался зачистке и тщательному сглаживанию образующейся текстуры между слоями в области ручья, формируя геометрию с требуемыми размерами (рисунок 4.2 д, е).



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 4.2. Последовательность изготовления сектора-штампа для проведения физического моделирования: а – твердотельная модель; б – раскрой листа; в – сборка пакета; г – подготовка блока перед сваркой; д – секторы-штампы до обработки поверхности ручья; е – окончательный вид секторов-штампов

Подобным образом реализовано производство сборочных единиц системы крепления и фиксации секторов на рабочих валах ковочных вальцов. Чертежи элементов конструкции представлены в приложении П2. Фиксирующая оснастка (боковые кольца, кольцевые замки, прижимные

кольца и упорные втулки) после сварки дополнительно подвергались токарной обработке внутренних поверхностей, сопрягающихся с валом, для обеспечения требуемой соосности, необходимой для установки.

Такая технология сборки деталей предложена при необходимости проведения натурных экспериментов в сжатые сроки и обусловлена относительно низкими финансовыми затратами на изготовление. Немаловажным преимуществом является доступность необходимого оборудования для производства, распространенность полуфабрикатов, а значит их относительно невысокая стоимость и сравнительно небольшие затраты времени на изготовление.

К недостаткам предложенных конструкций секторов-штампов и деталей системы крепления и фиксации инструмента на рабочих валах консольных ковочных вальцов можно отнести необходимость использования модельных материалов с низким пределом текучести для изготовления исходных заготовок для эксперимента.

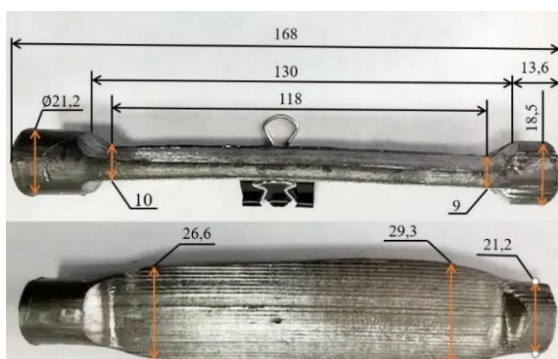
4.2 Физическое моделирование горячей вальцовки в ручьях переменного сечения по системе «круг – овал – квадрат»

В результате проведения физического моделирования процесса предварительной вальцовки в ручьях переменного сечения по системе «круг-овал-квадрат» получены профилированные заготовки двух переходов, внешний вид и форма которых представлена на рисунке 4.4 а, а также их размеры (рисунок 4.4 б, в).

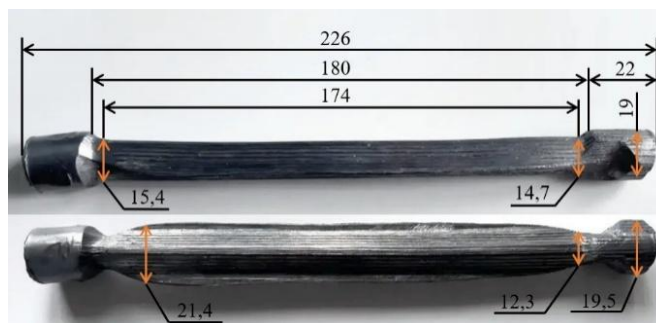
Для сравнительного анализа размеров полученных полуфабрикатов по итогам технологического расчета (рисунок 2.13), компьютерного моделирования (рисунок 3.11) и физического моделирования сформированы таблицы 4.1 и 4.2.



а)



б)



в)

Рисунок 4.4. Профилирование заготовки вальцовкой по системе «круг-овал-квадрат»: а – визуальное представление; б – первый переход (овальный калибр); в – второй переход (квадратный калибр)

Таблица 4.1

Размеры полуфабрикатов по результатам технологических расчетов и методов инженерного анализа

Первый переход			
Участок заготовки	Размеры, мм		
	Технологические расчеты	Компьютерное моделирование	Физическое моделирование
Общая длина	157,3	178,5	168
Большая головка: длина; диаметр	36; $\varnothing 21,3$	33; $\varnothing 21,3$	24,4; $\varnothing 21,2$
Участок начала формирования стержня: высота; ширина	8,6; 40,4	8,7; 26,4	10; 26,6

Окончание таблицы 4.1

Первый переход			
Участок заготовки	Размеры, мм		
	Технологические расчеты	Компьютерное моделирование	Физическое моделирование
Участок окончания формирования стержня: высота; ширина	7,8; 39,8	7,25; 27,8	9; 29,3
Длина стержня	97	115	118
Малая головка: длина; высота; ширина	18,3; 18,35; 20,7	16; 18,3; 21,7	13,6; 18,5; 21,2
Второй переход			
Участок заготовки	Размеры, мм		
	Технологические расчеты	Компьютерное моделирование	Физическое моделирование
Общая длина	234	234,6	226
Большая головка: длина; диаметр	36; Ø21,3	33; Ø21,3	24; Ø21,2
Участок начала формирования стержня: высота; ширина	14,47	14,7; 14,3	15,4; 21,4
Участок окончания формирования стержня: высота; ширина	14	14,5; 10,7	14,7; 12,3
Длина стержня	168	166	174
Малая головка: длина; высота; ширина	22; Ø19	23,7; 19,1; 18,84	22; 19; 19,5

Таблица 4.2

Сравнение результатов физического моделирования с технологическими расчетами и компьютерным моделированием в процентном соотношении

Первый переход		
	Технологические расчеты	Компьютерное моделирование
Общая длина	< 7,3%	> 5,9%
Большая головка: длина; диаметр	> 40%; =	> 24%; =
Участок начала формирования стержня: высота; ширина	< 14%; > 34%	< 13%; < 0,7%

Окончание таблицы 4.2

Первый переход		
	Технологические расчеты	Компьютерное моделирование
Участок окончания формирования стержня: высота; ширина	< 13%; > 26,4%	< 19,5%; < 5,1%
Длина стержня	< 17,8%	< 2,5%
Малая головка: длина; высота; ширина	> 25,7%; < 0,8%; < 2,5%	> 15%; < 0,8%; > 2,3%
Второй переход		
	Технологические расчеты	Компьютерное моделирование
Общая длина	> 3,4%	> 3,7%
Большая головка: длина; диаметр	> 40%; =	> 24%; =
Участок начала формирования стержня: высота; ширина	< 6%; < 32,4%	< 4,5%; < 33,2%
Участок окончания формирования стержня: высота; ширина	< 4,8%; > 12,1%	< 1,4%; < 13%
Длина стержня	< 3,45%	< 4,6%
Малая головка: длина; высота; ширина	=; =; < 2,6%	> 7,2%; =; < 3,4%

Анализ данных таблиц 4.1 и 4.2 показал, что общая длина профилированной заготовки первого перехода находится в погрешности, не превышающей 8%, второго перехода – 4%.

Длина участка большой головки отличается в меньшую сторону по сравнению с технологическими расчетами (на 40%) и результатами компьютерного моделирования (24%), но, исходя из данных эпюры диаметров и сечений (рисунок 2.12 б), где длина участка большой головки равна 26 мм и который не деформируется в процессе вальцовки, объема металла достаточно для качественного заполнения ручья вставки КГШП.

В начальной зоне формирования стержня высота полуфабриката первого перехода не превышает 15%, а в области окончания – 20%. Стоит отметить значительную разницу в ширине участков при сравнении

результатов натурного эксперимента и технологических расчетов, где показатели больше (на 34% в начале деформации стержня, в окончательной – на 26,4%). Это связано с тем, что в технологических расчетах не учитываются особенности течения металла на этапах разработки калибров. В сравнении с результатами компьютерного моделирования значения ширины не превышают 6%. Известно, что с увеличением ширины растет площадь пятна контакта секторов-штампов с заготовкой, что в значительной степени влияет на силовые параметры вальцовки. Этим фактом можно частично объяснить большую разницу в значениях силы вальцовки на разных участках профилированной заготовки при сравнении данных технологических расчетов с графиками силовых параметров программы DEFORM-3D. Длина стержня при вальцовке в первом пропуске в сравнении с технологическими расчетами больше на 17,8%, однако, в процессе проведения компьютерного моделирования принято решение увеличить его длину на 18 мм для обеспечения формирования окончательной профилированной заготовки с допустимой геометрией, гарантирующей полное заполнение ручья вставки КГШП. При сравнении с виртуальным моделированием вальцовки первого перехода отклонение не превышает 3%.

При анализе формирования стержня в ходе вальцовки второго перехода наблюдается большая разница в значениях ширины, особенно на начальном этапе (показатель больше на 32,4% в сравнении с технологическими расчетами, на 33,2% – с данными компьютерного моделирования). Это связано с образованием бокового заусенца, формирующегося из-за избытка металла в области стержня после вальцовки в овальном ручье. Отклонения по высоте стержня минимальны и не превышают 6%. Длина стержня после вальцовки в квадратном калибре равна 174 мм, что больше результатов технологических расчетов на 3,45% (168 мм) и компьютерного моделирования на 4,6% (166 мм). Оценка размеров малой головки показала, что отклонения в диаметре у окончательной профилированной заготовки минимальны и не превышают 3,5%. Относительно технологических расчетов длина малой

головки одинаковая, а в сравнении с виртуальном моделированием – меньше на 7,2 %.

Анализ окончательной профилированной заготовки после проведения физического моделирования вальцовки в ручьях переменного сечения показал, что наблюдается избыточное количество металла в области стержня, который выходит в боковой заусенец. Уменьшить объем излишков металла можно за счет уменьшения зазора между секторами-штампами первого перехода (на момент проведения вальцовки зазор составлял 2 мм), чтобы уменьшить площадь в сечениях между ручьями секторов. Этим же решением можно увеличить общую длину профилированной заготовки, приблизив ее к данным компьютерного моделирования и инженерным расчетам, а также длину участка большой головки.

4.2.1 Влияние зазора между секторами штампами на изменение формы и размеров профилированных заготовок двух переходов при физическом моделировании горячей вальцовки

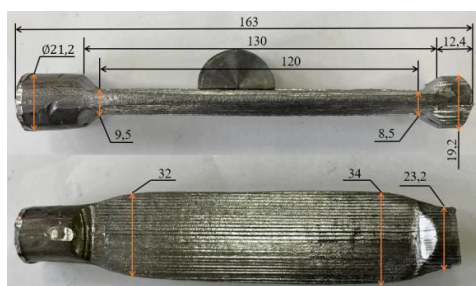
По результатам проведения физического моделирования горячей вальцовки в ручьях переменного сечения по системе «круг – овал – квадрат» принято решение уменьшить межосевое расстояние между валами ковочных вальцов, сократив зазор между секторами-штампами с 2 мм до 1 мм. Визуальное сравнение окончательных профилированных заготовок, а также полученные формы и размеры полуфабрикатов двух переходов представлены на рисунке 4.5.

Оценка полуфабриката первого перехода (см. рисунок 4.5 б) при сравнении с результатом предыдущего физического моделирования показала, что размеры по ширине в сечениях деформированной зоны стержня больше на 14 – 17%, а высота меньше на 0,5 – 0,7 мм. Ширина и высота сечений в области малой головки больше на 8% и 3% соответственно, при этом ее длина короче

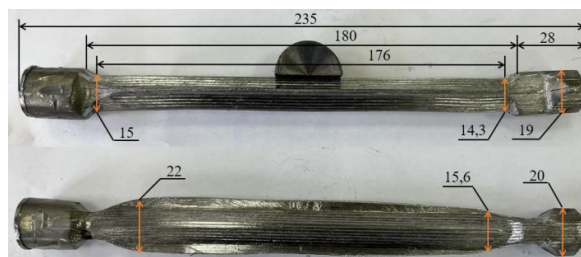
на 1,2 мм. Стоит отметить, что общая длина формованной заготовки первого перехода меньше на 5 мм. Длина участка стержня практически идентична.



а)



б)



в)

Рисунок 4.5. Результаты физического моделирования при зазоре между секторами-штампами 1 мм: а – визуальное сравнение форм окончательных профилированных заготовок; б – первый переход (овальный калибр); в – второй переход (квадратный калибр)

Анализ формы и размеров окончательной профилированной заготовки позволил установить, что в результате уменьшения зазора между секторами-штампами ее общая длина стала максимально приближенной к значению полуфабриката по итогам компьютерного моделирования, при этом, длина малой головки увеличилась на 8 мм, а большой головки – на 3 мм и составляет 27 мм. Автор предполагает, что, уменьшая объем металла в малой головке за счет увеличения объема в большой головке можно достигнуть большего соответствия профилированной заготовки с формой и геометрией исследуемого объекта по итогам компьютерного моделирования.

Также удалось уменьшить объем бокового заусенца. Стоит отметить, что вероятность возникновения брака из-за бокового заусенца минимальна при окончательном формировании рукояти гаечного ключа в открытом

штампе [95], однако лучше исключить данный дефект с помощью калибровки межосевого расстояния валов и доработки ручьев второго перехода профильным шлифованием с целью увеличения размеров поперечных сечений квадратного калибра [51, 92].

Геометрия профилированных заготовок после проведенных физических экспериментов отличается минимальным искривлением оси, что говорит об одинаковом силовом воздействии сегментов, а также чрезмерным обжатием овальным ручьем в зоне малой головки. При этом чрезмерное обжатие также выявлено при оценке формы профилированной заготовки второго перехода после проведения виртуального моделирования, не повлиявшее на формирование малого закрытого зева гаечного ключа. Поверхность заготовок имеет текстуру, связанную с особенностью изготовления секторов-штампов. В рамках натурного эксперимента текстура обеспечивает более надежный захват заготовок секторами-штампами, исключая проскальзывание.

Форма и размеры окончательных профилированных заготовок, полученных в процессе проведения физических экспериментов, удовлетворительно приближены к результатам компьютерного моделирования, где наличие достаточного объема металла подтверждается моделированием штамповки на КГШП, а также к данным эпюры диаметров и сечений. Однако полуфабрикат, полученный при вальцовке с зазором 1 мм в большей степени способен обеспечить полное формирование поковки гаечного ключа в штампе КГШП, благодаря увеличению объемов металла в области головок.

4.3 Физическое моделирование горячей вальцовки в ручьях переменного сечения по системе «квадрат – плоский овал – квадрат»

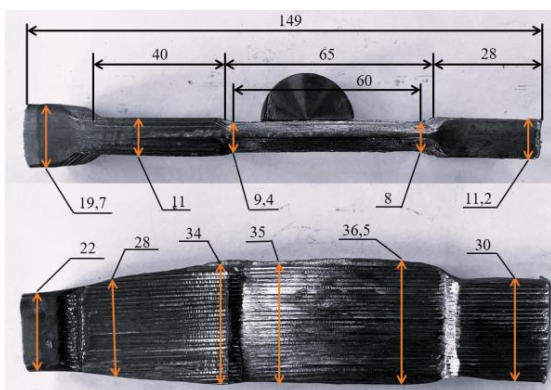
По итогам проведения физического моделирования процесса горячей

вальцовки в ручьях переменного сечения по системе «квадрат – плоский овал – квадрат» получены полуфабрикаты двух переходов, внешний вид и размеры которых представлены на рисунке 4.6, а также таблицы 4.3 и 4.4, содержащие информацию для сравнительного анализа результатов с данными технологических расчетов и компьютерного моделирования.

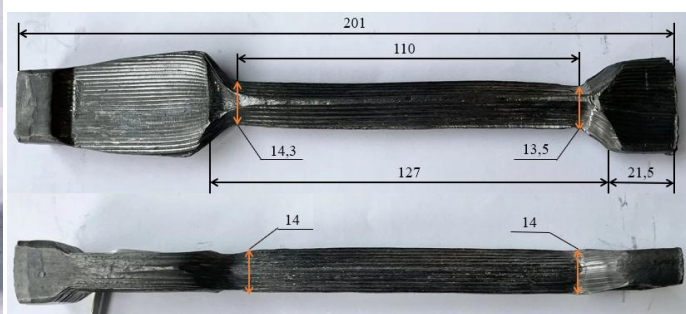
Окончательная профилированная заготовка также как и объекты предыдущего физического моделирования не имеет значительного искривления оси.



а)



б)



в)

Рисунок 4.6. Профилирование заготовки вальцовкой по системе «квадрат-плоский овал-квадрат»: а – визуальное представление; б – первый переход (плоскоовальный калибр); в – второй переход (квадратный калибр)

Таблица 4.3

Размеры полуфабрикатов по результатам технологических расчетов и методов инженерного анализа

Первый переход			
Участок заготовки	Размеры, мм		
	Технологические расчеты	Компьютерное моделирование	Физическое моделирование
Общая длина	136	146,5	149
Участок под захват клещами: длина; размеры квадрата	15; 20,3 × 20,3	11,5; 20,3 × 20,3	16; 19,7 × 22
Большая головка: длина; высота; ширина	32,5; 11; 32,5	40; 10; 26,5...29,3	40; 11; 28...34
Участок начала формирования стержня: высота; ширина	8,5; 39	8,5; 29,7	9,4; 35
Участок окончания формирования стержня: высота; ширина	7,85; 40	7,4; 29,2	8; 36,5
Длина стержня	58	55	60
Малая головка: длина; высота; ширина	22,5; 11; 32,5	30; 10,8; 27,1	21,5; 11,2; 30
Второй переход			
Участок заготовки	Размеры, мм		
	Технологические расчеты	Компьютерное моделирование	Физическое моделирование
Общая длина	186	195,4	201
Участок под захват клещами: длина; размеры квадрата	15; 20,3 × 20,3	11,5; 20,3 × 20,3	16; 19,7 × 22
Большая головка: длина; высота; ширина	32,5; 11; 32,5	40; 10; 26,5...29,3	40; 11; 28...34
Участок начала формирования стержня: высота; ширина	14,2	14,35; 11,3	14,3; 14
Участок окончания формирования стержня: высота; ширина	13	13,3; 10	13,5; 14
Длина стержня	106	102,4	110
Малая головка: длина; высота; ширина	22,5; 11; 32,5	25; 10,8; 27,1	21,5; 11,2; 30

Таблица 4.4

Сравнение результатов физического моделирования с технологическими расчетами и компьютерным моделированием в процентном соотношении

Первый переход		
	Технологические расчеты	Компьютерное моделирование
Общая длина	< 8,7%	< 1,7%
Участок под захват клещами: длина; размеры квадрата	< 6,2%; > 3% × < 7,3%	< 1,7%; > 3% × < 7,3%
Большая головка: длина; высота; ширина	< 8,8%; =; > 13,8% ... < 4,4%	=; < 9%; < 5,3% ... < 13,8%
Участок начала формирования стержня: высота; ширина	< 9,6%; > 10%	< 9,6%; < 15%
Участок окончания формирования стержня: высота; ширина	< 1,8%; > 8,8%	< 2,2%; > 20%
Длина стержня	< 3,3%	< 8,4%
Малая головка: длина; высота; ширина	> 4,5%; < 0,5%; > 7,7%	> 28%; < 3,6%; < 9,3%
Второй переход		
Общая длина	< 7,5%	< 2,7%
Участок под захват клещами: длина; размеры квадрата	< 6,2%; > 3% × < 7,3%	< 1,7%; > 3% × < 7,3%
Большая головка: длина; высота; ширина	< 8,8%; =; > 13,8% ... < 4,4%	=; < 9%; < 5,3% ... < 13,8%
Участок начала формирования стержня: высота; ширина	=; =	=; < 19%
Участок окончания формирования стержня: высота; ширина	< 3,8%; < 7,2%	=; < 28%
Длина стержня	< 3,7%	< 7%
Малая головка: длина; высота; ширина	> 4,5%; < 0,5%; > 7,7%	> 14%; < 3,3%; < 9,7%

Анализируя данные таблиц 4.3 и 4.4 выявлено, что общая длина профилированной заготовки двух переходов, по сравнению с технологическими расчетами отличается не больше 10%; с компьютерным моделированием – не больше 3%.

Длина участка под захват клещами меньше результатов технологических расчетов и компьютерного моделирования и не превышает 7%, однако в целом, площадь поперечного сечения исходной заготовки больше.

Габаритные размеры большой головки сохраняются как на первом переходе, так и на втором. При сравнении с результатами компьютерного моделирования наблюдается неравномерное распределение металла по ширине сечений ручья не только на участке большой головки, но и на участке стержня и малой головки. Длина участка большой головки одинакова относительно результата компьютерного моделирования, но объем металла в данной области больше.

Область стержня отличается большими объемами металла при сравнении с результатами компьютерного моделирования и схожими с расчетными данными.

Длина малой головки меньше расчетных на 1 мм, что приемлемо в рамках точности проведения физического моделирования, и меньше на 14% результатов компьютерного моделирования.

Так как корректность формы и размеров окончательной профилированной заготовки, полученной в ходе компьютерного моделирования, подтверждалась последующим моделированием поперечной вальцовки и формоизменением в штампе КГШП, то установлено, что полученный физическим моделированием полуфабрикат отличается минимальным отклонением размеров и формы, поэтому окончательная профилированная заготовка в высокой степени пригодна для последующего окончательного формоизменения.

4.4 Методика проектирования технологии горячей продольной штамповочной вальцовки

На основе информации, изложенной автором в главах 2-4 разработана методика проектирования технологии ГПрШВ, которая начинается с анализа технологичности (формы и размеров) детали-представителя. Симметричность ее формы вдоль оси в плоскости деформирования секторами-штампами является главным условием качественного выполнения операции. Значительное отклонение от симметрии приводит к неполному заполнению ручья, либо к чрезмерно неравномерному распределению облоя. Также на недоштамповку влияют резкие перепады поперечных сечений и большая разница толщин в областях головок и полотна.

При анализе детали в плоскостях, перпендикулярных осям рабочих валов, не менее важно анализировать отношение ее длины к размерам поперечных сечений и на наличие асимметрии. Величина данных характеристик влияет на возможность последующего отгибания головок и правки искривленной поковки в соответствующих переходах обрезающего прессы.

В случае соответствия детали требованиям ГПрШВ переходят к технологической подготовке, заключающейся в выполнении инженерных расчетов с обязательным проведением компьютерного моделирования в специализированных программных комплексах, таких как DEFORM-3D.

Технологические расчеты проводят по методикам, аналогичным разработке процесса горячей вальцовки в ручьях постоянного, либо переменного сечения как заготовительной операции перед штамповкой на КГШП, причем второй вариант наиболее предпочтителен с точки зрения ресурсосбережения и точности распределения объемов металла. Полученные размеры и форма расчетной профилированной заготовки корректируются с помощью численного моделирования, после чего уточняются параметры

исходной заготовки.

На данном этапе окончательный полуфабрикат не подходит под ГПрШВ, так как при формоизменении в фасонном ручье из-за перемещающегося локального очага деформации, больших коэффициентах вытяжки и опережения значительная часть металла вытесняется секторами-штампами, приводя к недоштамповке поковки. Известно [51, 53], что для определения площадей поперечных сечений каждого характерного участка на промежуточных переходах предварительной горячей вальцовки необходимо установить отношение их осей и коэффициент вытяжки на пропуске по разработанным номограммам, составленным по опытным данным на основе метода соответственной полосы в ЭНИКмаше [57]. Однако такая методика профилирования на ковочных вальцах, как и другие [3, 48], актуальна только при расчете полуфабрикатов, реализуемых в секторах-штампах по системе калибров относительно простой геометрии перед штамповкой осаживанием. Окончательная форма полуфабриката после ГПрШВ требует трудоемких аналитических расчетов общего коэффициента вытяжки, а также коэффициентов вытяжки на характерных участках при сложной геометрии поперечных сечений, поэтому принято решение установить окончательную форму профилированной заготовки компьютерным моделированием в DEFORM-3D методом последовательных приближений.

Ручей-гравюра окончательного перехода горячей вальцовки проектируется в программных пакетах, таких как SolidWorks, где развертка поковки детали-представителя накладывается на рабочую поверхность сектора-штампа с заглублением на необходимую величину, а затем с помощью операции вычитания удаляется с учетом зазора между инструментами. С целью наиболее равномерного распределения металла и уменьшения значения сил, возникающих в процессе операции, предусматриваются облойные канавки и другие конструктивно-технологические решения.

Ранее разработанный полуфабрикат делится на участки, каждый из которого ужимается, то есть, увеличивается его площадь поперечного сечения

при неизменной геометрии, а также уменьшается длина по принципу постоянства объема. В итоге достигаются такие формы и размеры профилированной заготовки, которые позволяют компенсировать вытяжку и обеспечить заполнение полости ручья. Важно предусмотреть участок для удержания клещами в процессе ГПрШВ.

Численным экспериментом также корректируются фасонные ручки таким образом, чтобы компенсировать опережение металла.

По итоговой геометрии профилированной заготовки проектируются секторы-штампы предварительных переходов ГПрШВ.

Полученная компьютерным моделированием поковка оценивается на наличие дефектов, анализируется НДС и силовые параметры после чего изготавливается оснастка для проведения натурных экспериментов, которые необходимы для верификации результатов аналитических расчетов и компьютерного моделирования.

Необходимо учесть влияние пружинения рабочих валов ковочных вальцов на геометрию и размерные значения полуфабрикатов и поковки, которое зависит от модели оборудования и возникающих сил при вальцовке. Данный параметр определяется эмпирически в процессе проведения натурных экспериментов, после чего производится дополнительная корректировка размеров ручьев секторов-штампов.

Методика проектирования технологии ГПрШВ сведена в схематичное исполнение, представленное на рисунке 4.7.

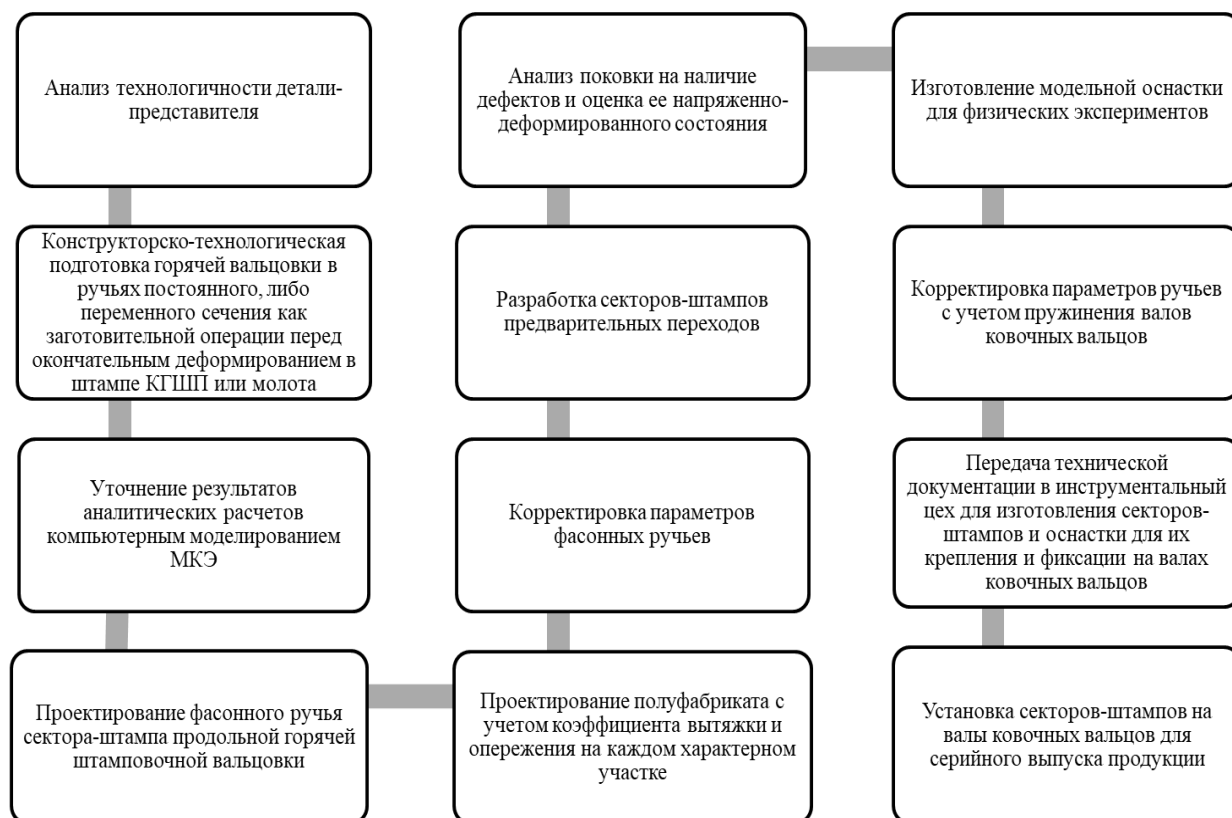


Рисунок 4.7. Методика проектирования технологии горячей продольной штамповочной вальцовки (ГПрШВ)

Таким образом, использование линии ГОШ на базе процесса ГПрШВ может быть эффективнее альтернативных методов производства с применением ковочных вальцов при условии технологичности детали-представителя и соответствующей технологической подготовки.

4.5 Выводы по главе 4

1. Предложенная конструкция крепления секторов-штампов показала достаточную надежность в процессе проведения физического моделирования, а также низкую трудоемкость в наладке. Разработанная методика изготовления деталей оснастки, в том числе, секторов-штампов обладает такими преимуществами, как сравнительно низкие временные и финансовые затраты, приемлемая прочность и точность производства. Однако ее применение ограничивается проведением натурных экспериментов на

относительно мягких материалах, подобных свинцу.

2. Выявлены особенности течения металла при физическом моделировании горячей вальцовки в ручьях переменного сечения по системе «круг-овал-квадрат». При сокращении зазора между секторами-штампами общая длина полуфабриката первого перехода уменьшается за счет большего распределения объема металла по ширине овального калибра в сечениях ручья в области стержня и малой головки. Однако длина окончательной профилированной заготовки увеличивается из-за роста коэффициента вытяжки у квадратного ручья.

3. Полученные две профилированные заготовки после вальцовки в ручьях переменного сечения по системе «круг – овал – квадрат» (при зазоре между секторами-штампами 2 мм и 1 мм) удовлетворительно пригодны для изготовления окончательной поковки накидного гаечного ключа, однако второй вариант более предпочтителен благодаря большему объему металла в головках и более близкому значению общей длины при сравнении с результатами компьютерного моделирования.

4. Полученная профилированная заготовка после вальцовки в ручьях переменного сечения по системе «квадрат – плоский овал – квадрат» отличается минимальными отклонениями в размерах по сравнению с результатами компьютерного моделирования, что говорит о высокой доли вероятности полного заполнения ручья при последующем окончательном формоизменении поперечной вальцовкой, либо формоизменением на КГШП.

5. В рамках проведенного физического моделирования все окончательные профилированные заготовки имели избыточное количество металла в области стержня, образующего боковой заусенец. При штамповке в открытом штампе, наличие бокового заусенца у полуфабриката, полученного вальцовкой по системе «круг-овал-квадрат», не так критично, как у формованной заготовки вальцовкой по системе «квадрат – плоский овал – квадрат», так как при штамповке в первом случае боковой заусенец можно расположить горизонтально, и он преобразуется в облой без возможных

дефектов, что во втором случае невозможно. Исключить боковой заусенец можно с помощью калибровки зазора между секторами-штампами, или корректировкой ручьев профильным шлифованием.

6. При компьютерном и физическом моделировании механические характеристики материалов необходимо задавать соответственно применяемым маркам стали, поскольку разные типоразмеры гаечных ключей могут изготавливаться согласно ГОСТ из разных материалов, это касается и температурных режимов обработки.

7. На основании аналитических расчетов, выполненного компьютерного моделирования и физических экспериментов с уточнением расчетных характеристик инструмента и заготовок разработана методика технологической подготовки горячей продольной штамповочной вальцовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научной квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения и разработки, направленные на совершенствование технологических процессов горячей вальцовки удлиненных в плане поковок на примере гаечных ключей, заключающееся в проектировании и сравнении новых вариантов технологии вальцовки и секторов-штампов с ручьями постоянного и переменного сечения, используемых для предварительного профилирования исходной заготовки перед штамповкой на КГШП. Разработаны технологии окончательного формоизменения поковки в секторах-штампах способами продольной и поперечной штамповочной вальцовки с обоснованием ограничений формы и размеров полуфабрикатов на примере выбранных объектов производства - гаечных ключей. Реализация новых вариантов технологии окончательного формоизменения поковки в секторах-штампах способами продольной и поперечной штамповочной вальцовки с обоснованием ограничений формы и размеров поковок на примере выбранных объектов производства - гаечных ключей разных исполнений направлена на повышение эффективности изготовления поковок за счет сокращения технологической цепочки исключением относительно дорогостоящего оборудования, такого как КГШП или штамповочные молоты.

1. В результате анализа и сравнения вариантов новых технологических схем заготовительной операции горячей вальцовки установлено, что поковка накидного гаечного ключа, полученная с применением процесса вальцовки в ручьях переменного сечения, характеризуется большей равномерностью распределения металла и меньшим объемом отхода в виде облоя (КИМ достигает 70%), в сравнении с поковкой того же гаечного ключа из профилированной заготовки в ручьях постоянного

сечения. Анализ предложенной технологии горячей продольной штамповочной вальцовки позволил выявить ряд ограничений при производстве поковок сложной геометрии: отсутствие симметрии в плоскости деформирования секторами-штампами и большие перепады объемов металла на разных участках не позволяют произвести ГПрШВ без критичных дефектов. Анализ предложенной технологии горячей поперечной штамповочной вальцовки также выявил ряд ограничений, так длина поковки ограничивается длиной рабочей части валов ковочных вальцов и возможностью позиционирования заготовки. Однако разработанный технологический процесс предварительного профилирования по системе «квадрат – плоский овал – квадрат» обеспечивает полное заполнение ручья, подтвержденное компьютерным моделированием ГПпШВ. Кроме того, профилированная заготовка отличается универсальностью, т.к. является пригодной для штамповки на КГШП, что также подтверждается компьютерным моделированием формоизменения в окончательном ручье прессового штампа.

2. С помощью проведенного компьютерного моделирования в программе DEFORM-3D исследовано НДС металла профилированных заготовок по разработанным вариантам технологии. Получены графики изменения интенсивности напряжений и интенсивности деформаций в изменяемом во времени локальном очаге воздействия секторов-штампов на заготовку, по которым установлен ряд закономерностей в изменении этих параметров в зависимости от степени обжатия ручьями секторов, формы исходной заготовки и используемой системы калибров. В итоге, объекты исследования характеризуются отсутствием дефектов, несмотря на значительную концентрацию напряжений. На основе анализа графиков силовых параметров выявлены характерные участки заготовки, на которых изменения силы зависит от формы ручьев секторов-штампов. Компьютерное моделирование поперечной штамповочной вальцовки рожкового гаечного ключа позволило выявить максимальное значение силовых параметров, что

превысило номинальную силу машины СА1335. Это объясняется чрезмерно большой площадью пятна контакта между деформирующими вставками в момент максимального обжатия профилированной заготовки и влечет за собой выбор ковочных вальцов с большим параметром номинальной силы и крутящего момента.

3. Проведенное моделирование горячей вальцовки по системе «квадрат – плоский овал – квадрат» по результатам технологических расчетов показало достаточность объема металла на всех участках профилированной заготовки как при окончательном формоизменении поковки технологией поперечной вальцовки, так и при ее штамповке на КГШП, что говорит об универсальности профилированной заготовки.

4. В результате моделирования температурное поле всех исследованных профилированных заготовок и окончательных поковок находится в пределах интервала температур горячей объемной штамповки, что позволяет проводить все технологические процессы без дополнительного нагрева.

5. Разработаны новые конструкции крепления и фиксации секторов-штампов на валы консольных ковочных вальцов для реализации горячей предварительной вальцовки и продольной штамповочной вальцовки. Проведенная оценка работоспособности одного из вариантов крепления с помощью компьютерного моделирования в программном комплексе SolidWorks Simulation на основе данных численного моделирования в DEFORM-3D и сравнения результатов с построенной аналитической моделью показала приемлемую надежность оснастки. Об этом свидетельствуют показатели прочности, значения эквивалентных напряжений и эквивалентных деформаций, а также результаты, полученные с использованием построенной статистической модели, описывающей взаимосвязь максимальных эквивалентных напряжений с температурными значениями, коэффициентом концентрации напряжений и силами воздействия на секторы-штампы в процессе горячей вальцовки в овальном, круглом и квадратном калибрах.

Определение усталостной долговечности секторов-штампов по модели Баскина позволила установить, что наибольшим ресурсом работы обладает овальный калибр, несмотря на сравнительно невысокий показатель коэффициента запаса прочности, а квадратный калибр – наименьшим, из-за относительно высоких показателей эквивалентных напряжений и эквивалентных деформаций. Разработаны новые системы крепления и фиксации оснастки для реализации поперечной штамповочной вальцовки на консольных ковочных вальцах.

6. Поставлен и проведен физической эксперимент, в ходе которого реализована предварительная горячая вальцовка в ручьях переменного сечения по системам «круг – овал – квадрат» и «квадрат – плоский овал – квадрат». Выявлено удовлетворительное совпадение формы и размерных параметров окончательной профилированной заготовки с результатами компьютерного моделирования, однако наблюдается некоторый объем металла в области стержня, вытекающий в боковой заусенец. Его образование связано с неточностью геометрии ручьев секторов-штампов, которую можно доработать выборкой излишков металла ручья профильным шлифованием и регулировкой зазора между секторами-штампами. Разработанные новые технологические процессы горячей вальцовки и полученные результаты в ходе экспериментов могут быть распространены на поковки гаечных ключей других типоразмеров при условии выбора кузнечно-штамповочного оборудования с соответствующими характеристиками.

7. На основе данных, полученных аналитическими расчетами компьютерным моделированием и физических экспериментов разработана методика проектирования технологии горячей продольной штамповочной вальцовки, определяющая последовательность этапов технологической подготовки производства деталей-представителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ребельский, А. В. Основы проектирования процессов горячей объемной штамповки / А. В. Ребельский. – М.: Машиностроение, 1965. – 248 с.
2. Иванюк, А. В. Классификация поковок, штампуемых на кривошипных горячештамповочных прессах / А. В. Иванюк // Вестник машиностроения. – 1988. – № 1. – С. 45-48.
3. Ковка и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка. 2е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. Е. И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 720 с.
4. Акаро, И. Л. Классификация поковок и технологических переходов горячей штамповки / И. Л. Акаро // Кузнечно–штамповочное производство. – 1980. – № 1. – С. 8-11.
5. Кондратенко, В. Г. Классификация деталей, получаемых осадкой / В. Г. Кондратенко, В. Н. Гречищев // Вестник машиностроения. – 1988. – № 5. – С. 54–58.
6. Камышинский завод слесарно-монтажного инструмента. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kzsmi.ru/about/> (дата обращения: 06.11.2022).
7. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
8. Охрименко, Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства: учебник для вузов по спец. "Обработка металлов давлением" и "Машины и технология обработки металлов давлением" / Я. М. Охрименко. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 560 с.
9. Cold and hot forging: fundamentals and applications / edited by Taylan Altan, Gracious Ngaile, Gangshu Shen. p. cm. Includes bibliographical references and index. ISBN: 0-87170-805-1 1. Forging. I. Altan, Taylan. II. Ngaile, Gracious.

III. Shen, Gangshu. TS225.C63 2004 671.3 32—dc22

10. Степанский, Л. Г. Прогнозирование надежности технологических процессов, инструмента и машин в обработке металлов давлением / Степанский Л. Г. – М.: Модерат, 2015. – 287 с.
11. Ильюшин, А. А. Вопросы теории течения пластического вещества по поверхностям / А. А. Ильюшин // Прикладная математика и механика. – 1954. – Т. 18. – № 3. – С. 265-288.
12. Ильюшин, А. А. Труды (1946-1966). Т.2. Пластичность / Составители Е. А. Ильюшина, М. Р. Короткина. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 430 с.
13. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.
14. Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П. Меллор. Перевод с английского А. Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.
15. Леванов, А. Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А. Н. Леванов, В.Л. Колмогоров, С. П. Буркин. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.
16. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением. / В. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
17. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. — Учеб.пособие для вузов. — 2-е изд., испр. / Ю. А. Работов. – М. Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.— 712 с.
18. Тутьшкин, Н. Д. Комплексные задачи теории пластичности: монография / Н. Д. Тутьшкин, А. Е. Гвоздев, В. И. Трегубов, Ю. В. Полтавец, Е. М. Селедкин, А. С. Пустовгар, В. И. Золотухин, Г. М. Журавлев; под ред. Н. Д.Тутьшкина, А. Е.Гвоздева. 2-е изд., перераб. и доп. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. – 408 с.
19. Мансуров, А. М. Технология горячей штамповки / А. М. Мансуров. – М.: Машиностроение, 1971. – 415 с
20. Живов, Л. И. Кузнечно-штамповочное оборудование: учеб. для студентов

- высш. технических учеб. заведений, обучающихся по специальности "Машины и технология обраб. металлов давлением" / Л. И. Живов; Л. И. Живов, А. Г. Овчинников, Е. Н. Складчиков; под ред. Л. И. Живова. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 559 с.
21. Титов, Ю. А. Технологияковки и объемной штамповки: учебное пособие / Ю. А. Титов, В. Н. Кокорин, О. И. Морозов. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – 111 с.
22. Бурко, В. А. Основные способы получения профилированных заготовок в ресурсосберегающих технологиях объемной штамповки / В. А. Бурко // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2012. – № 24. – С. 75-83.
23. Румянцев, М.И. Теория прокатки: учеб. пособие / М. И. Румянцев, Д. И. Кинзин. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2017. – 188 с.
24. Галимов, Э. Р. Выбор и способы изготовления заготовок для деталей машиностроения: учебник / Э. Р. Галимов, Е. П. Круглов, Н. Я. Галимова [и др.]; Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт. – Казань: Казанский федеральный университет (КФУ), 2016. – 265 с.
25. Эрксleben, С. Прокатка мерных заготовок на машинах фирмы "Lasco" / С. Эрксleben, А. Н. Петров, М. А. Петров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 10-2. – С. 168-177.
26. Добровлянский, Сергей Николаевич. Исследование процесса профилирования заготовок под штамповку вальцовкой в калибрах постоянного сечения: диссертация ... кандидата технических наук: 05.03.05 / С. Н. Добровлянский— Киев, 1980. — 183 с.
27. Клушин, В. А. Технология и оборудование поперечно-клиновой прокатки: монография / В. А. Клушин, А. О. Рудович. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2010. – 300 с.

28. Кожевникова, Г. В. Теория и практика поперечно-клиновой прокатки / Г. В. Кожевникова. – Минск: Беларус. наука, 2010. – 291 с.
29. Галкин, С. П. Современное развитие элементов теории, технологии и мини-станов радиально-сдвиговой прокатки / С. П. Галкин, Ю. В. Гамин, А. С. Алещенко, Б. А. Романцев // Черные металлы. – 2021. – № 12. – С. 51-58.
30. Lezhnev, S. N. Radialshear rolling as a new technological solution for recycling bar scrap of ferrous metals / S. N. Lezhnev, A. B. Naizabekov, I. E. Volokitina et al. // Complex Use of Mineral Resources. 2021. № 1 (316). P. 46 – 52.
31. Arkadiusz, Tofil Overview of the research on roll forging processes / Arkadiusz Tofil, Zbigniew Pater // Advances in Science and Technology Research Journal. 2017. Vol. 11(2). P. 72-86.
32. Zbigniew, Pater A Comparison of two-roll and three-roll cross wedge rolling processes / Zbigniew Pater // Advances in Science and Technology Research Journal. 2023. 17(1). P. 252-266.
33. Патент № 2381861 С1 Российская Федерация, МПК В21Н 7/00, В21К 1/00, В21J 5/00. Устройство для формообразования изделий с переменным сечением пластическим деформированием : № 2008142015/02 : заявл. 24.10.2008 : опубл. 20.02.2010 / Н. О. Мемжанов.
34. Троицкий, Д. В. Параметрическая модель трехвалкового узла мини-стана радиально-сдвиговой прокатки. / Д. В. Троицкий, Ю. В. Гамин, А. С. Будников // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2023. – № 3. – С. 376-386.
35. Гамин, Ю. В. Алгоритм автоматизированного параметрического проектирования трехвалковой клетки радиально-сдвиговой прокатки / Ю. В. Гамин, Д. В. Троицкий, С. П. Галкин [и др.] // Сталь. – 2024. – № 11. – С. 25-33.
36. Новокшенов, С. Л. Состояние современного уровня развития технологических процессов и оборудования кузнечно-штамповочного производства / С. Л. Новокшенов, В. В. Куц, Е. В. Смоленцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2025. –

- Т. 21, № 1. – С. 134-147. – DOI 10.36622/1729-6501.2025.21.1.020.
37. Патент № 2707206 С2 Российская Федерация, МПК В21В 13/02. Двухвалковая клеть стана винтовой прокатки : № 2017135834 : заявл. 09.10.2017 : опубл. 25.11.2019 / А. И. Гриншпун, Ю. П. Коваль, Г. А. Фурлендер, А. В. Чекулаев; патентообладатель Акционерное общество Акционерная холдинговая компания "Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения имени академика Целикова" (АО АХК "ВНИИМЕТМАШ"). – 9с.: ил.
38. Патент № 2179904 С2 Российская Федерация, МПК В21Н 1/18. Устройство поперечно-клиновой прокатки изделий переменного сечения : № 99127612/02 : заявл. 23.12.1999 : опубл. 27.02.2002 / В. Г. Ардабьевский, В. Н. Митяшин, С. С. Портной; патентообладатель Закрытое акционерное общество "КЕДР". – 6с.: ил.
39. Целиков, А. И. Теория продольной прокатки [Учеб. пособие для вузов по спец. "Обраб. металлов давлением" и "Машины и технология обраб. металлов давлением"] / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. — Москва: Металлургия, 1980. — 319 с.: ил.
40. Котенок, В. И. Становление и развитие деталепрокатных станов / В. И. Котенок, А. С. Сафонов // Тяжелое машиностроение. – 2006. – № 5. – С. 26-30.
41. Рудской А. И. Теория и технология прокатного производства: Учебное пособие / А. И. Рудской, В. А. Лунев. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2008. – 527 с.
42. Клубович, В. В. Периодические профили под штамповку балки передней оси автомобиля МАЗ и устройства для их прокатки / В. В. Клубович, В. А. Томило // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 35-40.
43. Панкратов, Д. Л. Решение задачи исключения неравномерности

- распределения металла при высадке поковок типа стержней с утолщением / Панкратов Д. Л., Низамов Р. С. // Научный вестник. – 2016. – №3(9). – С. 104-111.
44. Железков, О. С. Повышение устойчивости заготовки при штамповке рулевой тяги на горизонтально-ковочной машине / О. С. Железков, Ф. Ф. Гатин, С. А. Малаканов // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2013. – № 19. – С. 60-67.
45. Сидоров, А. А. Определение потребной силы деформирования при штамповке поковок типа стержня с полусферическим фланцем / А. А. Сидоров, О. А. Белокуров // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6, № 6. – С. 991-997.
46. Патент № 2310540 С2 Российская Федерация, МПК В21J 7/18, В30В 1/26. Горизонтально-ковочная машина : № 2005137679/02 : заявл. 02.12.2005 : опубл. 20.11.2007 / А. В. Сафонов, Т. Х. Аюпов, А. М. Володин [и др.] ; патентообладатель Открытое акционерное общество "Тяжпрессмаш". – 9с.: ил.
47. Патент JP2023072621A Япония, МПК В21К1/56, В21К27/00. Horizontal hot forging machine / Masahiro T., Minoru E., Daisuke E.; патентообладатель Sakamura Hot Art Co., Ltd – N 2021-197357 ; заявл. 12.11.2021 ; опубл. 24.05.2023.
48. Смирнов, В. К. Горячая вальцовка заготовок / В. К. Смирнов, К. И. Литвинов, С. В. Харитонин. – М.: Машиностроение, 1980. – 150 с.: ил.
49. Cai Z-yi. Precision design of roll-forging die and its application in the forming of automobile front axles // Journal of Materials Processing Technology. 2005. Vol. 168, No. 1. P. 95–101
50. Бундин, А. Т. Вальцы ковочные. Передовой научно-технический и производственный опыт. Тема 5. Ковка, горячая штамповка, периодическая прокатка и прессование металлов № М-57-48/1 / А. Т. Бундин. – М., 1957. – 51 с.: ил.
51. Атрошенко, А. П. Технология горячей вальцовки / А. П. Атрошенко. –

изд-во «Машиностроение», 1969. – 176 с.

52. Трофимов, И. Д. Ковочные вальцы / И. Д. Трофимов, В. А. Павлов, Н. В. Кузьмичев. – М.: Машиностроение, 1967. – 175 с.
53. Рудаков, Б. П. Ковка и штамповка на специализированном оборудовании / Б. П. Рудаков, А. Н. Силичев, Е. В. Степанов и др. Под общ. ред. П. В. Камнева и А. П. Атрошенко. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 96 с.: ил.
54. Бурко, В. А. Особенности проектирования и реализации ресурсосберегающих технологий штамповки поковок прямоугольных и круглых в плане / В. А. Бурко // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2012. – № 25. – С. 87-94.
55. Никольский, Л. Н. Опыт и пути внедрения вальцовки заготовок под последующую штамповку. / Л. Н. Никольский, А. В. Кузнецов, М. Е. Гаврилов, Ф. П. Паничев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1963. – №8. – С. 15.
56. Никольский, Л. Н. Вальцовка заготовок для последующей штамповки. Прогрессивная технология и вопросы автоматизации кузнечно-штамповочного производства / Л. Н. Никольский, А. В. Кузнецов. – М: Машгиз, 1960.
57. Скрыбин, С. А. Профилирование заготовок на ковочных вальцах / С. А. Скрыбин, А. И. Колпашников. – М.: Машиностроение, 1988. – 224 с.
58. Березин, И. В. Профилирование заготовок в ковочных вальцах: учебное пособие / И. В. Березин, Г. В. Понкротова. – М-во образования и науки Российской Федерации, Волгоградский гос. технический ун-т. – Волгоград: Волгоградский гос. технический ун-т, 2011. – 74 с.
59. Титов, Ю. А. Проектирование штампов для горячей объемной штамповки: учебное пособие / Ю. А. Титов, А. Ю. Титов. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 116 с.
60. Патент JP2005342729A Япония, МПК B21J5/00; B21J9/02; B21K1/12.

- Rolling-forging method and rolling-dies / Masato M.; патентообладатель Toyota Motor Corp – N 2004-161834 ; заявл. 31.05.2004 ; опубл. 15.12.2005.
61. Патент CN113926968A Китай, МПК B21J1/06; B21J13/02; B21J13/14; B21J5/00; B21J5/02 / Yong X., Bo L., Yuantian C., Genxue C.; патентообладатель Chongqing Kane Mech Manufacturing Co., Ltd – N 202111221128.2 ; заявл. 20.10.2021 ; опубл. 14.01.2022.
62. Патент CN101549384A Китай, МПК B21J5/00. Roll forging technology for producing roll forging parts with length exceeding maximum permissible length of roll forging machine / Jiang P., Hu F., Yu g., Fu D., Cao F., Wu Z., Wei B.; патентообладатель Baijing Res Inst of Mechanical – N 200910009307.7 ; заявл. 18.02.2009 ; опубл. 07.10.2009.
63. Патент CN208437616U Китай, МПК B21K27/00. Roll forging machine / Wei L., Yongbin W., Guiling X., Guangyu W.; патентообладатель Shandong Qianlima Forging and stamping Automation Equipment Co Ltd – N 201820884631.2 ; заявл. 07.06.2018 ; опубл. 29.01.2019.
64. Патент CN109773105A Китай, МПК B21J13/02; B21K7/12. Roll forging blanking die of steering trapezoidal arm and forging process of steering trapezoidal arm / Anxue Y., Zhi G.; патентообладатель Chengdu Hangxing Machinery MFG Co., Ltd – N 201910081299.0 ; заявл. 28.01.2019 ; опубл. 21.05.2019.
65. Патент CN102430678A Китай, МПК B21J13/10; B21J5/02. Roll forging method for series toothed rail forgings of coal mining machine / Jiang P., Hu F., Yu G., Wei W., Yang Y., Cao F.; патентообладатель Baijing Res Inst Mechanical & Electrical Technology – N 201110349517.8 ; заявл. 08.11.2011 ; опубл. 02.05.2012.
66. Патент CN201519735U Китай, МПК B21J13/02. Roll forging die enabling support arm to achieve bending on roll forging machine / Cao F., Fu D., Hu F., Jiang P., Wei X., Yang Y., Yu G.; патентообладатель Baijing Res Inst Mechanical & Electrical Technology – N 200920154109.5 ; заявл. 12.05.2009 ; опубл. 07.07.2010.

67. Патент CN208787449U Китай, МПК B21J13/02. Heavy spline shaft roll forging die for base / Yanjun G., Hang T., Peng T., Qiyong L., Shiqi Z., Guangyu L., Shengjie D., Baosheng G., Weihao A., Xile C.; патентообладатель Xuchang Zhongxing Forging Co; Xuchang Yuandong Drive Shaft – N 201821280199.8 ; заявл. 09.08.2018 ; опубл. 26.04.2019.
68. Патент CN208600651U Китай, МПК B21J13/02; B21K1/08. Crank roll forging base forming die / Wei L., Yongbin W., Guangyu W., Guiling X.; патентообладатель Shandong Qianlima Forging and Stamping Automation Equipment Co Ltd – N 201821312657.1 ; заявл. 15.08.2018 ; опубл. 15.03.2019.
69. Патент CN203621369U Китай, МПК B21J13/02. Roll forging blanking die for front axle forming / Simei S., Huajun C., Jian S., Gecheng J., Jie J.; патентообладатель Nanchang Gear Forging Factory – N 201320871144.5 ; заявл. 27.12.2013 ; опубл. 04.06.2014.
70. Патент CN202224580U Китай, МПК B21J13/02. Roll forging composite die for blanks / Ni J., Tao Y.; патентообладатель Jiangsu Hongbao Forging Co Ltd – N 201120306680.1 ; заявл. 23.08.2011 ; опубл. 23.05.2012.
71. Патент CN115401158A Китай, МПК B21J13/02; B21K1/08. Roll forging pre-forming process for crankshaft of asymmetric structure / Jiefeng X., Tian P., Jixin Z., LianGqun L., Juan D.; патентообладатель Guilin Fuda Heavy Ind Forging Co Ltd – N 202211060874.7 ; заявл. 31.08.2022 ; опубл. 29.11.2022.
72. Патент CN222985629U Китай, МПК B21J13/03. Die locking mechanism of roll forging machine / Yongkun L., Shuo L., Feng Q., Shubiao S.; патентообладатель Shandong Hongjie Automation Equipment Co Ltd – N 202520849291.5 ; заявл. 30.04.2025 ; опубл. 17.06.2025.
73. Патент CN215090439U Китай, МПК B21J13/02; B21J13/03. Roll forging die with positioning calibration structure / Zhulin T., Jinshun T., Shuiling T.; патентообладатель Maanshan Zhongye Machinery Co Ltd – N 202121209281.3 ; заявл. 01.06.2021 ; опубл. 10.12.2021.
74. Патент CN217316945U Китай, МПК B23Q3/02; B23Q3/18. Roll forging die

machining tool and equipment / Chengfel X., Zhongmin L., Fel S., Wufel D.; патентообладатель Tianrun Industrial Tech Co Ltd; Weihai Tianrun Machinery Tech Co Ltd – N 202221245346.4 ; заявл. 21.05.2022 ; опубл. 30.08.2022.

75. Патент CN207668411U Китай, МПК B21J13/08; B21J9/20; B21K27/00. Roll forming die and link gear of working and clamping / Wenzhong C.; патентообладатель Fuzhou King Duan Ind Co Ltd – N 201721825003.4 ; заявл. 25.12.2017 ; опубл. 31.07.2018.
76. Патент CN101596617A Китай, МПК B23C3/00; G05B19/18. Numerical-control. processing method of rolling-forging die cavity / Xie J., Zheng L., Liu J., Fu Z., Zhu G., Hu J., Song B.; патентообладатель Hubei Tri Ring Axle Co Ltd – N 200810236698.1 ; заявл. 01.12.2008 ; опубл. 09.12.2009.
77. Патент CN204620978U Китай, МПК B21J13/02. Improve structure of inserting in roll forging mould life-span / Xin L., Xiufu L., Huili Z., Qiaojun J., Hui Z., Linguo W.; патентообладатель Zhejiang Huangyan Jiangxin Forging Co Ltd – N 201520182860.1 ; заявл. 30.03.2015 ; опубл. 09.09.2015.
78. Патент JPS5545528A Япония, МПК B21J13/00. Roll Die Mounting Method in forging rolls of the like /Kenji A., Katsutoshi I.; патентообладатель Sumitomo Metal Ind – N 53-117583 ; заявл. 25.09.1978 ; опубл. 31.03.1980.
79. Патент JP2001259758A Япония, МПК B21D37/04; B21D37/14; B21J13/02. Die exchange apparatus of forging roll /Toshiharu A.; патентообладатель Sumitomo Heavy industries – N 2001-259758 ; заявл. 22.03.2000 ; опубл. 25.09.2001.
80. Патент CN108405781A Китай, МПК B21J13/10; B21J9/02. Connecting rod automatic roll forging device / Yi Z., Hua W., Xuesen Q., Jiarong H.; патентообладатель Hubei Three Gorges Polytechnic – N 201810103408.X ; заявл. 01.02.2018 ; опубл. 17.08.2018.
81. Патент CN206241697U Китай, МПК B23Q3/06. Roll forging mould add clamping apparatus and milling unit / Junyang J.; патентообладатель Kunshan Chaital-Xincheng Prec Forging Co Ltd – N 201621322820.3 ; заявл.

05.12.2016 ; опубл. 13.06.2017.

82. Патент KR102232173B1 Республика Корея, МПК B21J13/10; B21J5/02; B21J9/02. Method for plasticizing aluminum materials automatically using robot and forging rolls / Kang-guk B., Chang-young Cheon., Myung-hwan P., Man-sung J.; патентообладатель Formetal Co., Ltd.; Robot Valley Co., Ltd – N 10-2232173 ; заявл. 19.08.2019 ; опубл. 02.03.2021.
83. Zhou, J. A study on simulation of deformation during roll-forging process using system of special shaped and hat groove / J. Zhou, Z. Jia, H. Liu, M. WangJie // Rev. Adv. Mater. Sci. 33 (2013). P. 354-359.
84. Власов, А. В. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки / А. В. Власов, С. А. Стебунов, С. А. Евсюков [и др.]. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 384 с. – ISBN 978-5-7038-5101-2.
85. Jia Zhi. New type of groove used to improve friction in roll forging/ Jia Zhi, Zhou Jie, Ji Jin-jin// J. Cent. South Univ. (2014) 21. P. 493–499.
86. Кауфман, Константин Мартынович. Исследование процесса вальцовки заготовок в условиях высоких обжатий: в 2-х томах: диссертация ... технических наук: 05.00.00 / К. М. Кауфман. — Минск, 1970. — 280 с.: ил.
87. Кохан, Л. С. Вальцовка профилей с ромбическим сечением / Л. С. Кохан, А. В. Алдунин, Г. Б. Ремпель // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 1. – С. 13-16.
88. Кохан, Л. С. Вальцовка профилей с параболическим сечением / Л. С. Кохан, В. И. Пунин, Г. Б. Ремпель // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – № 3. – С. 29-34.
89. Кохан, Л. С. Оптимизация процесса калибровки при вальцовке / Л. С. Кохан, Г. Б. Ремпель // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2013. – № 4. – С. 43-47.
90. Кохан, Л. С. Исследование плотности материалов после вальцовки / Л. С. Кохан, В. И. Пунин, Г. Б. Ремпель // Известия высших учебных заведений.

Машиностроение. – 2014. – № 2(647). – С. 40-45.

91. Покрас, И. Б. Совершенствование процесса разработки технологии вальцовки с использованием метода эквивалентной полосы / И. Б. Покрас Э. Р. Ахмедзянов, А. С. Житников // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1(21). – С. 91-97.
92. Карпайтис, Е. П. Проектирование инструмента для горячей вальцовки заготовок / Е. П. Карпайтис, П. И. Золотухин, И. М. Володин // Известия МГТУ МАМИ. – 2013. – Т. 2, № 2(16). – С. 76-79.
93. Золотухин, П. И. Моделирование горячей вальцовки заготовок в овальных и круглых калибрах / П. И. Золотухин, И. М. Володин, Е. П. Карпайтис // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 10. – С. 115-121.
94. Володин, И. М. Влияние пружинения валков на процесс вальцовки заготовок в калибрах / И. М. Володин, П. И. Золотухин, Е. П. Карпайтис [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2016. – № 4(21). – С. 36-45.
95. Золотухин, П.И. Методика проектирования калибров с учетом неравномерности уширения вальцованных заготовок [Текст] / П.И. Золотухин, И.М. Володин, В.С. Мартюгин [и др.] // Известия ВУЗов Черноземья. Вып. 4. – Липецк: Изд-во ЛГТУ. – 2012. – С. 62-66.
96. Смирнов, В. К. Применение горячей вальцовки заготовок в кузнечно-штамповочном производстве / Смирнов В. К., Литвинов К. И., Харитонин С. В. // Заготовительные производства в машиностроении. – 2006. – №. 4. – С. 25-35.
97. Смирнов, В. К. Вальцовка заготовок для штамповки лопаток паровых и газовых турбин / В. К. Смирнов, К.И. Литвинов, С.В. Харитонин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2006. – №. 5. – С. 16-20.
98. Смирнов, В. К. Применение вальцовки заготовок при штамповке лопаток газотурбинных двигателей летательных аппаратов / В. К. Смирнов, К.И.

- Литвинов, С.В. Харитонин, В.А. Волков, Ш.Д. Кошаев // Заготовительные производства в машиностроении. – 2006. – №. 6. – С. 16-24.
99. Grass H. 3-D FEM-simulation of hot forming processes for the production of a connecting rod/ H. Grass, C. Krempaszky, E. Werner// Computational Materials Science 36 (2006). P. 480–489.
100. Ru-xiong LI. Roll forging technology and 3D finite element simulation of automobile front axle/ LI Ru-xiong, Jiao Song-hua// Applied Mechanics and Materials. 2012.Vols. 178-181. Pp 2845-2849.
101. Zhuang W. Numerical and experimental investigation of roll-forging of automotive front axle beam/ W. Zhuang, L. Hua, X. Wang, Y. Liu, X. Han, L. Dong// Int. J Adv. Manuf. Technol. (2015) 79. Pp. 1761–1777.
102. Как меняется рынок ручных инструментов в России: главные тренды года // Tebiz Group. Маркетинговые исследования и отчеты. URL: <https://tebiz.ru/kak-menyaetsya-rynok-ruchnyh-instrumentov-v-rossii-glavnye-trendy-goda> (дата обращения: 05.02.2025).
103. Прогноз рынка hand tools // ToolMash. Международная выставка металлообрабатывающих инструментов, оборудования и промышленных технологий. URL: <https://toolmashexpo.com/sectors/power-tools/> (дата обращения: 05.02.2025).
104. ГОСТ 2838–80. Ключи гаечные. Общие технические условия. – М.: Стандартиформ, 2008. – 7 с.
105. ГОСТ 2839–80. Ключи гаечные с открытым зевом двусторонние. Конструкция и размеры. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 12 с.
106. Каталог товаров. Фирменный магазин «ЗУБР». Гаечные ключи их характеристики и виды. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zubr36.ru/stati/58-gaechnye-klyuchi-i-ikh-kharakteristiki> (дата обращения: 18.02.2023).
107. Исследование технологии штамповки детали «Ключ гаечный» - Теория обработки металлов давлением: штампы, износ и смазочные материалы. Учебные материалы для студентов (info{at}studme.org) © 2013-2022.

- [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studme.org/354281/tehnika/issledovanie_tehnologii_shtampovki_detali_klyuch_gaechnyy (дата обращения 02.05.2023).
108. ГОСТ 2590-2006. Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый. Сортамент. М.: Изд-во стандартов, 2012. – 10 с.
109. ГОСТ 2310 – 77. Молотки слесарные стальные. Технические условия. – М: Госстандарт России: издательство стандартов, 1992. – 28 с.
110. ГОСТ ИЕС 60900-2019. Работа под напряжением. Ручные инструменты для работ под напряжением до 1000 В переменного и 1500 В постоянного тока. Общие требования и методы испытаний. М: Стандартинформ, 2019. – 50 с.
111. Кувалда.ру. Блог. Как делают гаечные ключи. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kuvalda.ru/blog/articles/polz/kak-delayut-gaechnye-klyuchi.html> (дата обращения: 06.11.2022).
112. Inside the Tool: How Wrenches Are Made – Gray Tools Online Store. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://shopgraytools.com/blogs/news/inside-the-tool-how-wrenches-are-made> (дата обращения 18.01.2026).
113. Espinoza, Edgar, "Optimizing a Hammer Forging Progression for a Large Hand Tool" (2015). Master's Theses (2009-). Paper 337. http://epublications.marquette.edu/theses_open/337
114. Кожевникова, Г. В. Комбинированный процесс поперечно-клиновой прокатки и штамповки / Г. В. Кожевникова // Инновации в машиностроении: сборник трудов VII Международной научно-практической конференция / под ред. В. Ю. Блюменштейна. – Кемерово: КузГТУ, 2015. – С. 443–446.
115. АМТ «Инжиниринг». Ресурсосберегающие технологии на КИЗ «СИТИМО». / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://amtengine.com/images/РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ_ТЕХНОЛОГИИ_НА_КИЗ_«СИТОМО».pdf (дата обращения 02.02.2024).

116. Патент № 2305610 С2 Российская Федерация, МПК В21Н 1/18, В21К 5/06. Способ изготовления поковки удлиненной формы : № 2005133143/02 : заявл. 28.10.2005 : опубл. 10.09.2007 / А. О. Рудович, В. А. Клушин. – 8с.: ил.
117. Клушин, В. А. Комбинированные процессы обработки металлов давлением с использованием поперечно-клиновой прокатки / В. А. Клушин, А. О. Рудой. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://amo.dmt-product.com/amo-08/pdfamo08/37.pdf> (дата обращения 04.02.2024).
118. Патент CN109926795A Китай, МПК В23Р15/00. Method for forming wrench tool / Bairong L.; патентообладатель Bairong Liao – N 201711351840.2 ; заявл. 15.12.2017 ; опубл. 25.06.2019.
119. Патент US2019176215A1 США, МПК В21J1/04, В21J1/06, В21J5/02, В21К5/16. Method for forming a spanner / Liao P.J.; патентообладатель Liao Po Jung – N 15/834,314 ; заявл. 07.12.2017 ; опубл. 13.06.2019.
120. Патент US2017056962A1 США, МПК В21D28/24, В21К5/16, В22F3/10, В22F3/24. Process of manufacturing wrenches / Lin C.C.; патентообладатель Lin Chen Chin – N 15/347,866 ; заявл. 10.11.2016 ; опубл. 02.03.2017.
121. Патент № 2781825 С1 Российская Федерация, МПК В21К5/16. Способ изготовления гаечных ключей пластическим деформированием : № 2021136351 : заявл. 09.12.2021 : опубл. 18.10.2022 / Сосенушкин Е.Н., Сосенушкин А.Е., Кадымов В.А., Яновская Е.А., Гусев Д.С., Рогулин С.А., Хохлова Н.Г.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН". – 11 с.: ил.
122. Патент № 2781826 С1 Российская Федерация, МПК В21К5/16. Способ штамповки гаечных ключей : № 2021136348 : заявл. 09.12.2021 : опубл. 18.10.2022 / Сосенушкин Е.Н., Сосенушкин А.Е., Кадымов В.А., Яновская Е.А., Гусев Д.С., Рогулин С.А., Хохлова Н.Г.; патентообладатель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН". – 10 с.: ил.

123. Патент № 2784307 С1 Российская Федерация, МПК В21К 5/16. Способ изготовления гаечных ключей пластическим деформированием : № 2021136355 : заявл. 09.12.2021 : опубл. 23.11.2022 / Сосенушкин Е.Н., Сосенушкин А.Е., Кадымов В.А. [и др.]; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН". – 10 с.: ил.
124. Патент № 2784309 С1 Российская Федерация, МПК В21К 5/16. Способ штамповки гаечных ключей : № 2021136354 : заявл. 09.12.2021 : опубл. 23.11.2022 / Сосенушкин Е.Н., Сосенушкин А.Е., Кадымов В.А. [и др.]; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН". – 9 с.: ил.
125. Патент № 2827963 С1 Российская Федерация, МПК В21К5/16, В21К 27/4, В21J 13/08. Способ штамповки гаечных ключей : № 2023123383 : заявл. 08.09.2023 : опубл. 04.10.2024 / Сосенушкин Е.Н., Гусев Д.С., Яновская Е.А., Сосенушкин А.Е., Шарыкин М.В., Рогулин С.А.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН". – 11 с.: ил.
126. 0000Компания UNIOR hand tools. О компании. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.unior.ru/about/> (дата обращения 04.04.2021).
127. Патент № 2859802 С1 Российская Федерация, МПК В21К 1/76, В21J 5/02, В21J 13/02. Способ горячей объемной штамповки поковок : № 2025100562 : заявл. 15.01.2025 : опубл. 08.04.2026 / Сосенушкин Е.Н., Сосенушкин А.Е., Яновская Е. А. [и др.]; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего

образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН". – 11 с.: ил.

128. Оборудование для бережливого производства гаечных ключей и слесарного инструмента. АМТ инжиниринг / 10.07.2020. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.amtengine.com/o-kompanii/arkhiv-novostey/oborudovanie-dlya-berezhlivogo-proizvodstva-gaechnykh-klyuchey.html> (дата обращения 03.05.2022).
129. Патент JP2018065166А Япония, МПК В21К5/16. Wrench manufacturing process / Ming-Chang C., Mao-Chih L.; патентообладатель Ming-Chang Chen, Mao-Chih Liao – N 2016-204667 ; заявл. 18.10.2016 ; опубл. 26.04.2018.
130. Патент DE102009038116А1 Германия, МПК В21К5/16. Methods for manufacturing combination wrenches without generating carbon scale / Hu B.; патентообладатель Hu Bobby – N 97131820 ; заявл. 20.08.2008 ; опубл. 25.02.2010.
131. Ngaile, Gracious and Taylan Altan. "Computer Aided Engineering in Forging." ERC for Net Shape Manufacturing, The Ohio State University. Web. 15 Dec. 2014.
132. Жаров, М. В. Оценка достоверности результатов математического моделирования пластического течения металла с использованием различных прикладных программных продуктов / М. В. Жаров, Е. В. Преображенский // Прикладная механика и техническая физика. – 2025. – № 4(392). – С. 206-218. – DOI 10.15372/PMTF202415468.
133. Зубков, Н. Н. САЕ моделирование формирования оребренных структур, получаемых методом деформирующего резания / Н. Н. Зубков, Д. В. Цуканов, Д. А. Бузаев, Ю. Л. Битюцкая // Воронежский научно-технический Вестник. – 2022. – Т. 2, № 2(40). – С. 3-12. – DOI 10.34220/2311-8873-2022-3-12.
134. Gardner J. D, Vijayaraghavan, A., & Dornfeld, D. A. (2005). Comparative Study of Finite Element Simulation Software. UC Berkeley: Laboratory for

Manufacturing and Sustainability. Retrieved from
<https://escholarship.org/uc/item/8cw4n2tf>

135. Кхалифа, М. М. Сравнительный анализ методик моделирования процесса резания с использованием программных средств / М. М. Кхалифа, Т. А. Дуюн // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 8. – С. 101-109. – DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-8-101-109.
136. Жаров, М. В. Контроль технологических параметров процесса штамповки оребрѐнных панелей: использование средств измерений и методов численного моделирования / М. В. Жаров, Е. В. Преображенский // Измерительная техника. – 2023. – № 10. – С. 41-48. – DOI 10.32446/0368-1025it.2023-10-41-48.
137. Группа компаний «СиСофт» (CSoft) – Simufact Forming 2021. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.csoft.ru/soft/simufact.forming/simufact-forming-2021.html?list_view=list&tags_actions=4953 (дата обращения: 04.02.2026).
138. Transvalor. End-to-end solution platform to reinvent digital together. Blog. Advanced forming simulation for defense fabrication processes. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.transvalor.com/en/blog/advanced-forming-simulation-for-defense-fabrication-processes> (дата обращения: 04.02.2026).
139. Constantin, George. “FEM Tools for Cutting Process Modelling and Simulation.” UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering.
140. Forge – Neon Infotech – Software & Engineering Solutions. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://neoninfotech.com/solution/forge/#forge-process> (дата обращения: 04.02.2026).
141. Солдусова, Е. А. Основные сведения о программном комплексе ANSYS. Геометрическое моделирование: учеб.-метод. пособ. / Е. А. Солдусова. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010 – 54 с.: ил.
142. Deform-3D – Finite-Element Based Metal Forming Process Simulation /

- CADIT Global Official Deform Products. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cadit.com/products/deform-3d-metal-forming-simulation> (дата обращения 16.03.2025).
143. Моделирование многопереходных технологических процессов обработки металлов давлением. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sapr.ru/article/24740> (дата обращения 16.03.2022).
144. Сосенушкин, Е. Н. Моделирование процесса вальцовки профилированной заготовки под штамповку поковки гаечного ключа / Е. Н. Сосенушкин, С. А. Рогулин, Д. С. Гусев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2023. – № 12. – С. 36-42.
145. ГОСТ 4543-2016.Metalloпродукция из конструкционной и легированной стали. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. – 50 с.
146. 40ХФА. Характеристика материала 40ХФА. Компания МЕТАЛЛИНВЕСТ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.m-invest.ru/spravochniki/marochnik-staley/stal-konstrukcionnaya-legirovannaya/40hfa/> (дата обращения 04.02.2022).
147. ГОСТ 7505-89. Поковки стальные штампованные. Допуски, припуски и кузнечные напуски. М.: Изд-во стандартов, 1990. – 53 с.
148. ГОСТ 16434-87. Вальцы ковочные консольные. Параметры и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1988. – 5 с.
149. Воронежский завод кузнечно-прессового оборудования им. М.И. Калинина, ВЗКПО. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://stanki-katalog.ru/st_kalininpress.htm?ysclid=mo5lm4gkjin712563202 (дата обращения 18.04.2024).
150. Dudkieiwcz Ł., Hawryluk M., Polak S. et al. Development of a new and high-performance precision forging technology. Int J Adv Manuf Technol 141, 3829–3845 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16842-8>
151. ГОСТ 10112-2001. Ключи гаечные двусторонние. Размеры комбинаций

зевов. М.: Стандартиформ, 2006. – 3 с.

152. Zamaraeva, Yu. V. Experience in the application of simulation of hot forging in production conditions at the KUMW JSC/ Yu. V. Zamaraeva, L. I. Knysh, E. M. Gaisin // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2023. Iss. 5. P. 69–82. DOI: 10.17804/2410-9908.2023.5.069-082.
153. Сотников, Н. Н. Основы моделирования в SolidWorks / Н. Н. Сотников, Д. М. Козар. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 129 с.
154. Патент № 2828337 С1 Российская Федерация МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01). Способ крепления и фиксации секторов-штампов на валах ковочных вальцов консольного типа : № 2024102147 : заявл. 29.01.2024 : опубл. 09.10.2024 / Сосенушкин Е.Н., Рогулин С.А., Сосенушкин А.Е., Яновская Е.А., Пономарева А.С.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН". – 14 с.: ил.
155. Патент № 2827967 С1 Российская Федерация МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01). Способ крепления и фиксации секторов-штампов на валах ковочных вальцов консольного типа : № 2024102146 : заявл. 29.01.2024 : опубл. 04.10.2024 / Рогулин С.А., Сосенушкин Е.Н., Сосенушкин А.Е., Яновская Е.А., Пономарева А.С., Гусев Д.С.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН". – 11 с.: ил.
156. Патент № 2828456 С1 Российская Федерация МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01). Способ крепления и фиксации секторов-штампов на валах ковочных вальцов консольного типа : № 2023135828 : заявл. 28.12.2023 : опубл. 14.10.2024 / Сосенушкин Е.Н., Рогулин С.А., Сосенушкин А.Е., Яновская Е.А., Пономарева А.С.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН". – 14 с.: ил.

157. Патент № 2827189 С1 Российская Федерация МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01). Рабочий вал ковочных вальцов : № 2023135830 : заявл. 28.12.2023 : опубл. 23.09.2024 / Сосенушкин Е.Н., Рогулин С.А., Сосенушкин А.Е., Яновская Е.А., Кадымов В.А., Шарыкин М.В.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН". – 13 с.: ил.
158. Патент № 2827191 С1 Российская Федерация МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01). Рабочий вал ковочных вальцов : № 2023135826 : заявл. 28.12.2023 : опубл. 23.09.2024 / Рогулин С.А., Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А., Сосенушкин А.Е.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН". – 12 с.: ил.
159. Патент № 2828455 С1 Российская Федерация МПК В21Н 8/02 (2006.01) В21J 13/02 (2006.01). Рабочий вал ковочных вальцов : № 2024102145 : заявл. 29.01.2024 : опубл. 14.10.2024 / Сосенушкин Е.Н., Рогулин С.А., Сосенушкин А.Е., Яновская Е.А., Кадымов В.А., Шарыкин М.В.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН". – 10 с.: ил.
160. Завод по выпуску тяжелых механических прессов ТМП. Оборудование для объемной штамповки. Пресс горячештамповочный кривошипный модели КА8538. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tmp-press.ru/products/die-forging/pg1/1/> (дата обращения 18.01.2026).
161. Большаков, В. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex: Учебный курс / В. Большаков, А. Бочков, А. Сергеев. –

Санкт-Петербург: Питер, 2010. – 336 с.

162. Литвинов, Р. Проектирование рабочих клеток прокатных станов в SolidWorks / Р. Литвинов, С. Лукинских, В. Шилов // САПР и графика. – 2009. – № 8(154). – С. 87-90.
163. ГОСТ 5950-2000. Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия. М.: Межгосударственный стандарт, 2000. – 42 с.
164. Рогулин, С. А. Исследование технологических параметров операций горячего деформирования поковки типа "гаечный ключ" / С. А. Рогулин, Е. Н. Сосенушкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 5. – С. 376-383. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-5-376-377.
165. Рогулин, С. А. Технология профилирования заготовки на ковочных вальцах для снижения расхода металла и анализ его напряженно-деформированного состояния / С. А. Рогулин, Е. Н. Сосенушкин, Е. А. Яновская // Черные металлы. – 2025. – № 8. – С. 46-53. – DOI 10.17580/chm.2025.08.06.
166. Рогулин, С. А. Рационализация вальцовки моделированием параметров заготовки под штамповку поковки детали «Гаечный ключ» как способ ресурсосбережения / С. А. Рогулин, Е. Н. Сосенушкин, Е. А. Яновская // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 1(123). – С. 147-154. – DOI 10.37313/1990-5378-2025-27-1-147-154.
167. Сосенушкин, Е. Н. К вопросу о моделировании напряженно-деформированного состояния при обработке материалов давлением/ Е.Н. Сосенушкин, В. А. Кадымов, Е. А. Яновская, А. А. Татаринцев, А. Е. Сосенушкин// Известия ТулГУ. Технические науки. – Вып. 11. – 2017. – Ч.1. – С. 82-100.
168. Сосенушкин, Е. Н. Математическая модель напряженно-деформированного состояния и силовых параметров гибки концевых

- участков швеллеров, используемых в вагоностроении / Е. Н. Сосенушкин, Е. А. Яновская, А. С. Пономарева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, №2. – С. 131-143.
169. Беляева, И. А. Математическое моделирование процессов ОМД: учеб. Пособие / И. А. Беляева. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 84 с.
170. Afanasyev, M. P. Computer-aided design of mechatronic machine equipment layouts using the Solidworks software package / M. P. Afanasyev, T. F. Tuliakov // Modern Science and Innovations. – 2022. – No. 4(40). – P. 31-40. – DOI 10.37493/2307-910X.2022.4.3.
171. Design & analysis of progressive die using SOLIDWORKS / A. Arora, A. Pathak, A. Juneja [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 51. – P. 956-960. – DOI 10.1016/j.matpr.2021.06.335.
172. Kitayama S. Technical review on design optimization in forging. Int J Adv Manuf Technol 132, 4161–4189 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13593-w>
173. Рогулин, С. А. Оценка работоспособности секторов-штампов и системы их крепления на рабочих валах ковочных вальцов открытого типа / С. А. Рогулин Е. Н. Сосенушкин, Р.М. Амхадов, Е. А. Яновская // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2026. – Т. 28, № 2. – С. 218-232.
174. NIST Technical Note 1907. Temperature Dependence of Elastic Moduli of Steels. 2015. – 125 с.
175. Ювиналл Р. К., Основы проектирования машинных компонентов / Р. К. Ювиналл, К. М. Маршек. М.: Машиностроение, 2006. – 816 с.
176. Shigley J. E., Mechanical Engineering Design / J. E. Shigley, C. R. Mischke, R. G. Budynas. McGraw-Hill, 2011. – 1072 с.
177. Куковинец, А.В. Полный факторный эксперимент для исследования фрагментарного метода обнаружения границ объектов на цифровом изображении / А. В. Куковинец // Colloquium-journal. Technical science. –

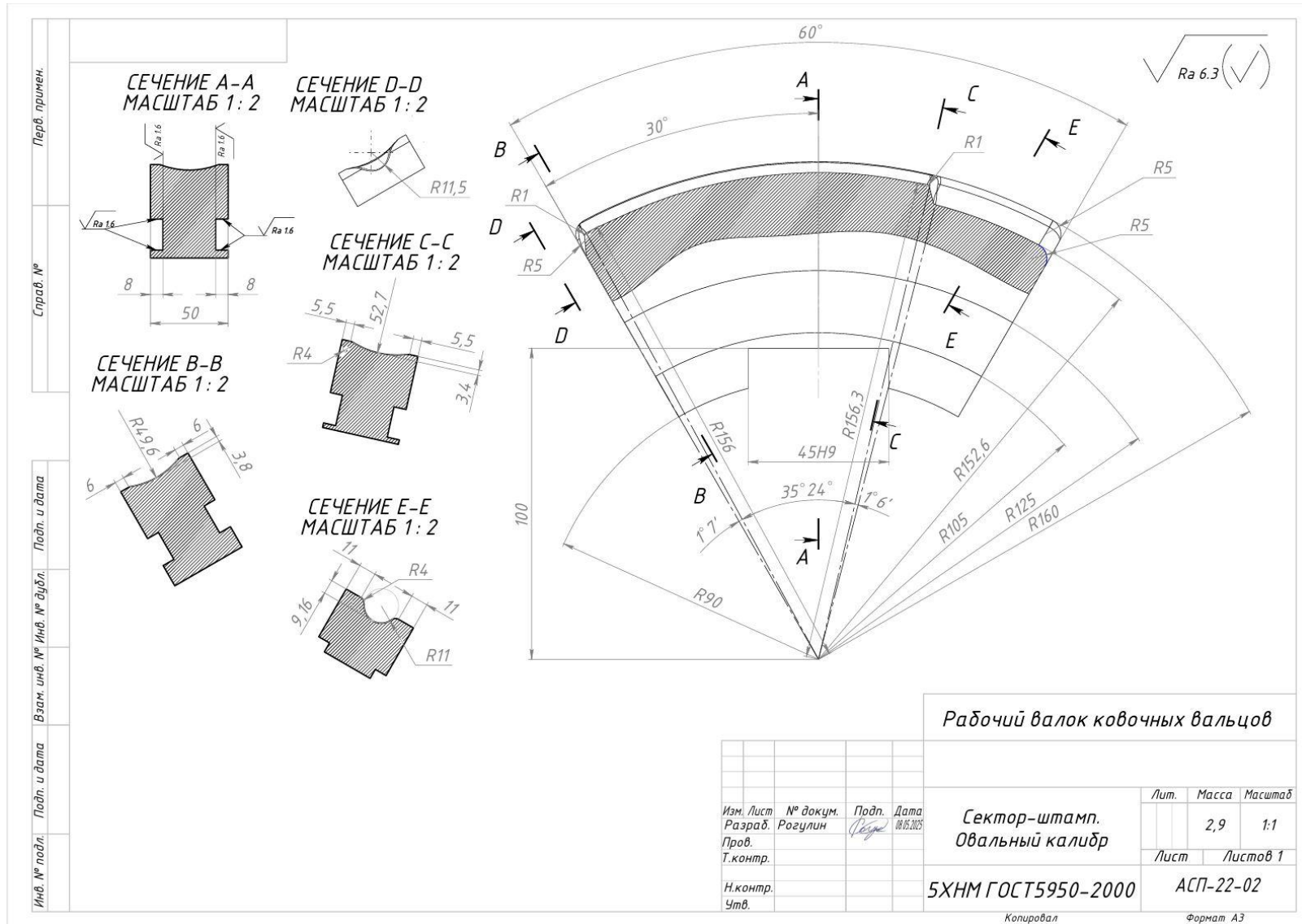
2020. – 52(54). – С. 12-15. DOI: 10.24411/2520-6990-2019-11210.
178. Монтгомери Д. К. Планирование экспериментов и анализ данных / Д. К. Монтгомери. М.: Статистика, 2019. – 592 с.
179. Шуленин, В. П. Изучение свойств ранговых аналогов F -критерия Фишера при отклонениях от Гауссовской модели дисперсионного анализа // В. П. Шуленин, В. В. Табольжин // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2008. – №1(2). – С. 87-96.
180. Баскин, О. Х. Экспоненциальный закон испытаний на выносливость // Proc. ASTM. — 1910. — Т. 10. — С. 625–630.
181. Ни, Ю. Влияние дефектности поверхности образцов титанового сплава ti-10v-2fe-3al на его поведение при испытаниях на высокоцикловую усталость / Ю. Ни, Ч. В. Чжоу // Физика металлов и металловедение. – 2021. – Т. 122, №10. – с. 1065-1074. DOI: 10.31857/S0015323021100077.
182. Никитин, И. С. Мультирежимная модель развития усталостных повреждений / И. С. Никитин, Н. Г. Бураго, А. Б. Журавлев, А. Д. Никитин // Прикладная математика и механика. – 2020. – Т.84, №5 – С. 663-674 DOI: 10.31857/S0032823520050070.
183. Vlasov A., Elastic-Plastic Thermomechanical Fatigue Analysis of Forging Dies / A. Vlasov, N. Biba, S. Stebunov // Key Engineering Materials Submitted: 2016-02-12 ISSN: 1662-9809, Vol. 716, pp 667-676 doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.716.667 (c) 2016 Trans Tech Publications, Switzerland.
184. Schlayer M.; Warwas, M.; Seifert, T. A Temperature-Dependent Viscoplasticity Model for the Hot Work Steel X38CrMoV5-3, Including Thermal and Cyclic Softening under Thermomechanical Fatigue Loading. Materials 2023, 16, 994. <https://doi.org/10.3390/ma16030994>.
185. Schlayer M. Isothermal and thermomechanical low-cycle fatigue of the hot work steel X38CrMoV5-3 with and without averaging heat treatment / M. Schkayer, M. Warwas, K. Hintz, D. Kohler, T. Seifert // International Journal

of Fatigue. – 2025. – Vol. 178. – Article 109353. DOI: 10.1016/ijfatigue.2025.109353.

186. Паршин В. С. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D / В. С. Паршин, А. П. Карамышев, И. И. Некрасов, А. И. Пугин и др.: уч. пособ. Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 265 с.
187. Перетяцько, В. Н. Енергоефективна технологія прокатки рельсов в чотирехвалкових калібрах / В. Н. Перетяцько, С. В. Сметанин // Металлург. – 2016. – № 7. – С. 54-59.
188. Чижи́ков, Ю. М. Теорія подоби́я і моделювання процесів обробки металів тисненням / Ю. М. Чижи́ков. – М.: Металлурґія, 1970. – 296 с.
189. ГОСТ 3778–98. Свинец. Технические условия. – Минск: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 8 с.
190. ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. М.: Стандартиформ, 2009. – 13 с.

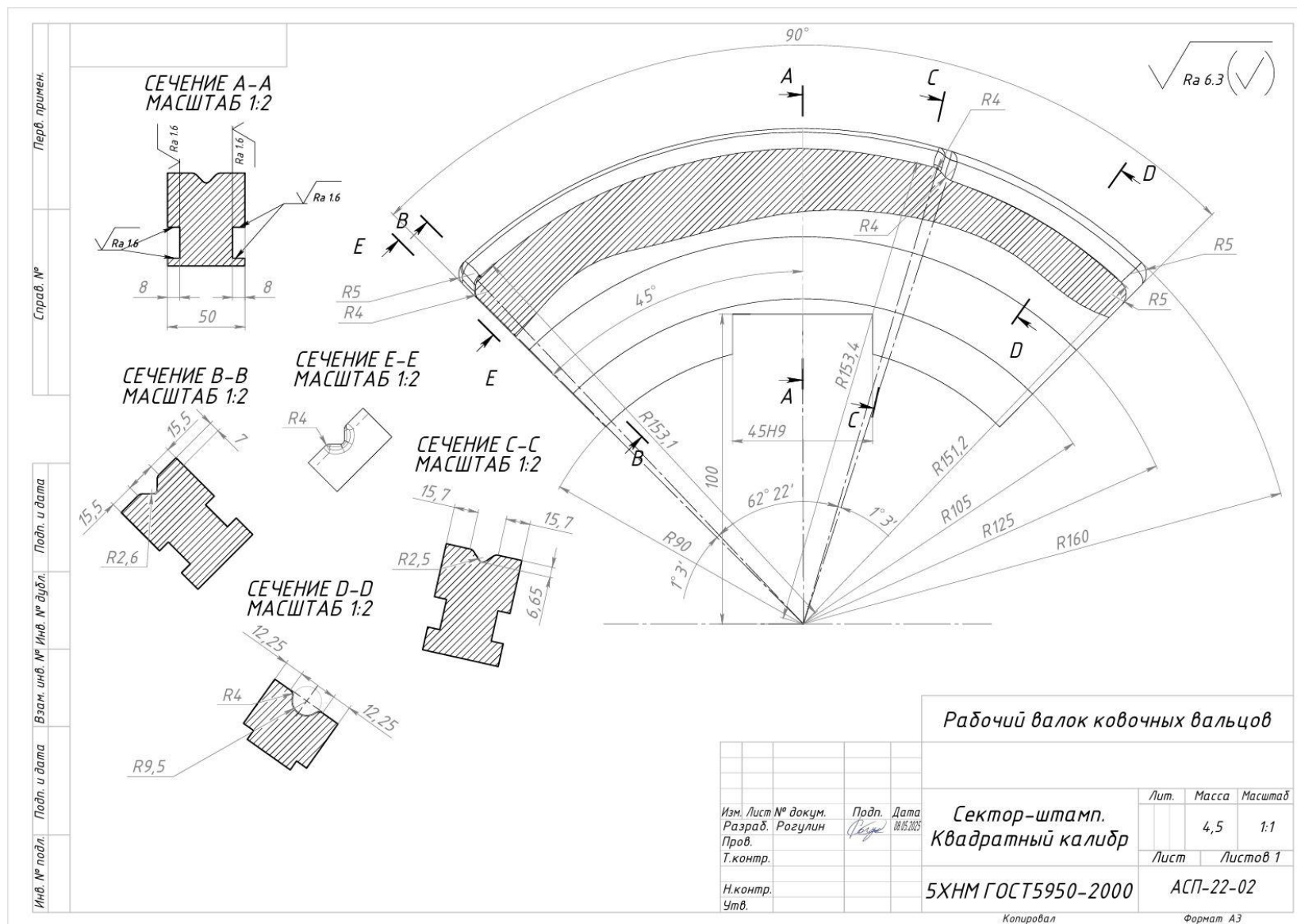
ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРИЛОЖЕНИЕ А



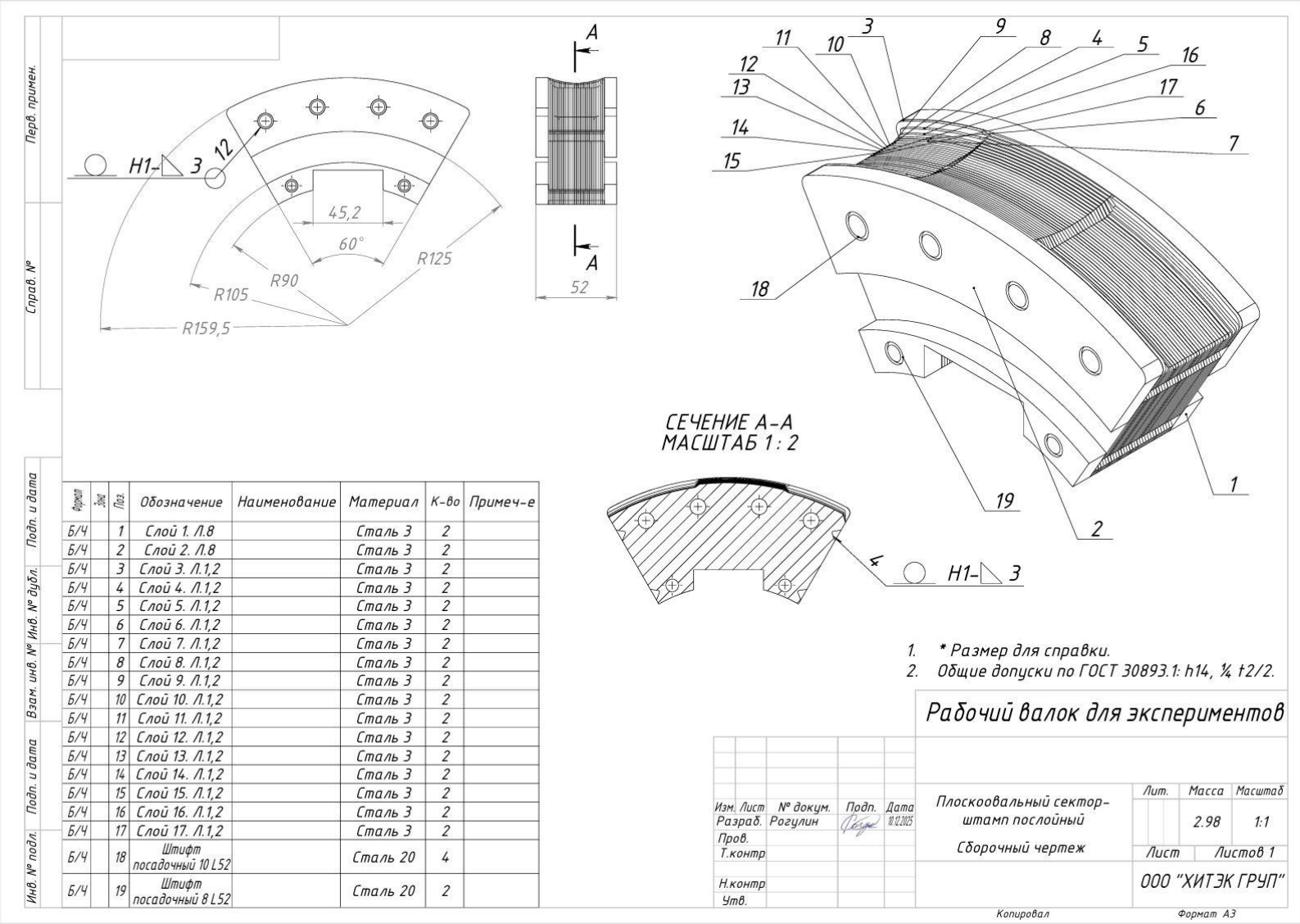
а)

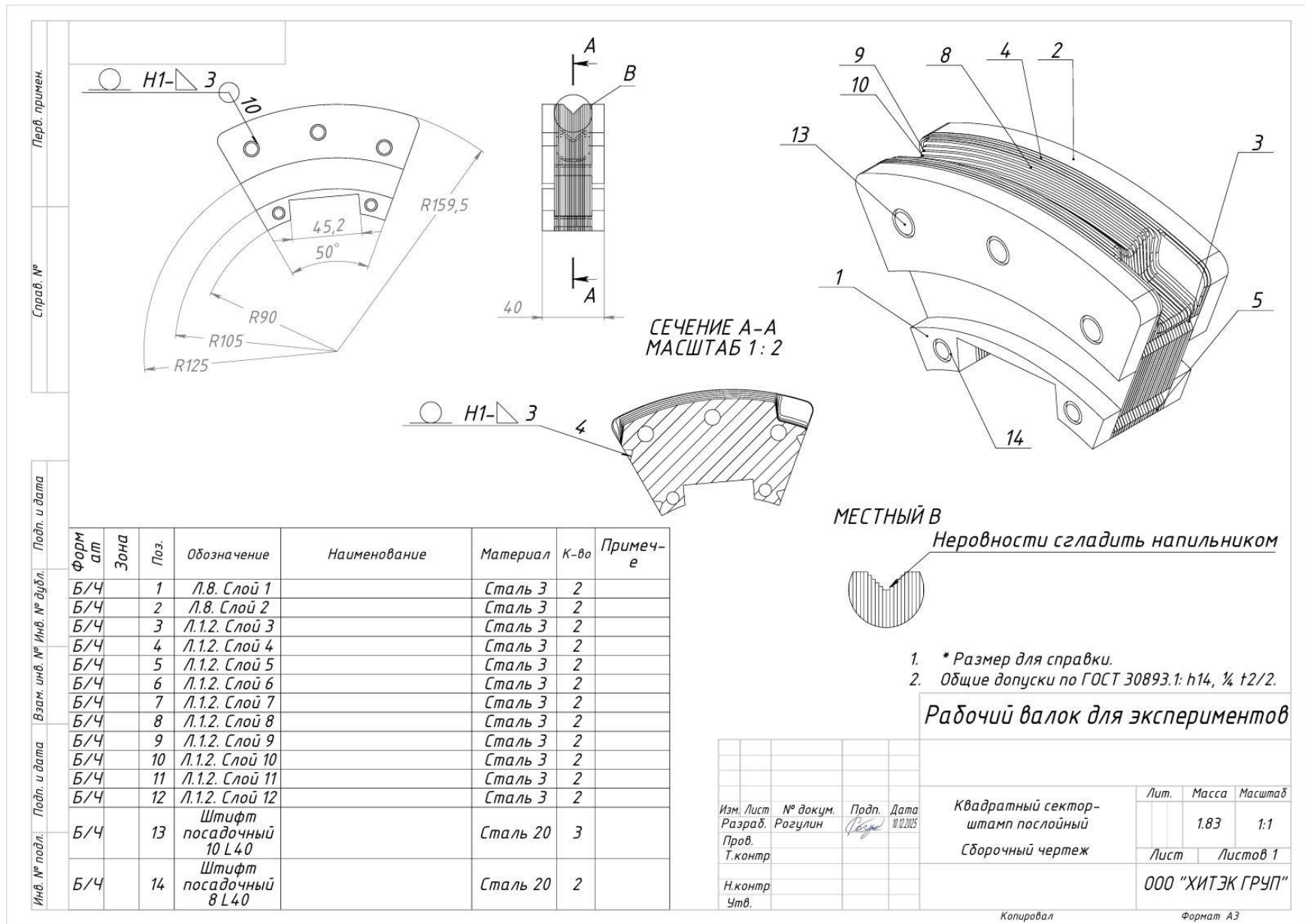
6)

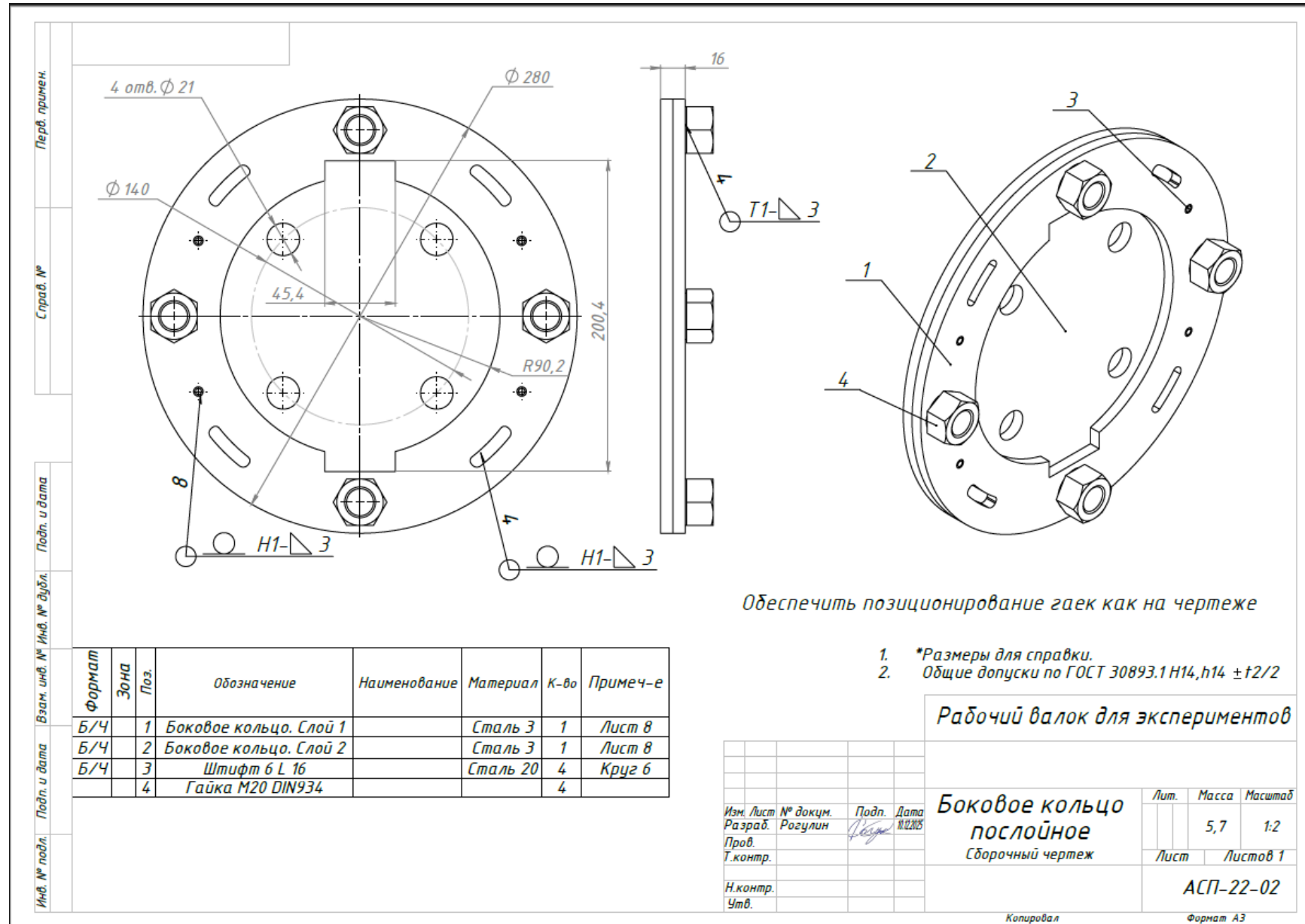


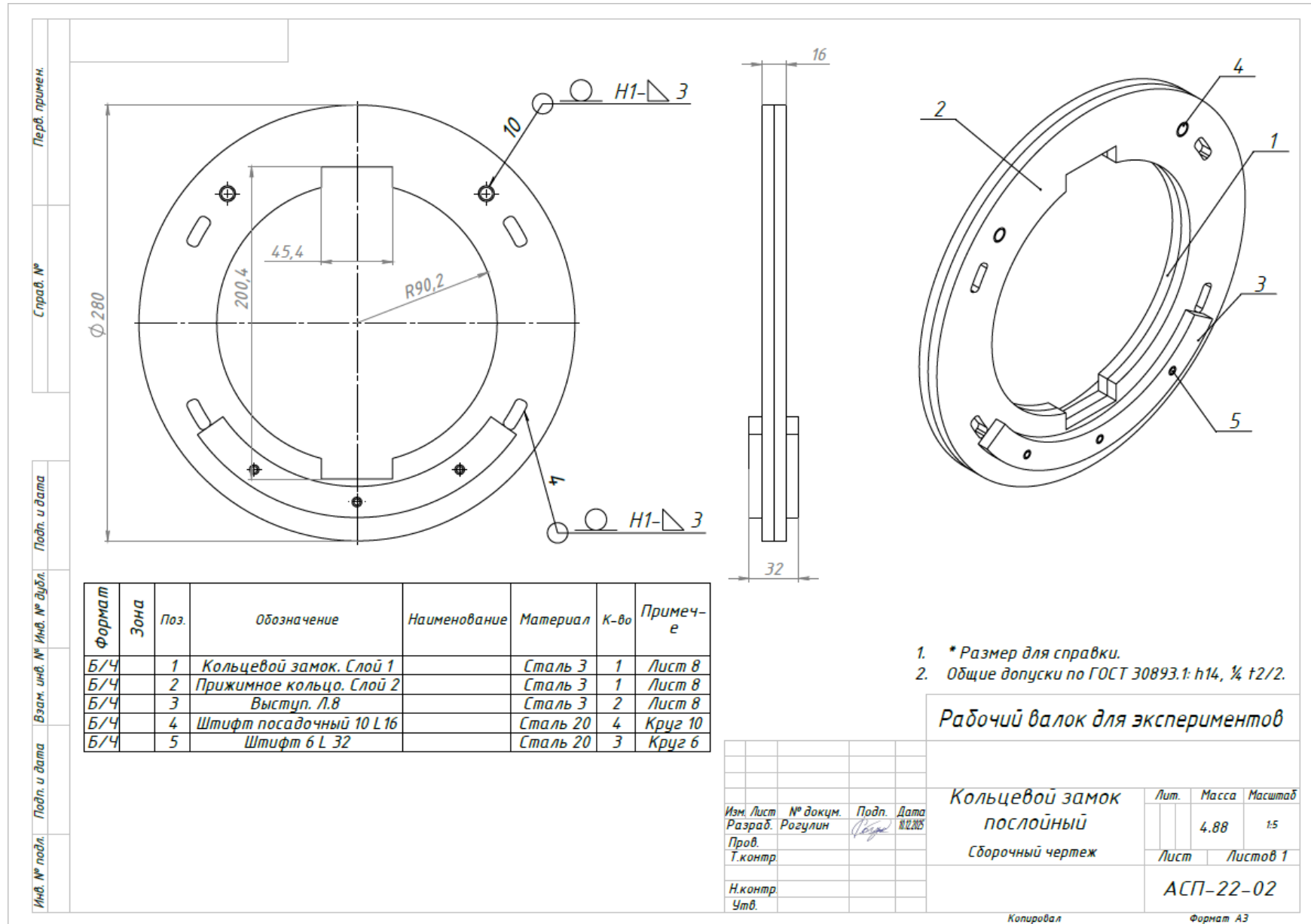
Чертежи секторов-штампов: а – овальный калибр; б – квадратный калибр

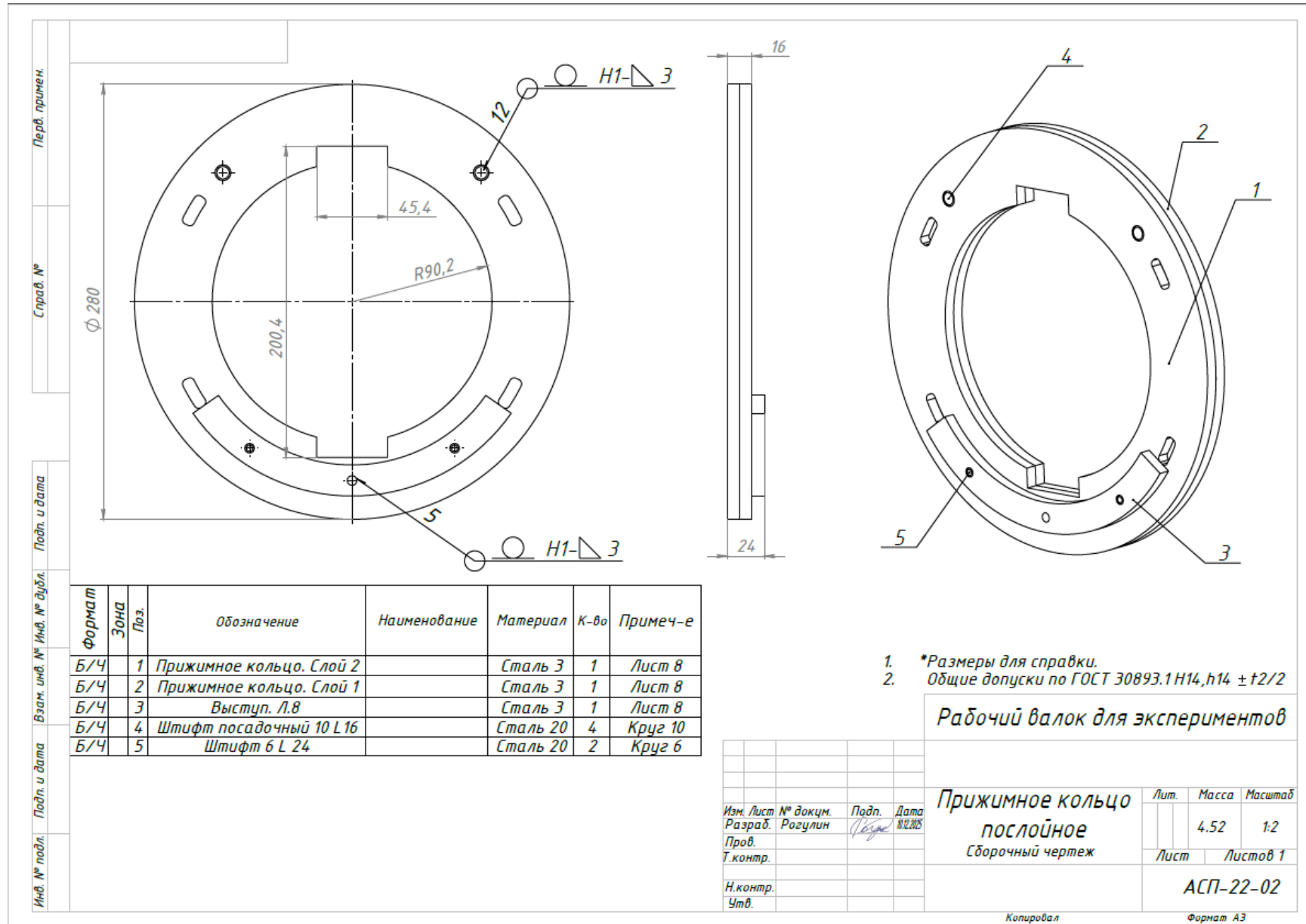
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

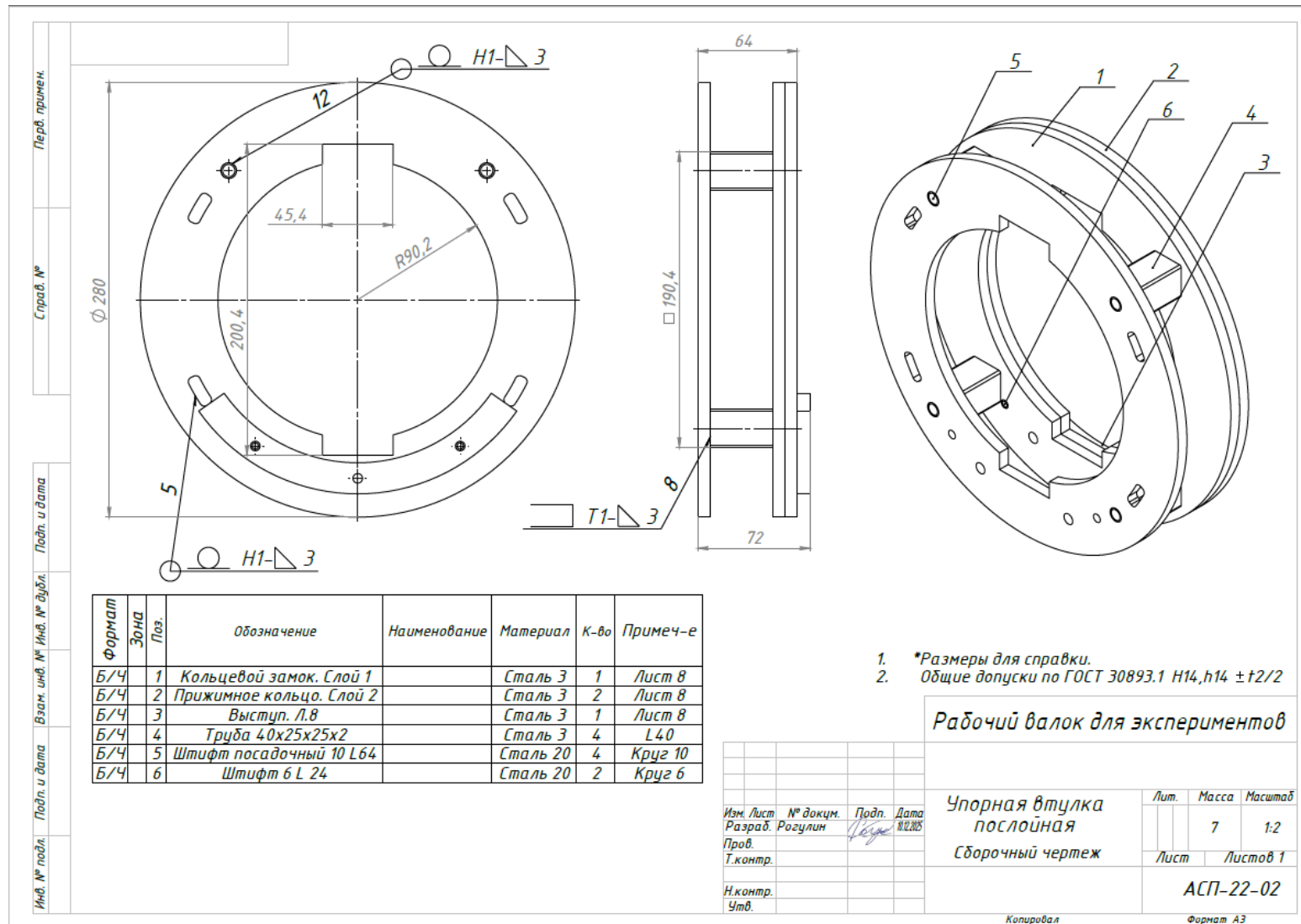












е)

Чертежи элементов крепления секторов-штампов для натурных экспериментов: а – плоскоовальный сектор-штамп; б – квадратный сектор-штамп; в – боковое кольцо; г – кольцевой замок; д – прижимное кольцо; е – упорная втулка





СЕРТИФИКАТ

участника Всероссийской (национальной)
научно-практической конференции
«Актуальные проблемы науки и техники. 2023»

Роголин Сергей Александрович

Донской государственный технический университет
Ростов-на-Дону, 15-17 марта 2023 г.

Проректор по учебной работе и
международной деятельности ДГТУ



А.Н. Бескопыйный

**XXVIII Московский международный
Салон изобретений и инновационных технологий**



«АРХИМЕД 2025»

ДИПЛОМ

*Решением Международного Жюри
награждается*

БРОНЗОВОЙ МЕДАЛЬЮ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технологический
университет «Станкин»

авторы: Сосенушкин Евгений Николаевич, Рогулин Сергей Александрович,
Сосенушкин Александр Евгеньевич, Яновская Елена Александровна,
Пономарева Анна Сергеевна; Гусев Дмитрий Сергеевич
за проект: «Способ крепления и фиксации секторов-штампов
на валах ковочных вальцов консольного типа»

Председатель
Международного Жюри,
академик,
вице-президент РАН

С.М. Алдошин

Президент Салона

Д.И. Зезюлин

Руководитель
Федеральной службы
по интеллектуальной
собственности

Ю.С. Зубов

Россия, Москва, 18.03 - 20.03.2025 г.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2781825

**Способ изготовления гаечных ключей пластическим
деформированием**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования "Московский
государственный технологический университет "СТАНКИН"
(ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Сосенушкин Евгений Николаевич (RU), Сосенушкин
Александр Евгеньевич (RU), Кадымов Вагид Ахмедович (RU),
Яновская Елена Александровна (RU), Гусев Дмитрий Сергеевич
(RU), Рогулин Сергей Александрович (RU), Хохлова Ника
Геннадьевна (RU)*

Заявка № 2021136351

Приоритет изобретения 09 декабря 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 18 октября 2022 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 09 декабря 2041 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2781826

Способ штамповки гаечных ключей

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Сосенушкин Евгений Николаевич (RU), Сосенушкин Александр Евгеньевич (RU), Кадымов Вагид Ахмедович (RU), Яновская Елена Александровна (RU), Гусев Дмитрий Сергеевич (RU), Рогулин Сергей Александрович (RU), Хохлова Ника Геннадьевна (RU)*

Заявка № 2021136348

Приоритет изобретения 09 декабря 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 18 октября 2022 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 09 декабря 2041 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2827963

Способ штамповки гаечных ключей

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Сосенушкин Евгений Николаевич (RU), Гусев Дмитрий Сергеевич (RU), Яновская Елена Александровна (RU), Сосенушкин Александр Евгеньевич (RU), Шарыкин Михаил Валерьевич (RU), Рогулин Сергей Александрович (RU)*

Заявка № 2023123383

Приоритет изобретения 08 сентября 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 04 октября 2024 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 08 сентября 2043 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2828455

Рабочий вал ковочных вальцов

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Роголин Сергей Александрович (RU), Сосенушкин Евгений Николаевич (RU), Яновская Елена Александровна (RU), Сосенушкин Александр Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2024102145

Приоритет изобретения 29 января 2024 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 14 октября 2024 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 29 января 2044 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2827189

Рабочий вал ковочных вальцов

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Сосенушкин Евгений Николаевич (RU), Рогулин Сергей Александрович (RU), Сосенушкин Александр Евгеньевич (RU), Яновская Елена Александровна (RU), Кадымов Вагид Ахмедович (RU), Шарыкин Михаил Валерьевич (RU)*

Заявка № 2023135830

Приоритет изобретения 28 декабря 2023 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 23 сентября 2024 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 28 декабря 2043 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2827191

Рабочий вал ковочных вальцов

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Сосенушкин Евгений Николаевич (RU), Рогулин Сергей Александрович (RU), Сосенушкин Александр Евгеньевич (RU), Яновская Елена Александровна (RU), Кадымов Вагид Ахмедович (RU)*

Заявка № 2023135826

Приоритет изобретения 28 декабря 2023 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 23 сентября 2024 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 28 декабря 2043 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2828456

**Способ крепления и фиксации секторов-штампов на
валах ковочных вальцов консольного типа**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования "Московский
государственный технологический университет "СТАНКИН"
(ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Сосенушкин Евгений Николаевич (RU), Рогулин Сергей
Александрович (RU), Сосенушкин Александр Евгеньевич (RU),
Яновская Елена Александровна (RU), Пономарева Анна Сергеевна
(RU)*

Заявка № **2023135828**

Приоритет изобретения **28 декабря 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **14 октября 2024 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **28 декабря 2043 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2828337

Способ крепления и фиксации секторов-штампов на валах ковочных вальцов консольного типа

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Сосенушкин Евгений Николаевич (RU), Розулин Сергей Александрович (RU), Сосенушкин Александр Евгеньевич (RU), Яновская Елена Александровна (RU), Пономарева Анна Сергеевна (RU)*

Заявка № 2024102147

Приоритет изобретения 29 января 2024 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 09 октября 2024 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 29 января 2044 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2827967

Способ крепления и фиксации секторов-штампов на валах ковочных вальцов консольного типа

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)*

Авторы: *Розулин Сергей Александрович (RU), Сосенушкин Евгений Николаевич (RU), Сосенушкин Александр Евгеньевич (RU), Яновская Елена Александровна (RU), Пономарева Анна Сергеевна (RU), Гусев Дмитрий Сергеевич (RU)*

Заявка № 2024102146

Приоритет изобретения 29 января 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 04 октября 2024 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 29 января 2044 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов





МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
(ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»)

Вадковский пер., д. 1, г. Москва, ГСП-4, 127994. Тел.: (499) 973-30-76. Факс: (499) 973-38-85

E-mail: rector@stankin.ru

№ _____

«УТВЕРЖДАЮ»

и.о. проректора по образовательной
деятельности и молодежной политике
к.т.н. М.В. Бильчук

2025 г

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов
диссертационной работы «Совершенствование операции горячей вальцовки при
предварительном и окончательном формоизменении удлиненных в плане поковых»,
представленной аспирантом С.А. Рогулиным на соискание ученой степени
кандидата технических наук по научной специальности 2.5.7. «Технологии и
машины обработки давлением»

Аспирантом С.А. Рогулиным (научный руководитель д.т.н., профессор Сосенушкин Е.Н.) выполнены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на повышение эффективности операции вальцовки как предварительно профилируемых заготовок, так и окончательных поковок, заключающиеся в разработке компьютерных моделей, с помощью которых проанализированы силовые параметры, НДС, температурные поля заготовок, а также обоснованы конструкторские решения и способы повышения надежности крепления и фиксации секторов-штампов на валах ковочных вальцов. Полученные аспирантом результаты внедрены в учебный процесс в курсах бакалавриата «Теория обработки металлов давлением», «Технология производства кузнечно-штамповочного

Начальник
учебно-методического
управления
К.Т.Н.  С.А. Тясто

Зав. кафедрой СПД
д.т.н.  Н.В. Коробова

Научный руководитель
д.т.н.  Е.Н. Сосенушкин

Аспирант  С.А. Рогулин

ПРИЛОЖЕНИЕ И

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер Кузнечного завода
ПАО «КАМАЗ»



Салимов А.Г.

« _____ » 2026 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы

Диссертационная работа «Совершенствование операции горячей вальцовки при предварительном и окончательном формоизменении удлиненных в плане поковок» аспиранта Рогулина Сергея Александровича (научный руководитель д.т.н., профессор Сосенушкин Е.Н) посвящена развитию теоретических положений операции вальцовки и решению конструкторско-технологических задач, связанных с эксплуатацией ковочных вальцов. Разработаны новые варианты технологических процессов горячей штамповочной вальцовки продольной и поперечной, новые конструкции устройств и способов крепления и фиксации секторов-штампов на рабочих валах, защищенных 9-ю патентами на изобретения, с учетом особенностей ковочных вальцов консольного типа.

Полученные аспирантом Рогулиным С.А. теоретические и экспериментальные результаты будут использованы на нашем предприятии при технологической подготовке производства поковок с удлиненной осью процессами горячей штамповочной вальцовки.

Начальник технологического отдела
обработки металлов давлением
Кузнечного завода, к.т.н.

 Низамов Р.С.

Заместитель директора по развитию –
главный технолог Кузнечного завода

 Карнилов А.Ю.