

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Факультет Материаловедения и металлургических технологий
Кафедра процессов и машин обработки металлов давлением

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ Л.В. Радионова

« _____ » _____ 20__ г.

Тема работы: «Исследование пластических свойств материалов, подвергаемых
обработке давлением с использованием нового устройства»

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

ЮУрГУ-22.03.02-2018-088-00.00.00 ПЗ

*Руководитель работы:
доцент, к.т.н.*

_____ / А.П. Пелленен/

*Автор работы
студент группы П-438*

_____ / Д.А. Вишняков/

Челябинск
2018

АННОТАЦИЯ

Вишняков Д.А. Исследование пластических свойств материалов, подвергаемых обработке давлением с использованием нового устройства: выпускная квалификационная работа. – Челябинск: ЮУрГУ, 2018, страниц – 44, библиографический список – 8 наименований, 19 – иллюстраций, 3 – таблиц.

Цель проведенного исследования, результаты которого предоставлены в настоящей выпускной квалификационной работе, заключается в разработке нового устройства для исследований пластических свойств металлов и сплавов и испытании нового устройства путем оценки исследований пластических свойств металлов и сплавов. Для достижения этой цели был проведен анализ методов и оборудования для исследований пластических свойств материалов и принципы их работы, применяющихся на сегодняшний день. Были разработаны 3D-модели процесса исследования пластических свойств материалов при изменении температуры нагрева, реализованных в QForm. Проведено экспериментальное исследование осадки металлических образцов аналогично задаваемым параметрам при моделировании в QForm. Произведена оценка сходимости результатов, полученных экспериментально и результатов конечно-элементной модели, полученных в QForm. Исходя из проведенных исследований были разработаны рекомендации по усовершенствованию оборудования.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ ОБОРУДОВАНИЯ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ	6
1.1. Испытание на растяжение	7
1.2. Испытание на сжатие.....	12
1.3. Испытание на кручение.....	15
1.4. Вывод.....	18
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАДКИ В QFORM	18
Вывод.....	23
3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ	24
3.1. Принцип работы нового устройства	25
3.2. 3D-моделирование работы нового устройства	28
3.3. Вывод.....	32
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОГО УСТРОЙСТВА	33
Вывод.....	37
5. ОЦЕНКА СХОДИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ	37
Вывод.....	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	40
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	42
ПРИЛОЖЕНИЕ	43

ВВЕДЕНИЕ

Исследование пластических свойств металлов и сплавов является основой производства продукции черной и цветной металлургии. Благодаря изучению пластических свойств имеются представления о деформируемости металлов и сплавов для составления различных технологических процессов обработки металлов давлением. Изучение характеристик металла основывается на влиянии внешних задаваемых параметров на протекание процессов ОМД. Для исследований пластических свойств необходимо специальное оборудования, с помощью которых осуществляется анализ свойств и характеристик металлов и сплавов. С развитием металлургии и появлением новой продукции также развивается отрасль металлургии по производству оборудования для исследований свойств материалов.

Настоящая работа посвящена разработке нового устройства для исследований пластических свойств металлов и сплавов, а также оценке его работоспособности. Разработка нового устройства велась при помощи Российского научно-исследовательского института трубной промышленности (РосНИТИ). Для оценки работоспособности нового устройства для исследований пластических свойств металлов и сплавов применялись компьютерные программы QForm и SolidWorks. С помощью QForm производилось 3D-моделирование процесса исследования пластических свойств металлических образцов в режиме сжатия для оценки сходимости результатов с первичными данными экспериментального исследования на новом устройстве. Также полученные результаты моделирования QForm являются обоснованием для выбора приспособления, которое осуществляет деформацию при проведении испытаний. SolidWorks применялась в целях оценки прочностных свойств нового устройства, в котором была составлена 3D-модель нового устройства и приложена нагрузка к определенным местам.

С помощью проведенных исследований были разработаны рекомендации по усовершенствованию нового устройства в направлении

автоматизации, тем самым обеспечена перспектива успешного применения разрабатываемого нового устройства в области исследований пластических свойств материалов.

1. АНАЛИЗ ОБОРУДОВАНИЯ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Мировой опыт исследования в сфере обработки металлов давлением (ОМД) составляет более 50 лет. На сегодняшний день разработаны и успешно применяются большое разнообразие методов исследования пластических свойств металлов. Данные методы испытаний предназначены для моделирования и последующего анализа различных процессов обработки металлов давлением. Исходя из полученных результатов испытания устанавливаются зависимости сопротивления пластической деформации от степени деформации, скорости деформации благодаря которым становится возможным описать то, как будут происходить те или иные процессы обработки металлов давлением (ковка, штамповка, прокатка, волочение, прессование).

Исследования проводятся в широком диапазоне температур для моделирования условий любых видов ОМД. Для этого имеется возможность при проведении исследований регулировать следующие параметры: температура деформации, скорость деформации, степень деформации, направление деформации. В результате становится возможным исследования влияние таких явлений, как пластическое упрочнение металлов (наклеп), разупрочнение металла в процессе пластической деформации при температурах, превышающих порог рекристаллизации. Испытания в условиях повышенных температур предназначены для моделирования процессов обработки металлов давлением, которые происходят в условиях температур, превышающих температуру рекристаллизации. Наблюдаются структурные изменения материала вследствие воздействия температуры и усилия, а значит одновременно протекают процессы упрочнения и разупрочнения, которые влияют на прочностные характеристики металла. Цель испытаний в таких условиях – это определение зависимости сопротивления пластической деформации от температуры, скорости деформации, степени деформации и времени.

Предварительная подготовка образцов – это обязательный этап перед испытаниями, который заключается в придании соответствующих форм и геометрических размеров образцов для каждого вида испытаний. Образцы должны соответствовать размерам и формам, требуемых в ГОСТ, изготавливаться и обрабатываться на металлорежущих станках [1, 2].

1.1. Испытание на растяжение

Метод испытания на растяжение является одним из самых распространенных способов определения механических свойств металлов. Испытания проводятся в соответствии с ГОСТ 1497 – 84 с целью определения зависимости сопротивления пластической деформации от таких параметров, как: степень деформации, время, скорость деформации, температура. Задача такого испытания заключается в моделировании и изучении, на основе полученных данных, процессов обработки металлов давлением, например, волочение, прокатка, то есть процессы, в которых металлы испытывают растяжение. Сущность метода заключается в следующем. Образец с известным соотношением размеров рабочей части $l_0/d_0 = 5...10$ растягивают усилием P . По ходу опытов в каждый момент времени регистрируют усилие деформирования P образца и величину абсолютного его удлинения $\Delta l = l - l_0$. [3]

Сопротивление пластической деформации определяют по формуле:

$$\sigma_s = \frac{P}{F}, \quad (1)$$

где P – усилие, F – площадь поперечного сечения образца

Степень деформации:

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0}, \quad (2)$$

где l – конечная длина образца, l_0 – начальная длина образца

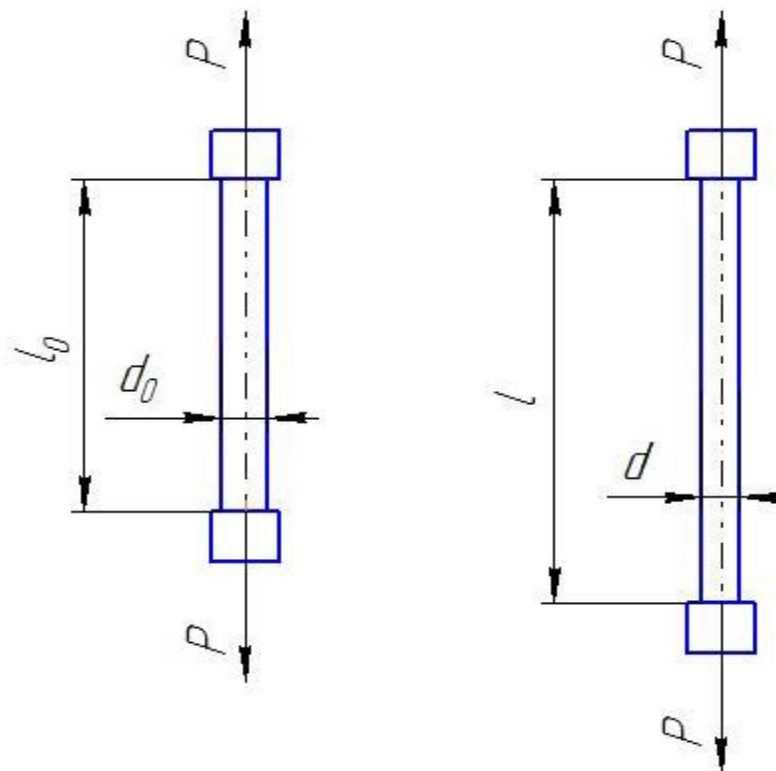


Рисунок 1 – Растяжение образца

Относительное удлинение:

$$\delta = \frac{l-l_0}{l_0} * 100\%; \quad (3)$$

Относительное сужение:

$$\psi = \frac{F_0-F}{F_0}, \quad (4)$$

где F_0 – начальная площадь поперечного сечения образца, F – конечная площадь поперечного сечения образца.

Определения сопротивления пластической деформации методом растяжения можно определить с помощью пластометра НИИМ, который находится в эксплуатации с 1971 года. Пластометр рассчитан на высокие нагрузки, что позволяет проводить испытания над труднодеформируемыми сплавами как при комнатной температуре образца, так и в условиях повышенных температур ($T \geq T_{\text{рекр}}$).

Технические характеристики пластометра:

- привод – двигатель постоянного тока (19 кВт, 1500 об/мин) с системой двухступенчатых редукторов, ременной и цепной передач; скорость деформации образцов – от 0,1 до 10 с⁻¹;

- максимальное усилие деформации – 6 т;
- максимальный рабочий ход – 45 мм;
- температура испытаний – до 1300 °С.

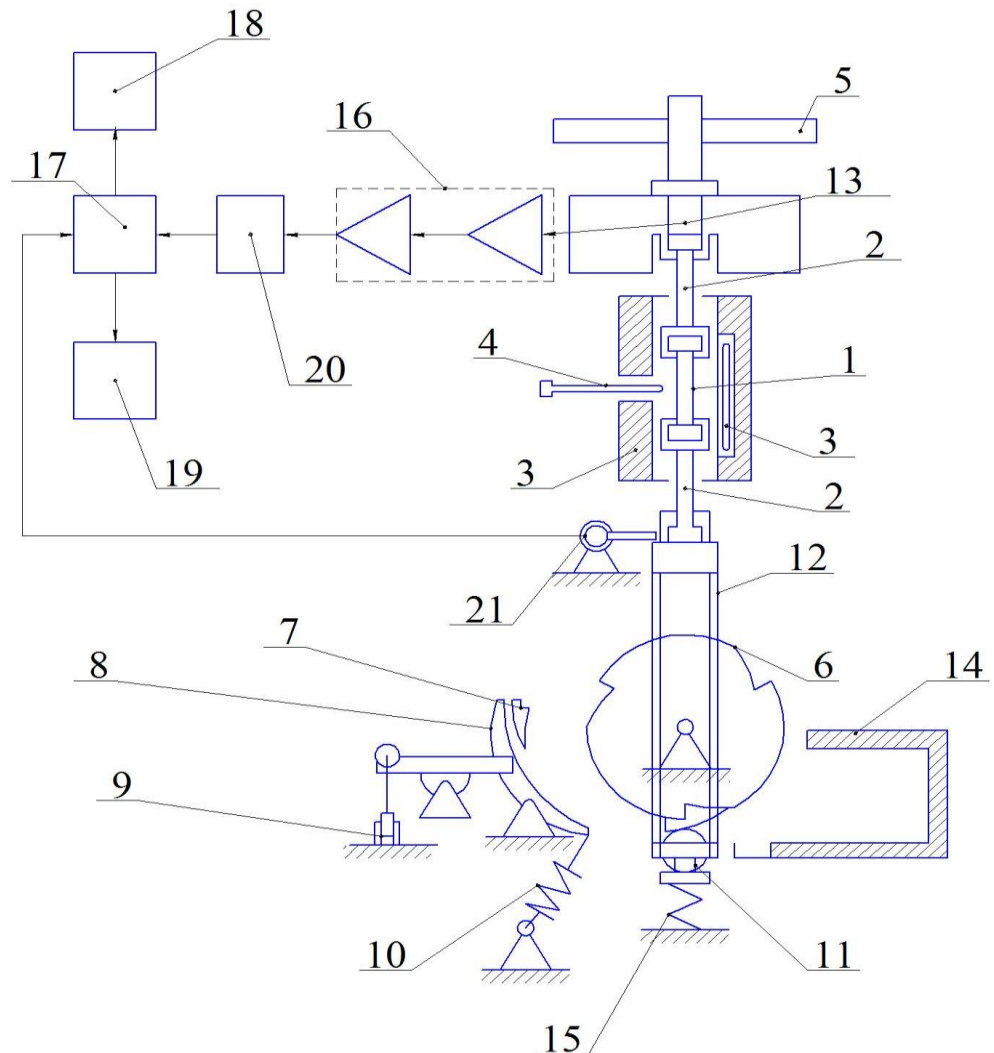


Рисунок 2 – Принципиальная схема пластометра НИИМ: 1 – образец; 2 – захваты; 3 – печь, силит; 4 – термопара; 5 – штурвал; 6 – задающее устройство; 7 – кулачок-клин; 8 – ведущий диск; 9 – соленоид; 10, 15 – пружины; 11 – ролик-копир; 12 – тяг; 13 – месдоза; 14 – приемная коробка; 16 – тензоусилитель; 17 – ЭВМ; 18 – дисплей; 19 – принтер; 20 – аналогоцифровой прибор; 21 – ходограф (ПДФ).

После нагрева и выдержки, образец вместе с печью задается в зацепы тяг, штурвалом выбираются люфты между зацепами с захватом и образцом.

Включается двигатель привода рабочего диска. Ведущий диск вращается с заданной частотой, с помощью регулятора скорости двигателя, обратной связи тахогенератора и системы передач. Рабочий ролик - копир с тягами перемещается в вертикальном направлении, растягивая образец, благодаря отделяющемуся кулачку (клину), который проталкивается вырезами диска между самим диском и роликом-копиром. Кулачок задается рычажным устройством, срабатывающим от фотореле.

Устройством для измерения усилия растяжения образца служит месдоза с тензометрическими датчиками собранными в две полумостовые схемы.

С рабочего полумоста аналоговый сигнал, пропорциональный усилию растяжения, поступает на тензоусилитель, затем на аналогоцифровой преобразователь (АЦП) и на электронно-вычислительную машину (ЭВМ). После обработки данных результаты измерения усилия деформации в зависимости от степени деформации выводятся на дисплей в цифровой форме. После разрыва образцы охлаждаются в воде для закрепления структуры.

Из импортного оборудования для исследований пластических свойств материалов имеет успех продукция Zwick/Roell, которая производит передовые испытательные оборудования. Из широкого спектра оборудования данного предприятия можно выделить испытательные машины, в которых нагревательная печь установлена непосредственно в самой машине. Благодаря такой конструкции, можно проводить испытания на растяжение как при комнатной температуре, так и при повышенной. Для испытаний при комнатной температуре такие компоненты, как высокотемпературная печь и высокотемпературный экстензометр просто выводятся из рабочей зоны. Благодаря применению составной печи, используемы тяги можно легко вводить и извлекать с помощью системы быстрой замены. Высокотемпературная система состоит из трех основных компонентов:

- высокотемпературной печи с поворотным механизмом и высокотемпературным регулятором;
- высокотемпературного экстензометра, также оснащенного механизмом для простого вывода из рабочей зоны;
- Линии нагружения, включающей в себя соединительные элементы для системы быстрой замены на испытательной машине, тяги, через которые в печь подается усилие растяжения, и адаптеры для образцов на концах тяг

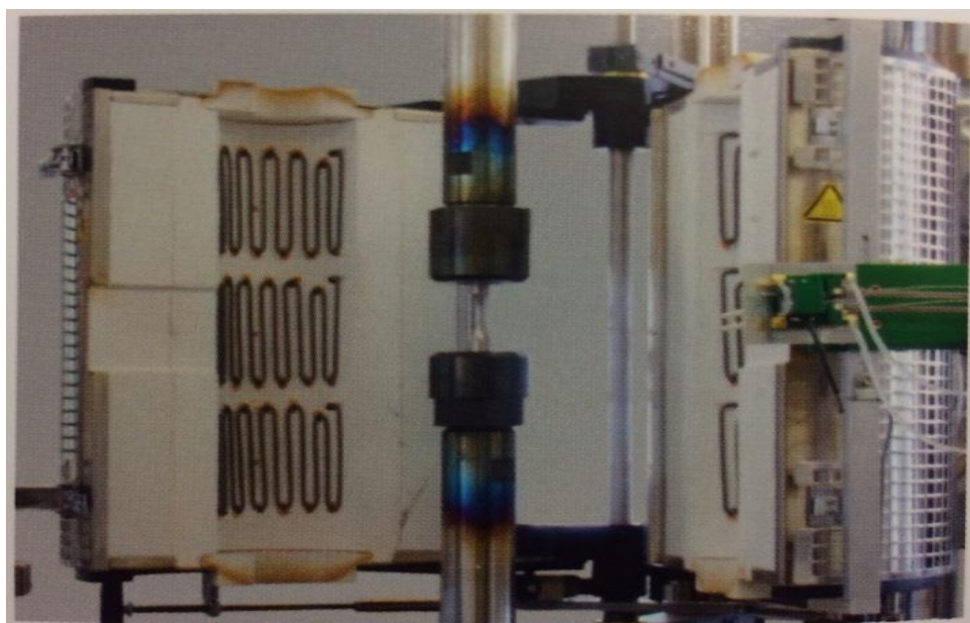


Рисунок 3 – Сервогидравлическая машина с высокотемпературной печью

Для испытаний используются образцы с резьбой, которые устанавливаются на тяги. Для испытаний этих образцов в температурном диапазоне до 1200 °С применяются стандартные адаптеры из различных материалов [4]

Преимущества:

- применение современных методов проведения испытаний;
- широкий диапазон температур;
- удобство использования благодаря наличию составных частей;

высокая точность полученных результатов

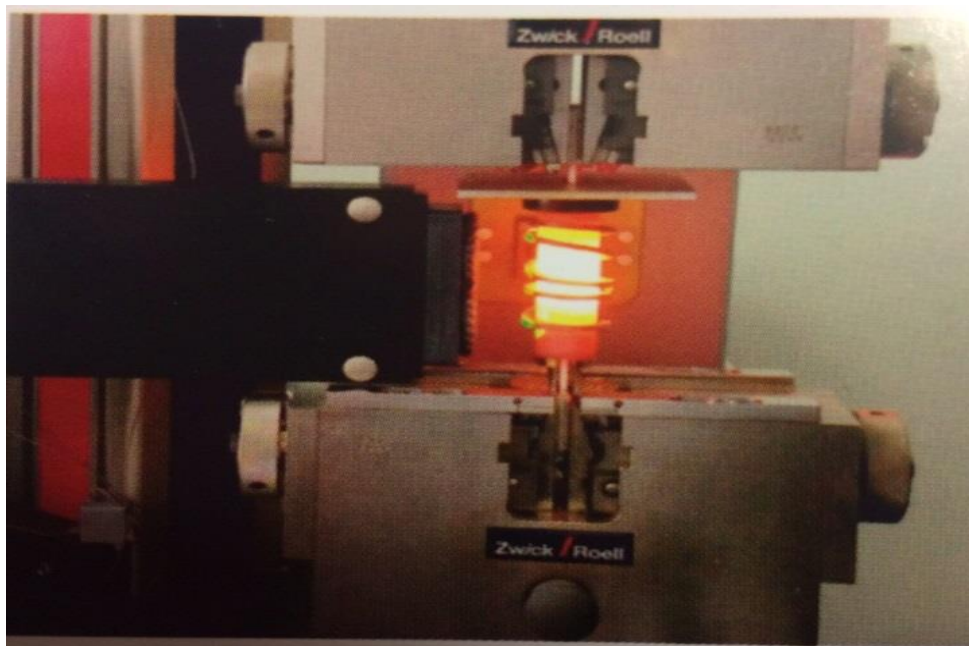


Рисунок 4 – Индукционная нагревательная система

Недостатки:

- высокая стоимость.

1.2. Испытание на сжатие

Пластическое сжатие имеет широкое применение в операциях обработки металлов давлением. Процессыковки, штамповки, прессования, листовой прокатки включают в себя процесс сжатия.

Метод сжатия, в отличие от метода растяжения, позволяет осуществлять деформацию до значительно больших величин. Соотношение высоты к диаметру у образца должно составлять от 1...2.[1]

Ход испытания осуществляется таким образом: образец помещают между двумя бойками пластометра, далее прикладывается усилие P , образец сжимается до определенных значений.

При испытаниях в обычных условиях наблюдается явление упрочнения, то есть сопротивление деформации возрастает в зависимости от степени деформации. По результатам испытаний составляется кривая упрочнения.

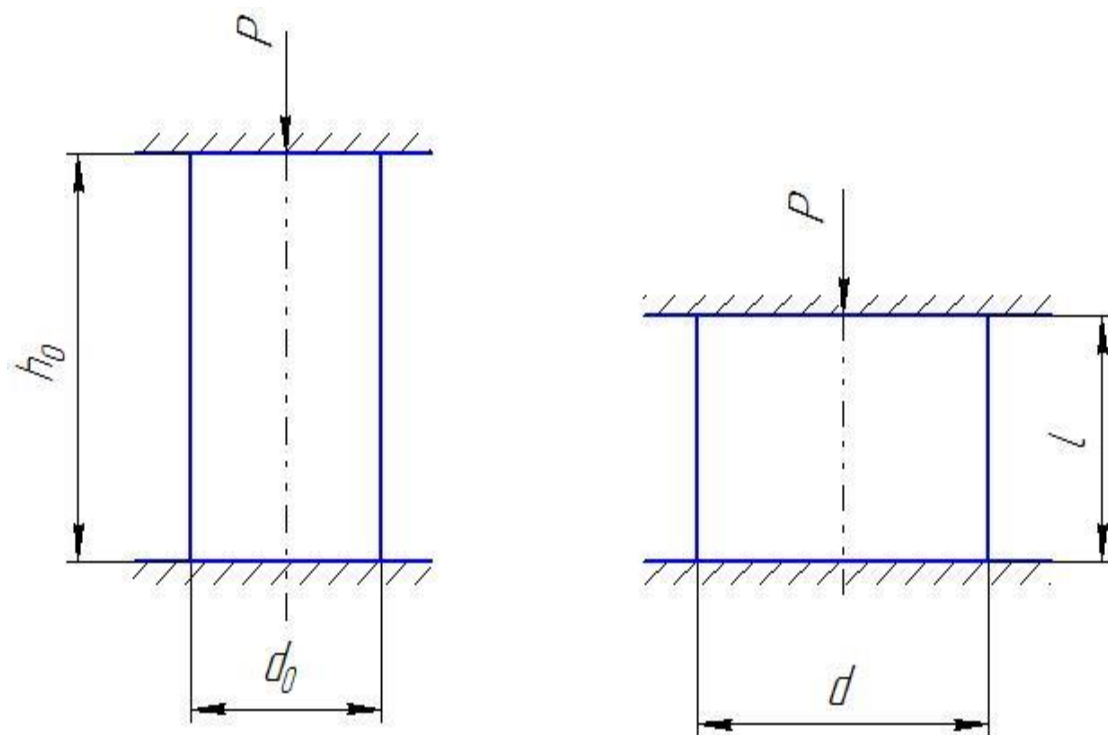


Рисунок 5 – Сжатие образца

В условиях повышенных температур ($T \geq T_{\text{рекр}}$) наблюдаются одновременно 2 явления: упрочнение и разупрочнение материала. По результатам проведенного испытания устанавливается зависимость сопротивления деформации от температуры, от степени деформации, скорости деформации. На основании полученных результатов осуществляется моделирование процессов горячего прессования,ковки, горячей штамповки, горячей прокатки. Для проведения испытаний на сжатие существует множество пластометров, один из них – пластометр для исследования деформируемости металлов, созданный сотрудниками кафедры Процессы и машины обработки металлов давлением Южно–Уральского государственного университета. Данный пластометр предназначен для испытаний металлов и сплавов в режиме однократного или дробного сжатия [5].

Техническая характеристика пластометра:

- Степень деформации – 5...85%.
- Скорость деформации – 0,1...100 с⁻¹.
- Температура нагрева образцов – 20...1350 °С.

- Количество рабочих кулачков – 3 шт.
- Количество обжатий одним кулачком – 1...10.
- Максимально допустимое усилие деформации – 200 кН.
- Время пауз при дробной деформации – 1 с и более. [4]

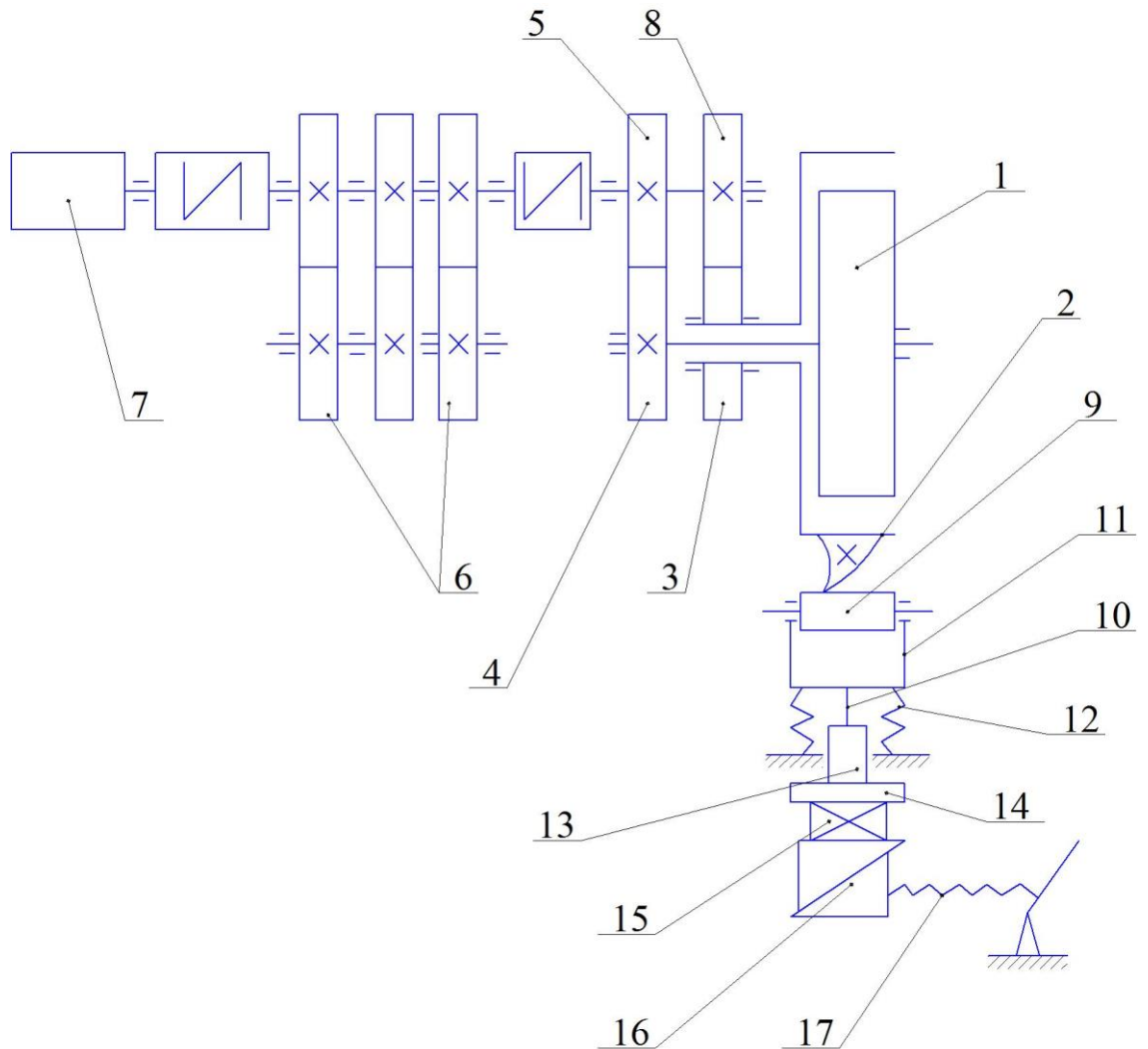


Рисунок 6 – Кинематическая схема пластометра ЮУрГУ

1 – диск; 2 – барабан; 3 – раздаточная коробка; 4, 5, 6, 8 – зубчатые колеса; 7 – электродвигатель; 9 – ролик; 10 – шток; 11 – нажимная подушка; 12 – пружины; 13 – контейнер; 14 – опорная деталь; 15 – датчик усилия; 16 – клиновой механизм; 17 – пружина

Преимущества:

- простота конструкции
- простота в эксплуатации и обслуживании

Недостатки:

- сложность при транспортировке из-за больших размеров
- искажение данных при испытании нагретых образцов вследствие отдельностоящих печей для нагрева образцов (в процессе транспортировки образца из печи в контейнер пластометра невозможно отследить снижение температуры).

Главным недостатком испытания на сжатие является невозможность точной оценки сил трения, возникающих между поверхностями инструмента и испытываемого образца. Даже при наличии смазки между контактными поверхностями часто не удается избежать искажения боковой поверхности (бочкообразования) [3].

1.3. Испытание на кручение

Испытание на кручение значительно реже осуществляется в сравнении с испытаниями на сжатие и растяжение. Данному испытанию подлежат материалы, которые в дальнейшем будут испытывать на себе кручение на определенных этапах обработки металлов давлением или при эксплуатации уже готового изделия. Главным преимуществом испытания на кручение является возможность осуществлять большие деформации с нарастающей скоростью сравнительно с другими испытаниями. Однако этот метод требует усовершенствования с целью исключения недостатков, связанных с неравномерными распределениями величины и скорости деформации по сечению образца [6].

При испытаниях к утолщенным головкам образца прикладываются 2 одинаковых момента вращения противоположных по направлению в плоскостях, перпендикулярных к оси образца.

Также существуют комбинированные испытания, такие как растяжение-кручение, сжатие-кручение. Данные виды испытаний редко осуществляются и применяются для моделирования сложных процессов

обработки металлов давлением, например: изготовление трубы горячим прессованием с внутренним винтовым оребрением. Для проведения подобных сложных испытаний существует *Исследовательский комплекс «Gleeble 3800»*. Данный модуль является самым широкофункциональным, реализует одноосную деформацию растяжением, сжатием, кручением и характеризуется наибольшими скоростями нагрева и охлаждения образцов. Позволяет моделировать процессы плавления и кристаллизации, воспроизводить ударные тепловые воздействия, выполнять опыты на растяжение и сжатие при повышенных температурах, выполнять дилатометрические исследования, реализовывать режимы термической обработки в широком диапазоне параметров.

Socket Jaw – модуль для высокотемпературных испытаний по схеме одноосного растяжения/сжатия, снабжен оснасткой для высокоскоростной дилатометрии и моделирования термических циклов сварки, обладает следующими техническими характеристиками:

- максимальная скорость нагрева – не менее 10000 °C/с;
- максимальная скорость охлаждения – до 10000 °C/с;
- скорость передвижения подвижной траверсы – до 2,5 м/с;
- усилие сжатия – до 200 кН;
- усилие растяжения – до 10 кН;
- максимальная температура – 1750 °C;
- контроль деформации по двум направлениям.

Hydrawedge – модуль для моделирования ударного нагружения образцов с высокой точностью по степени и скорости деформации. Специальная конструкция модуля позволяет выполнять многостадийные последовательные нагружения аналогичные режимам деформации на любом прокатном стане.



Рисунок 7 – Модуль Hydrwedge

Torsion – модуль для испытаний на кручение, позволяющий осуществлять деформацию поэтапного скручивания образца в одном направлении с возможностью приложения осевой нагрузки

Основные технические характеристики:

- максимальное количество оборотов: 90;
- максимальное усилие растяжения: 9 кН;
- максимальная температура: 1750 °С;
- максимальное усилие кручения: 1500 Нм
- скорость кручения: до 1500 об/мин;

Преимущества исследовательского комплекса Gleeble 3800 :

- возможность испытывать образцы под разными типами нагрузок
- возможность проводить испытания в разных условиях (высокие температуры, вакуум)
- высокая точность измерительных приборов

- высокая точность полученных результатов при проведении испытаний
- отсутствие больших сложностей при транспортировке и смены модулей

Недостатки:

- высокая стоимость установки, запасных частей и обслуживания

1.4. Вывод

Из анализа характеристик представленного оборудования выявлены их главные недостатки на данный момент: высокая стоимость и габариты.

Из методов испытания, самый применяемы это метод сжатия, так как с помощью этого метода можно достичь больших степеней деформации по сравнению с методом растяжения и является наиболее распространенным как вид деформации по сравнению методом кручения. Таким образом представляет практический интерес разработать устройство которое может служить альтернативой известному оборудованию и устранило бы выявленные основные недостатки.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАДКИ В QFORM

В ходе разработки нового устройства для получения первичных данных используется 3D моделирование процесса осадки с помощью компьютерной программы QForm.

QForm является полнофункциональным объектно-ориентированным приложением Windows. Простой и интуитивно понятный графический интерфейс делает систему доступной и легкой в использовании для пользователей персональных компьютеров. Благодаря наличию анимационной системы помощи и подсказки система удобна в изучении.

Полностью интегрированная архитектура QForm обеспечивает синхронное выполнение работ любой части программы. Визуализация процессов формоизменения происходит одновременно с расчетом, что

позволяет немедленно интерпретировать получаемые результаты и вносить в процесс исследования необходимые изменения.

QForm обеспечивает автоматическое формирование расчетных моделей (разбиение на конечные элементы), что позволяет обеспечить высокую точность расчета.

QForm позволяет проанализировать всю технологическую цепочку получения поковки, включая нагрев, охлаждение и пластическое деформирование на всех переходах, изменение свойств материала. Имитационное моделирование такой технологической цепочки выполняется автоматически и дает достаточно обширную информацию для быстрого и эффективного анализа.

Одной из целей применения компьютерного моделирования в данной работе, учитывая механические свойства металлов и сплавов, является составление требования к новому устройству по его способности развивать соответствующие силовые показатели для обеспечения проведения исследования пластических свойств металлов и сплавов, а значит необходимо выявить показатели усилий, которые требуются для деформирования образцов. Температура существенно влияет на структуру и механические свойства металла, поэтому исследование процесса осадки следует проводить при разных показателях температуры. Помимо температуры влияние на протекание процессов ОМД оказывает скорость деформации и степень деформации. На основании параметров, влияющих на процесс деформации, будет составляться анализ и последующие решения по обеспечению достаточных показателей развиваемого усилия для исследования пластических свойств металлов и сплавов..

Согласно методике проведения пластометрических исследований [7], берутся цилиндрические образцы соотношение высоты к диаметру которых составляет 1,5-1,6. Таким образом для данного исследования применяются образцы высотой $h_0 = 15$ мм и диаметром $d_0 = 10$ мм. В качестве материала испытуемых образцов в данной работе используется сталь 20,

принадлежащая к классу углеродистых сталей. Моделирование процесса осадки проводилось задавая параметры температуры от 800 до 1100°C при скорости перемещения инструмента $2,27 \text{ с}^{-1}$ и степени деформирования на протяжении всего исследования для всех образцов, которая составляет 30%. В качестве инструмента были выбраны несжимаемые пластины, имитирующие контейнер пластометра, куда помещается образец во время нагрева и дальнейшего сжатия для минимизации потерь температур во время испытания образца на сжатие.

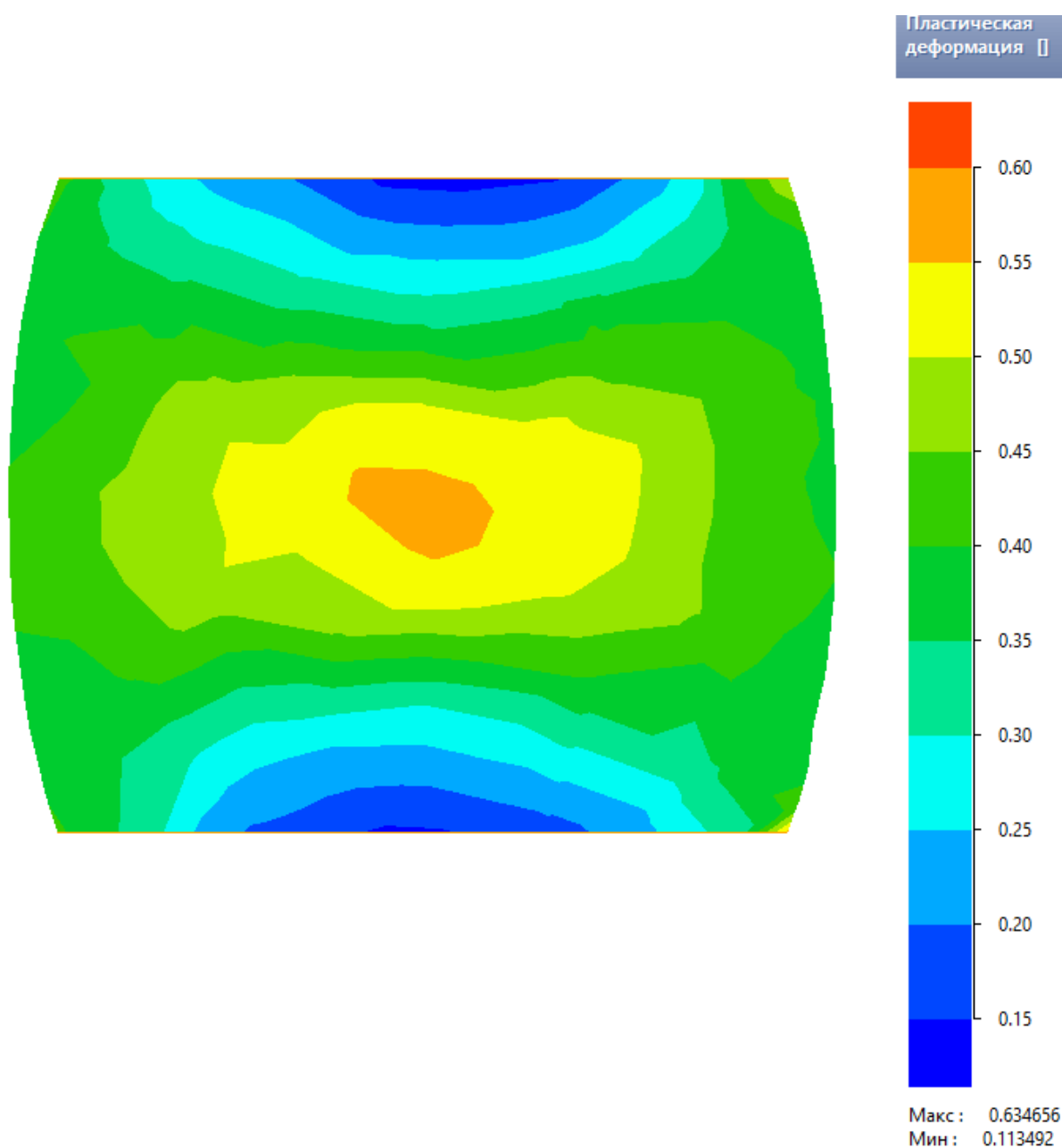


Рисунок 8 – Показатели пластической деформации 20 при осадке стали при $t=800^\circ\text{C}$

На рисунке 8 изображена модель деформированного образца в разрезе, из которого видно, что наибольшая величина пластической деформации образуется в центре образца, которая составляет 0,55%. Степень деформации уменьшается по мере отдаления от центра образца. Минимум пластической деформации зафиксирован у поверхностей контакта образца с инструментом. Данное явление объясняется наличием сил трения между поверхностью образца и поверхностью инструмента, вследствие чего наблюдается бочкообразование цилиндрического образца.

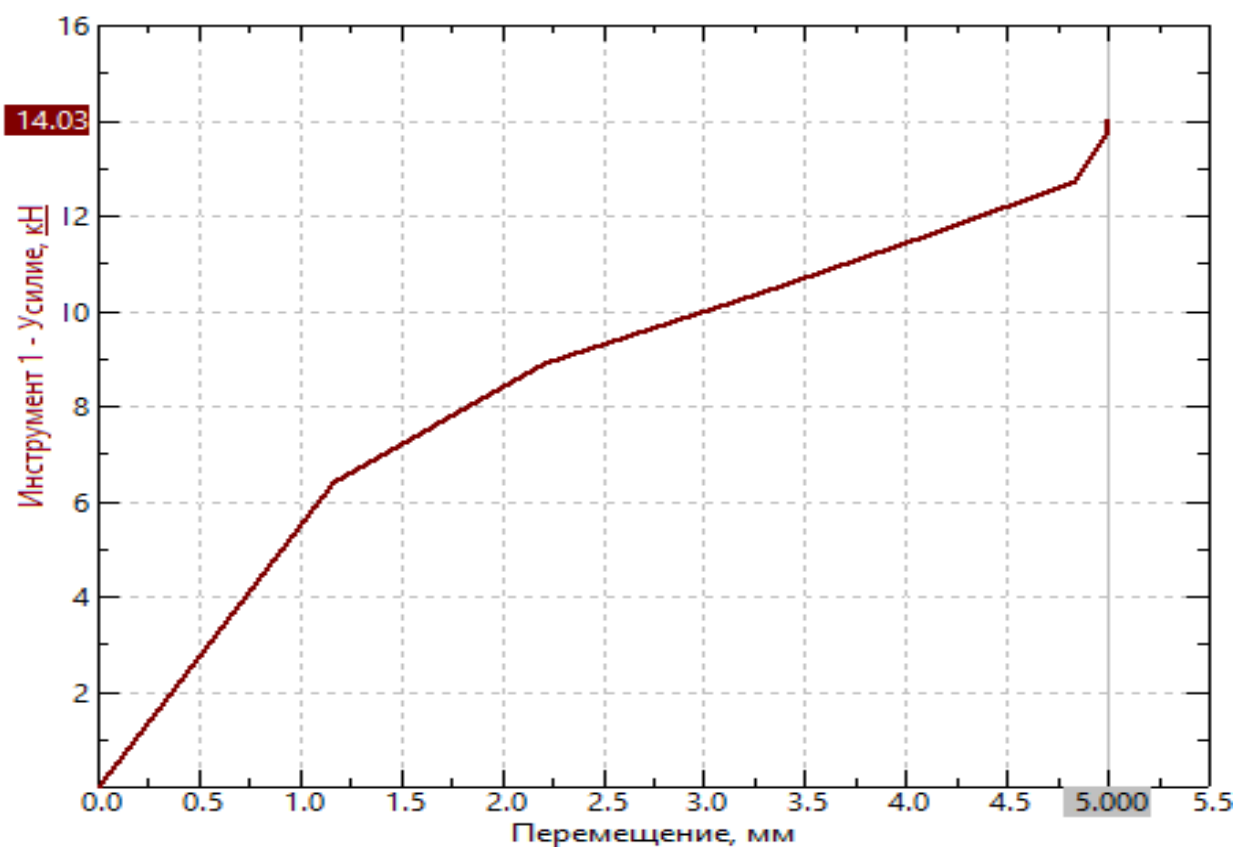


Рисунок 9 – График зависимости усилия от изменения высоты образца

Важным показателем при исследовании пластических свойств металлов и сплавов является усилие, с которым деформируется образец. На рисунке 9 приведен график зависимости усилия от расстояния, на которое сжимается образец при 800°C. Из графика, составленного по результатам моделирования процесса осадки с использованием программы QForm, следует, что с увеличением перемещения сжимающего инструмента увеличивается показатель усилия, воздействующего на образец. Данное

явление свидетельствует об образовании наклепа, наблюдаемое в структуре образца или иными словами упрочнение, по мере увеличения которого увеличивается усилие, необходимое для осуществления деформации образца до требуемой величины степени деформации.

В таблице 1 приведены результаты компьютерного моделирования, где U_d – скорость деформирования; ϵ_d – степень деформирования (5 мм); t – температура нагрева образца; P – усилие; S – площадь поперечного сечения; σ_s – сопротивление деформации.

Таблица 1 – Результаты компьютерного моделирования осадки образца стали 20

U_d, c^{-1}	ϵ_d	$t, ^\circ C$	$P, кН$	$S, мм^2$	$\sigma_s, МПа$
2,27	0,3	800	14,03	126,21	111,16
		900	11,55	124,6	92
		1000	9,17	125,41	73,12
		1100	7,4	126,47	58,5

Сопротивление деформации определялось из полученных результатов усилий и площадей сечения образцов, рассчитанных по формуле (1), соответствующих каждой температуре.

График изменения усилий по мере увеличения температуры представлен на рисунке 10

Сравнивая показатели усилия при 800 и 1100 °С на рисунке 8 видно, что усилие при 1100 °С (7,4 кН) примерно в два раза меньше, чем при 800 °С (14,03 кН).

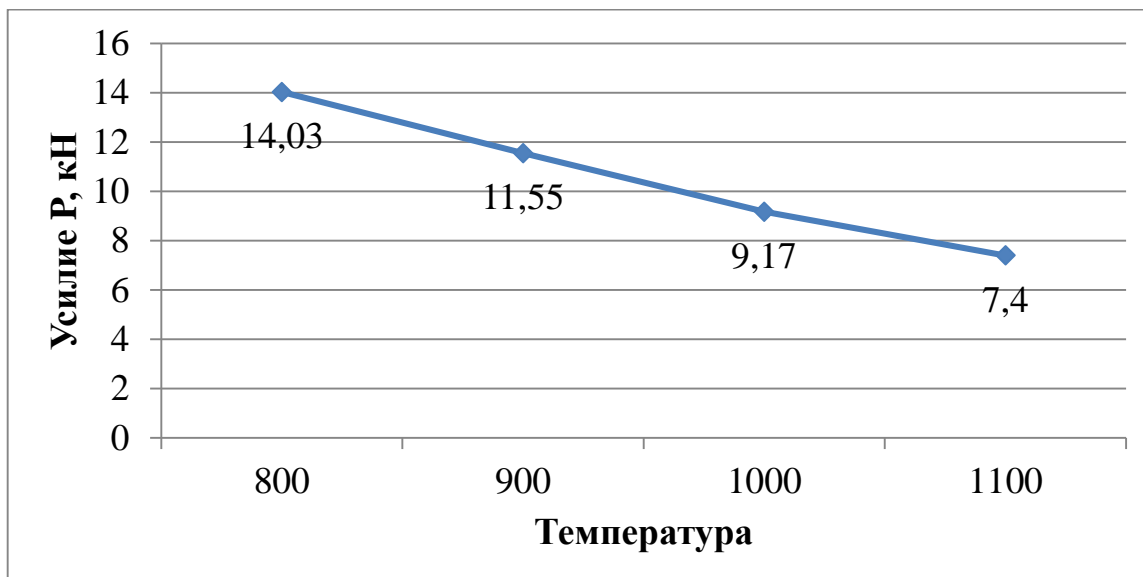


Рисунок 10 – График зависимости усилия от температуры

Аналогичная ситуация наблюдается при зависимости сопротивления деформации от температуры (рисунок 11)

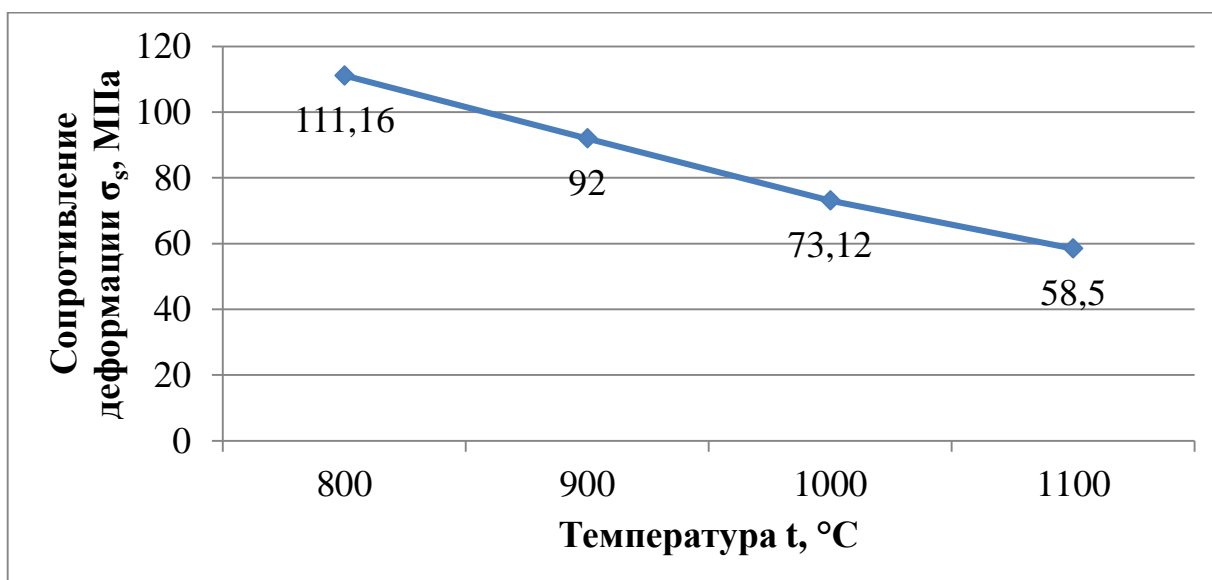


Рисунок 11 – Зависимость сопротивления деформации от температуры

Показатели сопротивления деформации при 800°C превышают показатели при 1100°C примерно в 2 раза. Это явление обусловлено воздействием температуры на структуру стали, где проходят одновременно упрочняющие и разупрочняющие процессы.

Вывод

С помощью результатов конечно-элементной модели, реализованной в QForm были получены результаты усилий и сопротивления деформации.

Также установлены влияния температуры на процесс деформации, что говорит о целесообразности применения данной компьютерной программы.

Графики зависимости усилия от температуры и снимки результатов степени деформации представлены в графическом материале.

3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Анализируя характеристики известного на сегодняшний день оборудования для исследования пластических свойств металлов и сплавов, основной целью разработки нового устройства для исследования деформируемости материалов является создание простейшей конструкции относительно малых габаритных размеров. Для проведения исследований, помимо самой установки, необходимо: вспомогательное оборудование для нагрева образцов (печь), электронно-вычислительная машина (ЭВМ) и измерительные приборы (месдоза), которые в совокупности вместе с новым устройством позволяли бы обеспечить все необходимые условия для проведения испытаний, такие как температура, развиваемое усилие, достаточное для деформирования, регистрация усилия, а также обработку результатов исследований для последующего анализа. Тем самым наличие вспомогательного оборудования, ЭВМ и измерительных приборов вместе с установкой образует комплекс для исследований пластических свойств металлов и сплавов. Одно из условий разработки нового устройства состоит в том, чтобы максимально ограничиться в плане материальных средств, затрачиваемых на разработку, элементы устройства и выполнение работ по обработке элементов конструкции.

В качестве элементов конструкции последующем выбирались детали простейших форм и небольших размеров, не требующие большого объема работ по их обработке (отверстия, шлифование) и изготовлении на специализированных предприятиях. Материалы элементов конструкции в основном состоят из углеродистой стали, которая сочетает приемлемые

показатели прочности, твердости и пластичности в совокупности в рамках условий работы данного пластометра.

Из предыдущей главы, где описывается компьютерное 3D моделирование процесса осадки образцов, известны прикладываемые усилия для сжатия образцов, следовательно, в качестве привода осуществляемого процесс сжатия был выбран гидравлический домкрат, развиваемый максимальное усилие – 100 кН, что удовлетворяет требуемым показателям усилия. Выбор гидравлического домкрата обусловлен тем, что данный элемент установки является довольно распространенным и доступным изделием, и, в случае необходимости, есть возможность его оперативно заменить по причине неисправности или в целях усовершенствования конструкции. Также основанием для выбора гидравлического домкрата является возможность для моментального монтажа и демонтажа данного элемента, что обеспечивает функционирование установки без длительных периодов задержки по техническим причинам. Еще одна важная особенность, на которой основывается выбор гидравлического домкрата в качестве привода – это отсутствие надобности подключения к источникам питания, что исключает затраты на электроэнергию и облегчает задачу размещения всей установки.

К пластометру прилагается отдельностоящая печь, в которой образцы нагреваются перед испытанием. Печь расположена в максимальной близости с установкой для того, чтобы время переноса контейнера с образцом из печи в пластометр занимало несколько секунд, что минимизирует потери тепла металлического образца для успешного проведения исследования.

3.1. Принцип работы нового устройства

Новое устройство представляет собой портативную установку для проведения пластометрических испытаний в режиме сжатия (рисунок 12).

Лист № 1 (б) выполняет функцию неподвижной пластины, на которой установлен гидравлический домкрат и прикреплены 3 стойки (12) резьбовым соединением. На листе № 1 выполнена выемка под основание

гидравлического домкрата и отверстия под стойки, расположенные равноудалено от центра листа и на 120° друг от друга по диаметру 300 мм.

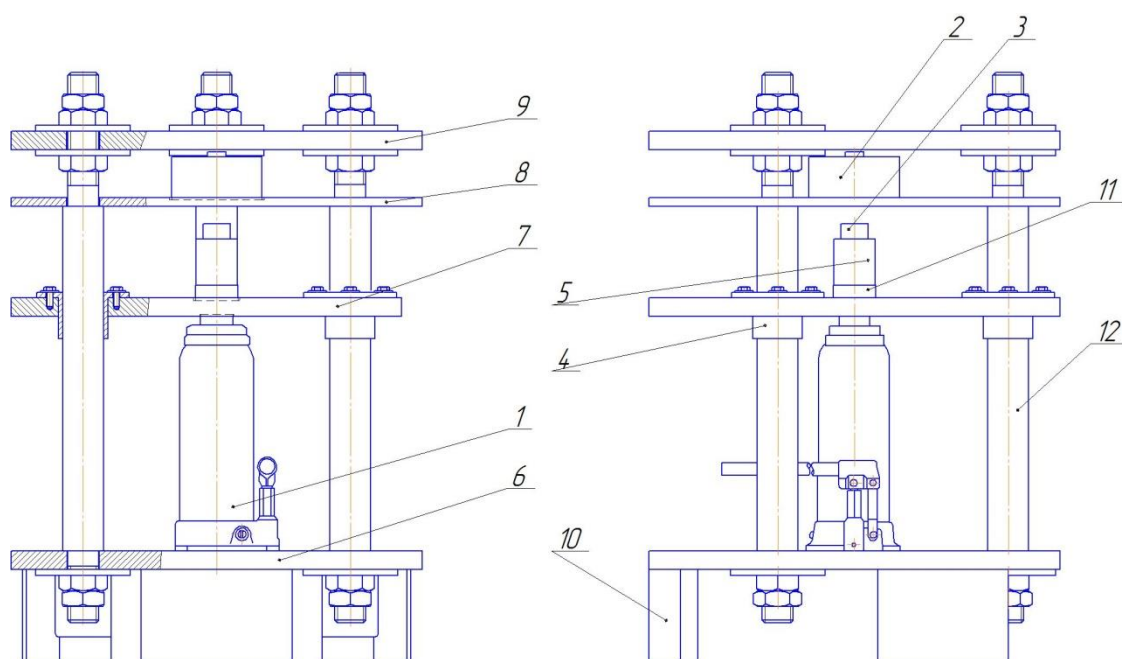


Рисунок 12 – Пластометр: 1 – гидравлический домкрат бутылочного типа; 2 – тензометрический датчик усилия; 3 – боек; 4 – втулка; 5 – втулка контейнера; 6 – лист №1; 7 – лист №2; 8 – лист №3; 9 – лист №4; 10 – основание; 11 – основание контейнера; 12 – стойка

Лист № 2 (7) установленный на трех втулках (4) материала БрАж выполняет функцию передвигающейся платформы, на которой установлен контейнер. Снизу на лист № 2 действует усилие со стороны гидравлического домкрата, с помощью которого осуществляется поднятие до упора контейнером в лист № 3 (8).

Контейнер состоящий из основания (11), втулки (4) и бойка (3), предназначен для помещения в него образца и минимизации потерь тепла образца при перемещении из печи в пластометр. Все три части контейнера выполнены из труднодеформируемого жаропрочного сплава 20Х23Н18, рабочая температура которого составляет 1100°C .

Лист № 3 (8) установлен на буртах стоек (12), который также может перемещаться под действием усилия со стороны гидравлического домкрата.

Лист №4 (9) представляет собой жестко закрепленную к стойкам посредством резьбового соединения неподвижную пластину (аналогично

листу №1). Между листами №3 и №4 вплотную установлен тензометрический датчик усилия (2), подсоединенный к компьютеру, позволяющий контролировать процесс деформации образца.

Гидравлический домкрат (1) бутылочного типа (рисунок 13) осуществляет нагрузку путем воздействия на рычаг, максимальное усилие составляет – 100 кН. На домкрате имеются отметки, с помощью них производится контроль перемещения пластины №2.

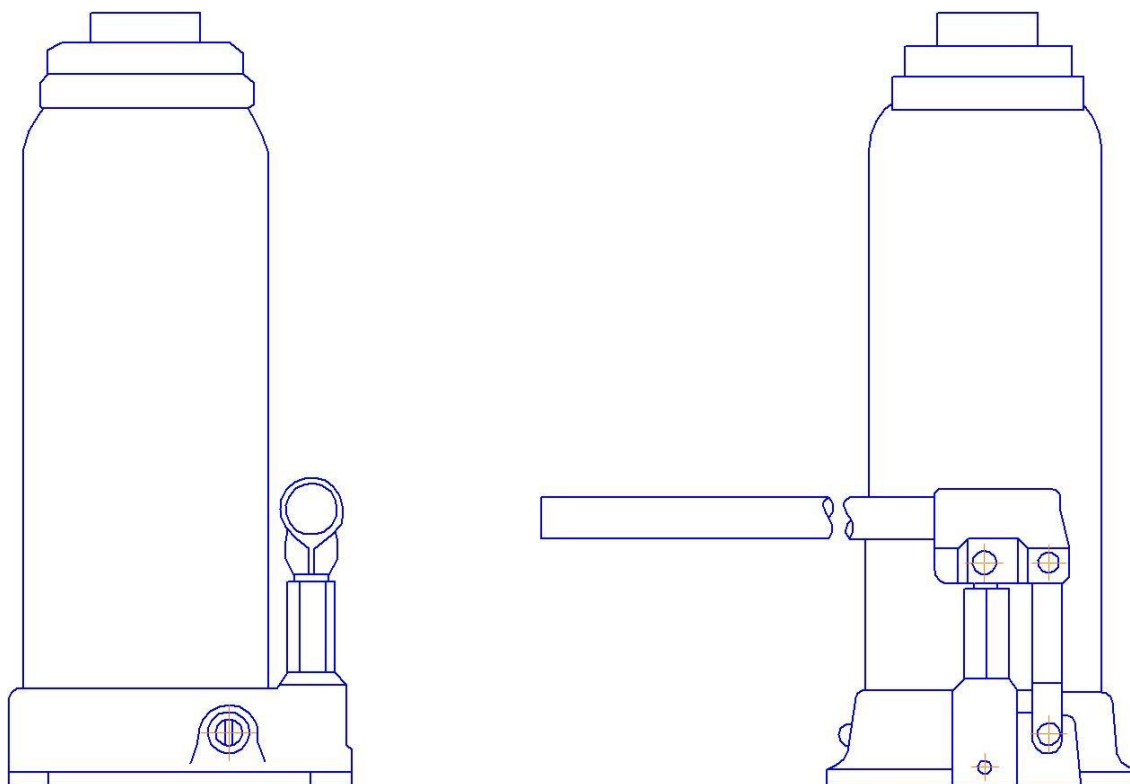


Рисунок 13 – Гидравлический домкрат бутылочного типа

Высота пластометра составляет 573 мм, ширина – 400 мм, что является примечательным параметром в плане удобства размещения и транспортировки.

Скорость перемещения штока гидравлического составляет $2,27 \text{ с}^{-1}$. Данная величина скорости была получена путем вычисления исходя из среднего времени (22 с) и расстояния (50 мм), за которое поднимается поршень домкрата.

Исходя из конструктивных особенностей и размеров пластометра следует обратить внимание на преимущества данной установки:

- компактность;

- простота конструкции;
- низкая стоимость

Данная установка является альтернативой для дорогостоящего и крупногабаритного оборудования для измерения пластических свойств металлов и сплавов.

3.2. 3D-моделирование работы нового устройства

В процессе разработки различных процессов и оборудования, необходимо иметь теоретические данные о разрабатываемом объекте и составить анализ на основе этих теоретических данных, что помогает приблизиться к осуществлению изготовления объекта. На данном этапе можно выявить уязвимые места и недостатки разрабатываемого объекта, в последующем устранить их путем усовершенствования. В настоящее время помимо классических расчетов, существуют системы автоматизированного проектирования (САПР), которые позволяют достаточно быстро моделировать различные процессы и облегчают проектирование объектов. В процессе разработки пластометра, как и любого другого объекта, важно иметь представление о способности конструкции выдерживать нагрузки различного характера. По характеру действия нагрузки бывают статические и динамические. Данная установка, а точнее ее элементы испытывают только статическую нагрузку, что упрощает задачу моделирования.

Для моделирования нового устройства применялась система автоматизированного проектирования SolidWorks, с помощью которой была создана 3D модель данного устройства с учетом всех конструктивных особенностей и размеров всех элементов (рисунок 14).

Главными задачами этапа моделирования пластометра в данной работе являются:

- применение максимальной нагрузки развиваемой гидравлическим домкратом согласно принципу работы установки;
- визуальная оценка поведения конструкции;

- оценка показателей деформации некоторых элементов установки;
- анализ на основе сравнения приведенных данных по показателям деформации элементов ;

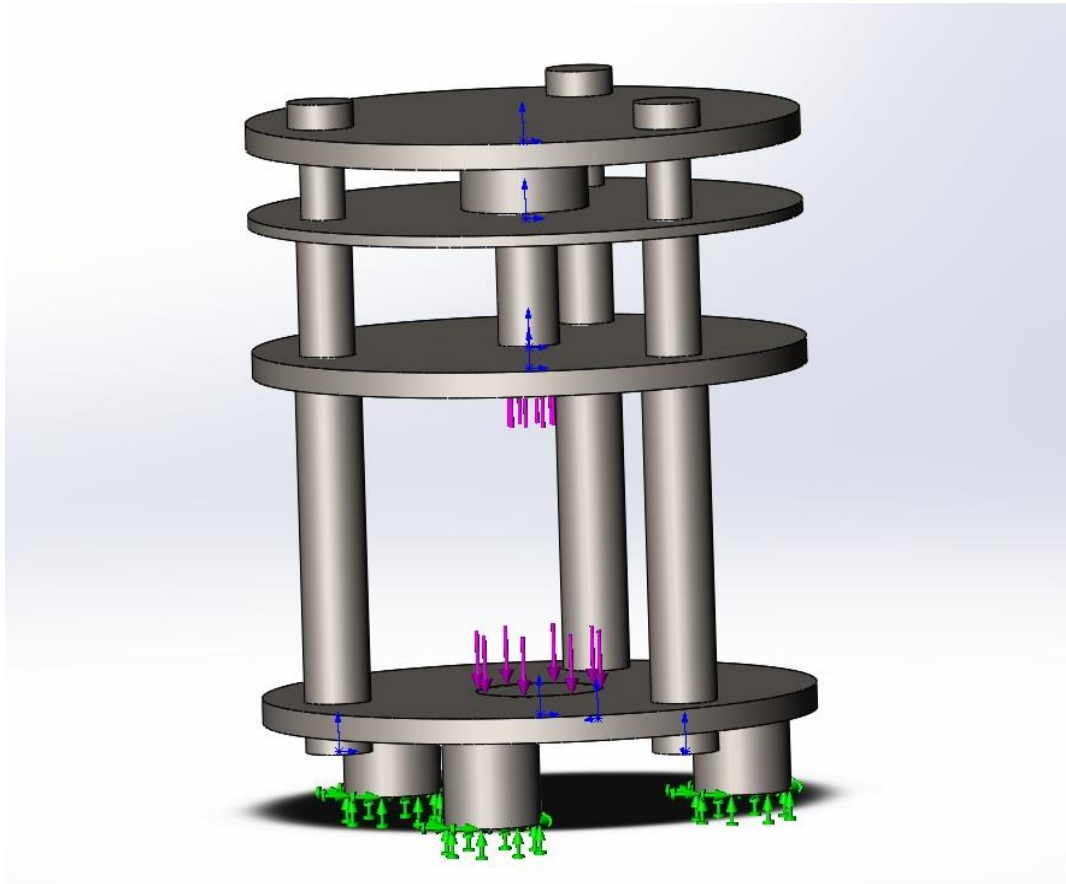


Рисунок 14– 3D модель пластометра перед началом нагружения

При имитации гидравлического домкрата, который осуществляет перемещение пластин, и, следовательно, сжатие образца, было учтено максимальное усилие, развиваемое гидравлическим домкратом по его технической характеристике – 100 кН. Нагрузка приложена к двум местам по 100 кН: лист № 1 – место размещения домкрата и лист №2 – площадь, куда прикладывается нагрузка при проведении испытания на сжатие.

Исходя из принципа работы и конструкции пластометра, следует обратить внимание на элементы, которые больше всего подвержены деформации из-за приложенного усилия гидравлического домкрата, а именно – лист №1, являющийся основанием пластометра, лист №4, к которому

установлен тензометрический датчик усилия и стойки. Результат 3D моделирования пластометра представлен на рисунке 15.

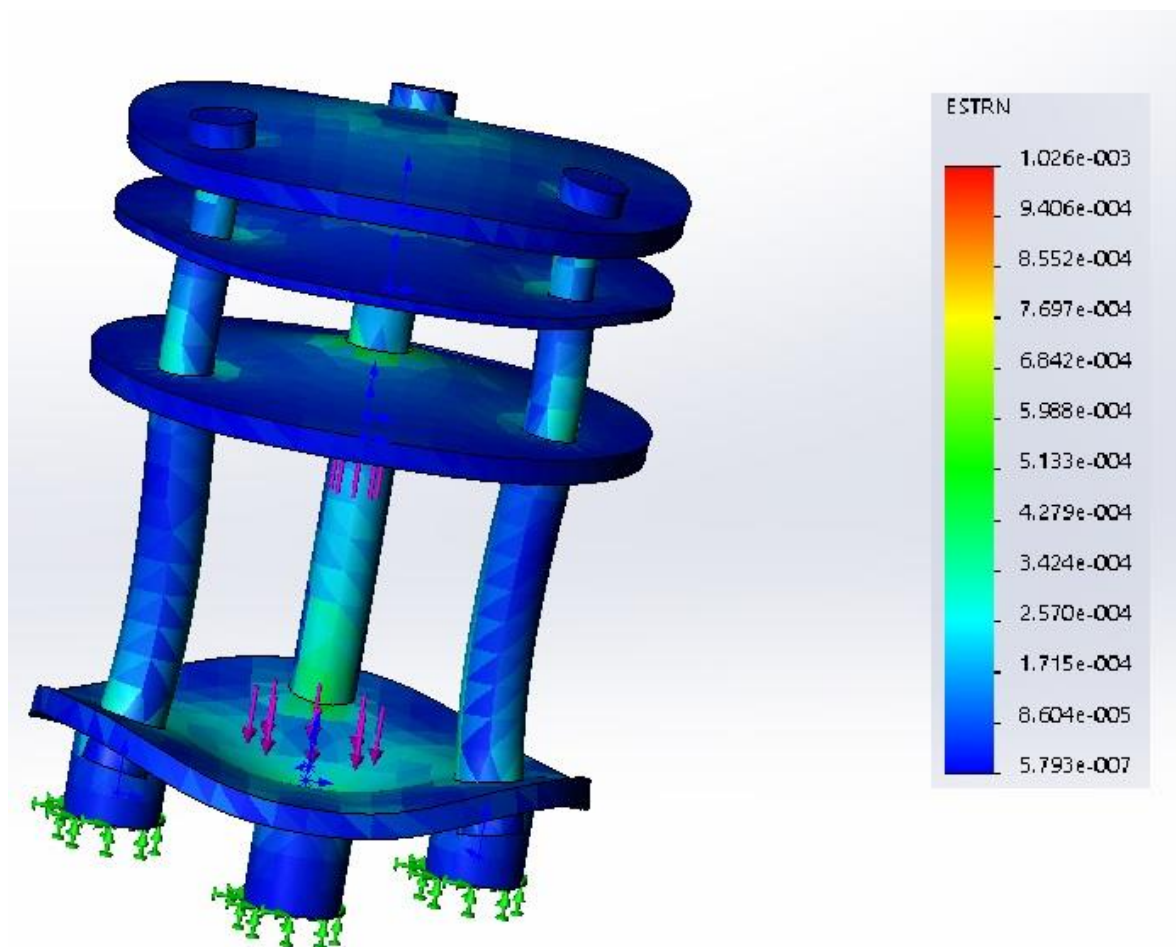


Рисунок 15 – 3D модель пластометра после нагружения с показателями деформации

Согласно результатам моделирования SolidWorks, показатели деформации не превышают критических величин. Об этом свидетельствует приведенный рисунок с обозначенными цветовыми областями каждого участка по величине деформации и шкалой. Максимальный показатель деформации среди всех элементов конструкции пластометра составляет не более $7 \cdot 10^{-4}$, что для углеродистой стали, из которой выполнены элементы конструкции, является приемлемым. Данный факт позволяет убедиться в правильном подборе размеров элементов конструкции пластометра.

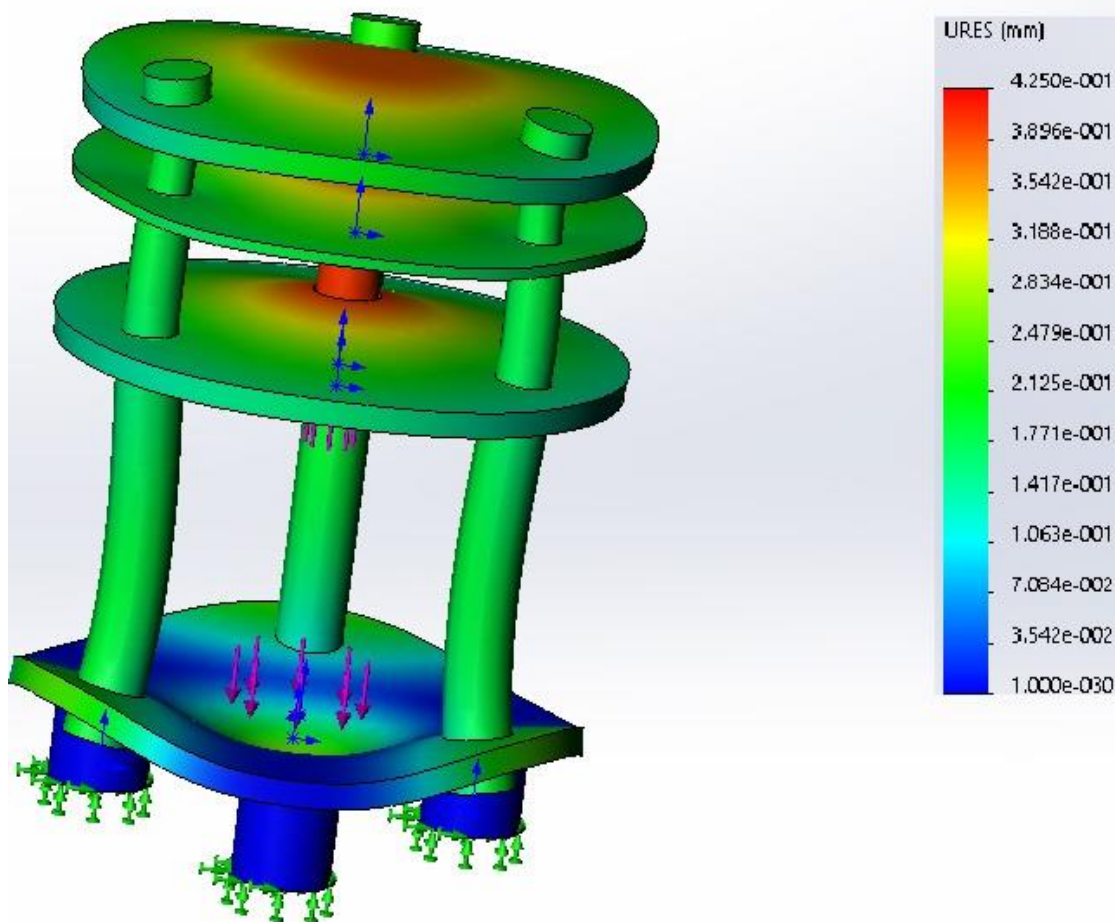
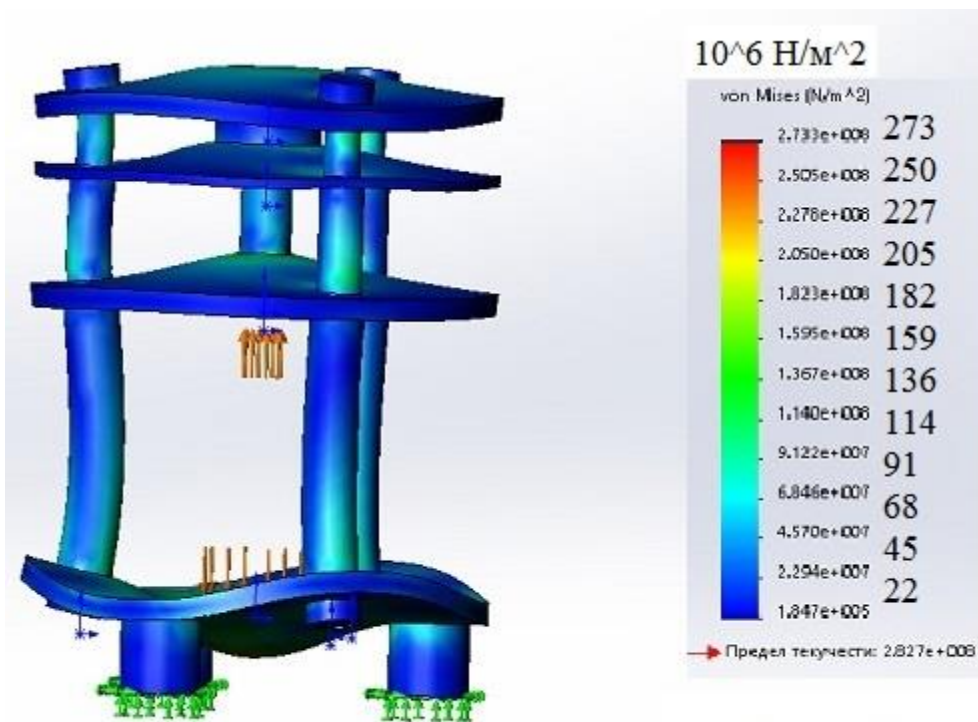


Рисунок 16 – Показатели перемещения (мм) элементов установки

Как видно на рисунке 16, максимальный показатель перемещения зафиксирован в центре листа №4 который составляет 0,42 мм, что является приемлемым показателем учитывая критическую нагрузку. Перемещение листа №4 составляет 0,25 мм – меньше, чем у листа №1, это связано с тем, что у листа №1 площадь приложения нагрузки больше, чем у листа №4, следовательно, нагрузка распределяется образуя меньшую концентрацию их по сравнению с площадью приложения нагрузки листа №4.



Предел текучести: $282 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$

Рисунок 17 – Показатели напряжения при нагружении

Показатели напряжения (рисунок 17) свидетельствуют о том, что прилагаемая нагрузка является допустимой. Наиболее деформируемые места у данной конструкции – это стойки в районе соприкосновения с листами и лист №4, так как он является последним элементом воспринимающим нагрузку с учетом площади контакта с месдозой.

3.3. Вывод

С помощью 3D моделирования пластометра в программе SolidWorks выявлены части конструкции, которые испытывают максимальное перемещение и нагрузку, также получены значения напряжений и величины перемещения всех частей конструкции. По результатам 3D-моделирования установлено, что конструкция и ее элементы способны выдерживать максимальную нагрузку, развиваемую гидравлическим домкратом в 100 кН без критических показателей деформации и изгиба ее элементов.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОГО УСТРОЙСТВА

На сегодняшний день известно множество методик проведения пластометрических исследований, по которым составляется определение сопротивления деформации исследуемых металлов и сплавов. Расчет показателей сопротивления деформации проводится на основе заданных параметров (температура, скорость деформации, степень деформации) и на основе полученных данных с приборов, регистрирующих происходящие процессы во время воздействия на металлический образец (усилие, требуемое для обеспечения степени деформации и изменение температуры образца на протяжении испытания).

В последние десятилетия с стремительным развитием металлургии как науки исследовательский интерес расположен по большей части к исследованию труднодеформируемых металлов и сплавов. В свою очередь развитие металлургии обусловлено потребностями людей к новым продуктам черной и цветной металлургии по части качества продукции и требования к ним по различным характеристикам и обновлением предложений на рынке продукции.

В данной работе сталь 20 в качестве испытываемого материала для исследования пластических свойств была выбрана по причине наличия довольно обширной информации о механических свойствах этой стали и относительно невысоких показателей сопротивления деформации по сравнению с труднодеформируемыми сталями и сплавами, что упрощает разработку нового устройства и является вводным этапом в освоении пластометрии как области науки в металлургии.

Исследования пластических свойств в режиме сжатия на новом устройстве проводилось аналогично 3D-моделированию в системе автоматизированного проектирования QForm по части задаваемых параметров температуры, степени деформирования и скорости деформирования. В данной работе QForm используется не только для

решения в выборе приспособления, осуществляющего деформирование, но и для ориентирования на энергосиловые показатели при исследовании пластических свойств стали 20 на новом устройстве.

Ход испытания ничем не отличается от процедур при использовании аналогичного оборудования для исследования пластических свойств металлов и сплавов. Для испытания были изготовлены образцы соответствующие методике проведения испытаний на сжатие начальными высотой $h_0 = 15$ мм и диаметром $d_0 = 10$ мм [1]. Предварительный нагрев образцов в контейнере осуществляется в печи, близко расположенной пластометру. Для каждого образца своя температура нагрева согласно проведенному моделированию в QForm – 800, 900, 1000 и 1100 °С. Каждый образец извлекается из печи по мере достижения нужной температуры для испытания и переносится с контейнером на поднимающийся лист пластометра и незамедлительно осуществляется сжатие образца путем поднятия штока домкрата на фиксированную величину. Общее время нагрева определяется по формуле:

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{в}}, \quad (5)$$

где $\tau_{\text{н}}$ – время нагрева (мин);

$\tau_{\text{в}}$ – время выдержки (для углеродистой стали – 1 мин).

Время нагрева нагрева рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\text{н}} = 0,1D_1K_1K_2K_3, \quad (6)$$

где D_1 – диаметр изделия (мм);

K_1 – коэффициент среды (для соли – 1);

K_2 – коэффициент формы (для цилиндра – 2);

K_3 – коэффициент равномерности нагрева (для всестороннего нагрева – 1).

Подставляя в формулу (6) значения получаем:

$$\tau_{\text{н}} = 0,1 \cdot 10 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1 = 2 \text{ (мин)}$$

Полученные данные из формулы (6) подставляем в формулу (5):

$$\tau_{\text{общ}} = 2 + 1 = 3 \text{ (мин)}$$

Таким образом время нагрева образцов составляет примерно 3 минуты [8].

Для точного контроля изменения перемещения фиксируется отметка на поршне домкрата, которая соответствует моменту соприкосновения контейнера и листа №3. Дальнейшая регистрация перемещения поршня домкрата осуществляется с помощью нанесенных рисок на поршне.

После осуществления деформации и остывания образца производится замер диаметра образца с помощью штангенциркуля для последующего определения площади поперечного сечения.

Для регистрации усилия применяется мессдоза от лабораторного прокатного стана. С предварительно проведенной тарировки можно полагать, что полученные результаты усилий соответствуют действительности.

Таблица 2 – Результаты экспериментального исследования пластических свойств стали 20

ε	U_d, c^{-1}	$t, ^\circ C$	P, kH	S, mm^2	σ_s, MPa
0,3	2,27	800	14,3	113	126,6
		900	11,8	112,4	105
		1000	8,5	112,1	75,9
		1100	6,9	111,5	61,9

Результаты экспериментального исследования пластических свойств стали 20 с использованием нового устройства приведены в таблице 1, где ε – степень деформирования; U_d – скорость деформирования; t – температура; P – усилие; S – площадь поперечного сечения образца; σ_s – сопротивление деформации

Для получения результатов усилий и площади поперечного сечения производился расчет среднего арифметического показателя. Показатели сопротивления деформации вычислялись согласно формуле (1).

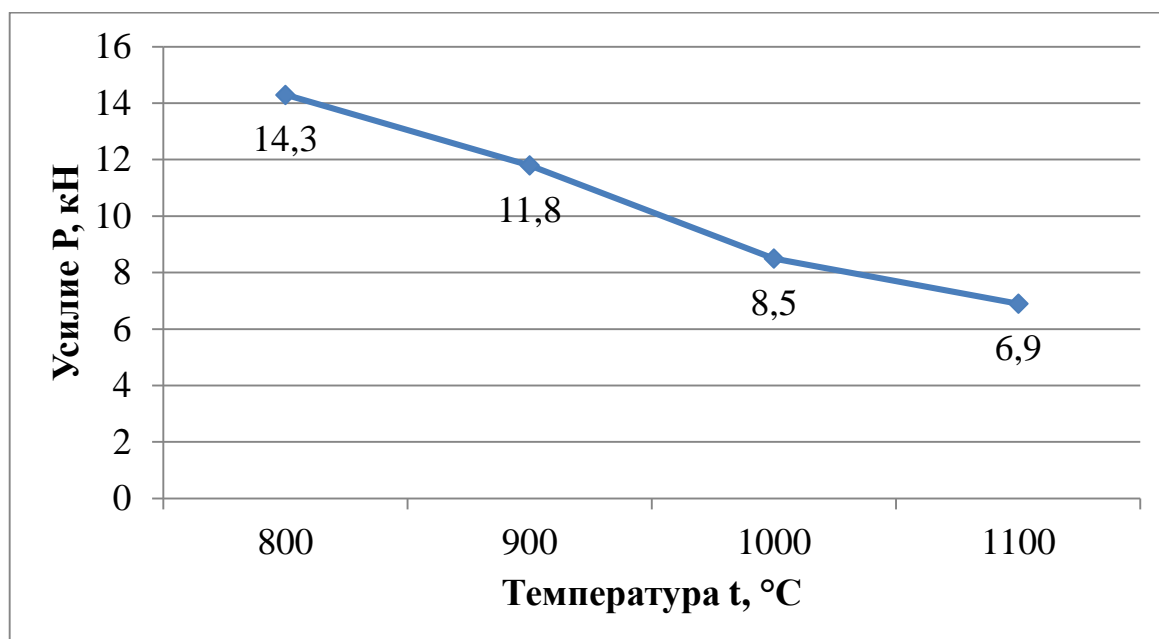


Рисунок 18 – Зависимость усилия от температуры

Как видно на рисунке 18, показатели приложенных усилий снижаются по мере повышения температуры.

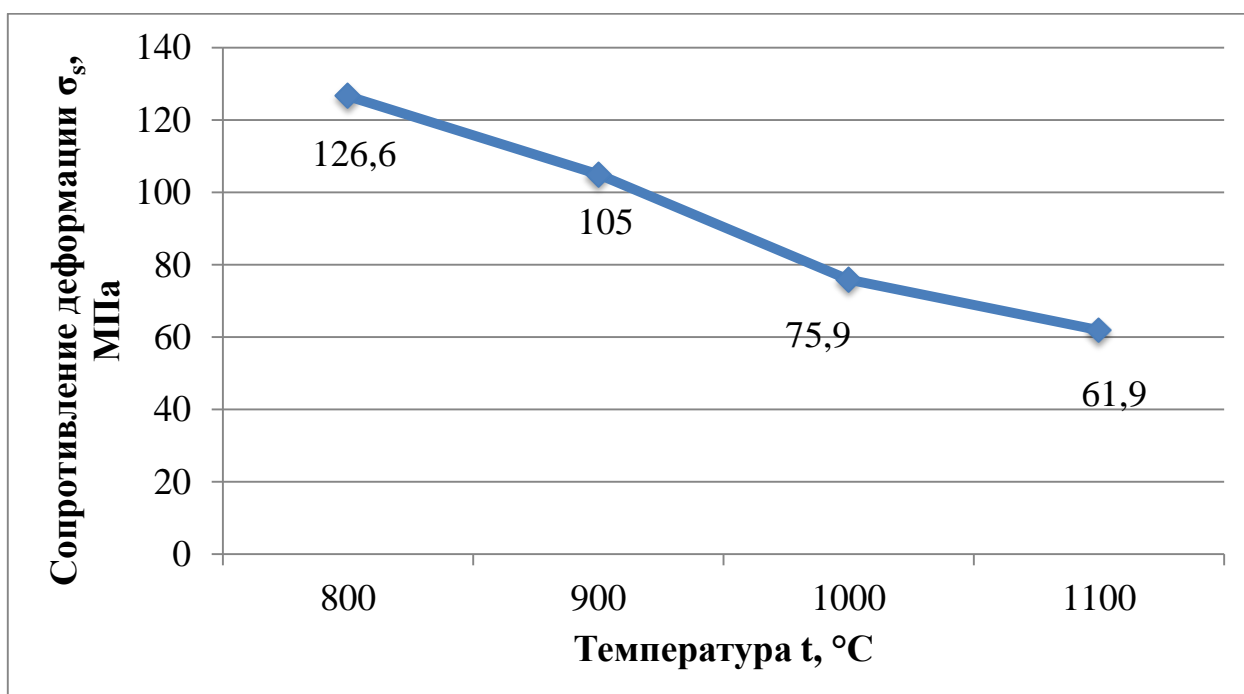


Рисунок 19 – Зависимость сопротивления деформации от температуры

Аналогичная ситуация наблюдается и при изменении сопротивления деформации под воздействием температуры (рисунок 19). Данное явление находит подтверждения в теоретических основах обработки металлов давлением, где говорится о влиянии температуры на сопротивление деформации [9].

Вывод

Несмотря на недоработку оборудования, удалось провести испытания на сжатие образцов, при этом были получены результаты усилий и размеры поперечного сечения образцов, с помощью которых произведен расчет сопротивления деформации.

5. ОЦЕНКА СХОДИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таблица 3 – Оценка сходимости результатов экспериментального исследования пластических свойств стали 20 и компьютерного моделирования, реализованного в QForm

U_d, c^{-1}	$t, ^\circ C$	$P_q, кН$	$P_э, кН$	$\sigma_{sq}, МПа$	$\sigma_{sэ}, МПа$	$\delta P, \%$	$\delta \sigma_s, \%$
0,3	800	14,03	14,3	111,16	126,6	1,93	13,89
	900	11,55	11,8	92	105	2,17	14,14
	1000	9,17	8,5	73,12	75,9	7,31	3,81
	1100	7,4	6,9	58,5	61,9	6,76	5,82

Оценка сходимости результатов приведена в таблице 3, где U_d – скорость деформирования; t – температура; P_q и $P_э$ – результаты усилий, полученные при моделировании в QForm и экспериментально соответственно; σ_{sq} и $\sigma_{sэ}$ – показатели сопротивления деформации, полученные при компьютерном моделировании и экспериментально

соответственно; δP и $\delta \sigma_s$ — оценочные показатели расхождения результатов усилия и сопротивления деформации соответственно.

Расчет расхождения результатов усилий производился согласно формуле

$$\delta P = \frac{P_q - P_э}{P_q} * 100\%, \quad (7)$$

где P_q и $P_э$ — результаты усилий, полученные при моделировании в QForm и экспериментально соответственно.

Таким же методом рассчитаны погрешности результатов сопротивления деформации:

$$\delta \sigma_s = \frac{\sigma_{sq} - \sigma_{sэ}}{\sigma_{sq}} * 100\%, \quad (8)$$

где σ_{sq} и $\sigma_{sэ}$ — показатели сопротивления деформации, полученные при компьютерном моделировании и экспериментально соответственно.

Сходимость результатов по сопротивлению деформации составляет от 3 до 15 %, это объясняется тем, что в компьютерном моделировании условия для протекания процессов остаются неизменными на протяжении всего процесса без допущения потерь температуры и прочих внешних воздействий. В реальных условиях результаты могут искажаться связи с неточностью контроля задаваемых параметров при эксперименте по части скорости деформирования. Следовательно, в связи с имеющимися недостатками нового устройства, на данный момент методика определения пластических свойств для данного оборудования нуждается в доработке. Также расхождение результатов обусловлено падением температуры при переносе из печи в пластометр и потерями при осуществлении деформации. Не смотря на расхождение результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных можно отметить сходство, которое заключается в том, что с увеличением температуры в обоих случаях наблюдается приблизительно одинаковая степень уменьшения усилия с повышением температуры. Данное явление объясняется тем, что углеродистая сталь

проявляет меньшую чувствительность к скорости деформации по сравнению с легированными металлами и сплавами, тем самым обладает достаточной пластичностью при горячей обработке практически при любых применяемых скоростях деформации [10]. Иными словами, погрешность данных по скорости и степени деформирования не влияет на сопротивление деформации в больших степенях для углеродистых сталей.

Вывод

Благодаря оценке сходимости результатов имеется возможность оценить погрешность оборудования, тем самым имеется представление по модернизации оборудования для исследований пластических свойств, подтверждая целесообразность применения компьютерного моделирования в QForm

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе было разработано оборудование для исследований пластических свойств материалов, работающим в режиме сжатия. С помощью системы автоматизированного проектирования SolidWorks были получены результаты о способности оборудования выдерживать максимальную нагрузку развиваемую гидравлическим домкратом. Также было проведено 3D-моделирование процесса осадки с помощью программы QForm образцов стали 20, с помощью которого было изучено на практике влияние задаваемых параметров на сопротивление деформации, а также были получены результаты усилий для осуществления деформации образцов, и следовательно, сделан выбор приспособления, которое осуществляет деформацию образца. Экспериментальное исследование пластических свойств стали 20 показало, что новое устройство способно деформировать образцы на фиксированное расстояние. Тем самым из экспериментального исследования были получены результаты усилий, зарегистрированных при осадке образцов и размеры образцов, с помощью которых произведено вычисление сопротивления деформации. Оценка сходимости результатов экспериментального исследования и результатов конечно-элементной модели, реализованной в QForm позволяет определить погрешности получаемых результатов и сопоставить результаты влияния задаваемых параметров на степень деформации, с помощью чего было установлено, что новое устройство нуждается в применении автоматизации путем установки оптического датчика ИСД-3, регистрирующего перемещения и установки привода, осуществляющего деформацию. В качестве привода, осуществляющего деформацию имеет смысл применить компактную гидростанцию. С помощью датчика ИСД-3 осуществляется воздействие на дроссельную заслонку гидростанции, тем самым производится контроль подачи жидкости в гидроцилиндр для контроля перемещения поршня.

Представленный вариант автоматизации нового устройства позволит улучшить точность задаваемых параметров и регистрируемых данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение
2. ГОСТ 25.503-97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие
3. Загиров Н.Н., Рудницкий Э.А. Теория обработки металлов давлением: Конспект лекций и варианты заданий для выполнения курсовой работы Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. – 56 с
4. Zwick/Roell – Машины и системы для испытаний металлов.
5. Пластометрические исследования на автоматизированном цифровом пластометре: Учебное пособие для самостоятельной работы/ Составители: В.И. Крайнов, В.С. Кропачев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 25 с.
6. Механические свойства алюминиевых сплавов: монография/ Н.А. Грищенко, С.Б. Сидельников, И.Ю. Губанов и др. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. – 196с.
7. Крайнов В.И. Оборудование, методика, результаты пластометрических исследований: Учебное пособие. – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – 95 с.
8. Гуляев А. П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. - 544 с.
9. В.Л. Колмогоров. Механика обработки металлов давлением. Учебник для вузов по специальности "Обработка металлов давлением". – Металлургия, 1986. – 688с.
10. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. Машиностроение, 1977.

ПРИЛОЖЕНИЕ