Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»

На правах рукописи

ЭЛЬДИБ ИБРАХИМ СААД АХМЕД

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО 3D-СКАНИРОВАНИЯ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: к.т.н., Dr.-Ing. Петров Михаил Александрович

Москва – 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 4

Глава 1. Контроль качества поковок и применение 3D-сканирования в обработке материалов давлением 11

1.1 Разработка мероприятий по контролю качества поковок 11

1.2 Методы контроля качества заготовок и поковок 14

1.3 Методы контроля геометрических элементов поковок 14

1.4 Неразрушающие методы контроля поверхностных дефектов поковок 15

1.5 Примеры применения технологий сканирования в ОМД 18

Глава 2. Оборудование и методы 3D-сканирования 30

2.1 Системы 3D-сканирования 30

2.2 3D-сканер на основе структурированного подсвета 33

2.3 Принцип построения трехмерной модели на основе результатов сканирования 36

2.4 Точность 3D-сканирования объектов 37

Глава 3. Определение механических свойств материалов 49

3.1 Дефекты в металлах 49

3.2 Поверхностные и внутренние дефекты, сопротивление разрушению 50

3.3 Механические испытания материалов 52

3.3.1 Качество 3D-печати и характер разрушения 54

3.3.2 Эксперименты на одноосное сжатие (ЭОС) 56

3.3.3 Эксперименты на одноосное растяжение (ЭОР) 59

3.3.4 Эксперименты на усталостную прочность (ЭУП) 62

3.3.5 Определение удельной энергопоглощающей способности материала 64

Глава 4. Примеры 3D-сканирования и реконструкции геометрических моделей 69

4.1. 3D-сканирование деталей с размерами от 200 мм до 30 мм 69

4.2 Принцип совмещённого 3D-сканирования 73

4.3. 3D-сканирование полимерного прототипа 74

4.4 3D-сканирование деталей с размерами от 15 мм до 50 мм 78
Глава 5. Численное моделирование процессов ОМД по уточнённым геометрическим моделям 87
5.1. Проведение КЭ-моделирования ЭОС и ЭОР 88
5.2. Проведение КЭ-моделирования процесса ХОШ 94
5.3 Сравнение геометрии полученных 3D-моделей 105
5.4 Оценка временных затрат на проведение КЭ-моделирования 108
Глава 6. Разработка алгоритма управления участком холодной объёмной штамповки 110
6.1 Производственный участок (DES) 112
6.2 Реологическое течение материала (FEA) 112
6.3 Применение сценариев для оценки работы алгоритма 113
6.4 Разработка виртуального участка ХОШ на примере действующей производственной площадки метизного производства 121
Заключение 124
Библиографический список 126
Приложения 140
Приложения 1. Комплектующие для ССП и ЛС 140
Приложение 2. Примеры бесконтактных сканеров, классифицированных по размерам объектов (не роботизированные) 142
Приложение 3. Калибровка 3D-сканера RangeVision и сравнение характеристик применяемых в работе 3D-сканеров 143
Приложение 4. 3D-сканирование цилиндрических образцов на сжатие 146
Приложение 5. Примеры 3D-сканирования автомобильных компонентов 147
Приложение 6. Примеры 3D-сканирования объектов из разных материалов и в разных условиях эксплуатации (разные 3D-сканеры) 157
Приложение 7. Примеры 3D-сканирования разных изделий 165
Приложение 8. Примеры других экспериментальных работ 172

Введение

Актуальность работы. В связи с повышением требований к точности изготовления и сборки узлов и агрегатов в машиностроении, на заготовительных производствах, в которых последовательность процессов определяет качество изделия, необходимо проводить контроль точности изготовления изделий сразу после технологических операций, например, операций холодной объёмной штамповки (ХОШ). Существующий мировой тренд создания цифрового производства приводит к тому, что возникают так называемые «цифровые двойники», соответствующие один к одному реальному изделию, существующий, однако, на виртуальном уровне. Для разработки таких «цифровых двойников» необходимо адекватно переносить параметры из реальности в виртуальную среду. Существуют два метода получения 3D-моделей изделий: прямой (построения в CAD-программе) и обратный (при помощи трехмерного сканирования изделия). В работе рассматривается возможность осуществления 3D-сканирования изделий при помощи оптического и лазерного 3D-сканеров, с целью дальнейшей оценки качества поковок и его интеграцией в производственную кузнечно-штамповочную линию, с учетом различных технологических параметров. Показано, что материал изделия, поверхностная модификация изделия, температура, способ сканирования, а также пост-обработка полигональной 3D-модели могут влиять на качество конечной текстурированной 3D-модели.

Степень оснащения новыми машинами, контрольными устройствами и оборудованием для автоматизации и механизации современного кузнечно-штамповочного производство повышается. Стремление снизить производственные расходы, а также появление инструментов виртуальной разработки технологий, привели к необходимости поиска способов замыкания производственной цепочки по всем отдельным операциям кузнечного производства, иными словами, к необходимости поиска общего

языка между средствами автоматизации производственного оборудования и средствами виртуального проектирования технологий. Особую роль здесь занимают алгоритмы реализации последовательных логических и вычислительных действий.

Существующий мировой тренд создания цифрового производства приводит к тому, что возникают так называемые «цифровые двойники», соответствующие один к одному реальному изделию, существующий, однако, на виртуальном уровне. Для разработки таких «цифровых двойников» необходимо адекватно переносить параметры из реальности в виртуальную среду. Стремление снизить производственные расходы, повысить точность производств, реализуемых в рамках концепции «Производство 4.0» (Industry 4.0), а также появление (цифровых) инструментов виртуальной разработки технологий, привели к необходимости поиска способов замыкания производственной цепочки по всем отдельным операциям кузнечного производства. Кроме этого, выбрав по результатам расчётов набор параметров можно использовать их для управления современным прессовым оборудованием, создав обратную связь. Например, оптимизировать работу пресса за счёт изменения вида циклограммы выходного звена пресса с сервоуправлением.

Рассматривается возможность контроля точности изделия по 3D-модели, получаемой при помощи 3D-сканирования, проведения численного моделирования и сравнения результатов численного моделирования с результатами реального процесса.

Поскольку сегодняшние технологии позволяют изготавливать в производственном масштабе на современных прессах с одним работником методом штамповки из ленты или прогрессивной штамповки как мелкие изделия с максимальным размером 5 мм для микроэлектронной промышленности, так и поковки среднего размера с максимальным размером до 500 мм, появились системы бесконтактного оптического контроля качества изделий, размеры которых изменяются в диапазонах от 5

до 500 мм. Связано это прежде всего с тем, что возросла частота межоперационного контроля качества изделий, при этом отводимое время на него снизилось, а сложность и требования повысились. Помимо этого, возросли сами требования по точности. Согласно данным европейских производственных ассоциаций величина поля допуска в ближайшем будущем уменьшится на 60% на операциях штамповки и на 67% в сборочных операциях кузовов. Если раньше оптический инлайн (выборочный летучий) контроль был распространён на высокоскоростных автоматах, то теперь он активно внедряется и в менее скоростных процессах штамповки.

Объектом исследования является техника и технология оптического сканирования на основе структурированного подсвета.

Предметом исследования является алгоритм реализации автоматической настройки параметров прессовой линии для холодной штамповки изделий, с возможностью изменения технологических параметров штамповочного оборудования с сервоуправлением

Цель диссертационной работы. Повышение точности геометрии объёмных изделий при ХОШ, на основе сравнения трёхмерной (3D) геометрии изделия, полученной оптической системой сканирования, установленной в производственной цепочке, с геометрией изделия, полученной по результатам численного моделирования.

В работе решались следующие **задачи**: 1) Исследование возможности получения геометрии изделия заданной точности при помощи 3D-сканирования; 2) Определение механических свойств полимерных материалов с заданной степенью заполнения и характера их разрушения; 3) Апробация методики выборочного летучего контроля с применением 3D-сканирования в производственных условиях; 4) Разработка алгоритма настройки пресса с использованием реальной модели и численного моделирования процесса ХОШ заготовки болта; 5) Проведение численного моделирования с применением уточнённых 3D-моделей.

Научная новизна заключается в том, что:

1) впервые разработан алгоритм контроля заданной геометрической точности поковок из металлов, проводящийся сразу после проведения ХОШ;

2) установлено, что по результатам 3D-сканирования и численного моделирования возможно учитывать особенности геометрии поковок, на основании чего в дальнейшем будет проводиться изменение параметров прессового оборудования;

3) при помощи инструментов моделирования и практических экспериментов были отработаны основные шаги разработанного алгоритма по получению, обработке и сопоставлению геометрических данных поковки.

Практическая значимость. Разработана методика реализации алгоритма связи виртуальных объектов с реальностью через их геометрические и физические свойства, основанный на методе оптического 3D-сканирования объекта, позволяющий точно (в указанном поле допуска) и быстро проводить оценку поковок, не прибегая к выборочному контролю, который проводится в лаборатории в отрыве от производственной линии, а не на сразу после проведения технологической операции (выборочный летучий или инлайн контроль).

Внедрение методики проведения оптического сканирования в учебный процесс для направлений подготовки 15.03.01 «Машиностроение» и 27.03.05 «Управление в технических системах».

Теоретическая значимость исследования заключается в уточнённых геометрических 3D-моделях, позволяющих снизить общую ошибку моделирования и спрогнозировать получение дефектов на уровне, близком к микро.

Предполагаемое внедрение. На промышленных предприятиях, на которых применяются технологии ХОШ, а также требуется высокий темп штамповки и высокая точность изделий.

Методы исследования и достоверность результатов. Алгоритм совершенствования операций холодной штамповки изделий на основе оптического сканирования был исследован в лабораторных и промышленных условиях. Достоверность получения 3D-моделей и их влияние на результат моделирования была подтверждена результатами, полученными в реальных производственных условиях.

Основные научные положения, а также выводы и рекомендации имеют теоретическое и практическое обоснование, которые не противоречат имеющимся литературным данным.

Личное участие соискателя в получении результатов. Диссертация «Разработка методики совершенствования технологического процесса холодной штамповки изделий на основе оптического 3D-сканирования и численного моделирования» является самостоятельной завершенной работой.

Личный вклад соискателя состоит в:

- непосредственном участии автора в проведении 3D-сканирования объектов из разных материалов и в разных технологических условиях; в исследовании механических свойств полимерных образцов с разной степенью заполнения, полученных по технологии 3D-печати, методами одноосного сжатия, растяжения и циклического нагружения; в проведении численного моделирования процесса ХОШ заготовки болта; в разработке алгоритма управления настройкой пресса;

- выполненной лично автором методики совмещённого сканирования для повышения уровня детализации 3D-моделей.

Получены следующие результаты: 1) Разработан алгоритм настройки пресса на основании результатов оптического 3D-сканирования и численного моделирования. Показана загрузка виртуального участка штамповки и выявлена высокая степень загрузки оборудования (85%) при темпе штамповки 60 шт./мин. Рассмотрены два сценария работы системы (прямой и обратный) по разработанному алгоритму. 2) Проведена оценка

геометрической точности 3D-модели, полученной методом 3D-сканирования, построена методика её проведения для изделий из модельного полимерного материала и из металлических материалов. Обоснована причина применения нескольких технологий оптического контроля. 3) Установлено влияние степени заполнения (СЗ) образцов из модельного полимерного материала на характер их разрушения, что может быть применено для прогнозирования внутренних дефектов, влияющих на итоговую степень деформации и проявляющихся в виде наружных трещин и сколов. 4) Проведено численное моделирование процесса высадки заготовки болта, а также экспериментов на одноосное сжатие и растяжения с использованием истинной геометрии заготовки. Показано, что результаты влияют на итоговые результаты и отличаются от результатов, в которых используется идеальная геометрия, соответствующая чертежу. 5) Проведена оценка характеристики модельного полимерного материала на основе вычисления удельной энергопоглощаемости материала образца и дальнейшее распространение результатов на металлические материалы с получением нелинейной зависимости.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены на следующих конференциях:

Студенческая научно-техническая конференция (СНТК 2017), Московский Политех (Москва, 2017); XX Российской конференции «Компьютерные системы инженерного анализа MSC Software» (Москва, 2017); IV-ая Международная научно-техническая конференция «Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением» (Тула, 2017); Международная конференция 3D fab+print (Москва, 2018); Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (Москва, 2018); Всероссийская научно-техническая конференция «Инновационные разработки в обработке материалов давлением и аддитивном производстве. Качество выпускаемых изделий» (Москва, 2018); V-ая Международная научно-техническая конференция

«Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением» (Тула, 2019); Студенческая научно-техническая конференция (СНТК 2019), Московский Политех (Москва, 2019); Международная конференция по обработке материалов давлением ESAFORM 2019 (Витория-Гастайц, 2019); XXXI-ая Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2019) (Москва, 2019).

Практическая апробация была проведена в производственных условиях на предприятии ООО «Параллель» (г. Орёл), специализирующемся на производстве метизной продукции.

По теме работы сделано 9 докладов, представленных на студенческих, общероссийских и международных научных конференциях.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения и 6 глав, заключения, приложения и библиографического списка из 129 наименований. Полный объём диссертации составляет 173 страницы с 86 рисунками и 18 таблицами.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 8 печатных работах. Всего в перечне ВАК 2 работы, из них 1 в Scopus.

Глава 1. Контроль качества поковок и применение 3D-сканирования в обработке материалов давлением

1.1 Разработка мероприятий по контролю качества поковок

Наряду с производственными операциями, технологический процесс включает операции контроля. Оптимальный технологический процесс обеспечивает наилучшие режимы обработки с учетом свойств деформируемых материалов.

В сложных случаях штамповки необходимо предусматривать подготовку заготовок на ковочных вальцах или применение в качестве заготовки периодического проката с соответствующим распределением металла для устранения образования складок, зажимов и утяжин. Необходимо выполнять требования к толщине облоя, линии разъема и т. д., а также учитывать технологию обработки и конструкцию штампов. При разработке процессов автоматической штамповки необходимо предусматривать выполнение дополнительных требований к промежуточной форме и размеру поковки после предварительной штамповки для надежного ее захвата автоматическими устройствами и передачи в следующий ручей штампа.

В производственных условиях причинами брака могут быть дефекты исходного материала, дефекты заготовок при резке и нагреве, а также отклонения от установленного технологического процесса. Таким образом, даже все звенья отлаженного технологического процесса необходимо постоянно контролировать. В крупносерийном производстве целесообразен статистический контроль штампованных поковок и режимов их обработки, обеспечивающий высокое качество изделий. При этом применяют выборочный контроль или используют статистические данные. Методы контроля качества поковок определяются в зависимости от цели контроля [1–4].

Заполнение технологической карты является завершающим этапом разработки технологического процесса. В кузнечных цехах обязательно применяют три вида технического контроля – контроль исходного металла, межоперационный контроль заготовок и окончательный контроль поковок. Первые два вида предназначены для своевременного предупреждения брака. Задача окончательного контроля состоит в том, чтобы не допустить выхода из кузнечного цеха недоброкачественных поковок. Каждый вид обозначенного контроля разделяется в зависимости от задач по разным классификационным признакам [5, 6].

Контроль поковок в кузнечных цехах производится контролерами отдела технического контроля (ОТК) в том случае, если контроль является выборочным, а пост контроля располагается вне производственного участка. Иногда проводят летучий контроль, который заключается в том, что представитель ОТК контролирует качество поковки непосредственно на участке штамповки. Контроль штампованных поковок стараются проводить на всех этапах изготовления. Количество контролируемых операций напрямую связано с расходами предприятия и чем их больше, тем выше расходы. Одновременно с этим, при наступлении страхового случая при предъявлении рекламации заказчиком, производителю будет легче обосновать претензии по качеству продукции. В современных производствах такой подход уже стал нормой и качество продукции контролируют после выполнения каждой операции.

Наружный осмотр поковок невооруженным глазом или с помощью увеличительного стекла применяют для выявления поверхностных дефектов. Для обнаружения особо мелких дефектов поверхности пользуются магнитным и люминесцентным методом контроля. Внутренние дефекты обнаруживают с помощью ультразвуковых или рентгеновских установок.

При оценке отдельных свойств продукции (размера, предела прочности, твердости и др.) обычно используют две характеристики:

уровень качества и однородность качества. Не все показатели качества поковок или изделий выражаются количественно (требования к очистке поверхности от окалины, к внешнему виду, отсутствию трещин и другие). При требовании отсутствия трещин уже заложено числовое понятие, указывающее, что в годных поковках экземпляры с трещинами должны составлять нулевую долю или весьма близкую к нулю часть всей продукции; в других случаях указываются размеры допускаемых трещин, например, волосовины глубиной не более 0,3 мм допускаются без выточки [1].

В силу различий типов возможных контролируемых параметров, не каждый из них может быть определён, а его влияние, оценено на участке технологической операции.

В работах [7, 8] представлены способы контроля изменения параметра температуры экспериментальным и численным способами на примере штамповки поршня двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Совмещая известные инструменты методов экспериментальных исследований с методами численного анализа достигается контроль над физическими параметрами (температура, напряжение текучести, запас пластичности, коэффициент трения), которые скрыты от глаз (трещины, вмятины и т.д.).

Реализация активного сопоставления (верификации) результатов экспериментов с результатами моделирования стала возможным с развитием практической части теории полупроводников (ППТ) и информационно-компьютерных технологий (ИКТ). В XXI основные инструменты оценки технологии потеряли материальное тело и существуют в виде отдельных программ и приложений. Можно сказать, что они являются воплощением накопленного экспериментального опыта учёных всего Мира.

1.2 Методы контроля качества заготовок и поковок

Контроль заготовок включает в себя проверку механической прочности поковки. Этот вид контроля в свою очередь включает в себя выполнение химических, металлографических, механических и магнитных испытаний, проверку твердости, выявление различных дефектов и проверку геометрических размеров заготовки. При контроле качества одновременно ведется подсчет количества поковок с исправимыми и неисправимыми дефектами. Среди методов контроля особо необходимо отметить метод компьютерной томографии, позволяющий с высокой степенью достоверности и точности оценивать даже самые малые дефекты (микротрещины) [9–11]. К недостаткам метода следует отнести время, затрачиваемое на контроль одного объекта, стоимость оборудования и количество генерируемой цифровой информации об объекте, для хранения и обработки которой требуются мощные настольные компьютеры и центры хранения и обработки данных.

1.3 Методы контроля геометрических элементов поковок

Контрольно-измерительный инструмент классифицируется по длительности проведения контроля и точности результатов. Так, универсальный инструмент предназначен для определения размеров поковок, разнообразных по форме. Специальный контрольно-измерительный инструмент предназначен для контроля одинаковых поковок, производимых большими партиями.

В традиционной практике выборочный контроль геометрических размеров проводит сам оператор-штамповщик или его помощник при помощи универсального, например, метрические линейки, складной метр, рулетка, кронциркули, штангенциркуль, штанген-высотомеры, угольники, угломеры, радиусомеры, щупы, или специального контрольно-

измерительного инструмента, например, шаблоны, скобы и различные контрольные приспособления, точность которых ±0,01 мм и более.

Работник ОТК, использующий для этих целей более сложные приборы, требующие предварительной юстировки и поверки, например, нутромеры, призмы установочные и поверочные, и сложные точные приборы, например, координатно-измерительные машины (КИМ), позволяющие проводить измерения на криволинейных поверхностях, определять отклонения с погрешностью ±0,01 мм и менее.

1.4 Неразрушающие методы контроля поверхностных дефектов поковок

Магнитный метод контроля заключается в том, что поковку сначала намагничивают в специальном устройстве (дефектоскопе), а затем на нее наносят слой магнитного порошка (опилок оксида железа) или окунают в жидкость, содержащей этот порошок. Притягиваясь к поковке, опилки выявляют наличие трещин, раковин и т.п., распределяясь на поверхности в соответствии с формой дефекта.

Люминесцентный контроль основан на способности минеральных масел, проникающих в трещины поковки, светиться под воздействием ультрафиолетового излучения [12]. Перед проверкой поковки обезжиривают, погружая в раствор минерального масла в керосине, промывают, просушивают и опыляют порошком оксида магния. Подготовленные таким образом поковки просматривают в затемненной кабине в свете ртутно-кварцевой лампы. Имеющиеся на поверхности поковки трещины светятся ярко-белым или ярко-зелёным цветом на темно-фиолетовом фоне.

Более современным вариантом люминисцентного контроля является контрастная люминисцентная дефектоскопия, при которой специальный спрей (пенетрант) с низкой вязкостью и высокой энергией поверхностного

натяжения наносится на поверхность объекта. После того, как пенетрант нанесён на поверхность, его излишки удаляются. Оставшийся пенетрант находится в дефектах и о его наличии судят после того, как проведут проявку при помощи специального проявителя на основе изопропилового спирта или ацетона, содержащего мельчайшие частицы. В зависимости от вида пенетранта и проявителя оставшееся в трещинах вещество идентифицируется при дневном или ультрафиолетовом освещении.

На рисунке 1 показана трещина на корпусе ШРУС, располагающегося у верхней кромки верхней части стакана [13]. После применения люминисцентного контроля с пенетрантом, была выполнена фотосъёмка. При отсутствии фильтрации данных изображения, полученных при помощи обычной фотокамеры, трещина не отображается на фотографии. Однако, при задействовании узкополостного фильтра трещина становится заметной.

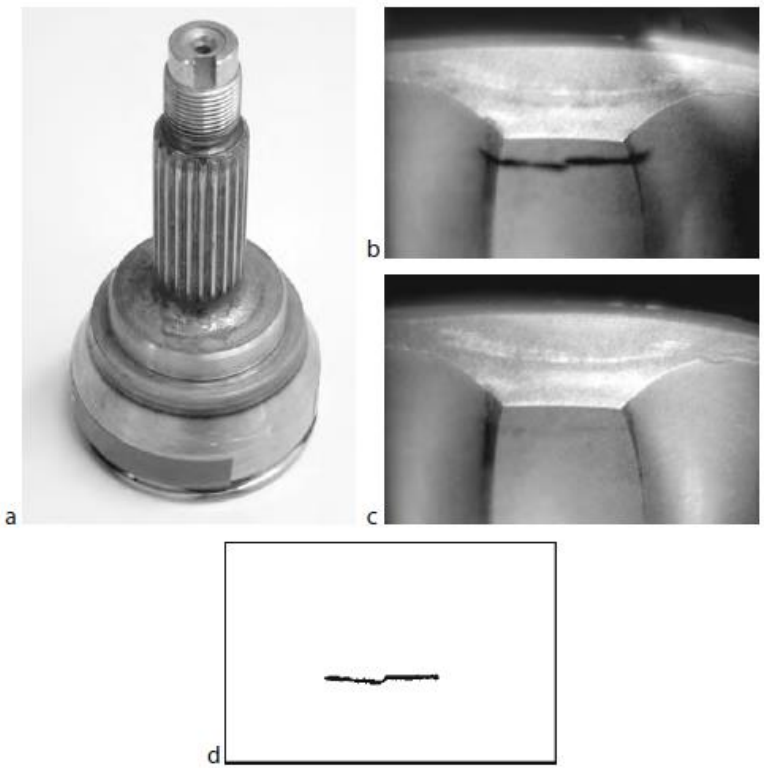


Рис. 1 – Обнаружение трещины на корпусе ШРУС

Ультразвуковой контроль основан на способности ультразвуковых колебаний отражаться от дефекта, находящегося внутри металла, и

преобразовываться в электрические импульсы. Отраженные электрические колебания через усилитель подаются на осциллограф и в, случае наличия дефекта, вызывают отклонение луча на его экране.

Рентгеновский метод основан на способности проникновения рентгеновского излучения сквозь металл и отражения им от атомов, в зависимости от локальной плотности. Если на пути рентгеновского излучения находится трещина, то в этом месте излучение отражается меньше и на экране появляется тёмная область.

Новый метод, получивший своё промышленное распространение лишь после середины 1990-ых годов. Метод 3D-сканирования на основе структурированного подсвета (ССП) основан на проецировании узоров с чередующимися повторяющимися изображениями (паттернами) в виде линий, перекрестий, точек, звёздочек, параллельных или пересекающихся волнистых линий (рисунок 2).

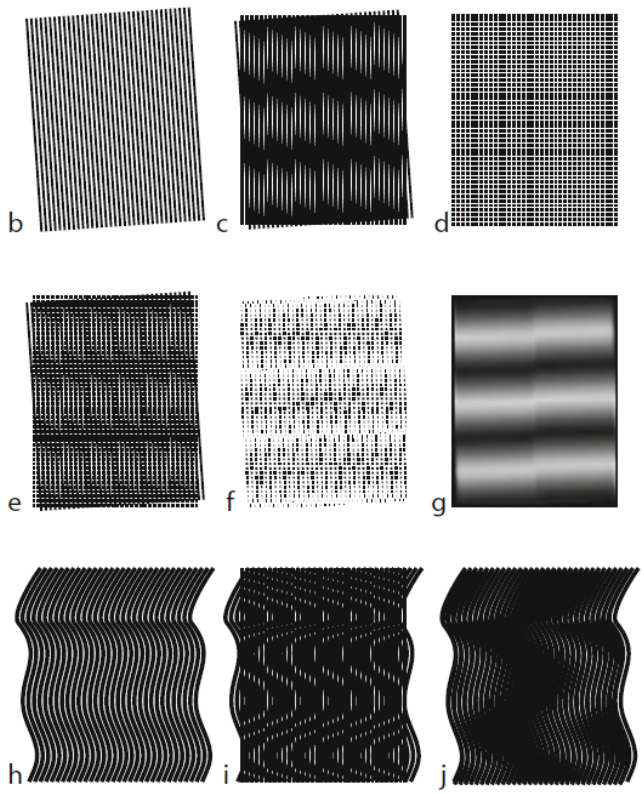


Рис. 2 – Примеры структурированного подсвета в виде проецируемого шаблона

Данный метод определяет расстояние до каждой точки, находящейся в плоскости проекции, по методу триангуляции. Существует другой способ, позволяющий определять расстояние до каждой точки с высокой частотой сканирования области без проецирования узора называемые лазерными сканерами (ЛС). Результаты обоих случаев похожи. Однако в первом случае применяются проецирующие устройства (проекторы) и камеры, а во втором источники фотонного излучения (лазерные устройства 1 и 2 классов) и камеры.

1.5 Примеры применения технологий сканирования в ОМД

Применение систем 3D-сканирования весьма разнообразно. Существуют классификации устройств сканирования по разным признакам. Например, различают устройства по длине волны источника света, по количеству камер с датчиками изображения, построенных приборах с зарядовой связью (ПЗС-матрица) или на комплементарной структуре металл-оксид-полупроводник (КМОП-матрица), по типу сканируемых объектов, по количеству возможных сканируемых направлений, по способу взаимодействия с объектом и т.д. Основной задачей сканирования является получение цифровой интерпретации об объекте исследования или его геометрического «цифрового двойника» [14–19]. Таким образом можно говорить о машинном зрении, которое является одним из интерфейсов в диалоге между человеком и машиной. Дальнейшее применение этой информации возможно для выполнения задач одной из следующих групп, представленных в таблице 1 [13, 20, 21].

На рисунке 3 представлен результат вычисления расстояний между центрами тяжести (барицентрами) двух отростков поковки с тремя отростками и между центром тяжести (барицентром) и центром большой головки поковки шатуна, выполненные роботом для точного захвата объектов и их транспортировки между операциями.

Таблица 1. Сводная таблица по механическим испытаниям

Группа задач	**Название устройств**	**Применение**
1	сканеры изображения	распознавание плоского изображения
2	сканеры штрихкодов	распознавание плоского изображения, с возможностью использования результата для поиска кода, скрытого за ним
3	фотоаппараты высокого разрешения и программное обеспечение (ПО) для фотограмметрии	распознавание объёмного объекта по изображениям, путём сопоставления отдельных точек нескольких изображений и реконструкции объекта, с возможностью использования результата для расчёта геометрических параметров, построения карты отклонения геометрических размеров (КОГР), численного моделирования, определения деформаций, оценки степени и значения повреждения
4	оптические/лазерные сканеры и ПО	определение положения точек в пространстве и реконструкция 3D-модели с возможностью использования результата для построения КОГР, численного моделирования, определения деформаций, оценки степени и значения повреждения, для создания интерактивных подвижных моделей

Авторы работы [22] рассматривают контроль геометрии крупных поковок в процессе их изготовления при помощи сканера на основе структурированного подсвета (рисунок 4).

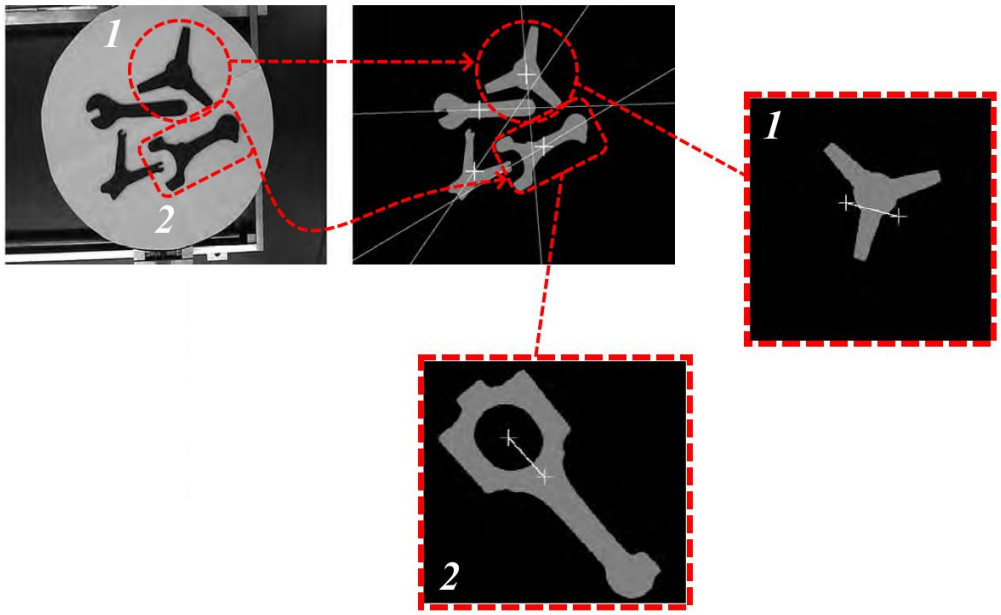


Рис. 3 – Определение расстояния до центра тяжести шатуна

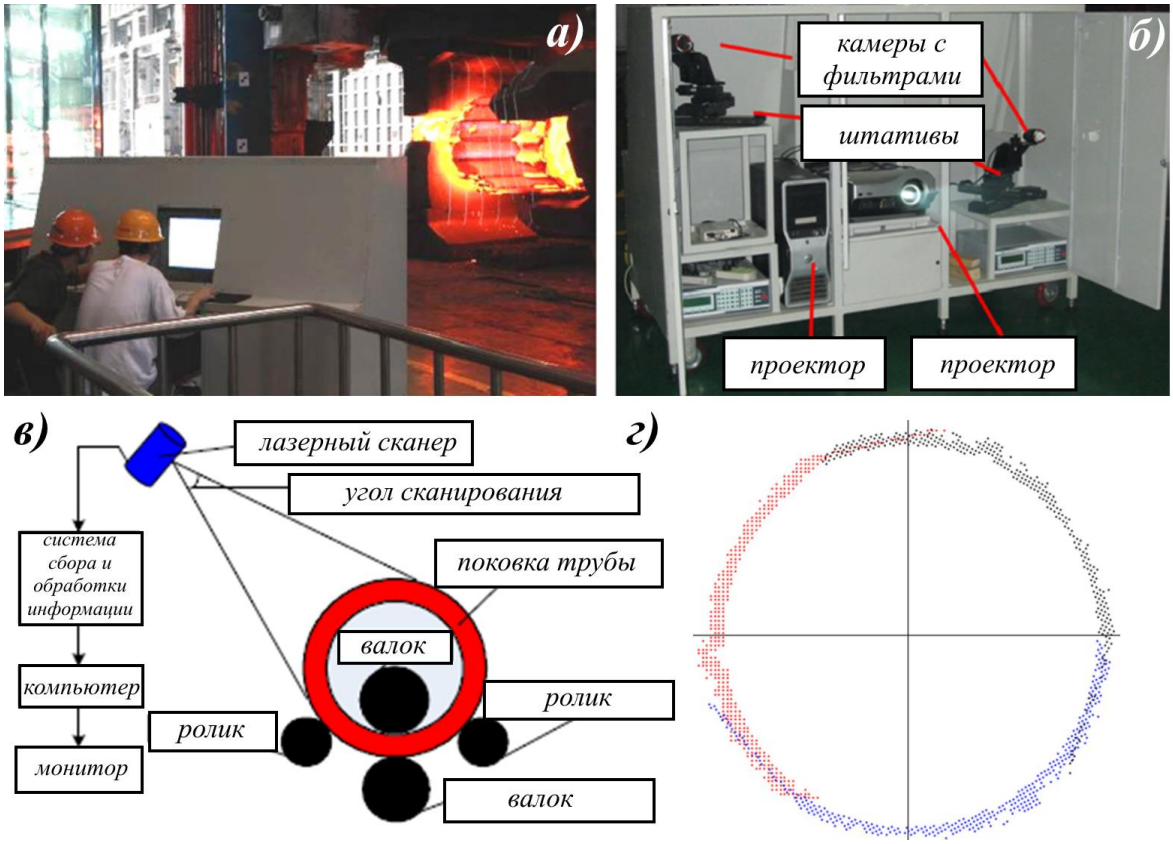


Рис. 4 – Определение геометрических параметров больших поковок

На нагретый слиток в процессе ковки проецируется шаблон в виде параллельных линий. Искажение от этих линий улавливается двумя стереокамерами. При помощи модели распределения отклонений Вейбулла проецируемый свет может быть отделён от фона и тогда геометрия объекта может быть определена с ошибкой 0,7%. Центральная точка линии подсвета определена точно на уровне субпиксела при помощи метода изменения мощности по нормали к поверхности.

Авторами статьи [23] при помощи ЛС Riegl VZ-1000 были получены данные о диаметре вращающейся горячей трубной заготовки, нагретой до температуры 1000°C. Скорость вращения заготовки составил 0,3 м/с, а ошибка измерения для холодной трубы составила менее 2 мм и не более 6 мм – для горячей.

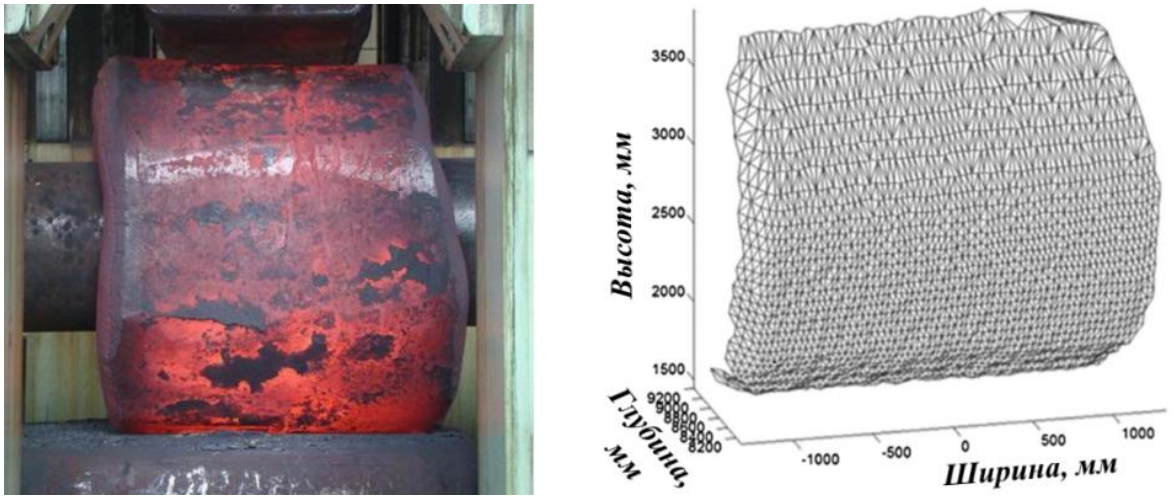


Рис. 5 – Определение диаметра кольца

В статье [24] при помощи моторизированного 2D-лазерного трекера SICK LMS100 были получены точки и реконструирована поверхность горячей поковки (температура ковки 950 – 1200°C). Триангуляционный Делоне была применена для реконструкции 3D-изображения. Общее время, затраченное на получение результата составило 15 с (компьютер 2.66 GHz 4-ёх ядерный CPU, 4ГБ RAM), а ошибка сканирования составила 2%, при размере горячей поковки 3 м.

В статье [25] была применена система XJTUDP для оценки степени пружинения листовой детали после её штамповки. Видна потеря устойчивости в (пружинение) в центральной части. Установлено, что среднее пружинение выше номинального значения составило +2,8 мм, а среднее пржинение ниже номинального значения составило – 4,6 мм.

В статье [26] рассматривается применение сканера ATOS III Triple Scan для сканирования листовых деталей с учётом их отражательной способности и плавных переходов (рисунок 7). Была применена упрощённая модель Наяра, представленная Элленридером [27, 28]. При применении роботизированной системы 3D-сканирования время на проведение сканирования сокращается на 50 – 85%.

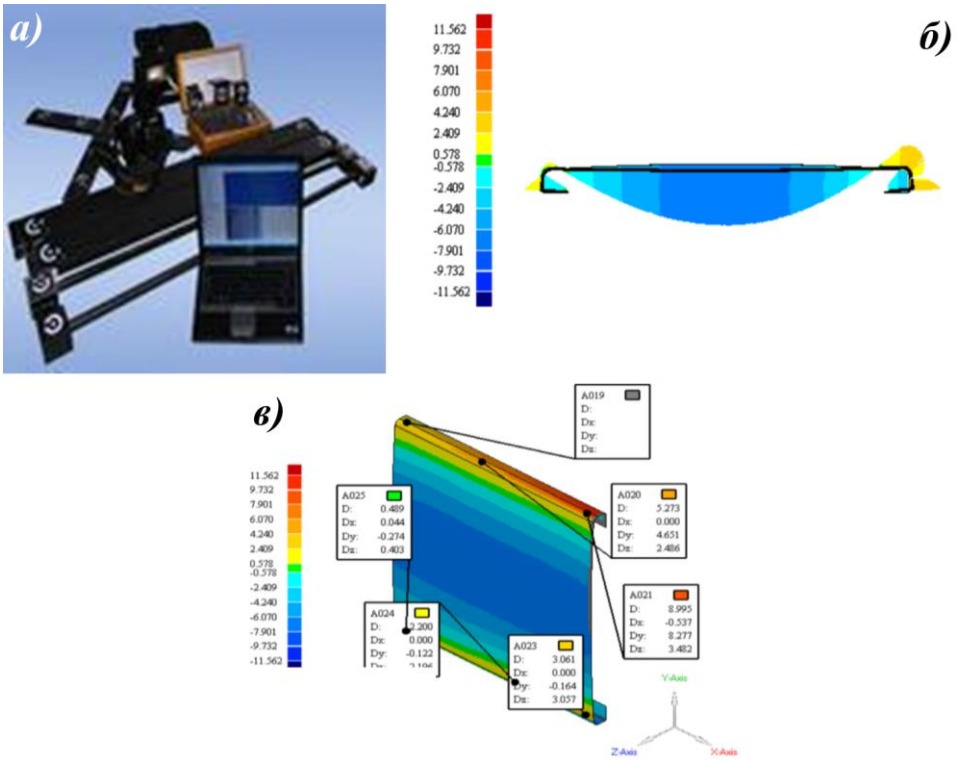


Рис. 6 – Визуализация пружинения листовой детали после штамповки (б – поперечное сечение, 10-ти кратное увеличение)

В статьях [29–32] рассмотрено применение 3D-сканирования для анализа степени износа инструментов и дефектов штамповки. Была применена измерительная рука ROMER Absolute ARM 7520si с

интегрированным лазерным сканером RS3 (точность сканирования 0,053 мм) компании Hexagon.

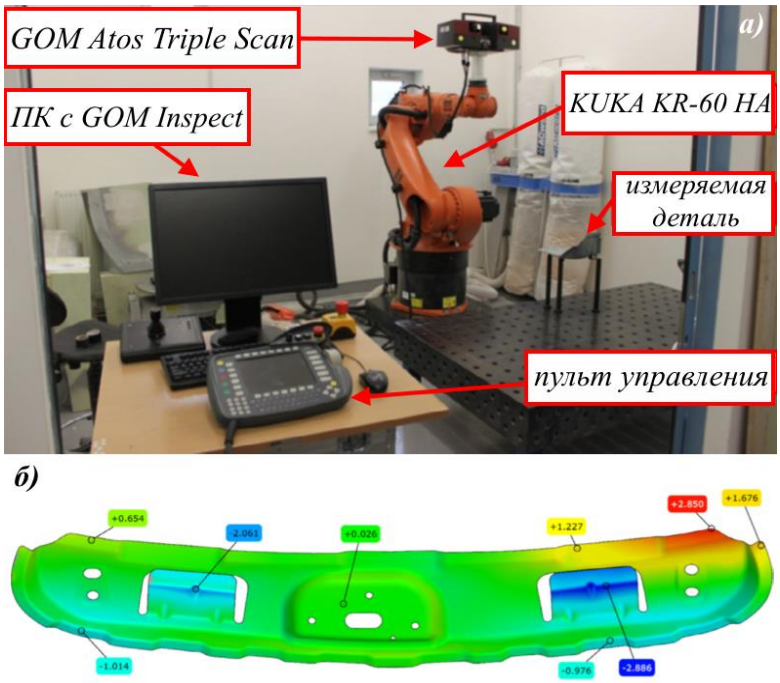


Рис. 7 – Результаты 3D-сканирования поперечины

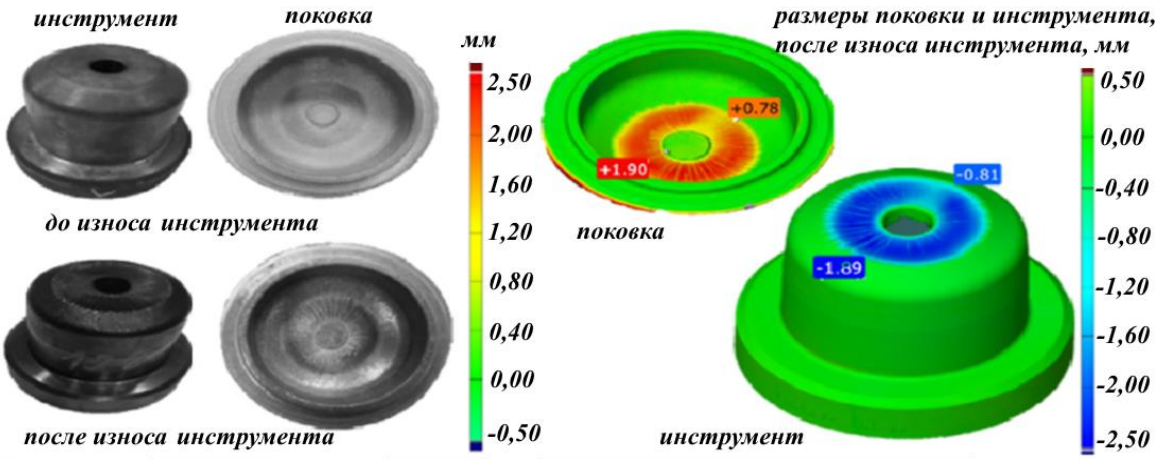


Рис. 8 – Результаты 3D-сканирования изношенного штампового инструмента: а) после изготовления 13 000 поковок; б) сравнение геометрии вставки матрицы и поковки после износа инструмента

Проводились измерения температуры инструмента и поковки в процессе горячей объёмной штамповки в три перехода. Их значения составили: 250°С – температура инструмента, 1120°С – 1150°С –

температура материала. Осуществлялся выборочный контроль, измерялась каждая 1000-ая поковка диска. Были установлены места износа инструментов и виды разрушений (рисунок 8 – 13).

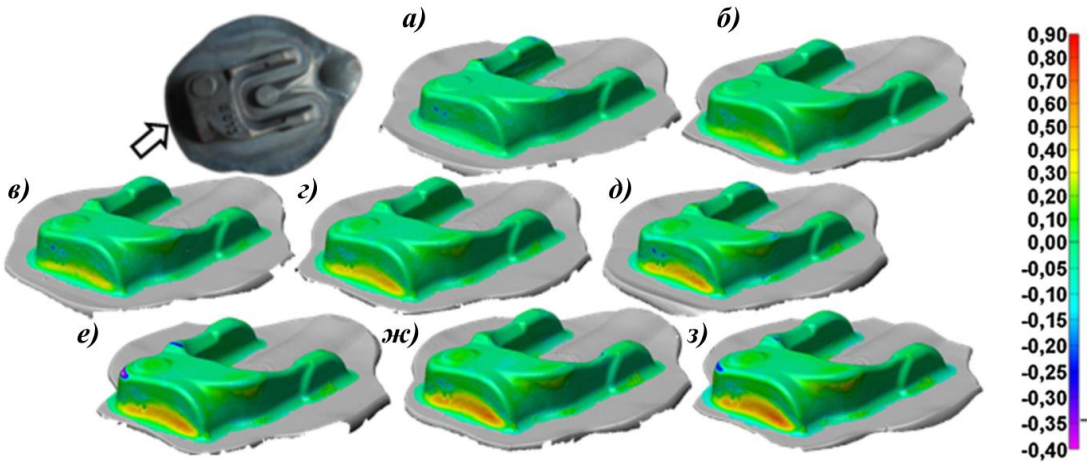


Рис. 9 – Сравнение сканов контактной поверхности инструмента с поверхностью сотой поковки, после изготовления: а) 2 000, б) 4 000, в) 6 000, г) 8 000, д) 10 000, е) 12 000, ж) 14 000 и з) 16 000 поковок

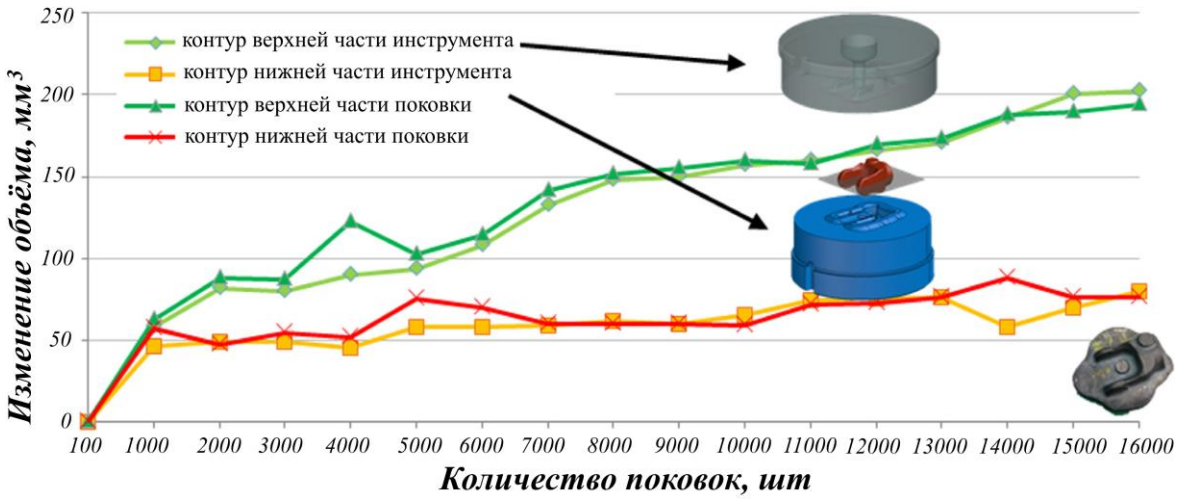


Рис. 10 –Графики объёмного износа в зависимости от числа поковок

В статье [33] авторы использовали одномерную (1D) трансформацию Фурье для получения данных о геометрии деформированной поверхности. Была применена камера с ПЗС-матрицей, а также устройство изменения скорости съёмки (энкодер) в зависимости от скорости движения объекта (рисунок 15).

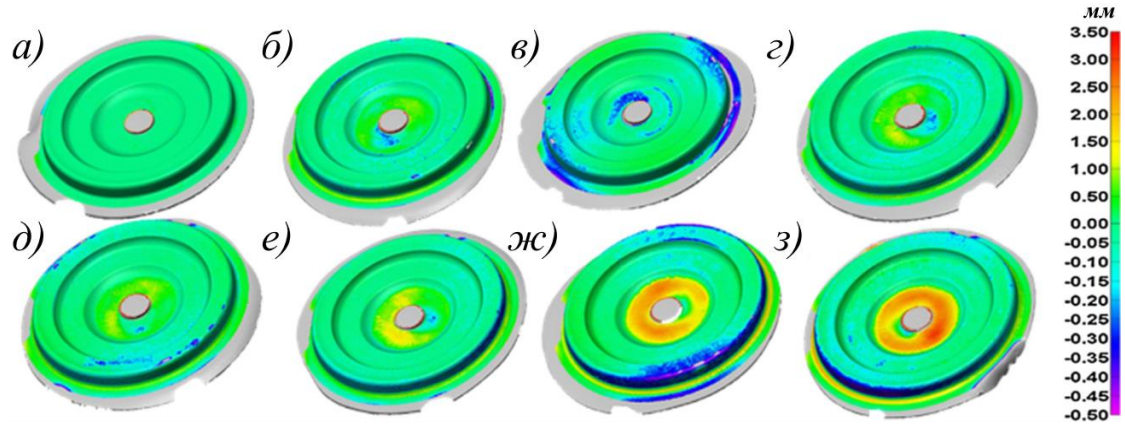


Рис. 11 – Сравнение сканов контактной поверхности инструмента с поверхностью сотой поковки, после изготовления: а) 1 000, б) 2 000, в) 3 000, г) 4 000, д) 5 000, е) 6 000, ж) 7 000 и з) 8 000 поковок.

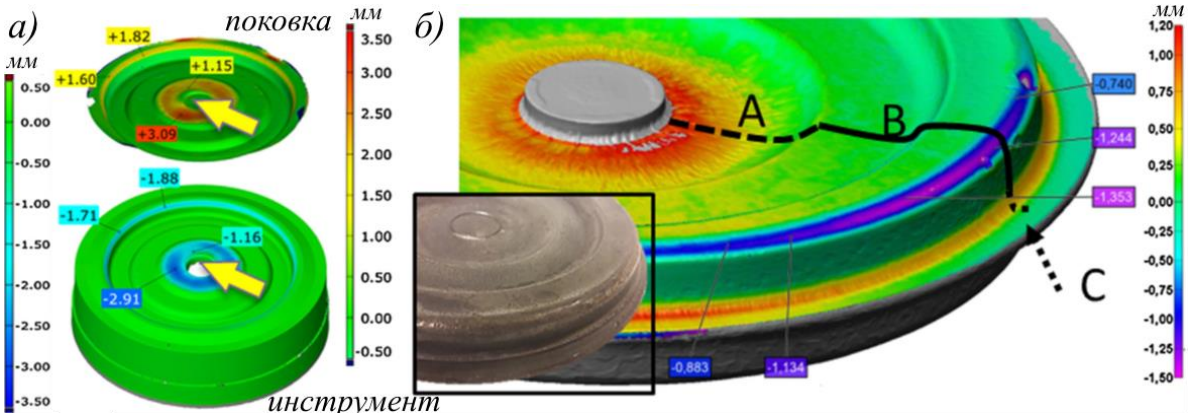


Рис. 12 – Пример реализации реверсивного метода отражения поверхности инструмента на поверхность поковки (а) и условное деление на три области (б)

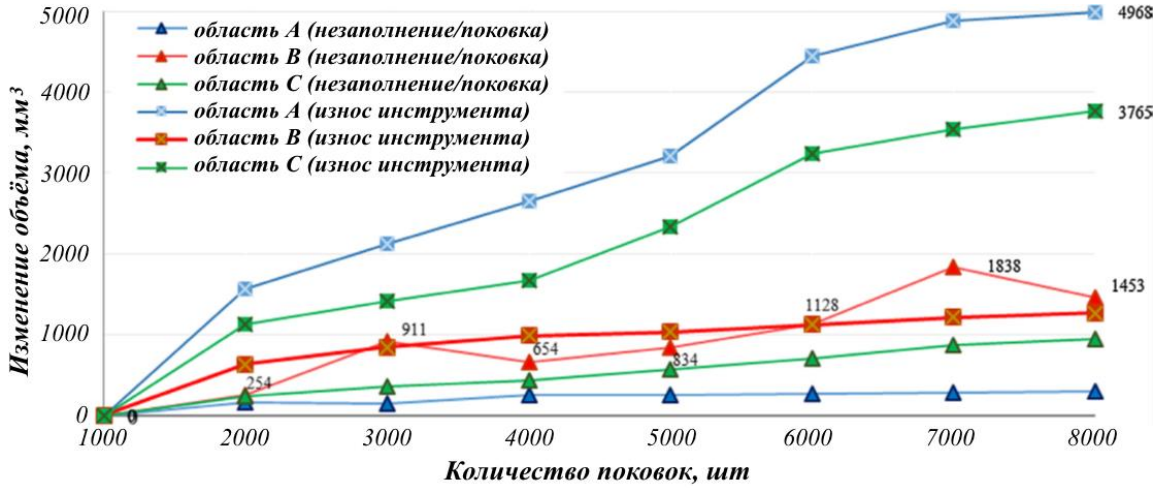


Рис. 13 – Графики объёмного износа в зависимости от числа поковок, с разделением на три области

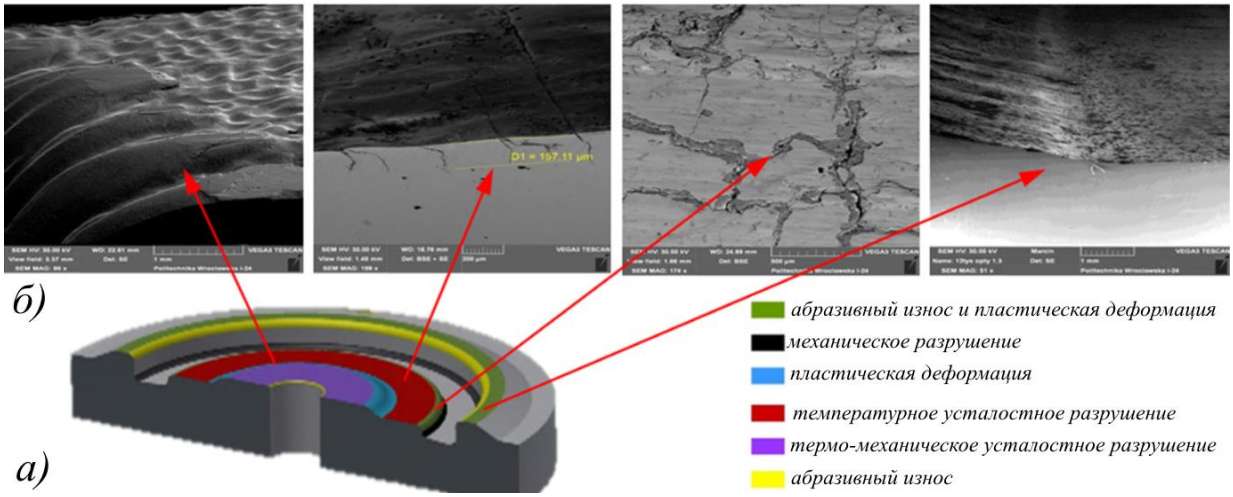


Рис. 14 – Разделение поверхности инструмента на характеристические области: а) выделение областей; б) фотографии изношенных поверхностей.

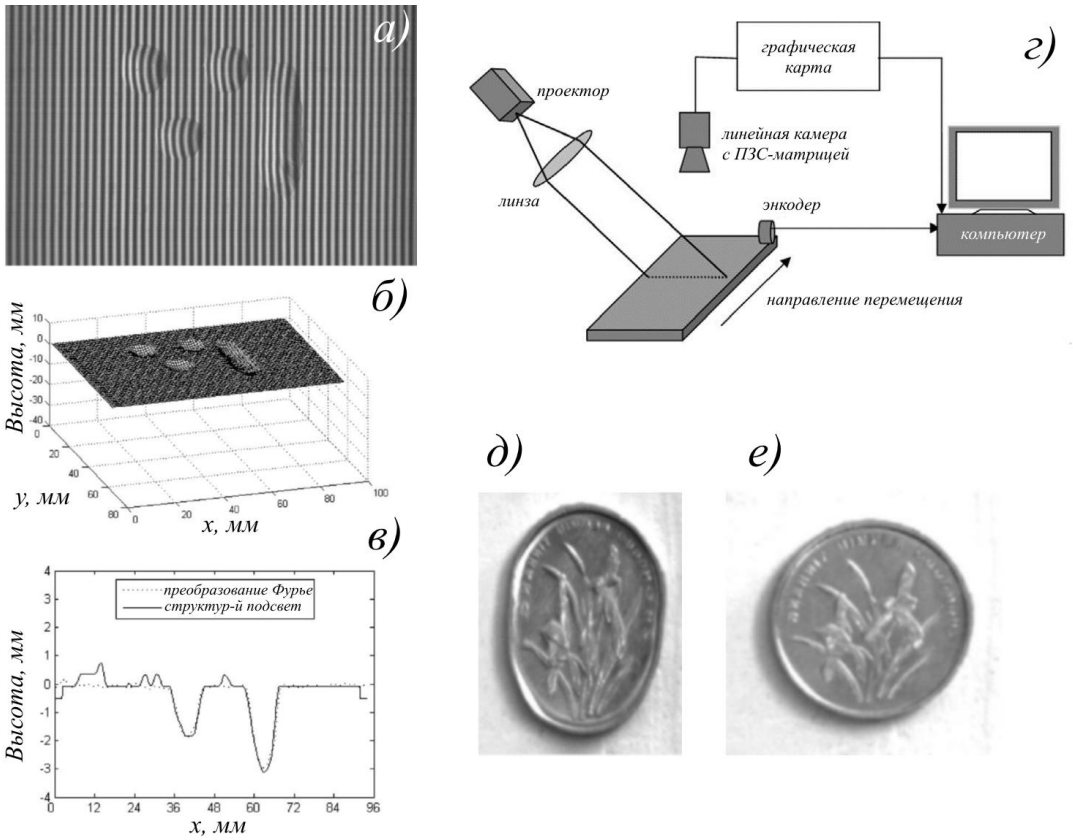


Рис. 15 – Схема сканирования и результаты, полученные без датчика (д) и с датчиком (е) скорости

В статье [34] рассматривается способ определения мест остаточной пластической деформации на фюзеляже самолета, полученной в результате с объектами при полёте, например, попадание града, выполненного из

панелей с сотовой внутренней структурой (рисунки 16 и 17). Измерения проводились с использованием измерительной руки FARO Edge 3D. Применение сканера позволила снизить ошибку определения площади деформированной области в некоторых случаях в 5,5 раза.

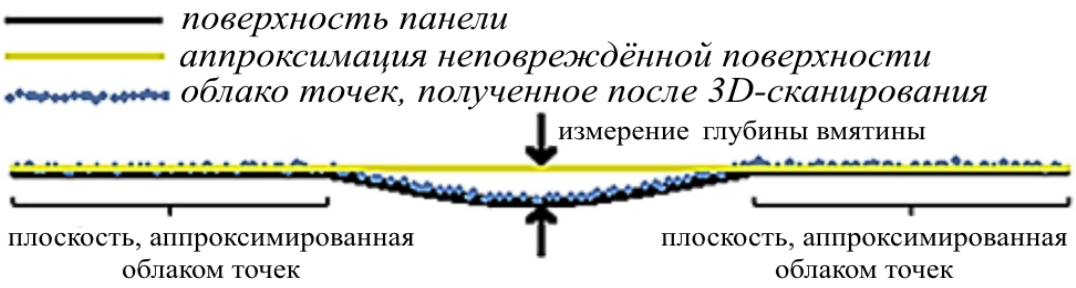


Рис. 16 – Измерение величины прогиба после деформации

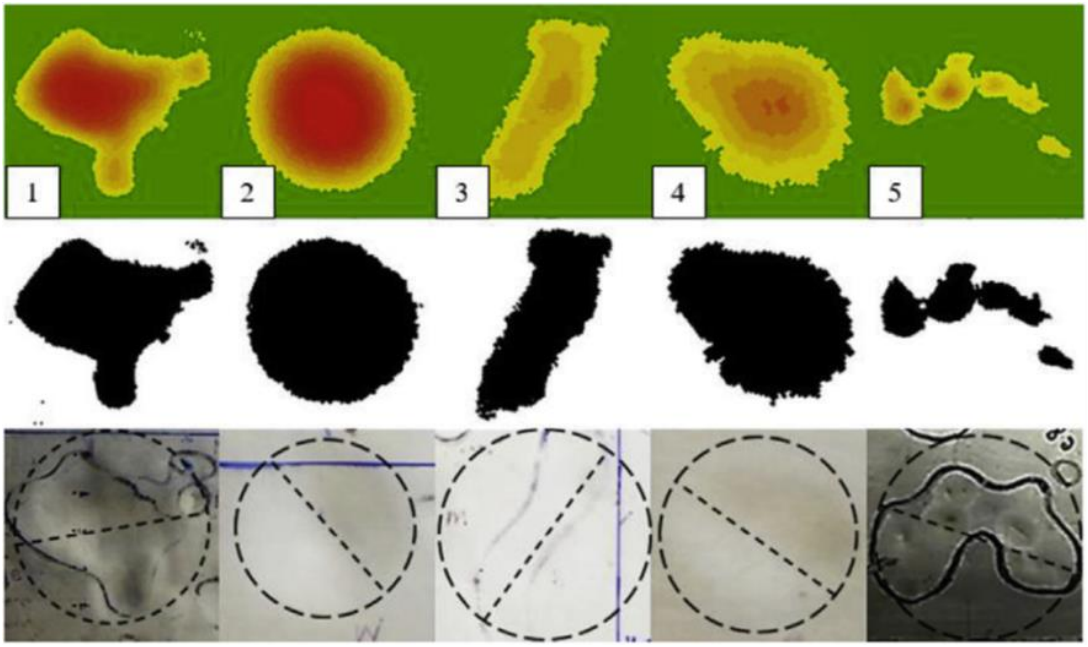


Рис. 17 – Сравнение форм мест деформации: 3D-сканирование (вверху), изображение после фильтрации (по центру) и ручной способ определения размеры вмятины по среднему диаметру эквивалентной фигуры (внизу)

В статье [35] рассмотрена методика летучего (инлайн) контроля поковок корпуса шарнира равных угловых скоростей в процессе их горячей объёмной штамповки (рисунок 18). Сканирование выполнялось при помощи лазерного сканера. Общее время, затраченное на сканирование и

реконструкцию объекта, составило 60 с при выборке сканирования каждой 20 поковки (период сканирования). Темп штамповки равнялся 20 шт/мин. Температура поковки в момент сканирования составляла 600°С.

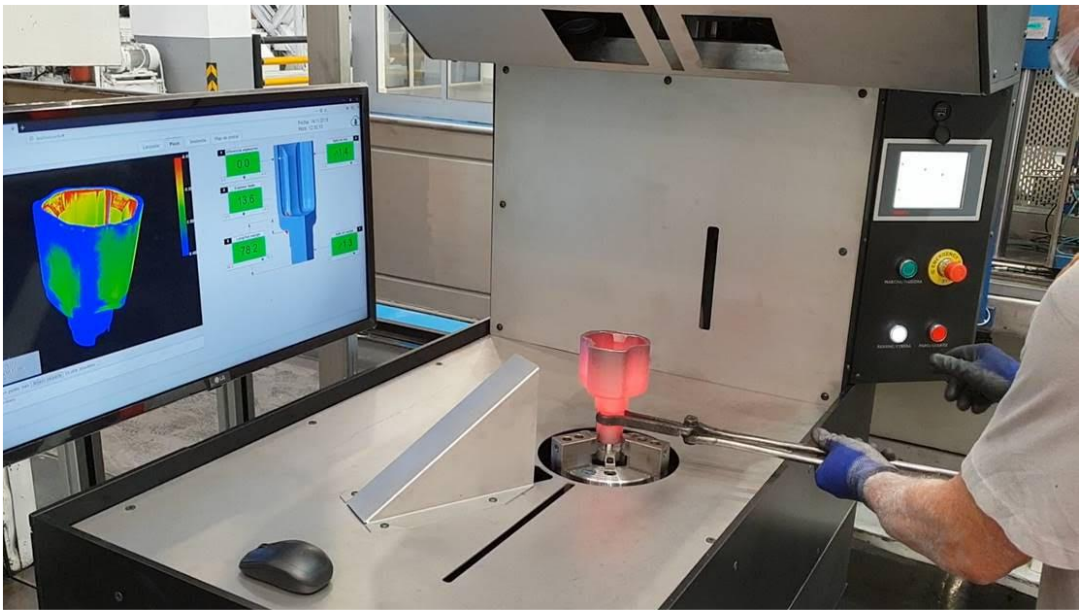


Рис. 18 – Проведение летучего (инлайн) контроля горячей поковки

Применялся лазер с длинной волны 450 нм. Температура не оказывала влияния на результаты сканирования. Таким образом время, затрачиваемое на проверку геометрии, сократилось с 20 минут до 1 минуты. Кроме этого из-за более частой проверки сократилось количество забракованных деталей в партии на 95%.

В статье [36] рассматривается применение лазерного сканера Leica ScanStation2 (рисунок 19). Измерение размеров поковок проводилось в холодном и горячем состояниях. Ошибка сканирования не превышала 8 мм. По сравнению с традиционной техникой измерения при помощи ручных мерительных инструментов было достигнуто сокращение времени на 33%. Система позволяет выбраковывать поковки, выявляя дефекты прежде, чем поковка поступает на следующую операцию обработки.

Другие практические примеры применение 2D- и 3D-сканирования отражены в статьях [37–50] и отражают широкий диапазон применимости

подобных систем с целью ускорения и повышения качества изделий в процессе проведения летучего и передвижного (скользящего) типов контроля [5, 6].

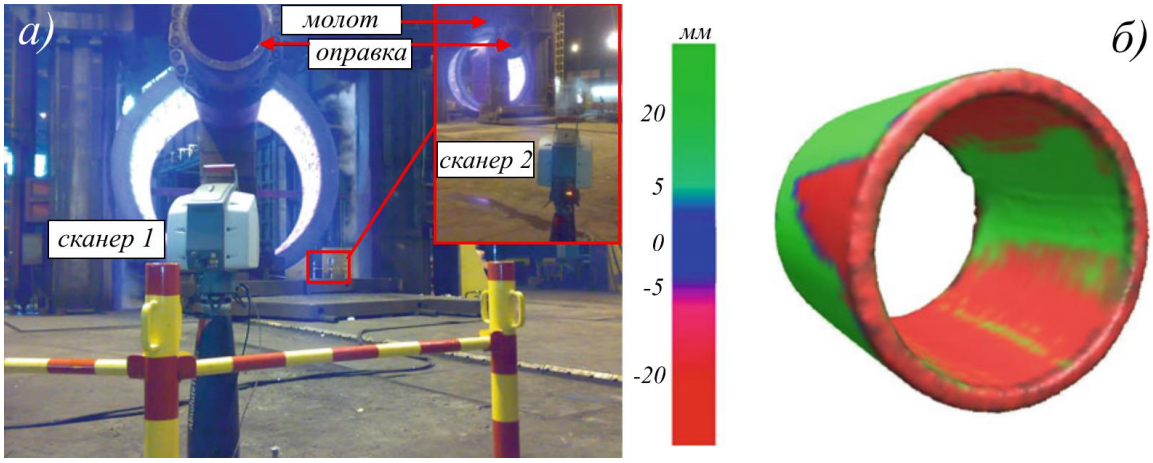


Рис. 19 – Летучее сканирование большой поковки

Глава 2. Оборудование и методы 3D-сканирования

2.1 Системы 3D-сканирования

Сравнение точности измерительных устройств, по заявленным техническим характеристикам производителя техники, показано на рисунке 20. Современные координатно-измерительные машины также относят к средствам 3D-сканирования, так как получение облака точек возможно осуществить на и таких машинах, но за более длительный промежуток времени. Бесконтактные сканеры являются более портативными, не смотря на то, что КИМ являются, как правило, более высокоточными. Кроме того, контактные сканеры подходят для твёрдых материалов, в то время, как бесконтактные сканеры – для мягких, полутвёрдых и твёрдых материалов.

Классификации устройств по разным признакам может быть найдена в разных открытых работах: статьях в периодических изданиях и на сайтах, а также в книгах [13, 52–60].

Ручной 3D сканер ZScanner 700 (бесконтактный сканер) позволяет получить облако точек и поверхностей путём обхода объекта исследования на 360°. При сканировании на поверхность проецируется перекрестие двумя линейными лазерами (класс 1). Частота получения трёхмерных поверхностей 15 поверхностей в секунду. После этого полученные поверхности объединяются в одну полигональную 3D-модель в программном обеспечении.

Оптическая система GOM ATOS II (бесконтактный сканер) работает на принципе структурированного подсвета. В отличие от портативных, ручных сканеров она устанавливается на штативе, а исследуемый объект вращается на предусмотренном поворотном столике.

Мобильная координатно-измерительная машина или измерительная рука FARO EDGE (контактно-бесконтактный сканер) сочетает высокую мобильность, точность и универсальность при сравнительно невысокой

цене и малом весе. Улучшенная конструкция балансира и правильное распределение веса элементов измерительной руки позволяют оператору работать эффективнее.

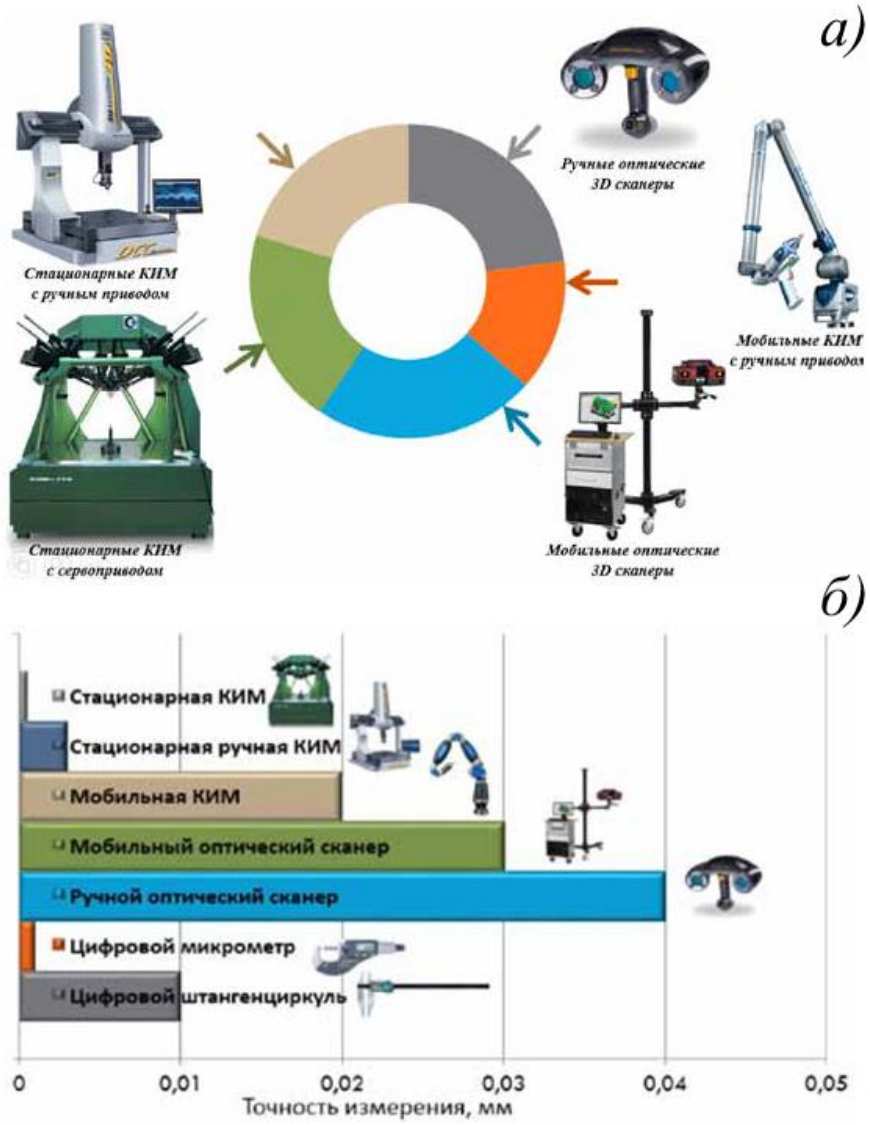


Рисунок 20. Классификация средств сканирования: а) по способу взаимодействия с объектом (контактный и бесконтактный) и б) по точности измерения [51]

Помимо температурных датчиков, которые вносят корректировки в результат измерения, имеются датчики сдвига, позволяющие правильно установить КИМ. В систему встроен сенсорный компьютер, с интегрированным интуитивно простым программным обеспечением,

позволяет проводить несложные геометрические измерения без использования ноутбука или стационарного компьютера. К измерительной руке предусматривается возможность установки 3D-сканера лазерного типа.

Компактные координатно-измерительные машины TESA MICRO-HITE (контактный сканер) имеют ряд уникальных особенностей. Она занимает среднее положение между портативным сканером и традиционной КИМ, позволяет обеспечить высокую точность и универсальность.

Конструкция КИМ-750 (контактный сканер) компании ООО «Лапик» обеспечивает шесть степеней свободы рабочего органа за счёт шести одновременно и согласовано управляемых осей перемещения. Жёсткость конструкции превосходит аналоги в 5 раз. Измерительная система отделена от силовой, что обеспечивает долговременную стабильность характеристик в повышении точности измерений.

На сегодняшний день все бесконтактные сканирующие системы имеют два способа реализации сканирования: безмаркерный, при котором привязка к точкам поверхности ведётся либо при помощи системы фотограмметрии, либо при помощи алгоритма распознавания текстуры поверхности, и маркерный, требующий установки специальных отражающих маркеров.

Устройства сканирования также можно классифицировать на три большие группы: для сканирования мелких объектов (с размером до 1 000 мм), для сканирования средних объектов (с размером от 1 000 мм до 10 000 мм) и для сканирования крупных объектов (с размером более 10 000 мм). Такое деление связано с максимально возможным полем сканирования, которое определяет количество сканов, необходимое выполнить для получения всех геометрических данных об объекте. В дальнейшем в поставляемом вместе с системой сканирования ПО позволяет сшивать отдельные сканы до полигональной модели. Чем больше количество сканов, тем больше времени нужно затратить на их позиционирование

относительно друг друга. При сканировании средних объектов, как правило, создают опорную сеть при помощи фотограмметрии, относительно которой в дальнейшем и позиционируют полученные отдельные сканы. При сканировании крупных объектов применяют лазерные трекеры, которые следят за перемещением ручного, портативного сканирующего устройства. В таблице 2 показаны системы, классифицированные по размерам сканируемых объектов.

Также при сканировании помимо определения координат сканов для их дальнейшей сшивки требуется учитывать отражающие способности поверхностей. Для повышения степени равномерного отражения падающего света от поверхности на поверхность наносят специальный матирующий спрей, например, проявитель, применяемый для проявления пенетранта при неразрушающем способе контроле наличия трещин на поверхности. В промышленных системах, там, где требуется непрерывное, поточное сканирование временно модифицировать поверхность не представляется возможным. Также при производстве кузова автомобиля невозможно покрывать каждую деталь в связи с высоким производственным тактом штамповки, сварки и сборки листовых кузовных деталей.

В Приложении 1 показаны виды комплектующих (отражающие маркеры и балки, матирующие вещества), повышающие качество результатов сканирующих систем. В Приложении 2 представлена классификация устройств сканирования по габаритным размерам объектов сканирования.

2.2 3D-сканер на основе структурированного подсвета

Техника для 3D-сканирования основывается на нескольких физических эффектах, в частности, эффектах геометрической оптики (отражение, дифракция, интерференция и дисперсия света, фокусировка

лучей, проходящих через линзы проектора и камер) и теории полупроводников (ПЗМ- и КМОП-матрицы). Из теории фотограмметрии известно, что информацию по форме, положению и размерам исследуемого объекта получают по двум снимкам, сделанных из разных точек пространства [123].

Сканирование на основе структурированного подсвета (ССП) отличается от лазерного метода сканирования (ЛС) и является усовершенствованным методом фотограмметрии (ФГМ). Вместо сканирования поверхности, происходит проецирование двумерной модели некогерентного источника света с образованием узоров. Подающий на криволинейную поверхность узор искажается. Отражённый свет попадает на одну (монокамера) или две (стереокамеры) камеры и методом триангуляции рассчитывается расстояние до объекта. (рисунки 21 и 22).

По сравнению с ЛС, в ССП происходит захват прямоугольной области с большим количеством точек, чем может захватить простой линейный лазер. Но так как частота когерентного источника излучения (лазера) выше, чем у лампового проектора или проектора, работающего на светодиодном модуле (DLP), то время сканирования приблизительно идентично.

При работе в монохромном режиме сканирование достигается наибольшая точность сканирования, чем при работе в цветном режиме. Это связано с переходом с одной длины цветовой волны на другую и образованием муара, который далее отфильтровывается системой. Поэтому монохромный режим или сканирование в градациях серого является желательным при сканировании объектов с высокой детализацией.

Для осуществления сканирования требуется провести калибровку сканера, нанести матирующий спрей на поверхность исследуемого объекта ровным слоем и разместить его на поворотном столике, разместить метки-маркеры, выключить свет. Существует вариант безмаркерного сканирования, который также не требует матирования объекта. Для этого применяют сканеры с синим светом, вместо белого. Он позволяет

сканировать даже при дневном освещении объекта [63, 64]. В Приложении 3 показана методика калибровки 3D-сканера RangeVision [65] и сравнение технических характеристик, применённых в работе других устройств 3D-сканирования. Разрешение при ЛС задаётся выражением (1), в то время, как при ССП разрешение определяется разрешением камер.

$$\Delta\varphi(\Delta\theta) = \frac{180d}{1.41\pi S}, \tag{1}$$

где s – расстояние от объекта сканирования до дальномера или лазера; d – минимальный размер сканируемого объекта, который впоследствии отображается на мониторе при сканировании; φ и θ – угловое разрешение сканирования по осям X и Y, которое зависит от особенностей сканера, его точности сканирования.

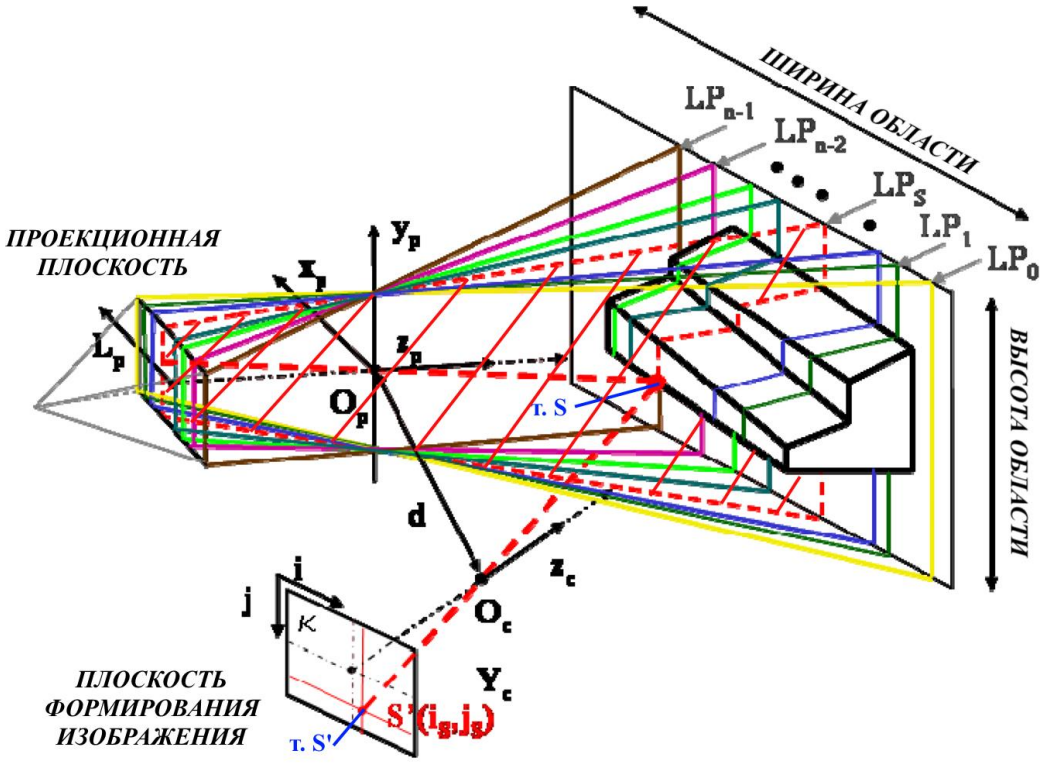
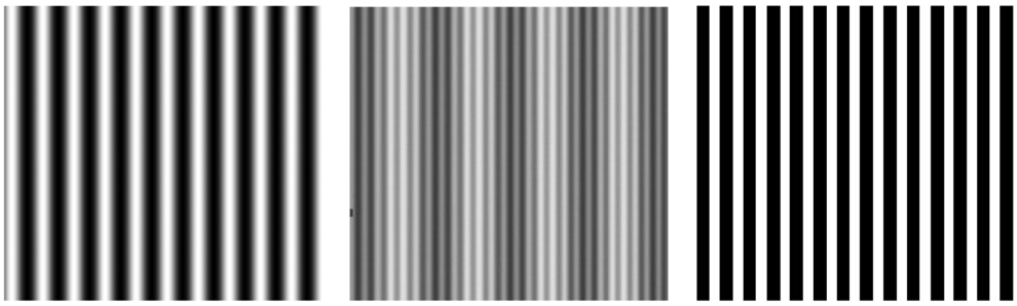


Рис. 21 – Схема сканирования на основе структурированной подсветки [60].

И в случае ССП, ив случае ЛС результатом является информация, представляющая набор значений по трём координатам в сферической системе координат (углы по вертикали и горизонтали), которые связаны с декартовыми координатами известными формулами (2).

$$\left.\begin{aligned} X &= R\cos\varphi\sin\theta \\ Y &= R\sin\varphi\sin\theta \\ Z &= R\cos\theta \end{aligned}\right\}, \qquad (2)$$

где *x*, *y* и *z* – конечные координаты точек вектора расстояния *r* до объекта; φ – горизонтальный угол; θ – вертикальный угол.



а) б) в)

Рис. 22 – Примеры стандартных проецируемых узоров в виде вертикальных линий различной толщины, получаемых как: а) рисунок синусоидальных полос. б) наложение двух синусоидальных полос на разных частотах. в) проекция полос прямоугольного профиля

2.3 Принцип построения трехмерной модели на основе результатов сканирования

Говоря о разных видах и применениях данных технологии, конечным результатом будет готовая полигональная или сеточная 3D-модель (ПГС – полигональная сетка), состоящая из объединённых друг с другом массива точек. Сам процесс получения 3D-модели можно разделить на две части.

Первая часть – собственно сканирование объекта, получение облака точек, работа со сканером. Вторая часть – создание 3D-модели по полученному скану, работа в специализированном ПО (позиционирование и сшивка сканов, создание ПГС или полигонизация, исправление ПГС) [66–69]. В случае цветного сканирование возможно наложение текстуры (рисунок 23).

Итоговый файл записывается в одном из форматов представления полигональной модели (stl, txt, csv, odt, xls). Полигональная модель не может быть отредактирована инструментами программ твердотельного моделирования (Т-Флекс, Компас, Inventor, SolidWorks, SolidEdge), поэтому её необходимо преобразовать в твердотельную модель или воспользоваться программами полигонального моделирования (Rhinoceros, Z-Brush, Blender).

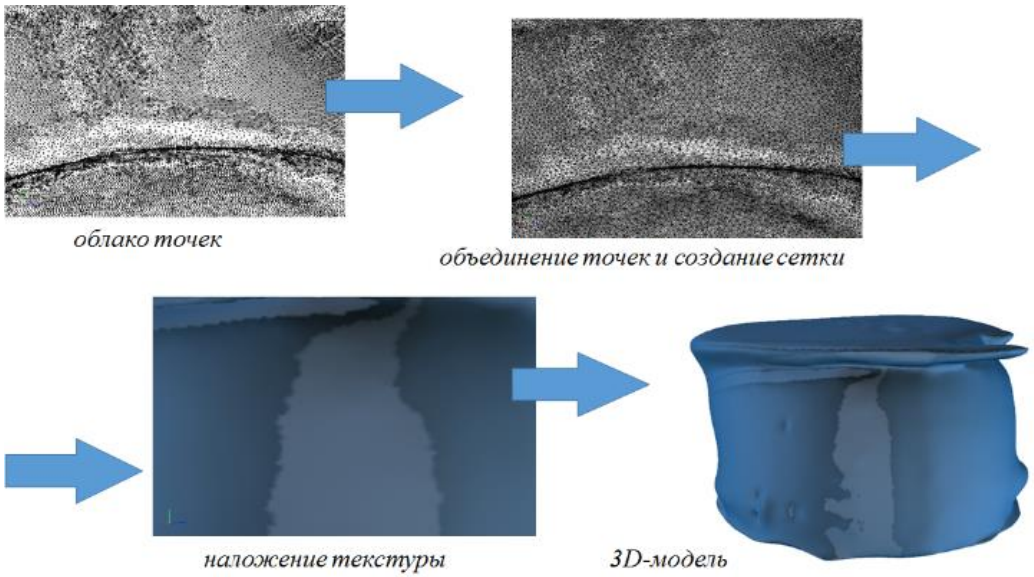


Рис. 23 – Этапы последовательного получения 3D-модели [72]

2.4 Точность 3D-сканирования объектов

Процесс реконструкции 3D-модели является непростым. Точность построения конечной 3D-модели зависит не только от машины, но и от оператора, работающего на машине и в специализированном ПО.

Во-первых, требуется соединение отдельных сканов. Самым точным способом будет являться тот, при котором объект полностью попадает в область сканирования. Также возможно совмещение сканов по специальным маркерам, место установки которых определяется оператором вручную (Приложение 1). Для больших объектов возможно совмещение по маркерам с помощью технологии ФГМ [71, 72].

Исходя из определения точности («Точность (accuracy) – степень близости результата измерений к принятому опорному значению») по ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 [62] в работе [61] было проведено следующее исследования для получения информации о реальной точности портативного, ручного 3D-сканера Creaform MetraScan. Одной из основных технических характеристик оборудования для сканирования является «объемная точность» [61]. Допустим, что имеется базовая точка в пространстве. При проведении оптического сканирования сканирующее устройство может отклониться от этой точки на расстояние, не более чем указанное в спецификации оборудования. Так для сканера Creaform MetraScan объёмная точность составляет 0,085 мм или 85 мкм. Это означает, что диаметр сферы, описанной вокруг базовой точки в пространстве, не может быть более ∅85 мкм, т.е. точки пространства будут отклоняться относительной базовой точки во все стороны по радиусу сферы не более, чем на R = 42,5 мкм. Эти слова можно проиллюстрировать следующим образом (рисунок 21). Для проверки значения объёмной точности измерения было произведено измерение эталонной меры, калиброванной при помощи КИМ и представляющей собой две сферы, диаметром D_1 и D_2, расположенные на расстоянии L_1 = 647,730 мм. В таблице 2 были внесены результаты оптического измерения при помощи сканера. Для сравнения значения расстояния «L» было проведено измерение контактной измерительной портативной системой Creaform HandyProb и вычисленно отклонение (Δ).

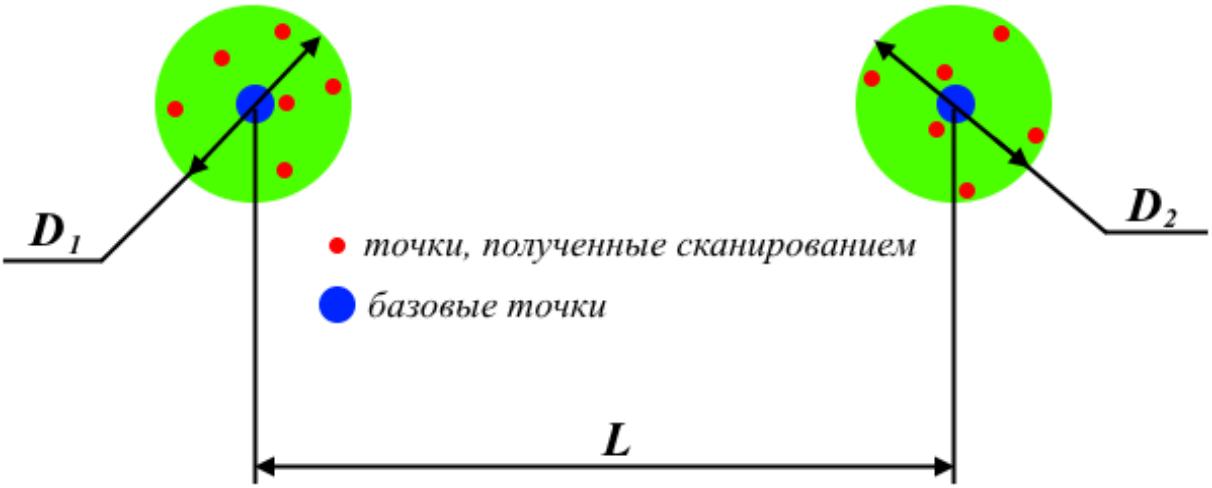


Рис. 24 – Схема измерения расстояния между двумя точками на объекте

Таблице 2. Результаты измерения расстояния «L» эталонной меры

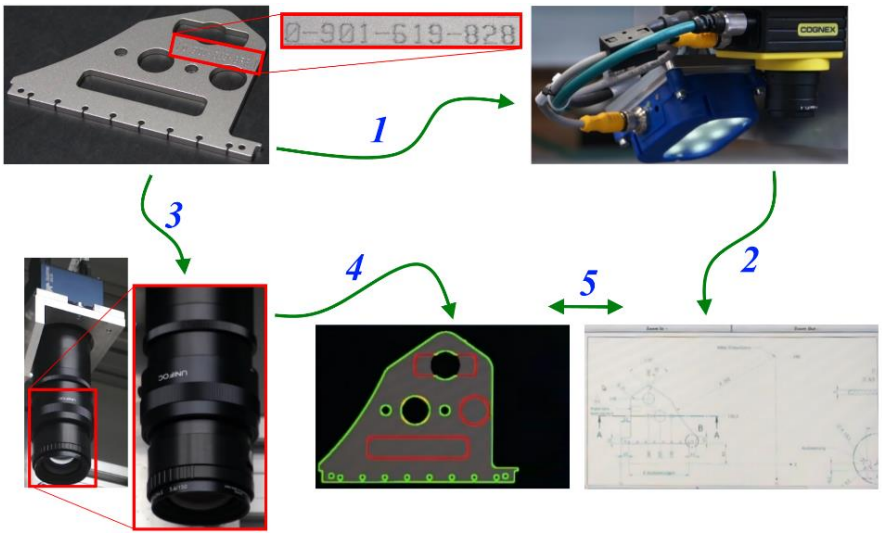
Параметр	**Расстояние «L», MetraScan, мм**	**Расстояние «L», HandyProb, мм**	**D_1, мм**	**D_2, мм**
L_1	647,719	520,666	38,112	38,110
L	647,730	520,658	38,119	38,121
Δ	0,011	0,008	0,007	0,011

Видно, что заявленная объёмная точность соблюдена. Бесконтактные системы только начинают применяться в качестве бесконтактного способа метрологической оценки точности изделия. Наибольший интерес к ним проявляют на тех производствах, где разрабатываются прототипы будущих изделий или инструментов, не вошедших пока в серийное производство. Применяя данный способ метрологический контроль размеров ускоряется за счёт большего количества измеряемых точек. Таким образом, метрологические измерения перестанут быть точечными и будут носить полевой характер.

На сегодняшний день нет универсальных камер, которые бы одновременно позволяли получать высокоточные макромодели (свыше 1 метра), мезомодели (менее 1 метра) и микромодели (менее 1 мм) объектов. В связи с этим произошло разделение устройств, для реализации

«машинного зрения» на устройства для плоскостного распознавания геометрии (системы фотограмметрии или 2D-сканеры), обладающие высокой разрешающей способностью, и объёмного распознавания геометрии (лазерные и оптические 3D-сканеры) с невысокой разрешающей способностью. Первая группа сканеров применяется на поточных линиях, в которых необходим контроль размеров детали в/на плоскости (рис. 25а). Вторая группа предназначена для получения геометрической информации о всей детали и построения полигональной 3D-модели/поверхности (рис. 25б). При сравнении размеров изготовленной детали в случае 2D-сканирования проводится сравнение с чертежом (шаг 5, рис. 25а), а в случае 3D-сканирования с твердотельной моделью (рис. 25б). Причём чертёж и твердотельная 3D-модель разрабатываются во внешних CAD-программах. Иногда при 3D-сканировании больших объектов применяются инструменты фотограмметрии, позволяющие, создавать опорную сеть, относительно которой позиционируются отдельные сканы, полученные в процессе 3D-сканирования. Например, такой подход реализуется при 3D-сканировании автомобильных кузовов (макромодель). И, наоборот, фотограмметрия может применяться для локализации мест расположения поверхностных дефектов на детали. Например, полимерный прототип шатуна, напечатанный по технологии FFF, имеющий на теле поверхностные трещины (микромодель, рисунок 26) [4, 5].

Для того, чтобы получить, например, детализированные идентификационные метки на деталях (рисунок 27) необходимо проводить последовательное сканирование и совмещение результатов сканирования (сканов). Это позволяет получать два набора точек, один из которых описывает большой объект, а другой – небольшую область на нём; в последствие обе области совмещаются вместе и на их основе создаётся полигональная сетка (stl-модель).



а)



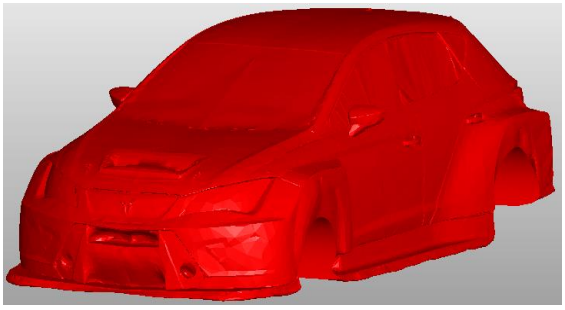
б)

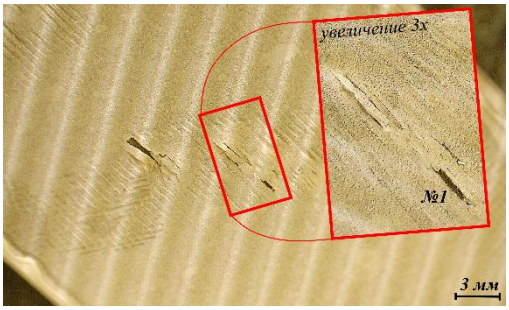
Рис. 25 – Примеры оптических систем: а – 2D-сканирование детали после чистовой вырубки системой Stemmer Imaging, цифрами указана последовательность идентификации детали и особенностей геометрии [75]; б – 3D-сканирование зубчатого венца регулируемой шестерни ГРМ системой RangeVision, работающей по принципу структурированного подсвета

На рисунке 27а представлена деталь «Кронштейн крепления автомобильного двигателя», на рисунке 27б – её полигональная модель. В случае применения камеры 9 мм, которая применялась для сканирования основного объекта, идентификационная метка получается расплывчатой и плохо читаемой (рисунке 27в).



а)


б)



в)

Рис. 26 – Пример оптического сканирования гоночного автомобиля: а – исходный объект; б – полученные сканы левой боковой поверхности; в – трещина на поверхности прототипа, длина трещины №1 составляет 0,91 мм [73, 74]

При применении объектива 25 мм качество идентификационной метки возрастает (рисунке 27г). Такая виртуально полученная метка может быть распознана человеком или камерой, проведено сопоставление детали с эталоном из базы данных (БД) изделий. На рисунке 27д, 27е и 27ж показаны деталь «Кронштейн правой опоры двигателя», её полигональная модель и идентификационная маркировка соответственно.

В общем случае точность (погрешность, ошибка) получения виртуальной копии объекта (ΔΣ), определяемая в микрометрах, может быть описана простой суммой нескольких переменных по уравнению 14.

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{3D-\text{п}} + \Delta_{3D-\text{с}} + \Delta_{3D-\text{м}} = (\Delta_{\text{СПО}} + \Delta_{\text{СПТ}}) + (\Delta_{\text{НС}} + \Delta_{\text{ОС}} + \Delta_{\text{ОСО}}) + (\Delta_{\text{ППО}} + \Delta_{\text{ВОО}} + \Delta_{\text{ПР}}) \quad (3)$$

где $\Delta_{3D\text{-п}}$ – погрешность 3D-печати; $\Delta_{3D\text{-с}}$ – погрешность 3D-сканирования; $\Delta_{3D\text{-м}}$ – погрешность в результате обработки облака точек, создания stl-

модели и виртуального измерения; $\Delta_{СПО}$ – существующая погрешность, связанная с оборудованием, на котором был изготовлен объект, определяется техническими характеристиками оборудования; $\Delta_{СПТ}$ – существующая погрешность, связанная с технологией 3D-печати, определяется правильностью выбора параметров 3D-печати; $\Delta_{НС}$ – погрешность настройки сканера, определяется по результатам калибровки; $\Delta_{ОС}$ – погрешность совпадения параметров окружающей среды (условий эксплуатации сканера), определяется экспериментальным путём; $\Delta_{ОСО}$ – погрешность, связанная с оптическими свойствами исследуемого объекта (цвет и текстура материала, отражательные и рассеивающие способности и т.д.); $\Delta_{ППО}$ – погрешность первичной обработки облака точек на компьютере (полигонизация модели), определяется по карте отклонений размеров; $\Delta_{ВОО}$ – погрешность вторичной обработки объекта на компьютере (сглаживание, переразбиение поверхности и т.д.), определяется по карте отклонений размеров; $\Delta_{ПР}$ – погрешность построения размеров в ПО класса CAI, предназначенного для виртуального инспектирования качества деталей (CAI) и построения виртуальной карты отклонений геометрических размеров (КОГР) от эталонной геометрии, полученной прямым проектированием в CAD-программе, как, например, GOM Inspect, VXinspect, PowerINSPECT, Geomagic Qualify, Inspire Hexagon, предназначена для виртуальной оценки погрешностей результатов сканирования, которые могут быть представлены либо в виде облака точек, либо в виде stl-модели.

В качестве объектов исследования были взяты Платоновы тела: додекаэдр и икосаэдр. Прототип был изготовлен методом 3D-печати по технологии FFF из АБС-пластика (плотность исходного материала составляет 1,06 г/см^3). Оптическое сканирование проводилось на оптическом сканере RangeVision Spectrum с двумя камерами со съёмными объективами, работающем по принципу структурированного подсвета.

Точность сканирования находится в диапазоне 20 – 200 мкм. Использовался объектив 25 мм (наименьшая область сканирования).

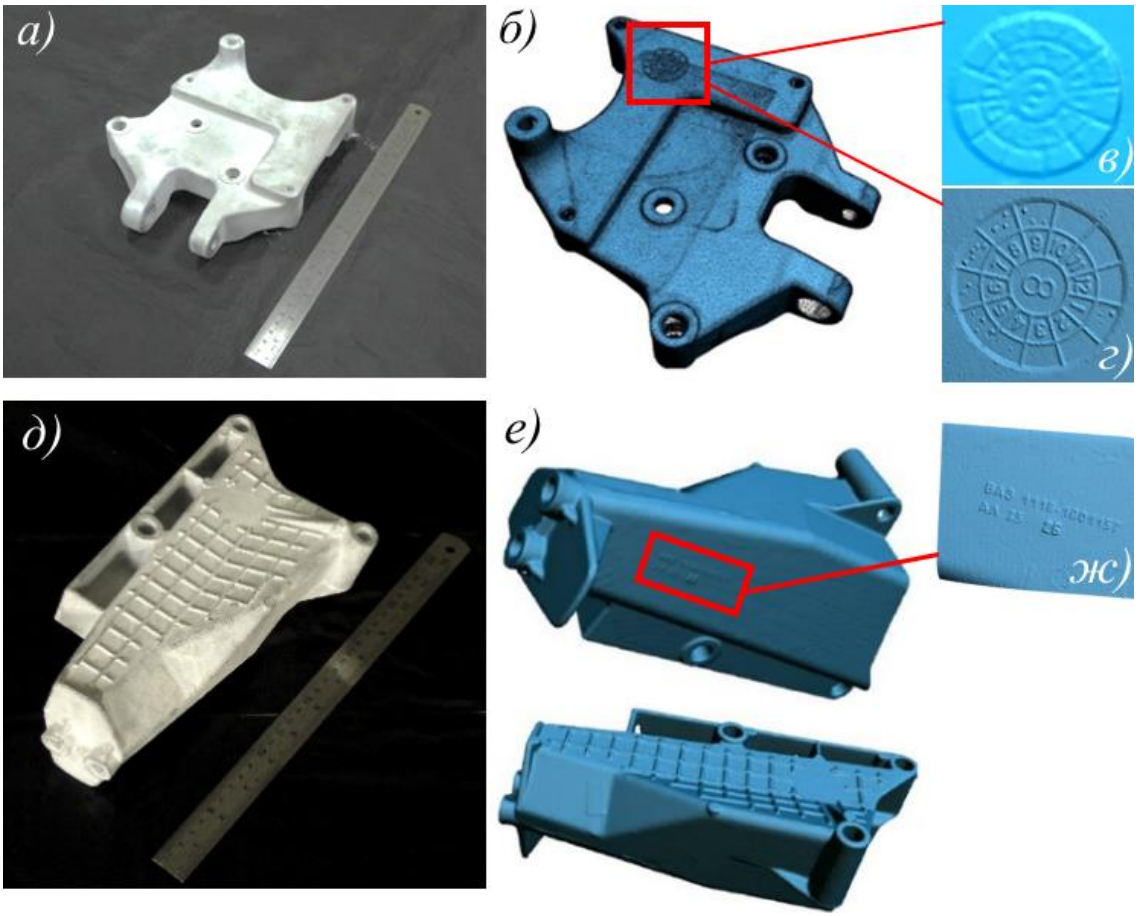


Рис. 27 – Пример получения детализированного изображения идентификационной метки автомобильных деталей

Для оценки точности 3D-принтера и 3D-сканера были изготовлены калибровочные тела, геометрия которых определялась 3D-моделями, выполненными в CAD-программе (таблица 3, рис. 28). Геометрические размеры тел после 3D-печати оценивались путём сравнения четырёх чертёжных размеров с аналогичными размерами stl-модели в ПО GOM Inspect (CAI), а также при помощи карты отклонений, позволяющей наглядно оценить отклонения геометрии от эталонной CAD-геометрии по всему объёму.

Известно, что при 3D-печати по технологии FDM/FFF выдавливаемый через сопло экструдера филамент приобретает эллиптическую форму

поперечного сечения и волнообразный профиль в продольном сечении. При исследовании макроповерхности калибровочных образцов на микроскопе с увеличением до 300х были выявлены различные источники погрешности в виде дефектов (рисунок 29).

Таблица 3. Характеристики исследуемых объектов

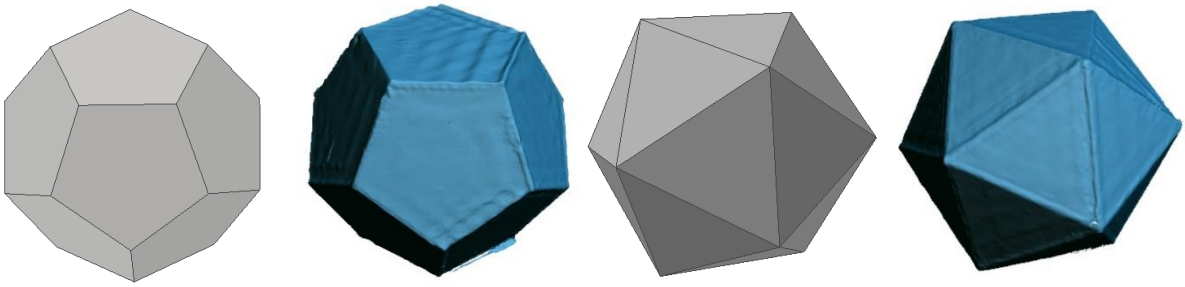
Параметр	**Значения**		
	сегмент крыла	*додекаэдр*	*икосаэдр*
Масса детали, кг	0,0580	0,0474	0,0508
Объём детали, мм^3	44 021, 277	44 691,286	47 892,2

Поверхность напечатанного образца имеет складчатость (площадь поверхности на грани больше, чем на эталонной CAD-модели) и волнистость поверхности. Рёбра и вершины имеют радиусы скругления. На некоторых гранях имеются места стыков филаментов, которые отсутствуют на исходной CAD-модели. Складчатость и стыки можно отнести к ошибкам 3D-печати, в то время, как волнистость и скругления являются особенностью реализации процесса 3D-печати. По своим размерным характеристикам складчатость и места стыков распознаются при 3D-сканировании. Однако, волнистость, при шаге 150 – 250 мкм, не распознаётся при 3D-сканировании и реконструкции с параметрами по умолчанию, а реконструируемая поверхность грани сглаживается.

Перед проведением исследования размеров stl-модели были импортированы эталонные и полигональные 3D-модели, проведено предварительное выравнивание. Глобальные ошибки совпадения при выравнивании моделей по методу best-fit составили: 0,17 мм (додекаэдр) и 0,18 мм (икосаэдр). Значения отклонений Платоновых тел, указанные на чертежах (рис. 28б), не были выдержаны при их проверке инструментами CAI, так как не укладывались в указанные отклонения.

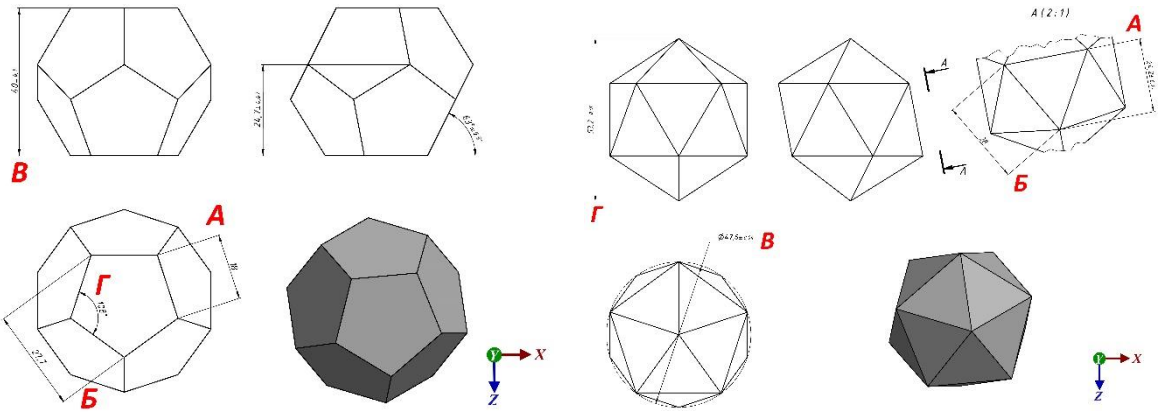
додекаэдр | | икосаэдр | |

CAD | stl | CAD | stl

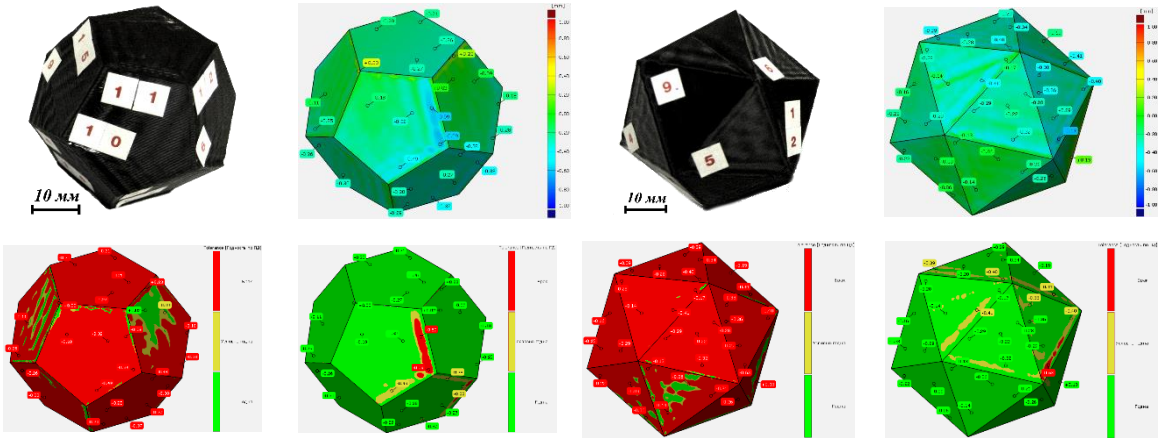


44 691,286 мм^3 | 43 555,1 мм^3 | 47 892,2 мм^3 | 46 678,4 мм^3

а) реперные Платоновы тела, с указанием их объёмов



б) исходные чертежи Платоновых тел



ПД ±0,1 мм | ПД ±0,5 мм | ПД ±0,06 мм | ПД ±0,5 мм

в) напечатанные объекты и КОГР (значения и годность по ПД)

Рис. 28 – Определение отклонений размеров эталонных объектов [74]

Размеры определялись как среднее арифметическое по 3 – 5 значениям опорных размеров А, Б, В и Г. Линейные размеры имели положительное отклонение относительно чертежных размеров, а угловой размер – отрицательное. Результаты инспектирования представлены в таблице 4.

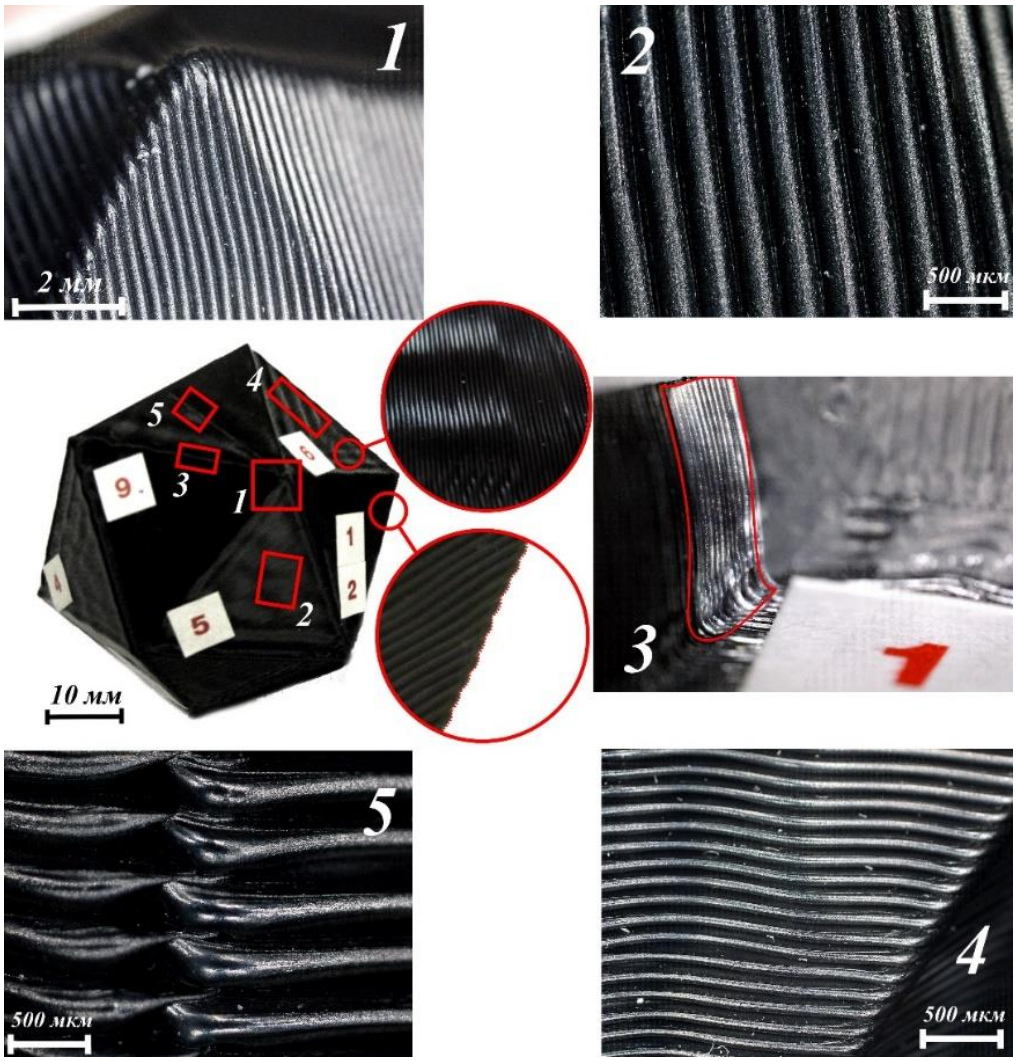


Рис. 29 – Макроструктура поверхности реперных образцов после 3D-печати [74]

С увеличением степени детализации объектов точность реконструкции stl-моделей повышается и Δ_{Σ} существенно снижается. Рассмотренные внутренние и внешние микродефекты при 3D-печати полимерных эталонных тел по технологии FFF не оказывают сильного

влияния на изменение макроразмеров. Поэтому при определении Δ_Σ большее влияние будет оказывать точность сканирования. Заявленная точность сканирования 3D-сканера подтверждена косвенно, через качество получаемой поверхности со складками на грани напечатанного образца. Более текстурированную поверхность при автоматической реконструкции получить не удалось.

Таблица 4. Результаты виртуальных (компьютерных) измерений размеров

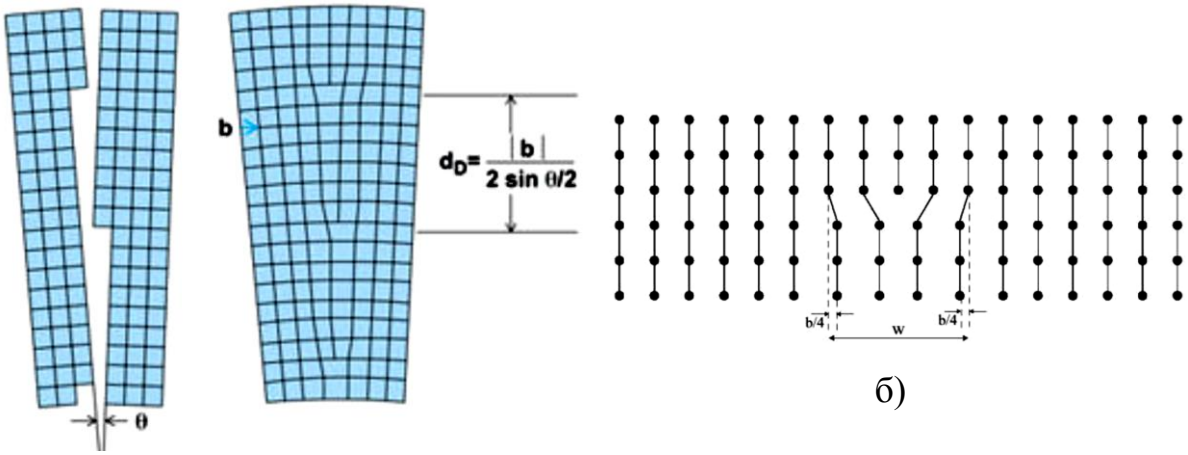
Прототип/ Способ измерения	**Размеры А/Б/В/Г, мм**			
	додекаэдр		*икосаэдр*	
	CAD	*CAI*	*CAD*	*CAI*
Значения размеров	18/27,7/ 40/108°	17,77/27,12/ 39,77/108,53°	24,2/28/ 47,6/53,2	23,68/27,24/ 46,59/52,49
Δ_Σ, мм или °	+0,23/+0,58/+0,23/-0,53°		+0,52/+0,76/+1,01/+0,71	
Δ_Σ, мкм или °	+230/+580/+230/-0,53°		+520/+760/+1 010/+710	

Исходя из полученных данных о линейных размерах эталонных тел было установлено, что суммарная ошибка сканирования, взятая по абсолютной величине наибольшего отклонения линейного размера, не превышает 1,02 мм, а углового размера составляет не более 0,53°. Поиск отклонений по КОГР следует обязательно дополнять локальной проверкой размеров.

Глава 3. Определение механических свойств материалов

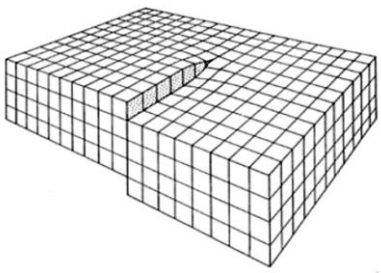
3.1 Дефекты в металлах

Внутренние дефекты кристаллических металлических материалов делятся на плоскостные (границы зёрен), линейные (дислокации краевые и винтовые) и точечные (атомы примесей, вакансии) (рисунок 30). Однако, в наибольшей степени разрушение материалов происходит не из-за названных дефектов, а из-за встречающихся микротрещин, которые объединяясь образуют магистральную трещину, по которой и происходит разрушение. Рост микротрещин связан с превышением свободной упругой энергией в материале значения упругой энергией на поверхности трещины. Дефекты существуют в материале всегда.



а) б)

Рис. 30 – Дислокация участвует в образовании субзёрен (а), линейная (б) и винтовая (в) дислокации



в)

Они могут образовываться и замещаться другими, поскольку равновесие системы считается условным. Дислокации могут образовывать

дефект упаковки (рисунок 31), связанный со сдвигом плоскостей, равным половинному расстоянию между атомами кристаллической решётки.

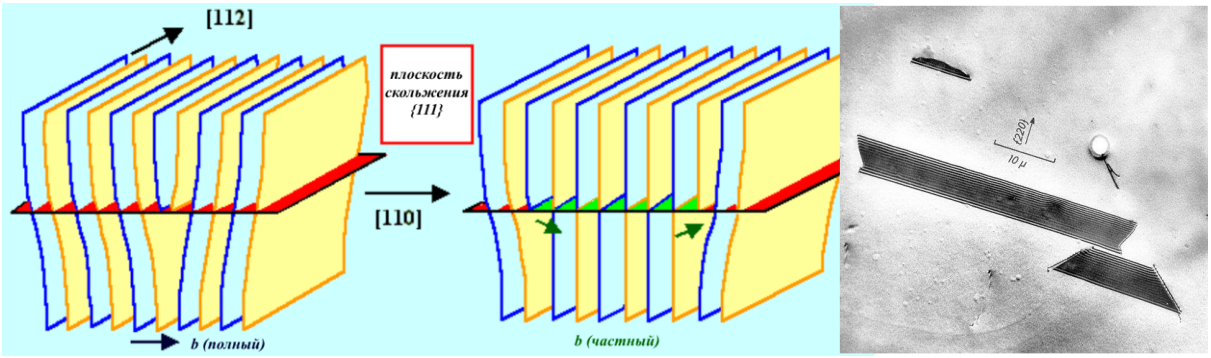


Рис. 31 – Дефект упаковки (слева) и под электронным туннельным микроскопом (TEM) (справа, [78])

В винтовых дислокациях доминируют сдвиговые напряжения, а в краевых дислокациях – сдвиговые и продольные напряжения. Направление и величину смещения дислокаций определяет вектор Бюргерса.

3.2 Поверхностные и внутренние дефекты, сопротивление разрушению

Металлические материалы, подвергаемые обработки накапливают на своей поверхности дефекты в виде микротрещин (рисунок 33). По отношению к внутренним дефектам они способствуют разрушению материала более интенсивно при температурной и механической нагрузке.

Внутренние дефекты классифицируются по размеру, резкости очертаний и ориентации внутри объёма материала. При наличии дефекта дислокации, пробегая по объёму металла, могут отклоняться от своего прямолинейного перемещения. Так как по теории дислокаций они выходят на поверхность материала, то по расстояние между соседними выходами на поверхность можно теоретически определить наличие и размер скрытых, внутренних дефектов.

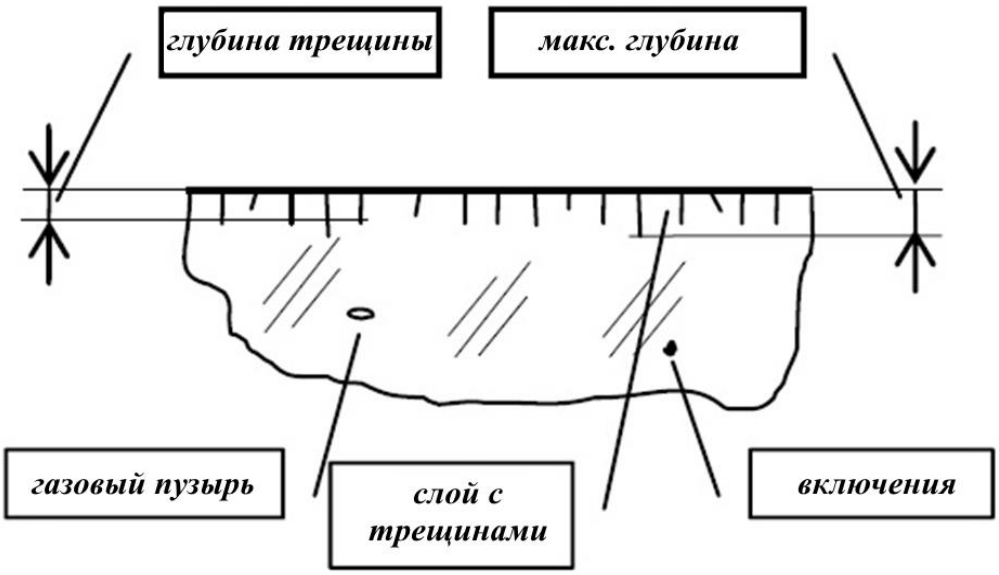


Рис. 32 – Приповерхностные и внутренние дефекты

На рисунке 33 представлено теоретическое изменение направления движения дислокации при наличии трещины внутри сплошного материала. В случае их наличия и при отсутствии других препятствий к изменению направления движения, под действием внешней силы и возникающей пластической деформации, дислокации «пробегут» по всему объёму материала, но выйдут на поверхность на другом расстоянии друг от друга. Их направления движения также будут повёрнуты на некоторый угол. Таким образом, по точкам выхода дислокаций на поверхность, которые сможет определить сканер, можно судить о наличии внутренних дефектов.

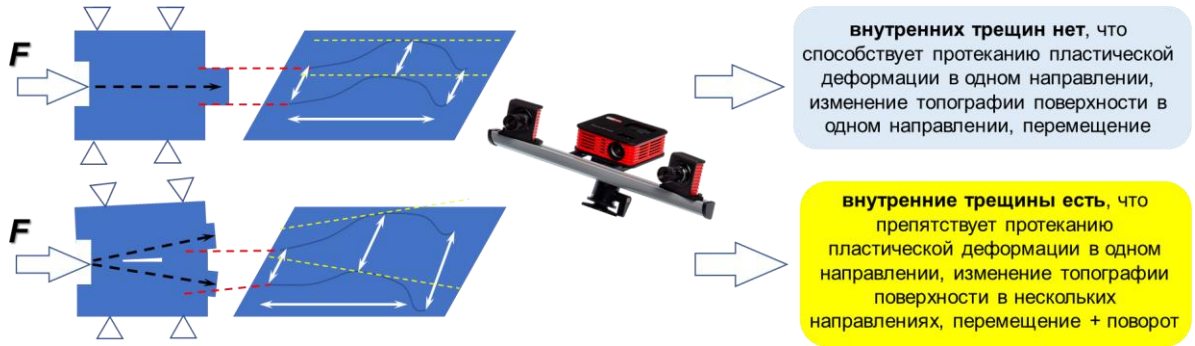


Рис. 33 – Изменение направления движения дислокации

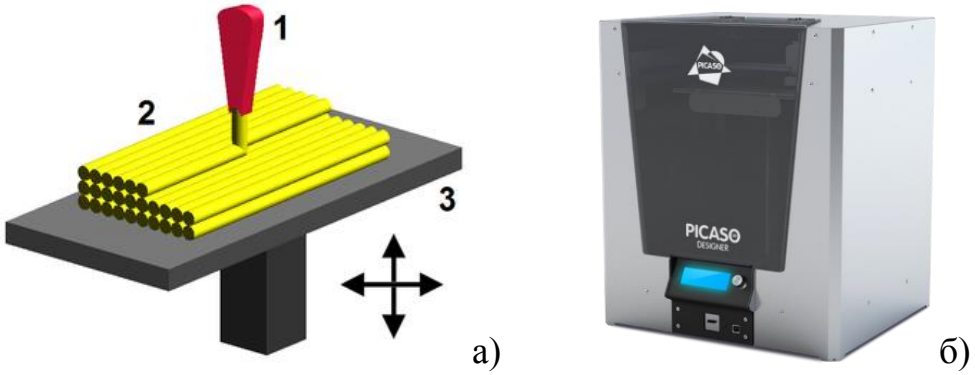
Более подробное описание о влиянии дефектов на металлографическом уровне на движение дислокаций можно найти в многочисленных работ, среди которых следующие [79–84].

3.3 Механические испытания материалов

Целью механических испытаний является получение информации по поведению образцов, полученных методом 3D-печати FFF, имеющих внутреннюю несплошность, и количественная оценка их способности к сопротивлению деформации в условиях одноосного нагружения. Необходимость проведения механических испытаний обусловлена несколькими причинами. Во-первых, требуется определить силовую характеристику при деформации образца с разной степенью заполнения, определить характер разрушения. Во-вторых, оценить точность 3D-моделей, которые были получены по результатам оптического 3D-сканирования продеформированных образцов. В-третьих, сопоставить результаты экспериментов с результатами численного моделирования.

Для получения образцов с определённым процентом несплошности необходимо получать их по такому технологическому процессу, который бы эту несплошность и создавал. Традиционные технологии (прокатка, штамповка, литьё, наплавка и другие) не позволяют это сделать. Такой технологией на сегодняшний день является экструзионная технология 3D-печати FFF (Fused Filament Modelling), при помощи которой материал послойно добавляется в том месте, где есть материал согласно данных о полигональной, оболочковой модели. Внутреннюю часть между стенками заполняют с той степенью заполнения (СЗ), которая задана пользователем в управляющей программе (gcode). Преимуществом такого способа получения образцов является необходимость минимальной доработки геометрии образца. Вместе с этим, есть и недостаток, заключающийся в том, что в образцах, полученных таким образом на 3D-принтерах бюджетного

класса, присутствуют несплошности, являющиеся особенностью технологии, которые снижают несущую способность образца [95–97]. На рисунке 34а показана общая схема экструзионной технологии 3D-печати и 3D-принтер, который был применён для получения образцов Picaso Designer.



а) б)

Рис. 34 – Технологии 3D-печати FFF (а) и 3D-принтер Picaso Designer

Механические характеристики образцов оценивались по результатам трёх испытаний: одноосное растяжение, одноосное сжатие и усталостная прочность (рисунок 35). В таблице 5 даны данные по проведённым механическим испытаниям.

Таблица 5. Сводная таблица по механическим испытаниям

Вид механического испытания	**Геометрия пробы**	**Ко-во образцов/ испытаний**	**Модельные материалы**
одноосное сжатие (ОС)	ГОСТ 4651-2014	18	АБС- и ПЛА-пластики [98–105]
одноосное растяжение (ОР)	ASTM D 638, тип IV	432	
усталостная прочность		12	ПЛА-пластик

Необходимость большого количества образцов на растяжение обусловлено плоскостностью и несимметричностью задачи. Наоборот,

количество образцов для одноосного сжатия небольшое, что связано с отсутствием необходимости вводить ориентацию в плоскости печати из-за осесимметричности задачи [106–129].

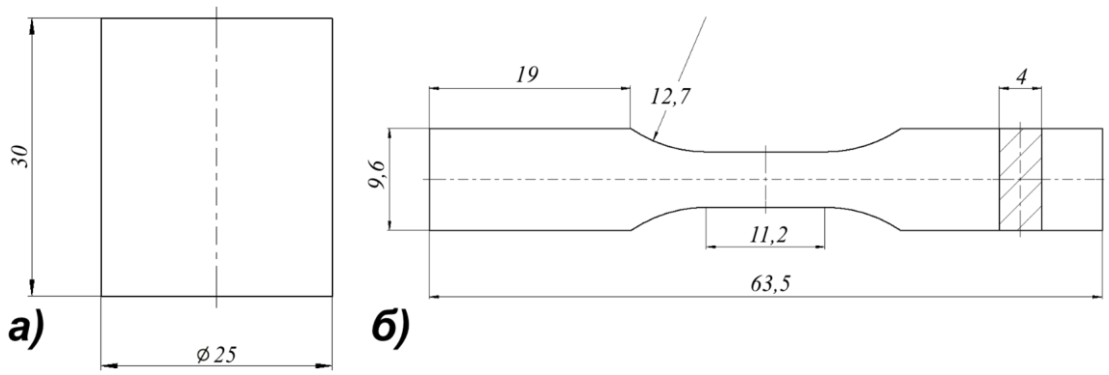


Рис. 35 – Образцы на сжатие (а) и растяжение (б)

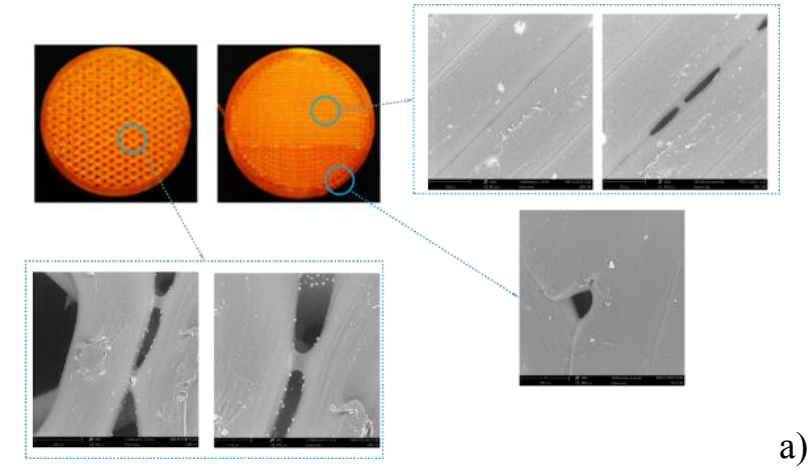
3.3.1 Качество 3D-печати и характер разрушения

При изготовлении образцов были определены дефекты, которые можно разделить на наружные (рисунок 29) и внутренние (рисунок 36). Первая группа дефектов является видимой, распознаваемой, но может являться концентратором напряжений и образованию трещин, уходящих вглубь. Наружные дефекты имеют периодический, волновой характер распространения. В зависимости от первоначальной ориентации 3D-модели в пространстве в области 3D-печати и наличия наклонных поверхностей можно выделить профиль с закруглённым (2) и приглаженным гребнем (4). Также имеются места стыковочных соединений выдавливаемого через сопло экструдера филаментов в каждом сечении, связанное с окончанием контура в слое и с перемещением экструдера в отдалённое место печати (5).

Вторая группа дефектов является скрытой, приводящей к появлению внутренних трещин. При помощи сканирующего электронного микроскопа Phenom XL установлены места образования внутренних дефектов.

При проведении механических испытаний учитывалась статистическая достоверность за счёт испытания не менее трёх образцов на

один и тот же набор параметров. Полученные графики машинной диаграммы сила-ход применялись в дальнейшем для определения удельной энергопоглощающей способности материала.



а)



б)

Рис. 36 – Ошибки при 3D-печати по технологии FFF: а – соединение между филаментами, б – изменение формы филамента [76, 77].

Всего выделено три вида: расслоения между отдельными филаментами, неплотное прилегание филаментов в перемычках-трабекулах и зазоры в месте соединения внешней оболочки и внутренними слоями заполнения. Другие дефекты, больше отражающие состояние, эквивалентное остаточному напряжённо-деформируемому в металлах, связаны с изменением геометрии филамента и появлению «поджатых» филаментов, а также филаментов с переменным поперечным сечением.

3.3.2 Эксперименты на одноосное сжатие (ЭОС)

Проводились на универсальной испытательной машине EU-100 (рисунок 37) с применением оснастки, позволяющей точно контролировать высотную степень деформации и измерять значение температуры [85]. Печать цилиндрических образцов проводилась «стоя», что обусловлено минимальным количеством работ на этапе пост-обработки (рисунок 38). В таблице 6 показаны результаты ИОС с картой испытаний по СЗ.



Параметр	Значение
Номинальная сила, МН	10
Температура окружающей среды, °С	23,5
Скорость перемещения траверсы, мм/с	1

Рис. 37 – Универсальная испытательная машина

На рисунке 39а представлены результаты ЭОС для всех образцов, в то время, как на рисунке 39б графики перемещения – сила представлены как среднее арифметическое по трём образцам. На рисунке 39в показано изменение температуры для 18-ти образцов.

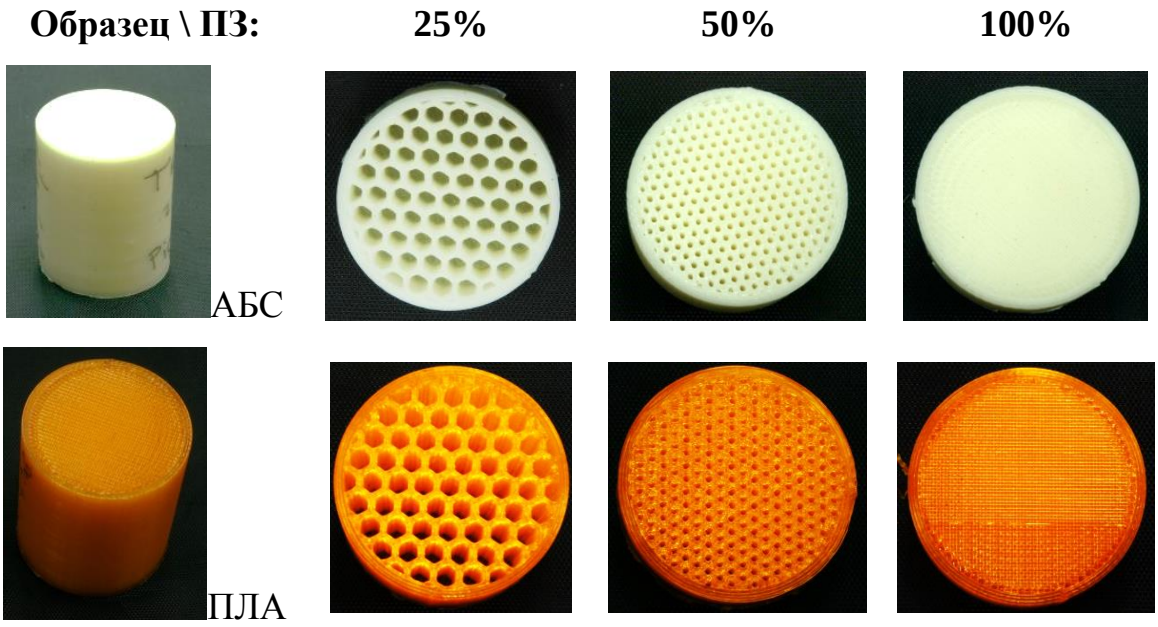
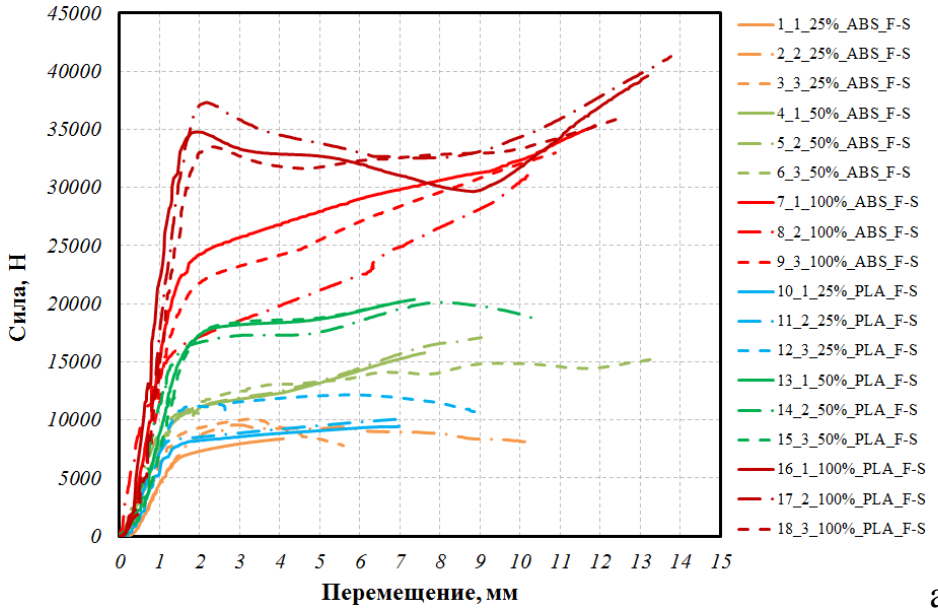


Рис. 38 – Образцы на сжатие с разной СЗ.

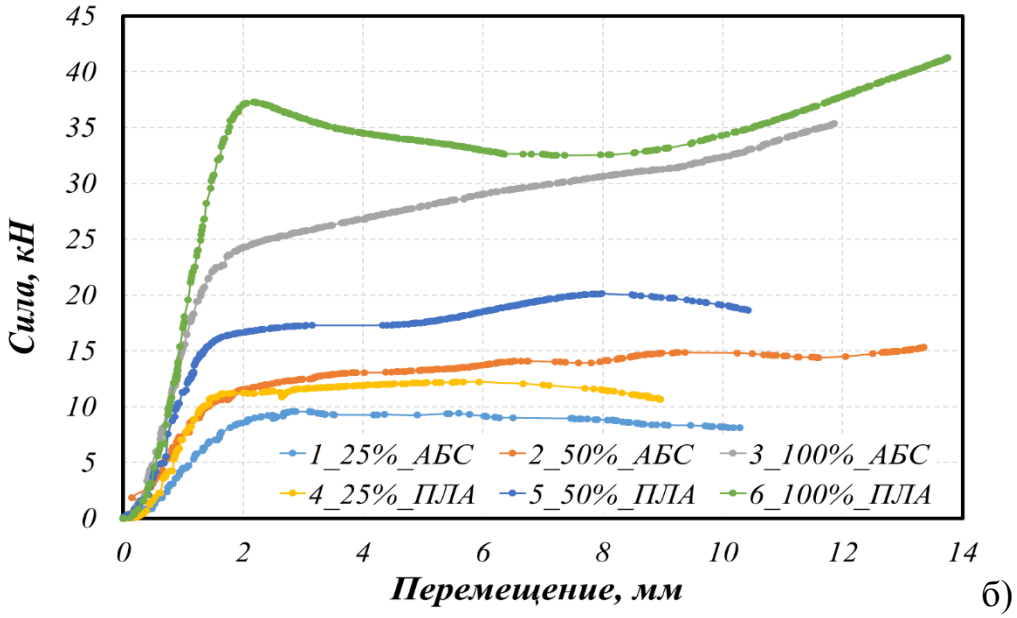
Таблица 6. Результаты ЭОС

Обозначение	**Степень заполнения (СЗ)**				**Геометрические параметры образца**			
					исходные, мм		конечные, мм	
	25%		50%	100 %	$H^{и}_{ср.}$	$D^{и}_{ср.}$	$H^{к}_{ср.}$	$D^{к}_{ср.}$
1_1_25%_ABS	ABS	x			29,5	24,7	19,0	27,9
2_2_25%_ABS		x			29,6	24,9	19,5	27,9
3_3_25%_ABS		x			29,5	24,7	19,5	28,4
4_1_50%_ABS			x		29,9	24,8	21,4	27,3
5_2_50%_ABS			x		29,8	24,8	22,9	27,1
6_3_50%_ABS			x		29,7	24,7	18,2	29,5
7_1_100%_ABS				x	29,6	24,8	18,2	30,5
8_2_100%_ABS				x	29,9	24,7	16,9	31,8
9_3_100%_ABS				x	29,8	24,8	20,1	29,0

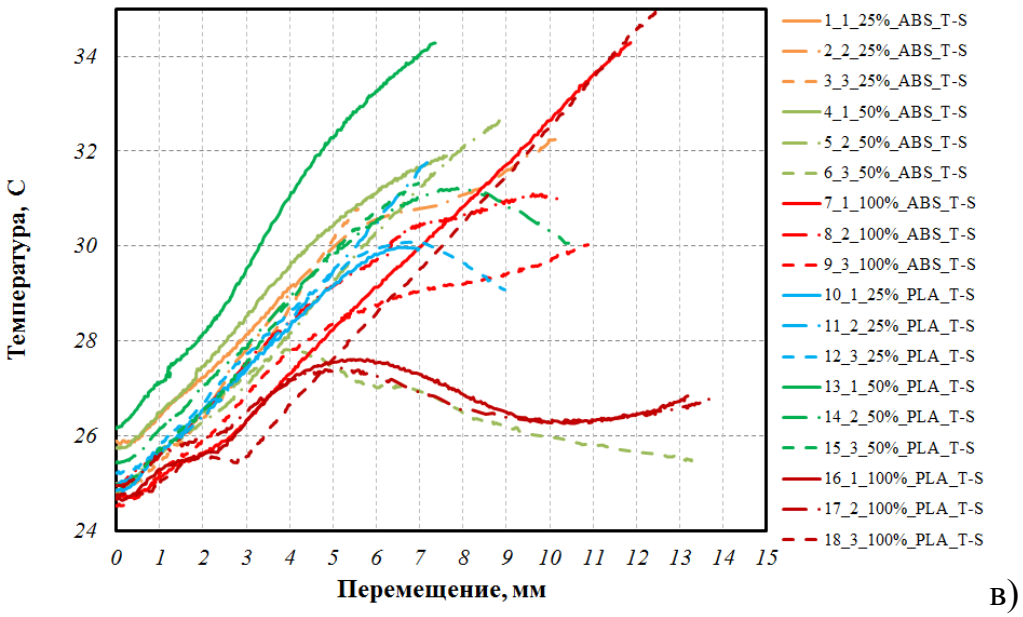
10_1_25%_PLA	PLA	x			29,9	24,8	18,4	27,6
11_2_25%_PLA		x			29,9	24,8	17,6	27,8
12_3_25%_PLA		x			29,8	24,8	16,6	28,8
13_1_50%_PLA			x		29,9	24,8	17,3	29,5
14_2_50%_PLA			x		29,9	24,8	17,3	30,6
15_3_50%_PLA			x		29,9	24,8	18,8	28,9
16_1_100%_PLA				x	29,9	24,9	17,1	30,8
17_2_100%_PLA				x	29,9	24,8	17,0	33,5
18_3_100%_PLA				x	29,9	24,8	18,6	30,1



а)



б)



в)

Рис. 39 – Результаты ЭОС

3.3.3 Эксперименты на одноосное растяжение (ЭОР)

Образцы печатались из полимерного модельного материала с разными цветовыми пигментами, которые на прочностные характеристики влияния не оказывают. Пробы на растяжение можно ориентировать как в плоскости печати или УП, так и в плоскости перемещения экструдера или НП (рисунок 40). Для проведения испытаний была выбрана машина Walter+Bai LFM-L с номинальной силой 10 кН (рисунок 41а и 41б). Образцы маркировались и испытывались в произвольном порядке с целью повышение качества проведения эксперимента за счёт устранения ошибки, вызванной человеческим фактором.

По результатам испытаний были получены машинные диаграммы перемещение-сила в виде картинки. На рисунке 42 показано совмещение результатов испытаний четырёх образцов.

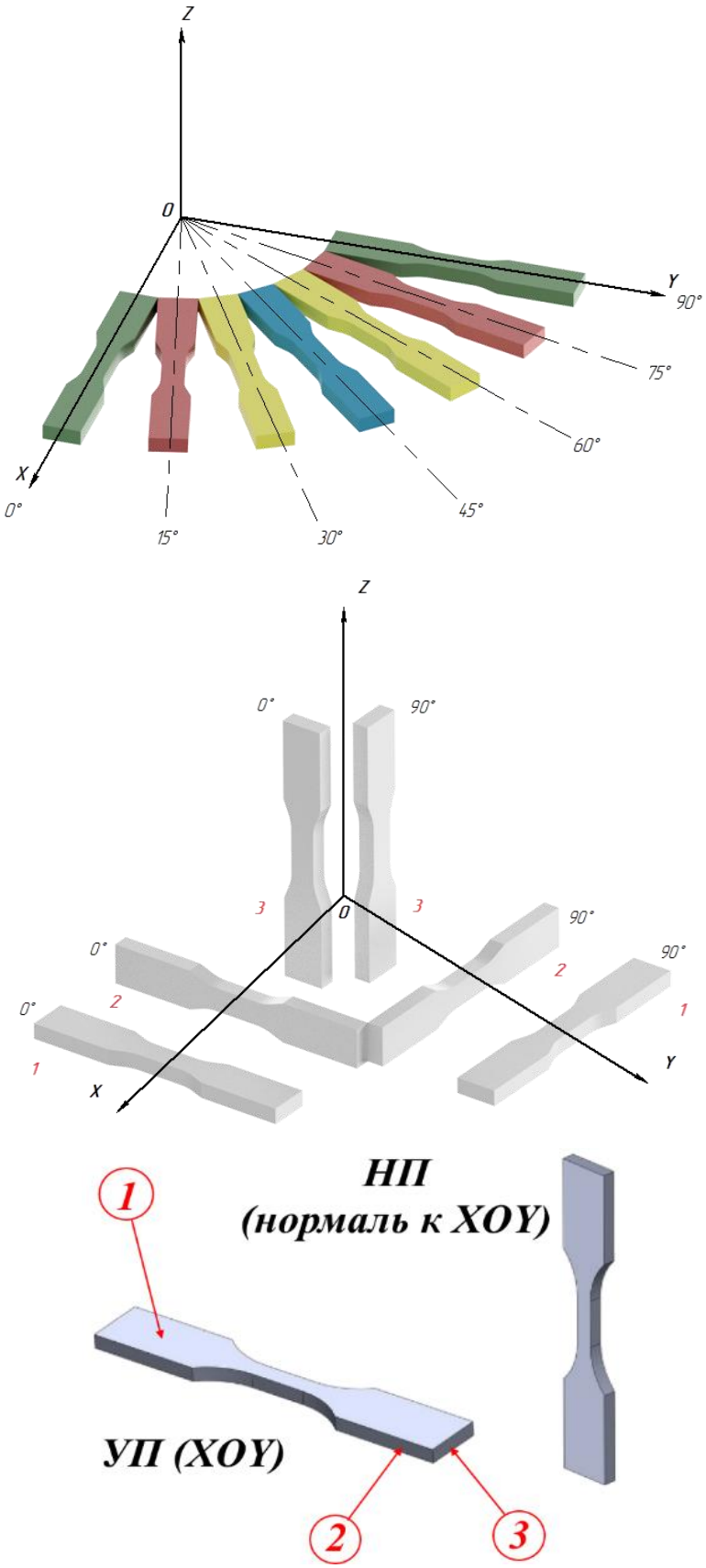
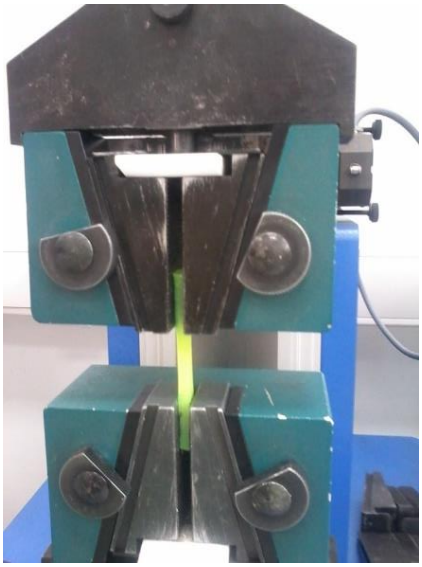


Рис. 40 – Ориентация образцов при 3D-печати



а)



б)



в)

Рис. 41 – Испытательная машина для проведения ЭОР

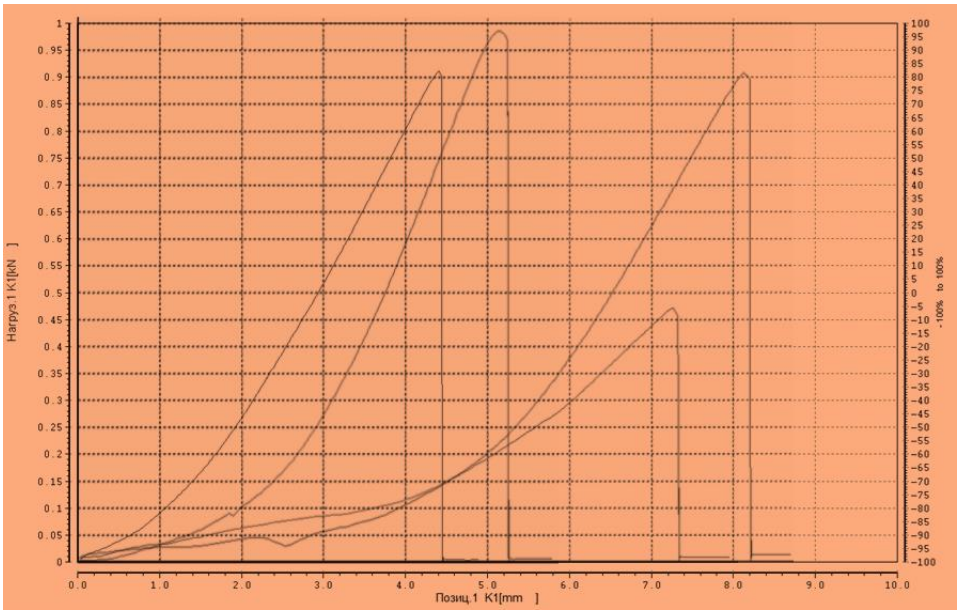
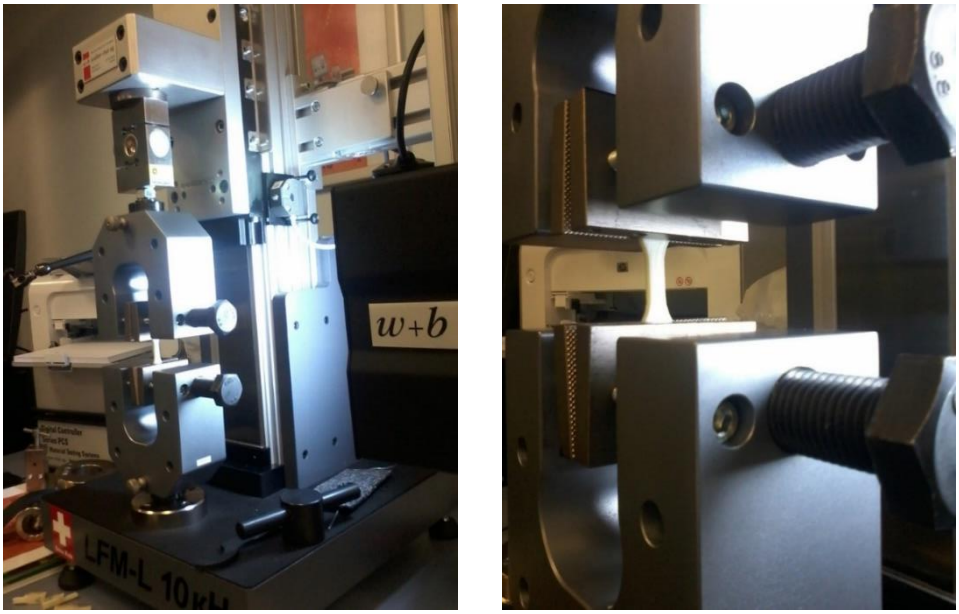


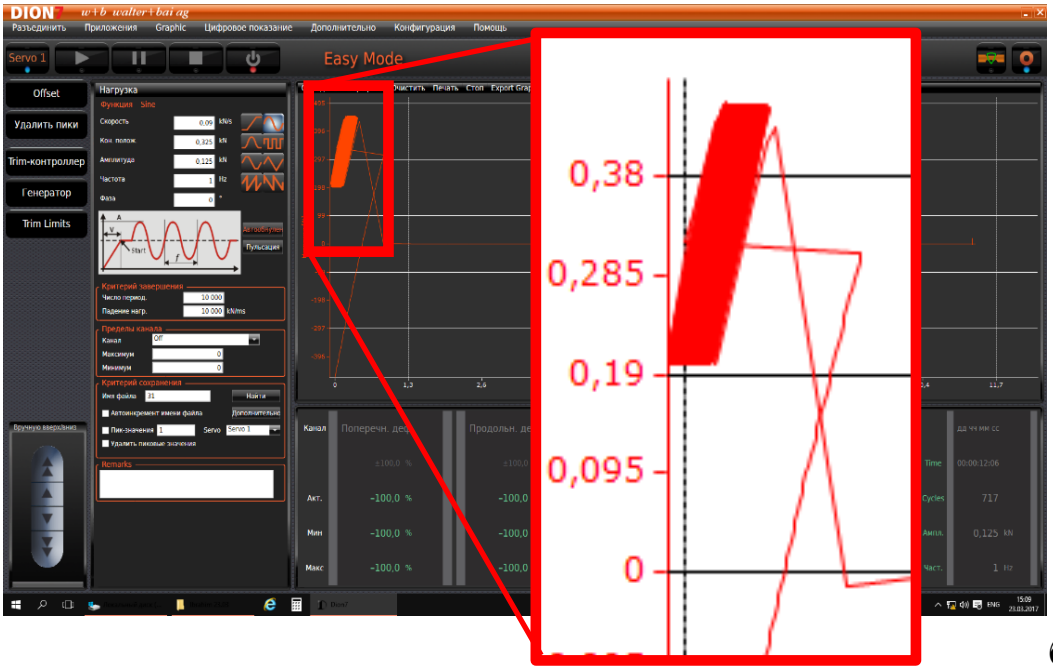
Рис. 42 – Примеры получаемых машинных диаграмм сила-ход

3.3.4 Эксперименты на усталостную прочность (ЭУП)

Исследования проводились на испытательной машине Walter + Bai LFM-L новой модификации с номинальной силой 10 кН (рисунок 43а) по симметричному циклу нагружения (рисунок 43б).



а)



б)

Рис. 43 – Общий вид испытательной машины (а) и график нагружения (б)

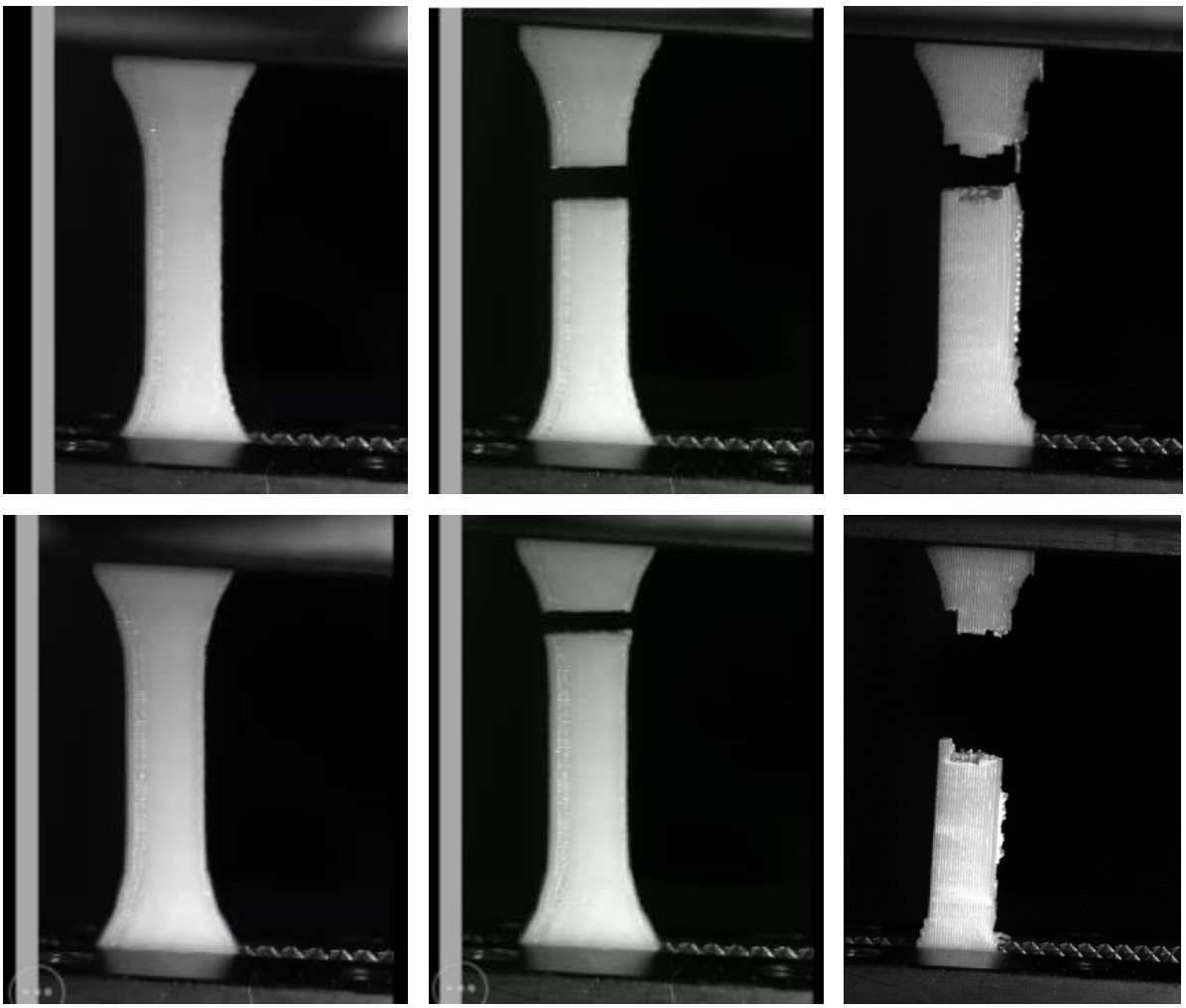


Рис. 44 – Некоторые образцы до и после разрушения

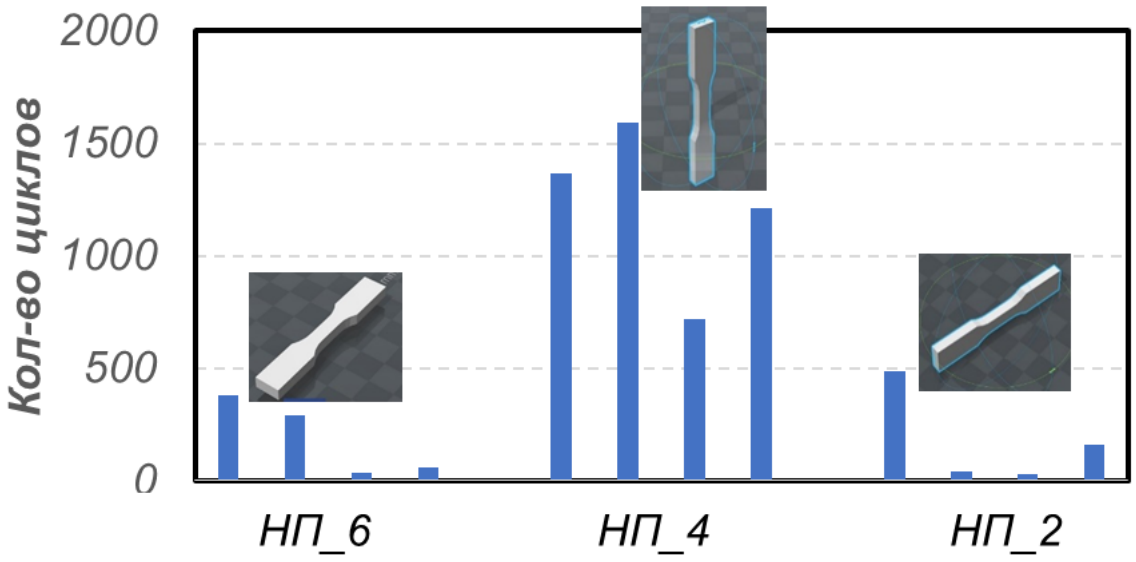


Рис. 45 – Столбчатая диаграмма выносливости образцов по НП

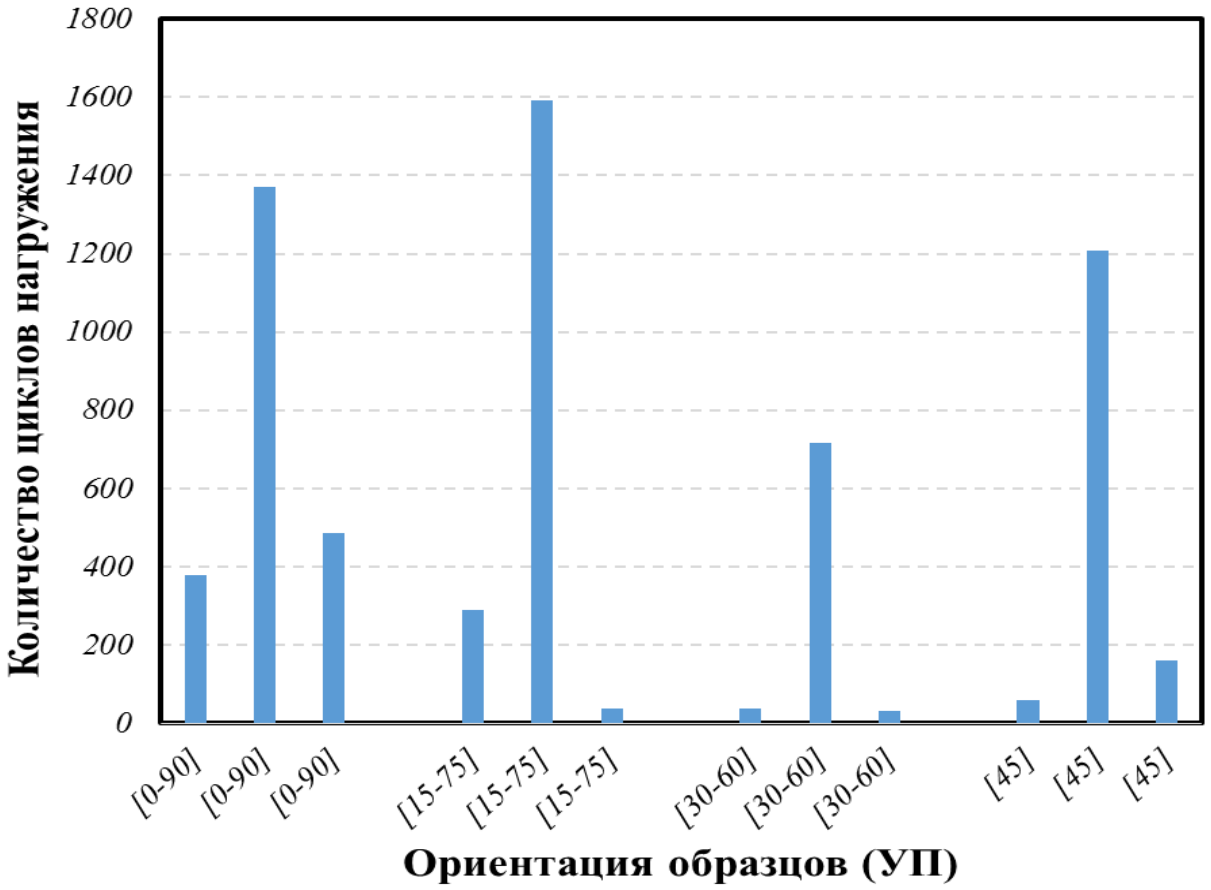


Рис. 46 – Столбчатая диаграмма выносливости образцов по УП

Видно, что разрушение образцов происходит ближе к области захватов, что является нежелательным (рисунок 44). Также отчётливо различимы различия в образовавшихся местах разрушений (ровный срез и разрушение с выступами). Это говорит о том, что внутренняя структура оказывает влияние на разрушение. Также влияние оказывает и направление 3D-печати в плоскости стола (XOY). Наименьшее число циклов выдержали образцы с ориентацией НП 2 и 6 (рисунок 45), а также УП 30°-60° (рисунок 46).

3.3.5 Определение удельной энергопоглощающей способности материала

В зависимости от СЗ и исходной геометрии образца можно рассчитать напряжения сжатия и растяжения по уравнениям 4 – 7. Поскольку

определить итоговую площадь сечения ячеистого образца после деформации сложно, так как деформация и разрушение внутренних перемычек является динамическим не учитываемым процессом, то расчёт проводился по площади сечения исходного образца (цилиндрического ($A = \pi D^2$) и гантелеобразного ($A = ab$), что позволило оценить нижнее значение напряжений разрушения при растяжении и верхнее значение напряжений разрушения при сжатии.

На последнем этапе методики проводится определение удельного энергопоглощения по соотношению ОЭД к массе образца (χ) по уравнению 13. С физической точки зрения этот параметр оценивает способность детали с известной геометрией и массовой характеристикой сопротивляться внешней работе, направленной на его разрушение.

$$m_{обр} = \rho^* V_{обр} = СЗ\rho_м V_{обр}, \tag{4}$$

$$m_{обр}^{сж} = СЗ\rho_м \pi D^2 \text{ Н}, m_{обр}^{раст} = СЗ\rho_м abl, \tag{5}$$

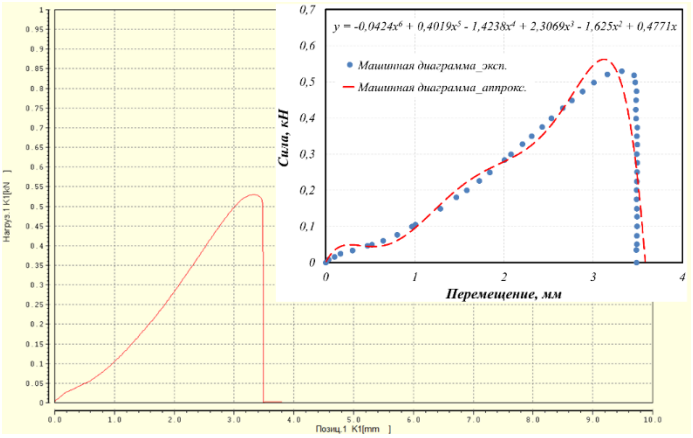
$$\sigma_{сж} = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi D^2} = \frac{FСЗ\rho_м \text{ Н}}{m_{сж}}, \sigma_{раст} = \frac{F}{A} = \frac{F}{ab} = \frac{FСЗ\rho_м l}{m_{раст}}, \tag{6}$$

$$\chi = \frac{ОЭД}{m}, \tag{7}$$

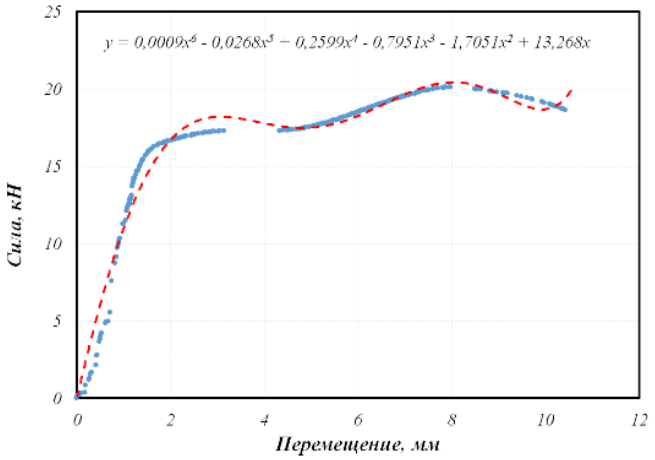
где $m_{обр}$ – масса образца, г; ρ^* - плотность ячеистого образца, без учёта микропор, г/мм^3; $СЗ$ – степень заполнения образца; $\rho_м$ – плотность полимерного материала образца, г/мм^3; $V_{обр}$ – объём образца, мм^3; H – исходная высота цилиндрического образца, мм; l – деформируемая длина гантелеобразного образца, мм; χ – удельное энергопоглощение (УЭП), Дж/г.

При проведении экспериментов было установлено, что для образцов, выбранной геометрии и размеров при разрушении отсутствуют характерные

для металлов плоскости разрушения, направленные под 45° и места утонений. В виду отсутствия информации по разрушениям, проходящим внутри несплошного образца оценить общую деформацию оказывается трудной задачей. Результаты испытаний были структурированы по удельной энергопоглощаемой способности (УЭПС) образца, являющейся отношением общей энергии деформации к массе образца (χ). В открытых источниках были найдены графики перемещения – ход для металлических материалов и также определена величина УЭПС. Соотношение между полимерными образцами и металлическими хорошо аппроксимируется логарифмической зависимостью.



а)



б)

Рис. 47 – Осреднённые результаты экспериментов: а) построение машинных диаграмм и аппроксимационных функций по графическому изображению (АБС, СЗ = 0,5, НП 1-0°); б) построение машинных диаграмм и аппроксимационных функций на основании файла с выгрузкой данных с датчиков (ПЛА, СЗ = 0,5).

Графики сила – ход для ИОР обрабатывались при помощи программ Т-Флекс и Excel. Так как графики выгружались в виде картинки, то для составления аппроксимирующей функции применялся следующий подход. Сначала картинка загружалась в программу Т-Флекс и определялись координаты не менее 50 точек.

Далее, координаты загружались в программу Excel и определялась аппроксимационная функция в виде полиномиальной функции 6-ого порядка. Далее методом прямоугольников по массиву точек и методом подынтегральной функции по аппроксимирующей функции определялась площадь, соответствующая общей энергии деформации (ОЭД). Для объективной оценки и связи со СЗ образцов было рассмотрено отношение УЭПС. На рисунке 48 представлены результаты для ЭОС и ЭОР.

Диаграмма на рисунке 48в является наиболее важной, так как показывается переход от образцов, выполненных из модельного (полимерного) материала к металлическим образцам.

Уравнением переходя является логарифмическая функция, в которой в качестве аргумента рассматривается масса образца, а в качестве функции – удельное энергопоглощение материала:

$$\chi = A\ln m + B, \tag{8}$$

где $m_{обр}$ – масса образца, г; χ – удельное энергопоглощение (УЭП), Дж/г; А и В – коэффициенты, показывающие характер изменения вогнутости функции.

Известно, что при помощи оптического сканирования возможно получить данные по перемещению или деформации образца из сплошного материала [86]. Тогда подсчитывая значение удельного энергопоглощения сплошного металлического материала, а также значение для несплошного образца, нанесём на координатной плоскости масса образца – удельное энергопоглощение новые значения, которые должны располагаться на графике уравнения 8.

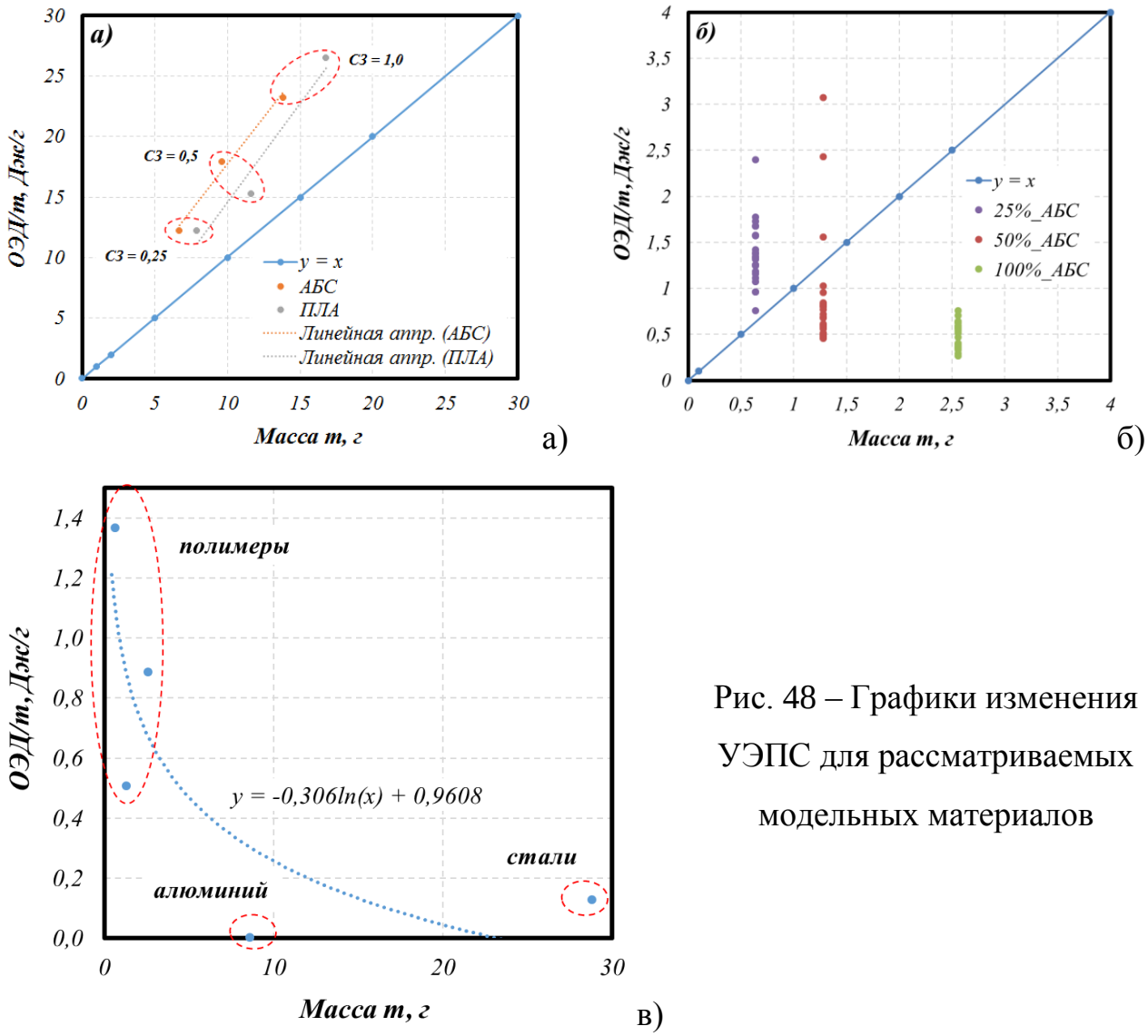


Рис. 48 – Графики изменения УЭПС для рассматриваемых модельных материалов

Для получения прочностных характеристик (предел прочности/текучести) необходимо продифференцировать уравнение 8. Фактически, сканирование требуется в этой методе определения прочностных характеристик материала для контроля правильности протекания деформации (Приложение 4), на которую оказывают влияние как внутренние особенности строения образца, так и внешние условия проведения эксперимента.

Глава 4. Примеры 3D-сканирования и реконструкции геометрических моделей

Для проведения исследований по получению облака точек и stl-моделей высокого разрешения были выбраны две оптические системы RangeVision, работающие по принципу СП. Краткая спецификация систем приведена в таблице 7.

Таблица 7. Техническая спецификация 3D-сканеров RangeVision

Модель	**Область сканирования, мм**	**Размер объекта, мм**	**Точность 3D-точки**	**3D-разрешение**
Premium	макс. 450x150x400 мин. 66x50x50	1 – 3 000	0,03 – 0,16	0,043 – 0,35
Spectrum	макс. 520x390x390 мин. 133x100x100	10 – 3 000	0,04 – 0,12	0,072 – 0,26

4.1 3D-сканирование деталей с размерами от 200 мм до 30 мм

Сканирование проводилось тремя способами, с применением сменных объективов-камер: по большому полю (камеры 9 мм), по малому полю (камеры 25 мм) и совмещённое (сначала камеры 9 мм, затем камеры 25 мм). В качестве объектов исследования были выбраны 6 изделий: машиностроительные изделия (МАШ), образцы для механических испытаний (МИ), сувенирная (СП) и гражданская (ГР) продукции. Подробная информация по выбранным изделиям приведена в таблице 8.

Каждое из выбранных изделий имеет свои особенности, которые оказывали влияние на результат и постановку уникальной задачи для 3D-сканирования (таблица 9). Перед проведением 3D-сканирования изделий, поверхности, имевшие высокие отражательные и/или поглощательные способности света, покрывали проявителем (для дефектоскопии),

образующий плёнку белого цвета после высыхания. Для СП-2 нанесение проявителя не требовалось.

Таблица 8. Исходные данные по изделиям

№	Название	Маркировка	Описание
1	Рычаг выключения сцепления а/м ВАЗ-21010	МАШ-1	сталь, листовая штамповка, лакокрасочное покрытие
2	Кронштейн а/м ВАЗ-2105 генератора ТЗА	МАШ-2	стальное литьё, без покрытия
3	Металлическое кольцо из проволоки ∅ 1,5 мм	МАШ-5	сталь, холодная навивка
4	Дверной ключ	ГР-1	латунь, холодная объёмная штамповка
5	Памятные медали	СП-1	латунь, чеканка
6	Брелок	СП-2	ПВХ, литьё в форму

Таблица 9. Особенности изделий

Маркировка	Особенности
МАШ-1	листовая деталь, толщина листа 2 мм, составная деталь, отверстия и заклёпки, цифровая маркировка
МАШ-2	объёмная деталь, рёбра жёсткости, отверстия, цифровая и буквенная маркировки
МАШ-5	проволока, изгибы, качество обработки концов
ГР-1	объёмная деталь, отверстие, бородка и коронка, буквенная маркировка
СП-1	листовое изделие, рельеф малой высоты
СП-2	небольшая высота, не монохромное изображение, надписи

Для получения информации по цифровой и буквенной маркировкам была применена техника совмещённого сканирования при которой сначала проводится сканирование по большому полю, определяются крупные элементы геометрии, а затем по малому полю, детализированное представление локальной области. После этого на этапе объединения ОТ в первый набор ОТ добавляется второй набор ОТ и далее реконструируется stl-модель. В случае, если размер локальной области соответствовал размеру всей области сканирования, сканирование проводилось по малому полю (рисунки 50 – 53). Даже при наличии мелких дефектов на поверхности изделий, были получены качественные результаты, удовлетворяющие требованиям, поставленным к задачам. Датчики, встроенные в систему сканирования также позволяют распознавать цвет и реконструировать цветные stl-модели (рисунок 53в).

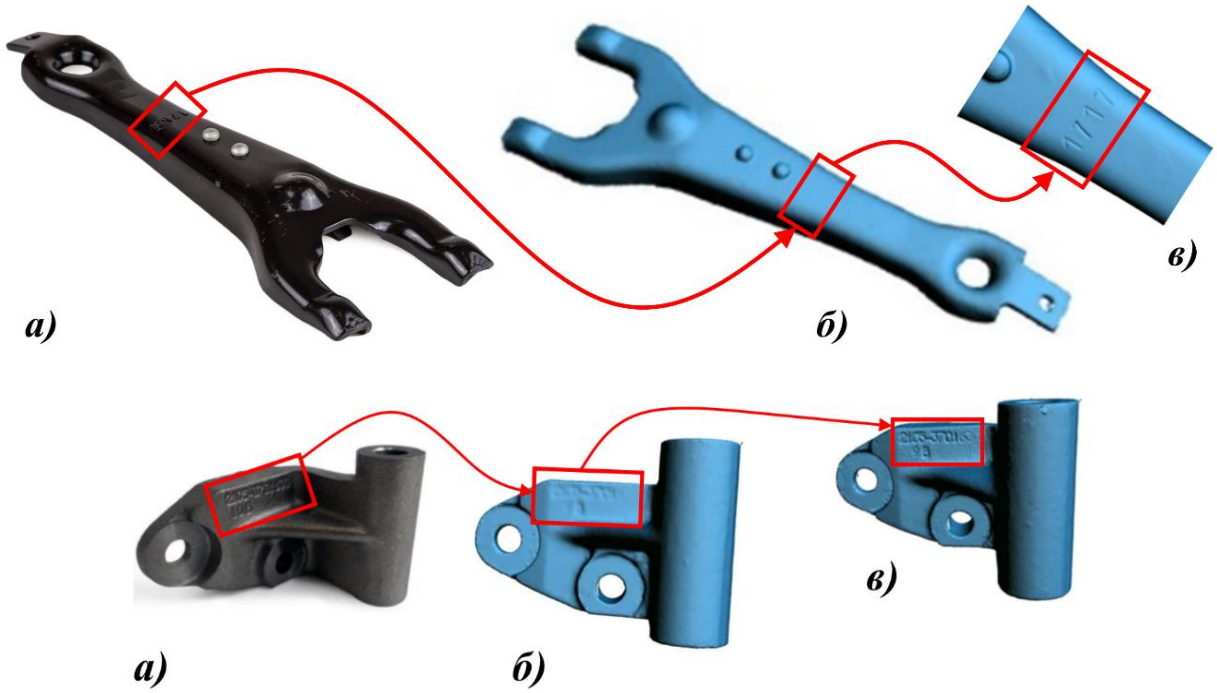


Рис. 49 – Изделия МАШ-1 (вверху) и МАШ-2 (внизу): а – исходное изделие; б – stl-модель; в – уточнение облака точек в области.

Помимо высокоточных моделей также возможно получение текстурированной модели с учётом цвета и качества поверхности (макроуровень, видимый глазом человека).

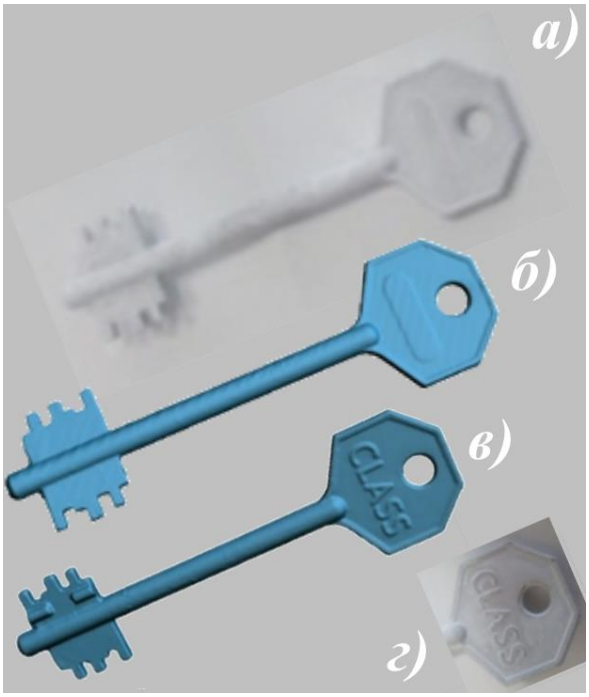




Рис. 50 – Изделие МАШ-5: а – исходное изделие;
б – stl-модель.

Рис. 51 – Изделие ГР-1: а – исходное изделие, покрытое белым проявителем; б, в – stl-модель лицевой и оборотной сторон ключа; г – увеличенная надпись на головке ключа.

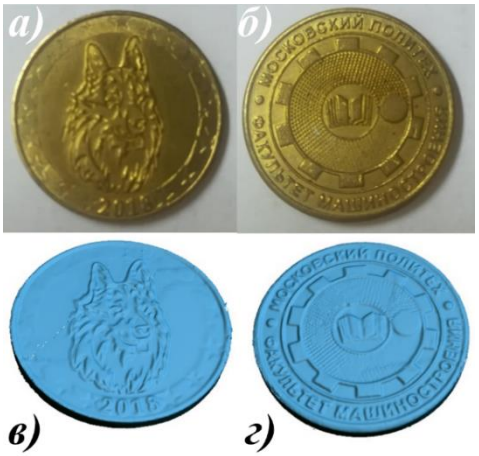


Рис. 52 – Изделие СП-1: а, б – исходные геометрии;
в, г – stl-модели.



Рис. 53 – Изделие СП-2: а – исходное изделие;
б – stl-модель; в – нанесение цветной текстуры.

Нанесение белого проявителя зависит от оптических свойств поверхности изделия и является обязательным для поверхностей с высокими отражательными и/или поглощательными способностями. Реконструированные на основании ОТ stl-модели могут быть использованы

в дальнейшем для проведения численного моделирования, что позволит повысить реалистичность выполняемых расчётных задач [87].

4.2 Принцип совмещённого 3D-сканирования

На рисунке 54 представлены результаты сканирования по совмещённому принципу. Идентификационные метки имеют узнаваемый рельеф, что говорит о высоко качестве детализации при сканировании. Сравнение высоты рельефа идентификационных меток показало, что ~80% всех контрольных размеров по рассмотренным четырём деталям находятся в поле допуска ±0,05 мм (рисунок 55).

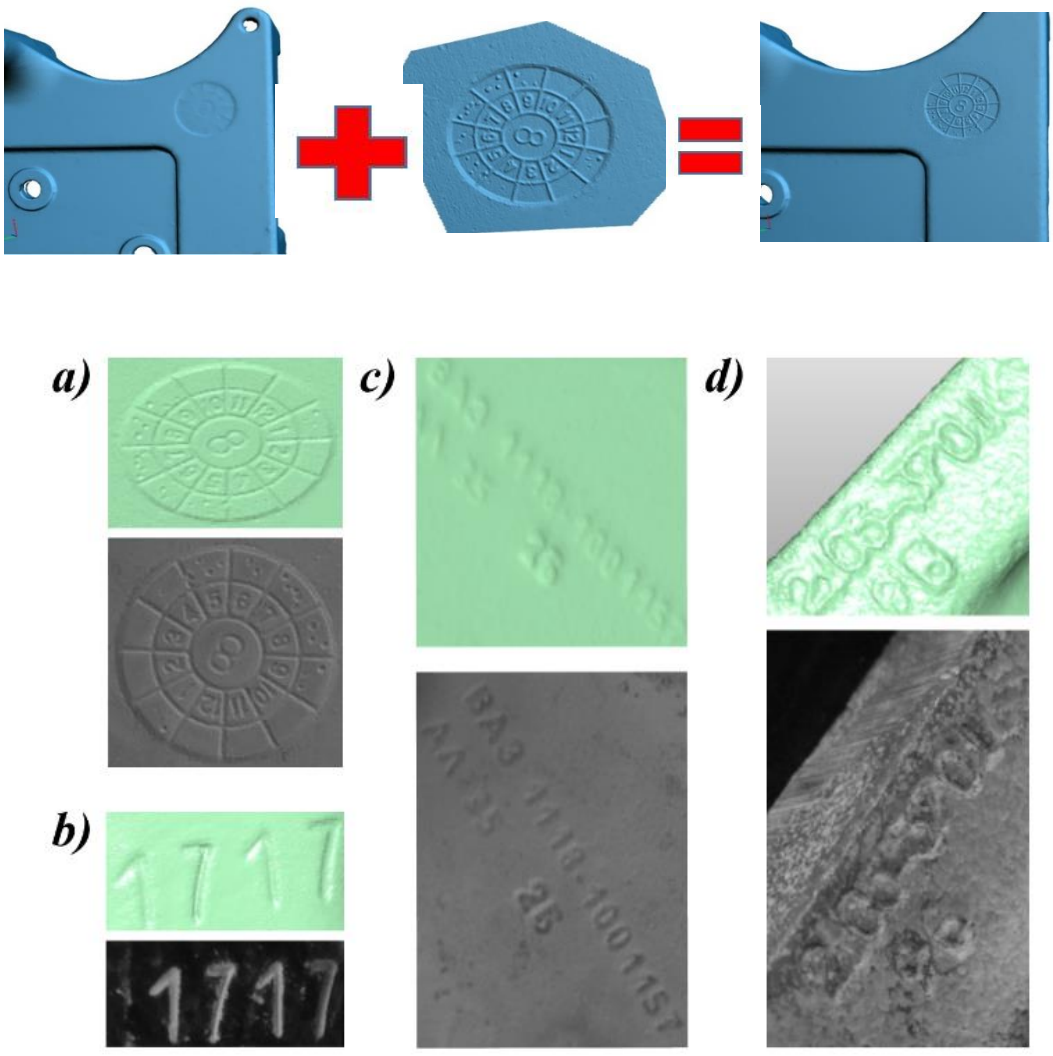


Рис. 54 – Результаты детализированного 3D-сканирования

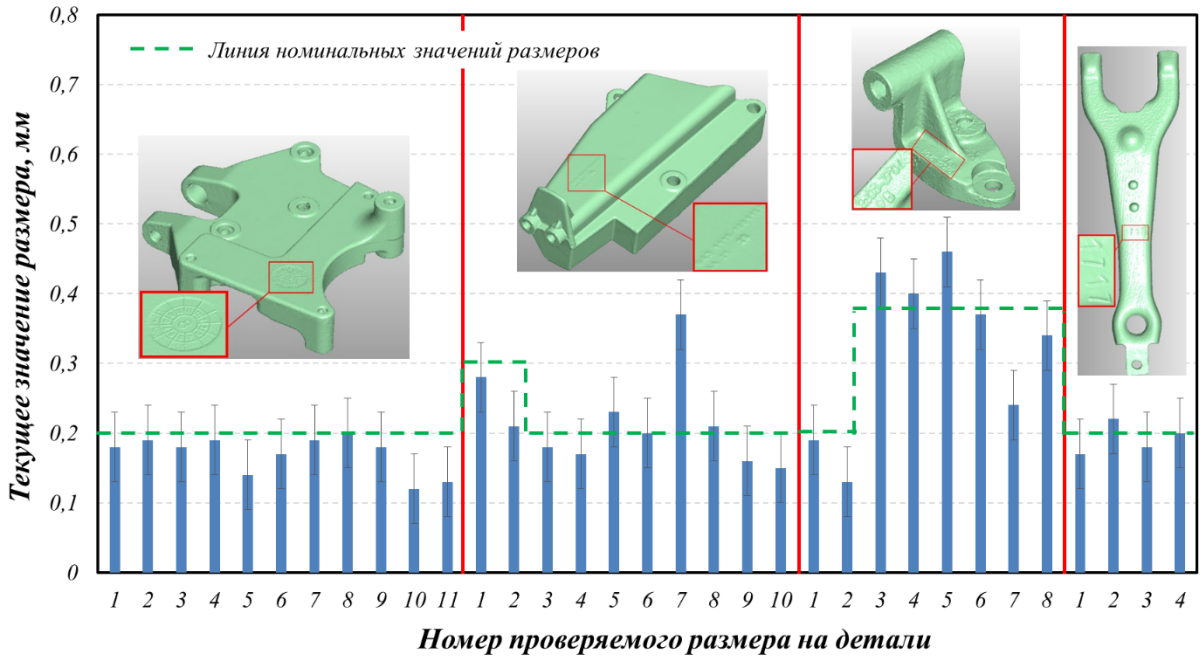


Рис. 55 – Сравнение размеров в CAI

4.3. 3D-сканирование полимерного прототипа

В качестве объекта дальнейшего исследования была рассмотрена тонкостенная деталь «Сегмент крыла», трёхмерная модель которой представлена на рисунке 56. Прототип был изготовлен методом 3D-печати по технологии FFF из АБС-пластика (плотность исходного материала составляет 1,06 г/см^3). Оптическое сканирование проводилось на оптическом сканере RangeVision Spectrum с двумя камерами, работающем по принципу структурированного подсвета.

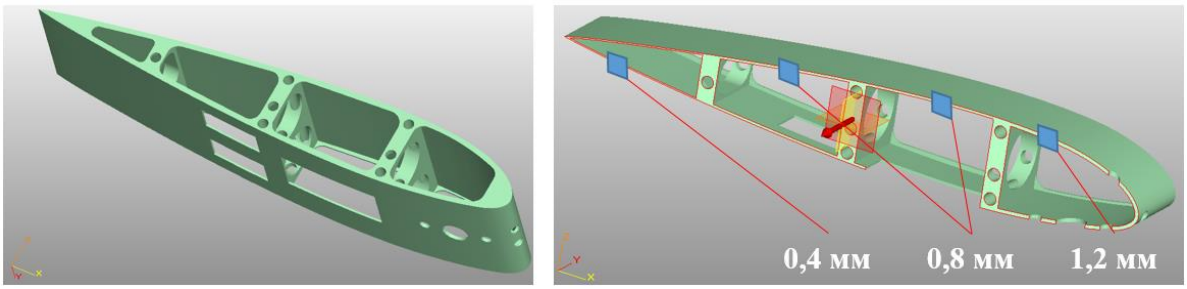
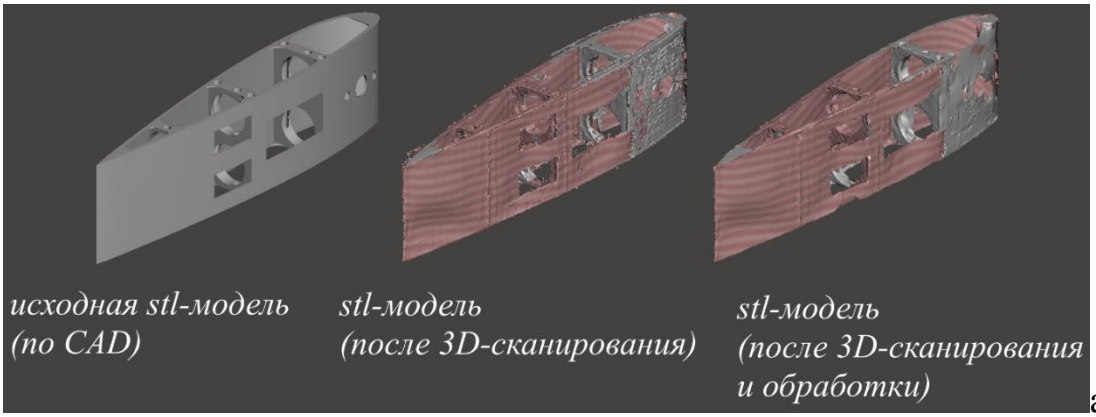


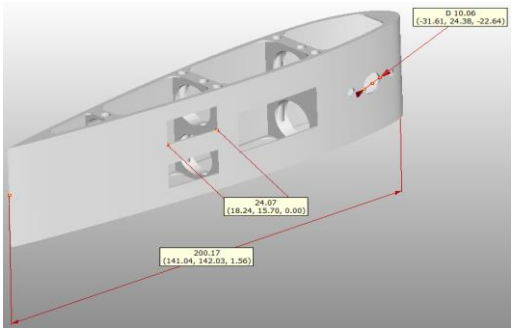
Рис. 56 – Прототип «Сегмент крыла» (слева) и его разрез с указанием переменной толщины внешней стенки (справа [74]

Точность сканирования находится в диапазоне 20 – 200 мкм. Для детали «Сегмент крыла» был выбран объектив 9 мм (наибольшая область сканирования). Точность печати 3D-принтера при использовании сопла с отверстием ∅300 мкм определяется толщиной слоя, равного 125 мкм. Толщина стенок прототипа была выбрана переменной. Предполагалось, что в месте стенки с наименьшей толщиной будет максимальное коробление.

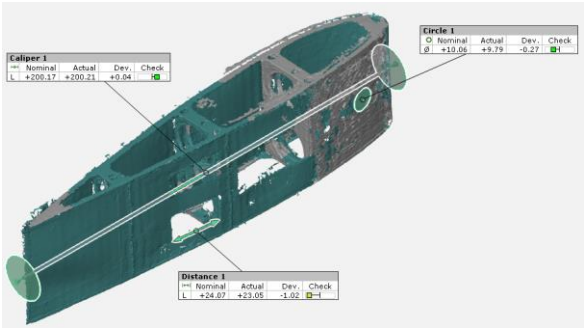
Результат 3D-сканирования показан на рис. 57а. Области с результатами разделены и имеют разные цвета, что обусловлено неправильной ориентировкой полигональных элементов, образующих сетку. Тем не менее, три проверочных размера (диаметр отверстия, длина прямоугольного выреза и длина прототипа) и КОГР могут быть построены. Результаты построения показаны на рис. 57б и 57в. Глобальная ошибка совпадения при выравнивании моделей по методу best-fit составила 0,42 мм.



а)



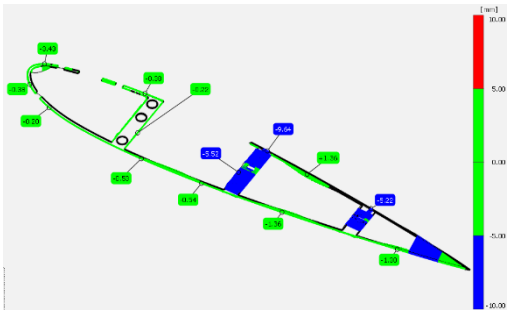
б)



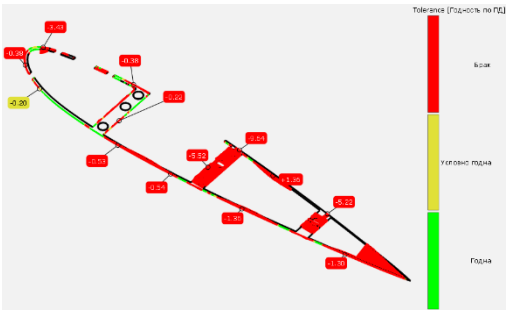
в)

Рис. 57 – Полученные stl-модели «Сегмента крыла» (а) и сравнение контрольных размеров: исходная геометрия CAD (б) и геометрия после 3D-сканирования без обработки (в) [74]

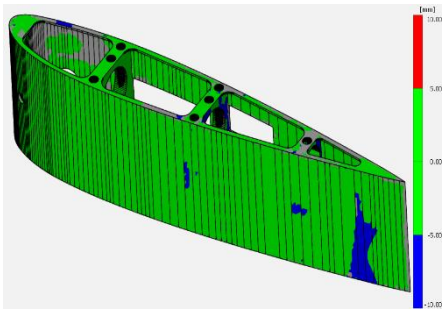
К размерам прототипа «Сегмент крыла» требования по величинам отклонений не предъявлялись. Значение отклонений по линейным размерам были как положительные, так и отрицательные (рисунок 58).



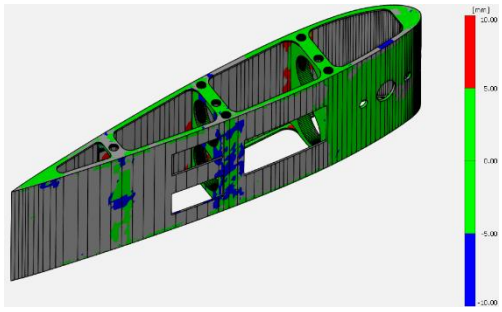
а) в сечении (середина высоты)



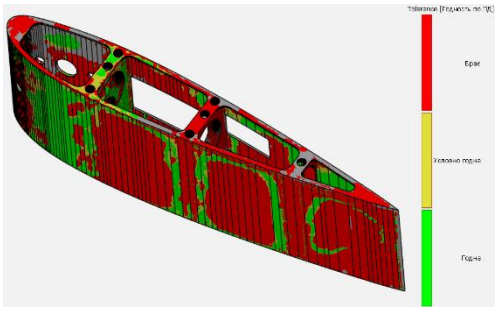
б) в сечении (середина высоты)



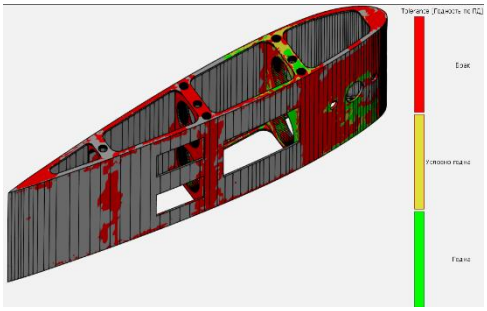
в) по поверхности



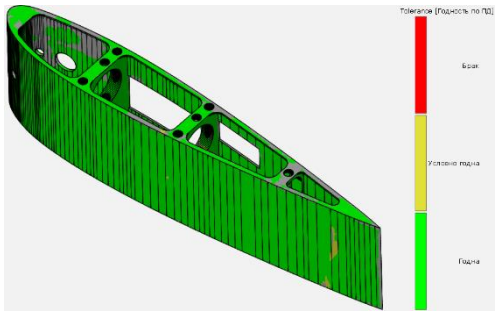
г) по поверхности



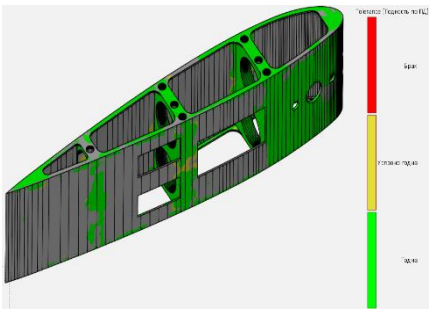
д) по поверхности



е) по поверхности



ж) по поверхности



з) по поверхности

Рис. 58 – Значение отклонений размеров прототипа (а, в, г) и оценка годности прототипа по ПД, равного ±0,2 мм (б, д, е) и ±10,0 мм (ж, з) [74].

При построении КОГР были проведены два типа анализа: по сравнению сечений и по сравнению поверхностей. Синий цвет шкалы указывает на то, что полученная сеточная геометрия лежит ниже базовой (CAD) геометрии. Красный же цвет указывает на то, что сеточная геометрия лежит над базовой геометрией.

Если при сравнении геометрий появляются серые области, это указывает на то, что геометрии либо находятся за пределами установленного порогового принимаемого во внимание значения, либо поверхности полигональной модели имеют дефекты сетки, например, треугольники с обратно-ориентированным направлением нормали к поверхности. В качестве секущей плоскости выбрана плоскость, проходящая на расстоянии 24 мм от верхней грани прототипа. Наибольшее отклонение размера составляет 6,37 мм и располагается в задней части прототипа. Если установить диапазон поля допуска (ПД) размеров прототипа равным 0,4 мм (отклонения ±0,2 мм) и перейти в режим оценки геометрии по полю допуска, то наилучшее совпадение будет наблюдаться на носке крыла, в первой нервюре, а также в областях, соприкасающихся с поперечинами (рис. 58д, е).

Расширение значения поля допуска до 20 мм (отклонения ±10,0 мм) дают полностью пригодный результат (зелёный диапазон областей на рис. 58в, г, ж, з). Результаты итоговых измерений занесены в таблице 10.

Таблица 10. Результаты виртуальных (компьютерных) измерений размеров

Прототип/ Способ измерения	**Размеры А/Б/В/Г, мм**	
	сегмент крыла	
	CAD	*CAI*
Значения размеров	200,17/24,07/10,06	200,21/23,05/9,79
Δ_{Σ}, мм или мкм	-0,04/+1,02/+0,27 или -40/+1 020/+270	

В Приложениях 5 – 8 показаны примеры результатов 3D-сканирования других машиностроительных и прочих изделий, полученных с применением разных 3D-сканеров, для разных материалов и в разных условиях эксплуатации.

4.4 3D-сканирование деталей с размерами от 15 мм до 50 мм

Следующие объекты представляют собой детали, полученные другими способами заготовительного производства, относящихся к области обработки давлением: прессование, ХОШ, микроштамповка, а также полимерное монохромное изделие, имеющие небольшие размеры. Условия проведения сканирования совпадают с теми, которые были при сканировании детали в разделе 4.1 и 4.3.

Перед проведением сканирования были проведены подготовительные работы по нанесению белого покрытия (матированию) на поверхность исследуемых объектов аэрозольным способом. Контроль толщины покрытия не проводился. Покрытие считалось годным, если отсутствовали видимые места исходной текстуры объекта.

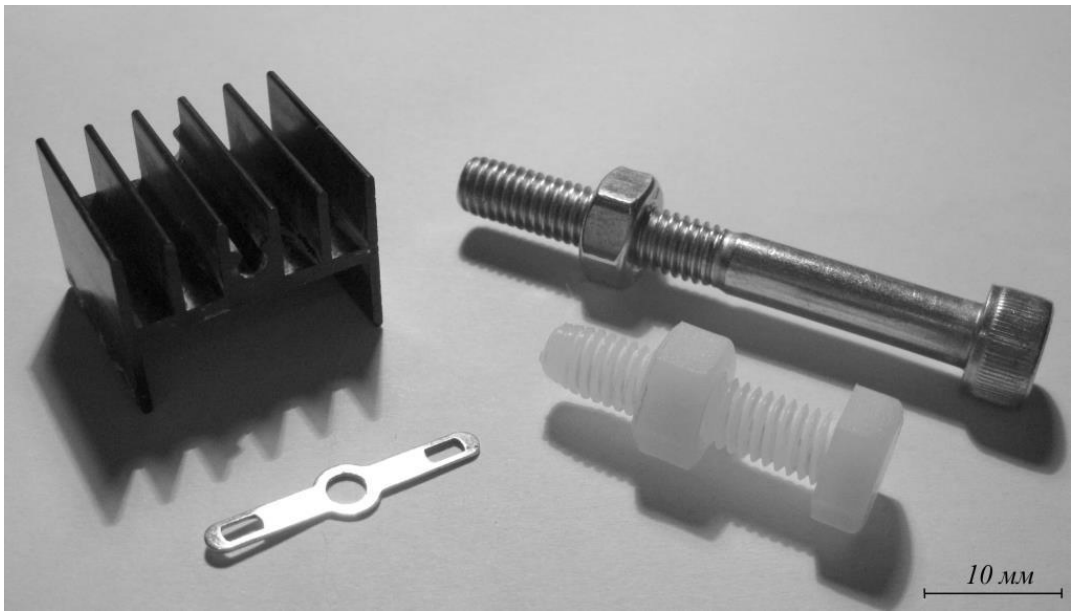
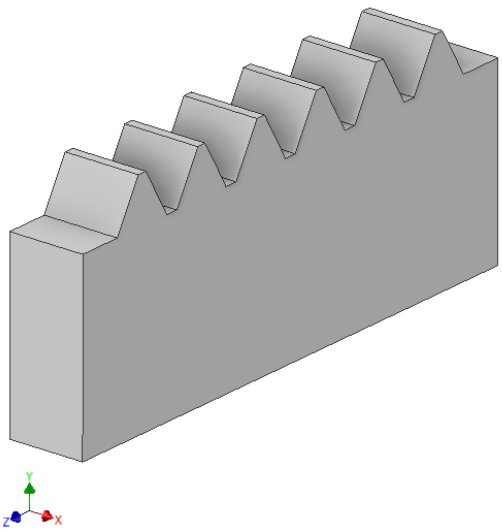


Рис. 59 – Общий вид реальных деталей [88]

Для разработки КОРГ применялась академическая версия программы GOM Inspect, которая позволяет сопоставить результат твердотельного моделирования объекта в CA(D)D/CAGD/CAED-программе с результатом, полученным на основе сканирования/фотограмметрии. При этом объективное суждение о точности основывается либо на текущих численных значениях отклонений или на значениях установленного поля допуска. По результатам сопоставления программа выдаёт как среднее значение отклонения по всему объекту (глобальное отклонение, ГО), так и значения отклонений от базового тела в точке (локальное отклонение, ЛО), созданного в CA(D)D/CAGD/CAED-программе.

Исходная модель метрической резьбы со стандартным углом 60° при вершине разрабатывалась для небольшого начального участка болта М6 с шагом резьбы 1 мм в CAD-программе в параметрическом виде (рисунок 60 и 61а). Исходные 3D-модели алюминиевого радиатора и латунного рычажка показаны на рисунке 61б.

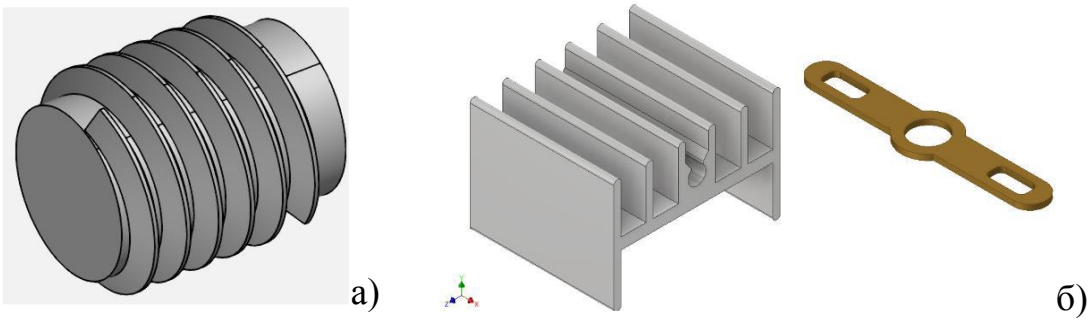


Имя параметра	Используется	Единица/тип	Формула	Номин. знач.
Пользовательские				
D	Height, D1, D2	мм	6 мм	6,000000
d	d6, d3, d1_1, d2_1	мм	6 мм	6,000000
D2	Height	мм	D - 0,6495 бр * P	5,350500
d2_1	d10	мм	d - 0,6495 бр * P	5,350500
D1		мм	D - 1,0825 бр * P	4,917500
d1_1	d9	мм	d - 1,0825 бр * P	4,917500
d3	d11	мм	d - 1,2267 бр * P	4,773300
Height	d12	мм	(D - D2) * 4 мм / 3 мм	0,866000
P	d16, d3, d1_1, D...	мм	1 мм	1,000000
alfa	d13	град	60 град	60,000000
length	d21	мм	7 мм	7,000000
dist	d23	мм	1,0 мм	1,000000
na	d14	бр	6 бр	6,000000
thickness	d24	мм	1,0 мм	1,000000

Рис. 60 – 3D-модель и таблица с параметры метрической резьбы М6х1 (линейный шаблон)

На рисунке 62а представлена исходная геометрия карданного болта с шестигранной головкой. Параметрическая 3D-модель объёмной детали,

получаемой методом холодной объёмной штамповки (ХОШ), была разработана в соответствие с ГОСТ 24705-2004 на метрическую резьбу (рисунок 62б). На том же рисунке представлена 3D-модель, полученная при помощи сканирования, причём участок головки сканировался не полностью, так как контроль точности осуществлялся для участка с накатанной резьбой. Сканирование проводилось на производственном участке компании ООО «Параллель» (г. Орёл). Общее время с момента выхода болта с холодновысадочного автомата, накатки резьбы, очистки от масла, нанесения покрытия и окончания сканирования составило порядка 4–5 минут.



а) б)

Рис. 61 – 3D-модели метрической резьбы М6х1 (диаметральный шаблон, а), радиатора и рычажка (б)

Второе изделие, полученное методами холодной листовой штамповки (ХЛШ), представленное на рисунке 62в, сканировалось вне производства, в лабораторных условиях. Разработка CAD-геометрии проводилась по результатам прямых измерений при помощи стандартных инструментов (штангенциркуль, линейка, микрометр). Небольшой изгиб в центральной части, являющийся результатом пружинения материала после штамповки, не учитывался. Получение STL-моделей осуществлялось в ПО Geomagic Wrap.

Результаты разработки КОГР показали, что применение встроенного в программу алгоритма best fit (совпадение наилучшим образом) позволяет

достичь наилучшего сопоставления результатов исходной CAD-модели и полученной STL-модели.

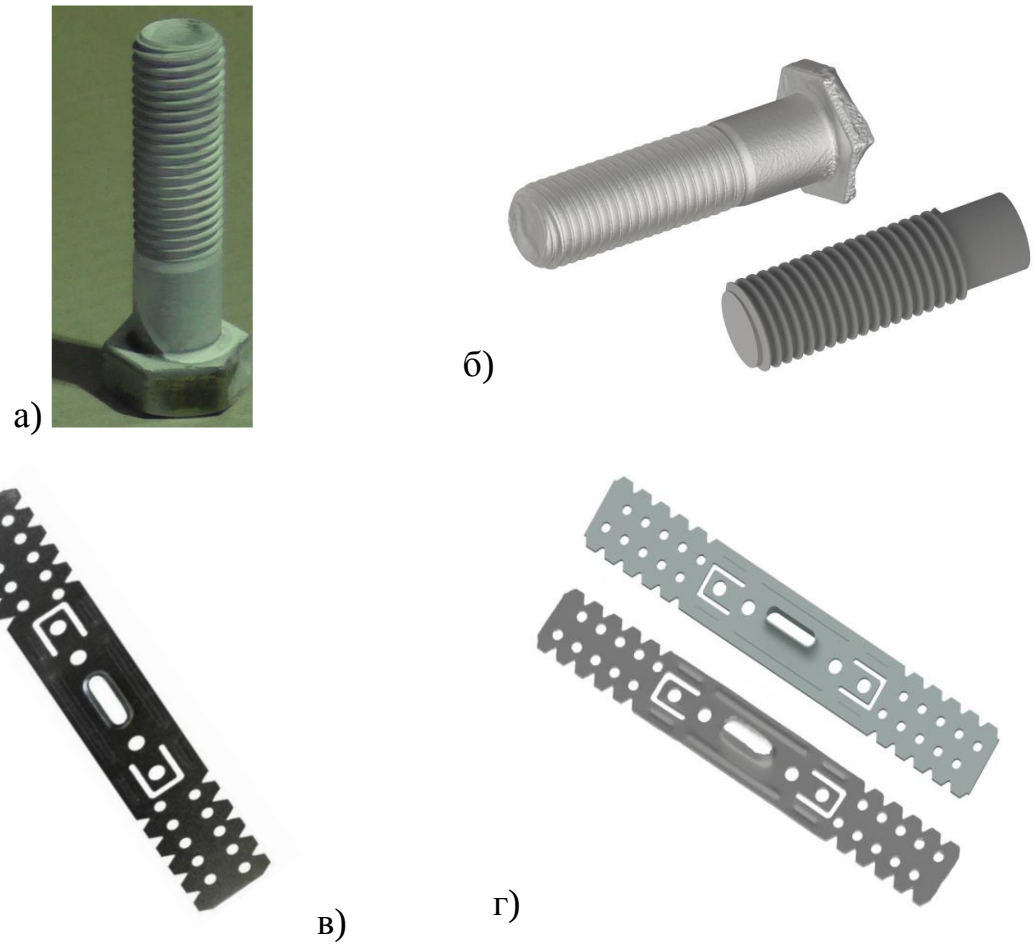


Рис. 62 – Исходная геометрия болта М16х2 с нанесённым покрытием (а), его 3D-модель (диаметральный параметрический шаблон в формате step-модели внизу и результат сканирования в виде STL-модели вверху, б); исходная геометрия крепежа универсального ПП2 (в), его 3D-модель (step-модель вверху и результат сканирования в виде STL-модели внизу, г)

На цветовой шкале рисунка 63 и в таблице 11 показаны полученные величины отклонений. Красным цветом отмечены области, выступающие за поверхность исходного контура (размеры со знаком «плюс»), синим цветом показаны размеры, не доходящие до поверхности исходного контура (размеры со знаком «минус»). Суммарное поле допуска, в зависимости от

которого производилась окраска результата совмещения для четырёх деталей, было различным (таблица 11).

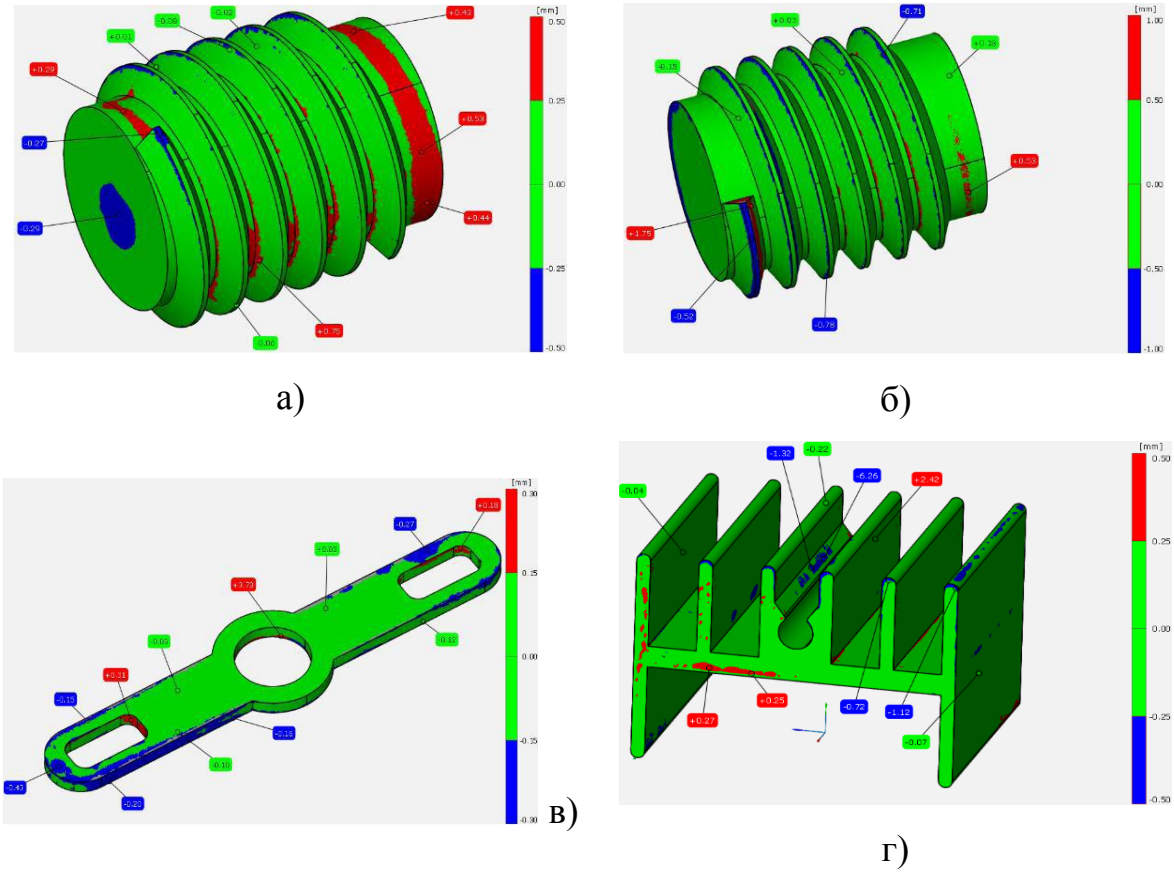
Таблица 11. Средние значения полученных ГО

№ п/п	Название детали/ поле допуска, мм	Величина ГО, мм	Величина ЛО, мм	
			Мин. +/-	*Макс. +/-*
1	Болт М6х1 (сталь)/0,5	0,10	+0,29/ -0,27	+0,75/ -0,29
2	Болт м6х1 (полиэтилен)/1,0	0,12	+0,53/ -0,52	+1,75/ -0,78
3	Рычажок (латунь)/0,3	0,048	+0,18/ -0,15	+3,73/ -0,27
4	Радиатор (алюминий)/1,0	0,07	+0,25/ -0,72	+2,42/ -6,26

Наихудшие ЛО были получены на вершинах и впадинах резьбы, что связано с большой рассеивающей способностью острых кромок (вершины) и трудностью прохождения проецируемого света в узких каналах/пространствах. Также было установлено, что на стенке радиатора при межрёберном расстоянии 3,5 мм и наличии незамкнутой цилиндрической поверхности в центральной части интенсивность света усиливается в результате его переотражения и интерференции, что приводит к высоким ЛО. Максимальное положительное отклонение, полученное на рычажке в области отверстия, связано с несоосным расположением поверхности отверстия внешней цилиндрической поверхности.

Из-за малой толщины детали и острых кромок происходит активное рассеивание проецируемого света, что приводит к потери геометрического контура и отклонения, как в «плюс», так и в «минус». Следует отметить, что кроме программы для обработки получаемого облака точек, существует

необходимость исправления полученной STL-модели, например, в области скруглений или острых кромок. Эта процедура может как повышать ГО, так и снижать величины ЛО.



а) б) в) г)

Рис. 63 – Результаты разработки КОГР: а – резьба образца №1; б – резьба образца №2; в – образец №3; г – образец №4 [88].

После получения геометрий деталей в форматах step (исходная геометрия) и STL (результат оптического сканирования) в программе GOM Inspect проводилось позиционирование двух моделей по встроенному в программу алгоритму best fit (совпадение наилучшим образом) и автоматически рассчитывалась карта отклонений геометрических размеров (КОГР). На цветовой шкале рисунка 64 и в таблице 12 показаны полученные величины отклонений. Красным цветом отмечены области, выступающие за поверхность исходного контура (размеры со знаком «плюс»), синим цветом показаны размеры, не доходящие до поверхности исходного контура

(размеры со знаком «минус»). Суммарное поле допуска, в зависимости от которого производилась окраска результата совмещения для двух деталей, было различным (таблица 11).

Таблица 12. Средние значения полученных отклонений

№ п/п	Название детали/ поле допуска, мм	Величина ГО, мм	Величина ЛО, мм	
			Мин. +/-	Макс. +/-
1	Болт М16х2/0,5	0,0417	+0,03/ -0,05	+0,2,14/ -2,21
2	Крепёж универсальный ПП2/1,0	0,2200	+0,11/ -0,43	+6,94/ -8,24

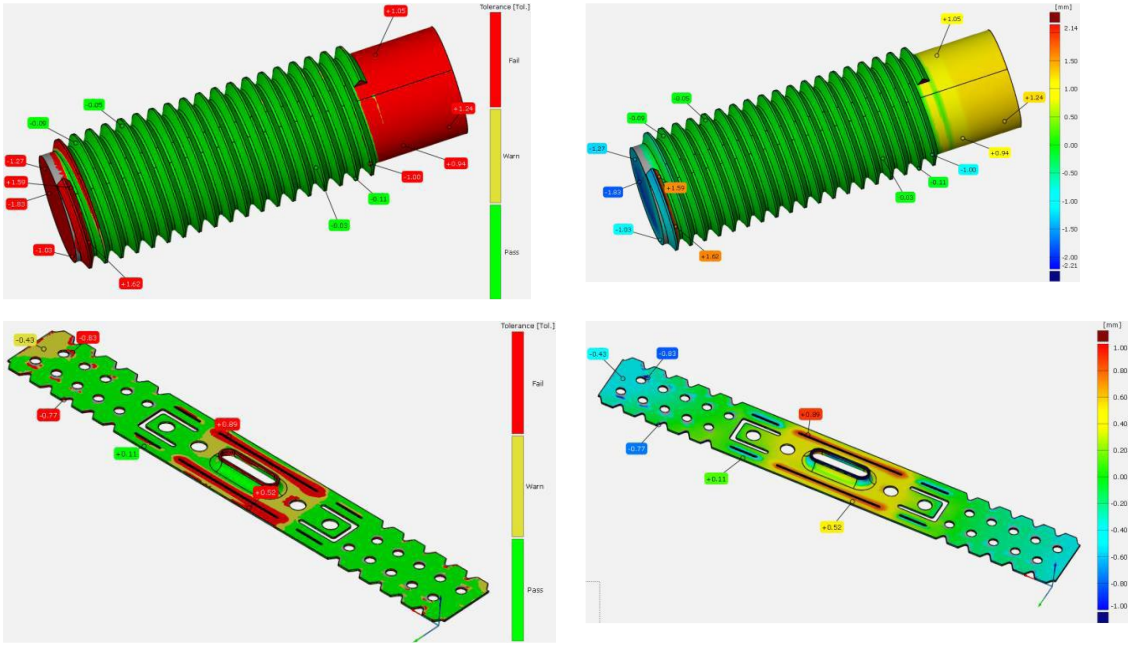


Рис. 64 – Результаты разработки КОГР: а – резьба образца №1, легенда по полю допуска; б – резьба образца №1, легенда по значениям отклонений; в – образец №2, легенда по полю допуска; г – образец №2, легенда по значениям отклонений.

Наихудшие ЛО были получены на вершинах и впадинах резьбы, что связано с большой рассеивающей способностью острых кромок (вершины)

и трудностью прохождения проецируемого света в узких каналах/пространствах. При малых осреднённых значениях ГО на образце №1 присутствуют большие ЛО, например, в области торцевой поверхности, в которой находится углубление, являющееся следствием ступенчатой деформации исходной заготовки, отделяемой хрупко-пластически от основного разматываемого объёма проволоки. Основная стержневая часть также не укладывается в поле допуска 0,5 мм, так как на ней не учтён плавный переход на меньший радиус. Для образца №2 наибольшие отклонения наблюдаются в центральной части, оформляемой операцией «отбортовка», а также в области рёбер жёсткости (выштамповки). Кроме этого большие отклонения (до +6 и -8 мм) наблюдаются на цилиндрических и фигурных поверхностях отверстий. Эти три ло указывают на то, что создание 3D-модели по результатам прямых измерений было осуществлено с недостаточной точностью. Следует отметить, что кроме программы для обработки получаемого облака точек Geomagic Wrap, существует необходимость исправления полученной STL-модели, например, в области скруглений или острых кромок. Эта процедура может как повышать ГО, так и снижать величины ЛО.

Полученные данные оптического сканирования позволяют говорить о принципиальной возможности применения поточного сканирования (инлайн) и сопоставления исходных результатов с результатами сканирования в процессах холодной деформации с дальнейшей возможностью регулировки параметров производственной линии. При сравнении данных по достигаемой точности сканирования (таблица 11) со значениями ЛО (таблица 12) можно сказать, что сложность реальной геометрии напрямую влияет на качество виртуальной геометрии. Сравнение геометрии 3D-модели, полученной методом прямого измерения размеров, с геометрией, полученной по результатам 3D-сканирования, позволяет уточнить геометрическую модель и исправить те участки, измерение которых затруднено, например, малые радиусы закругления. При

применении более когерентных источников излучения (линейные лазеры) можно повысить точность и приблизиться к значениям, указанных в спецификации оборудования.

Глава 5. Численное моделирование процессов ОМД по уточнённым геометрическим моделям

Основной идеей численного моделирования методом конечных элементов (КЭ) по уточнённым геометрическим 3D-моделям является получение результатов, близких к экспериментальному результату. Для выполнения этой задачи были реализованы два этапа. На первом этапе были проведены сравнения результатов численного моделирования ЭОС и ЭОР для идеальной геометрии образцов и для реальной геометрии образцов, полученной при помощи 3D-сканирования. На втором этапе производился поиск условий, при которых результаты численного моделирования наилучшим образом описывали результаты эксперимента. Краткое описание задач показано в таблице 13.

Таблица 13. Описание этапов

№ этапа	Цель этапа	Краткое описание
I	КЭ-моделирование ЭОС и ЭОР	- построение CAD-моделей методом прямого моделирования и по результатам 3D-сканирования; - проведение КЭ-моделирования для сплошных и несплошных образцов (через функцию относительной плотности) в условиях ЭОС и ЭОР; - проведение КЭ-моделирования для образцов с разным типом заполнения в условиях ЭОС; - сравнение результатов КЭ-моделирования.
II	КЭ-моделирование штамповки	- построение CAD-моделей заготовок методом прямого моделирования и по результатам 3D-сканирования для пяти

	заготовки болта	переход, соответствующих позициям холодновысадочного автомата, а также, аналогичным образом, 3D-модели обрезного пуансона пятой операции; - проведение КЭ-моделирования для пяти вариантов постановки задачи; - сравнение результатов КЭ-моделирования.

5.1. Проведение КЭ-моделирования ЭОС и ЭОР

Оптическое сканирование цилиндрических и гантелеобразных образцов проводилось по технологии ССП на оборудовании RangeVision Premium, состоящего из одного проектора и двух КМОП-камер. Процедура получения образцов, выполненных из модельного полимерного материала, представлена в разделе 3.3. Точность 3D-сканирования составляла 20-200 мкм. Подготовленная полигональная модель была преобразована в твердую модель в ПО MeshMixer и Autodesk Inventor. Для первой и второй вокселизации в ПО MeshMixer применялись размеры элементов 0,06 мм и 0,2 мм соответственно. Далее твердотельные модели были импортированы в специализированное ПО для моделирования процессов пластического деформирования QForm VX (продукт QuatorForm). Для того, чтобы определить влияние внутренней плотности образцов на силу деформирования, были подготовлены четыре типа внутреннего заполнения (твердое тело, оболочка, соты и квадрат), которые противопоставлялись образцам, с назначенной в программе QForm значением относительной пористости (рисунок 65 и таблица 14).

Для получения информации о геометрической точности полученной геометрии STL-модели, полученный результат сравнивали с исходной CAD-моделью в GOM Inspect.

Обычно, плотность материала при расчете не учитывается, за исключением случая импульсных процессов, где масс-инерционными характеристиками нельзя пренебречь из-за расширения уравнения равновесия.

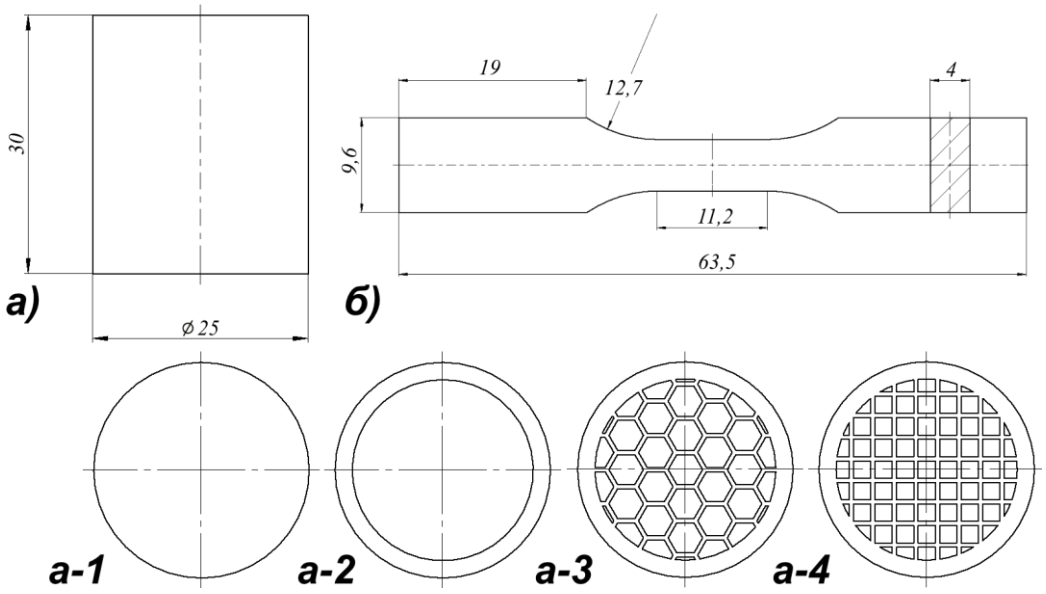


Рис. 65 – Геометрия и размеры образцов для испытаний на сжатие (а) и растяжение (б), а также четыре типа геометрии внутреннего заполнения для образцов на сжатие [89].

Однако может быть применена существующая в QForm изотропная модель пластичности Дж. Грина (уравнения 8) для дискретных компактируемых материалов [90–95]. Для случая а-1 (рисунок 65) было выбрано несколько значений относительной плотности ρ* в соответствие со следующим рядом: 1,0; 0,8; 0,6; 0,4 и 0,2. Очевидно, что чем больше степень деформации материала, тем больше будет значение силы. Таким образом, чем меньше разница между геометрическим объемом исходного или твердого образца (а-2) и геометрическим (CAD) объемами оболочки (а-2) и заполнителями ячеистого типа (а-3, а-4), тем более жестким является образец. Обратное значение формулировки твердого тела может быть задано коэффициентом пористости, который отражает коэффициент

пропорциональности между свойством материала (ρ_{const}), начальным объемом твердой геометрии (V_{const}, а-1) и текущей массой образца (m_{var}). Эта зависимость может быть выражена уравнением 11. Численное моделирование ЭОР проводились только для $\rho^* = 1$ и без заполнения.

Во время процедуры дискретизации происходит огрубление начальной геометрии образцов, полученных по результатам 3D-сканирования (второй образец). На рисунке 66 показано изменение количества конечных элементов (КЭ) для образцов 3 и 4 при расчете и их резкое уменьшение (для второго образца) перед началом расчета. Такое упрощение было сделано для сокращения времени расчета. Для повышения точности расчета полученной дискретизированной геометрии были проведены расчёты с одинаковым шагом по времени для испытаний на растяжение (10 мс) и сжатие (100 мс).

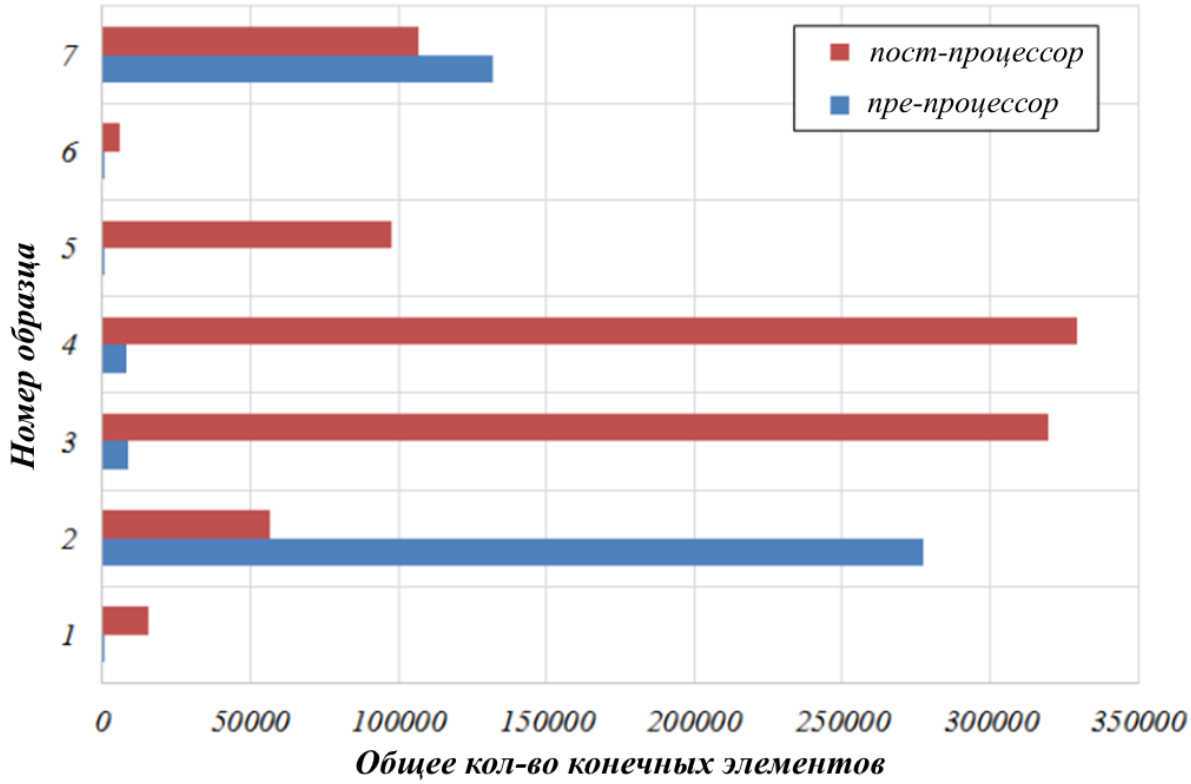


Рис. 66 – Четыре типа геометрии внутреннего заполнения для образцов сжатия.

$$f(\sigma_{ij}) = \mathrm{A}J_2 + BI_1^2 = \sigma_R^2, \quad (8)$$

$$J_2 = \frac{1}{6}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right] = \frac{\bar{\sigma}}{3},\ I_2 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_m, \quad (9)$$

$$\sigma_R^2 = \eta\sigma_s^2, \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{m_{\mathrm{var}}}{\rho_{const} V_{const}}, \quad (11)$$

где A и B – функции отн. плотности материалов, причём B = 1 – A/3; σ_R – уменьшенное значение предела текучести с отн. плотностью ρ* для теста на одноосное растяжение, МПа; $\bar{\sigma}$ – эффективное напряжение, МПа; σ_m – среднее напряжение, МПа; J_2 – второй инвариант девиатора напряжений; I_2 – первый инвариант тензора напряжений; σ_s – предел текучести основного материала, МПа; η – функция отн. плотности.

Таблица 14. Геометрическое описание образцов

Название теста	№ п/п	Геометрия образца	Объём, мм^3	Масса, кг	ΔОбъём, мм^3	Пористость
одноосное сжатие	1	цилиндр_CAD	14 726,216	0,015610	0	1,000
	2	цилиндр_3D-сканирование	14 086,905	0,014932	6,39311E-07	0,957
	3	цилиндр_квадраты_CAD	8 078,778	0,008564	6,64744E-06	0,549
	4	цилиндр_соты_CAD	6 854,846	0,007266	7,87137E-06	0,465
	5	цилиндр_оболочка_CAD	4 335,398	0,004596	1,03908E-05	0,294
одноосное растяжение	6	гантель_CAD	2 070,288	0,002195	0	1,000
	7	гантель_3D-сканирование	1 939,056	0,002055	1,31232E-07	0,937

Для получения информации о геометрической точности полученной геометрии STL-модели, полученный результат сравнивали с исходной CAD-моделью в GOM Inspect (рисунок 67).

Для образца на растяжение глобальное отклонение по алгоритму наилучшего совпадения (best-fit) составило 0,08 мм, а для образца на сжатие-0,15 мм. Синий цвет показывает поверхность под номинальной

CAD-геометрией, а красный – над ней (67б и 67г). Зеленый цвет показывает почти нулевые отклонения от номинальных значений. По результатам виртуального сравнения размеров отклонения не превышают 95% поверхности полей допуска 0,6 мм для образцов на растяжение и 1,6 мм для образцов на сжатие.

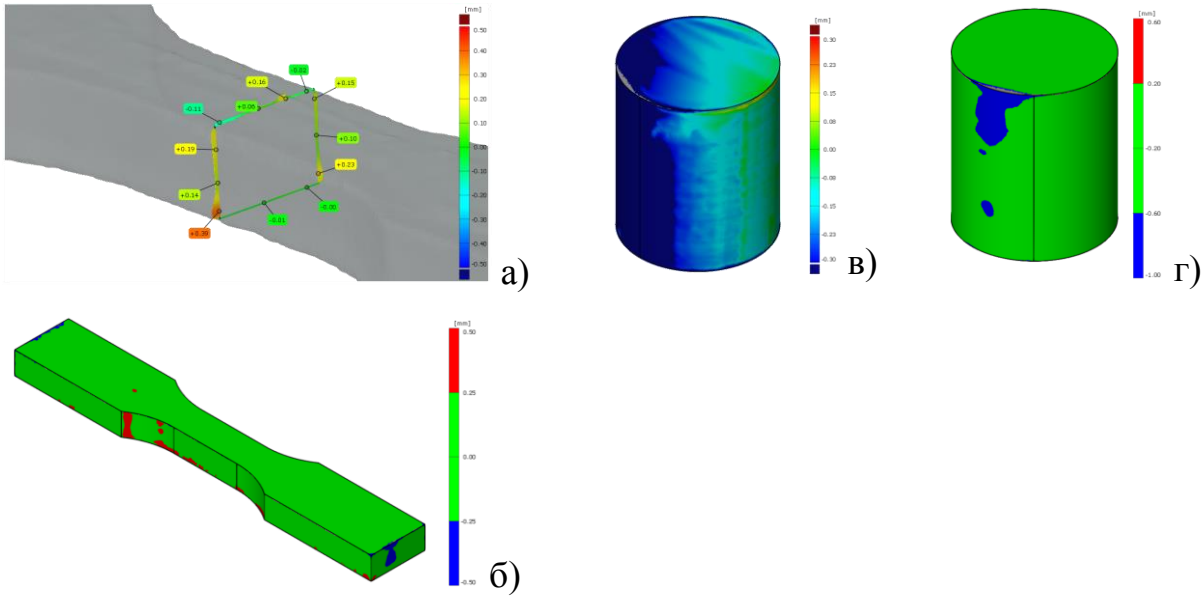


Рис. 67 – КОГР: а) поперечное сечение и б) изометрический вид образца на растяжение (допуски ±0,5 мм, поле допуска 1 мм); в) изометрический вид образца на сжатие для допусков ±0,3 мм, поле допуска 0,6 мм и г) изометрический вид образца на сжатие для допусков +0,6 и-1,0 мм, поле допуска 1,6 мм.

С учетом снижения точности при переразбиение конечно-элементной сетки и потери КЭ в QForm (рисунок 66), результаты моделирования ЭОР показали различия в зависимости от исходной 3D-модели: полученной после прямого моделирования (образец 6, таблица 14) и после 3D-сканирования (образец 7, таблица 14), и представлены на рис. 68.

Для гантелеобразных образцов 7 разрушение настало раньше, чем для образцов 6. Точки трассировки, первоначально расположенные на одном и том же расстоянии для 6 и 7 образцов, изменили свое местоположение

относительно области разлома для случая (а). Общая длина образцов после разрушения была больше для идеальных образцов 6 примерно на 3,8-5,1%.

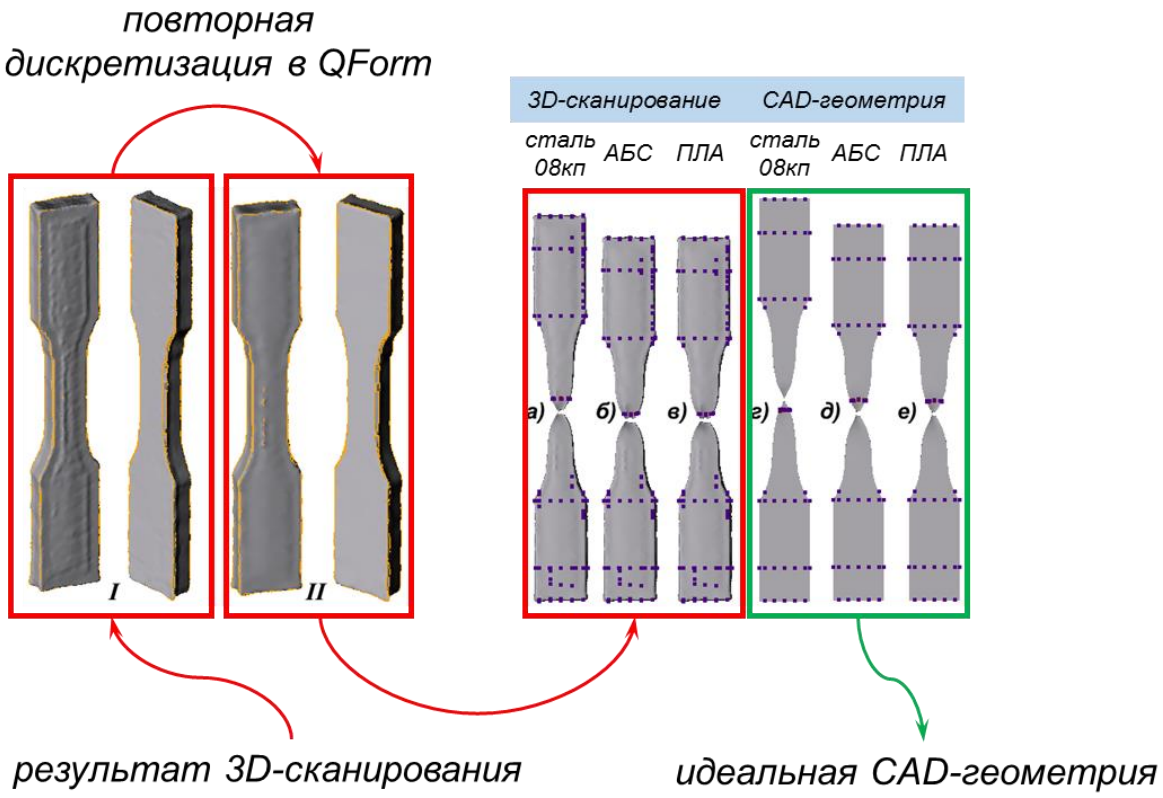


Рис. 68 – Две стороны 3D-моделей гантелеобразных образцов в предпроцессоре (I) и на первом этапе моделирования (II); гантелеобразные образцы после разрушения для трёх исследуемых материалов (слева направо, дважды: 08kp, АБС и ПЛА): (а) – (в) – для образцов, полученных методом 3D-сканирования и (г) – (е) - для образцов, полученных методом прямого 3D-моделирования

На рисунке 69 представлены основные результаты испытаний на растяжение (69а) и сжатие (69б). Численные кривые перемещение – сила были получены на основе средних значений напряжений и измеряемых каждые 50 мс расчетного времени значений поперечного сечения. Полученные четыре кривые (для образцов 6 и 7, модельный полимерный материал) имеют одинаковую форму и максимальное значение силы не превышает 750 Н. Численные кривые более широкие, что означает более высокие предельные значения деформации. В реальности напряжение

уменьшается за счет внутреннего типа заполнения и шероховатости поверхности. Влияние степени и вида внутреннего наполнения более отчётливо видно на экспериментальных кривых ЭОС. Численные кривые для образцов из модельного материала АБС- и ПЛА-пластиков расположены довольно близко к соответствующим экспериментальным кривым образцов со 100% заполнением. Но начиная с величины перемещения 3 мм для ПЛА- и 10 мм для образцов из АБС-пластиков кривые резко возрастают. Кривые для образцов из АБС-пластика имеют очень хорошее совпадение при смещении 1,5 мм. Такую же тенденцию резкого повышения имеют кривые для образцов №1 с переменными относительными плотностями (рисунок 69б). Однако, наблюдается падение кривых (спуск графика) после значения перемещения 8 мм для образцов 3, 4 и 5.

По результатам первого этапа моделирования было установлено, что тип внутреннего заполнения и относительная плотность, а также внешняя геометрия, оказывают влияние на уменьшение механических свойств, в частности, предельной деформации. Это означает, что при наличии внутренних дефектов в образце, а также особенностей во внешней геометрии, значения основных механических характеристик будут меняться, что приведёт и к изменениям в результатах моделирования.

5.2. Проведение КЭ-моделирования процесса ХОШ

На втором этапе КЭ-моделирования (таблица 13) был выбран процесс моделирования деформации заготовки болта с шестигранной головкой М10, который изготавливается на производстве в условиях холодной деформации. В ходе проведения экспериментов на производственной площадке предприятия ООО «Параллель» (г. Орёл) была определена последовательность проведение 3D-сканирования. Последовательность из пяти операций ХОШ выполнялась на холодновысадочном автомате

Malmedie QPB 101. Мерные заготовки отрезались на первой операции от стальной проволоки ∅11,8$_{-0,08}$, выполненной из стали 35, разматываемого бунта.

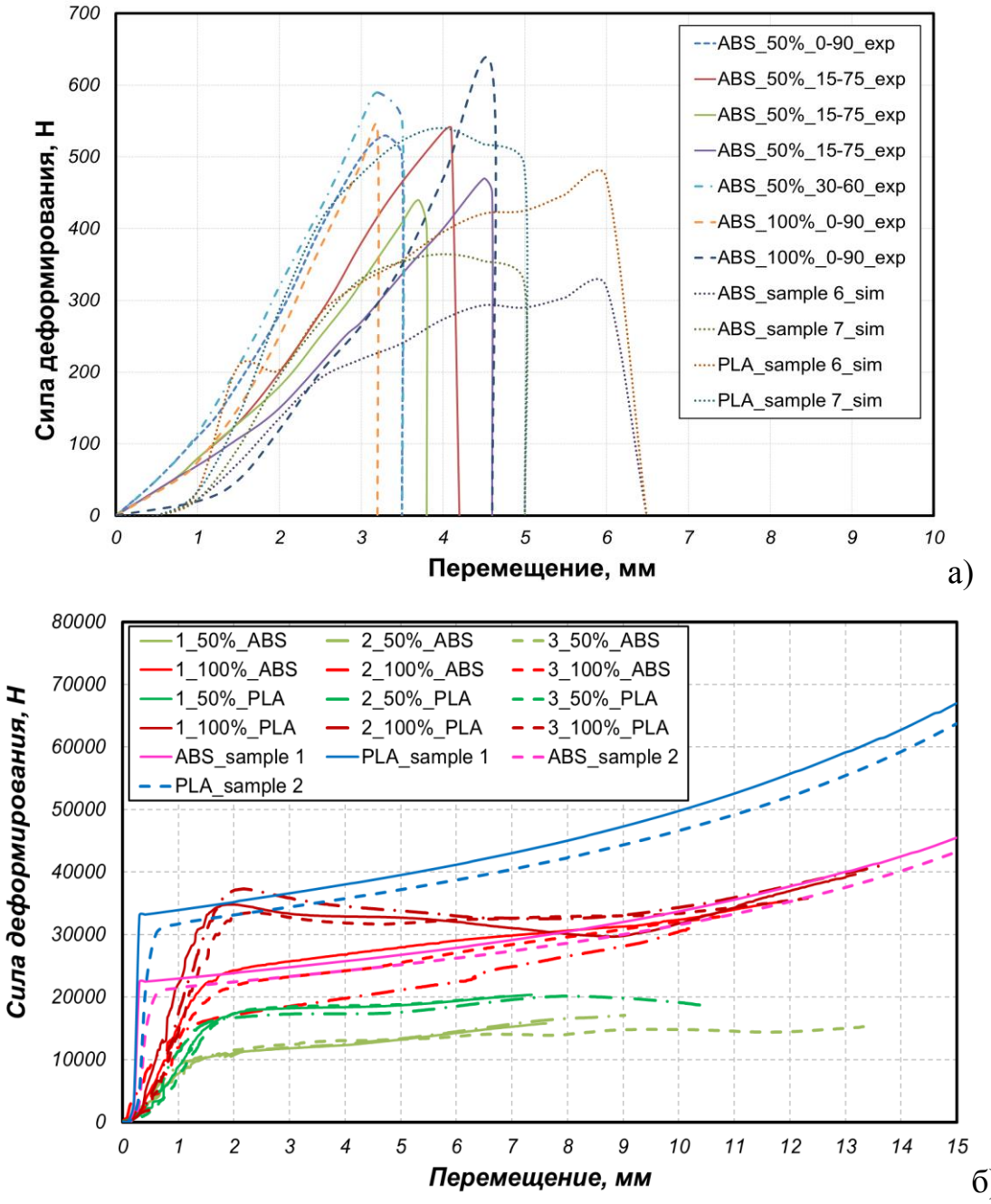


Рис. 69 – Сравнение графиков экспериментов и КЭ-моделирования: а) экспериментальные результаты для напечатанных образцов с УП 0°, 45° и 90°, с 50% и 100% заполнение образцов; б) сравнение экспериментальных кривых для 50% и 100% заполнения для образцов из АБС- и ПЛА-пластиков с результатами экспериментов.

На второй операции осуществлялась осадка, на третьей – высадка головки и формирование фаски, на четвёртой – редуцирование ножки, на пятой – формирование шестигранной головки обрезным пуансоном (ОБП). Производительной холодновысадочного автомата составляла 60 шт./мин. В дальнейшем заготовки подвергались заключительной операции – накатке резьбы. На рисунке 70 показаны результаты последовательного выполнения операций ХОШ заготовки болта. Видно, что на последней операции появляется неплоскостность нижнего торца ножки заготовки болта, имеющего вогнутую форму (далее утяжина), которая не является производственным дефектом и не влияет на работу болта в процессе его эксплуатации.

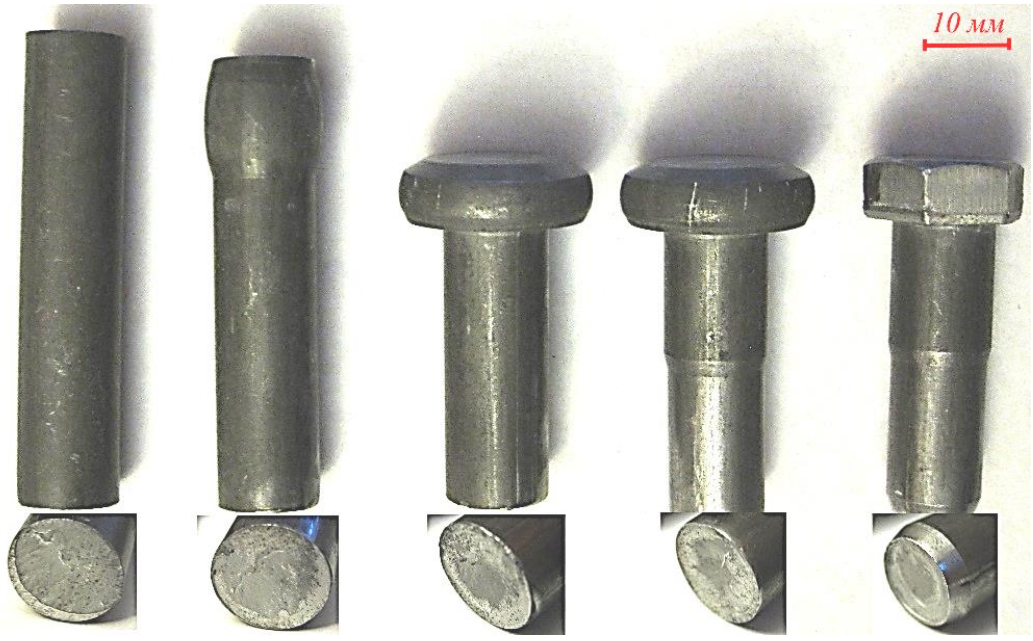
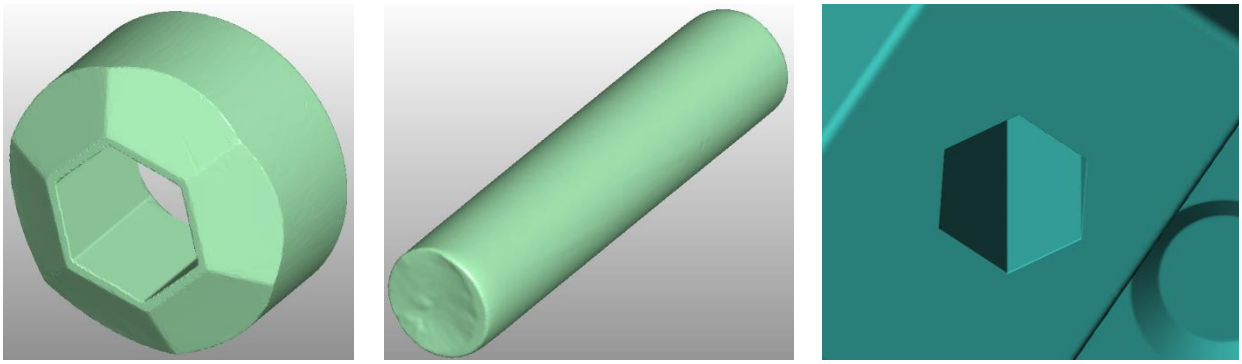


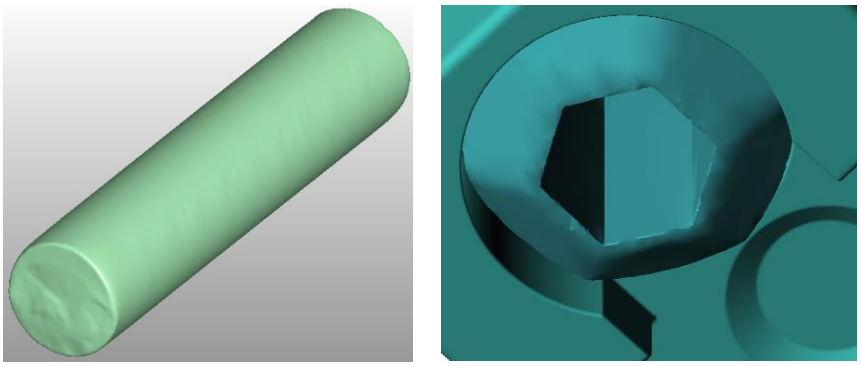
Рис. 70 – Штамповочные переходы для получения заготовки болта (слева-направо): отрезка, осадка, высадка головки, редуцирование, контурная обрезка головки болта.

Последовательность выборочной проверки геометрии заготовки болта проводилась следующим образом. После пятой операции из общего контейнера извлекали последнюю заготовку болта, ветошью очищали её от остатков смазки, аэрозольным способом наносили матирующий спрей для

создания поверхности с равномерно отражающими свойствами и проводили 3D-сканирования на основе структурированного подсвета на 3D-сканере RangeVision Spectrum. Среднее значение общего времени работ выборочной проверки составила 2,5 – 3 минуты, без учёта времени на однократную первичную калибровку оборудования. Полученный объём геометрических необработанных данных одного сканирования составил 500 МБ.



а) б) г)



в) д)

Рис. 71 – Полигональные 3D-модели: обрезной пуансон (а) и заготовки после отрезки (б, в), показаны оба торца, плоская ОБП1 (г) и фигурная ОБП2 (д).

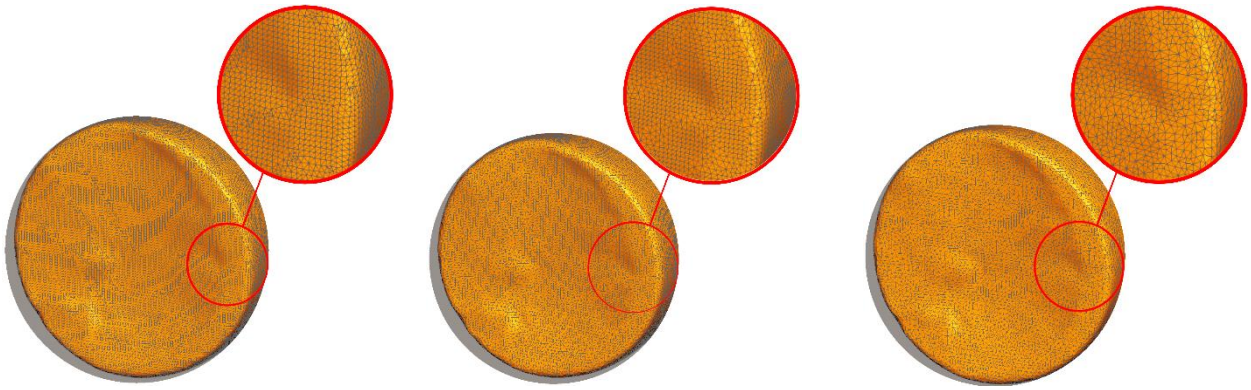
В дальнейшем вне производственной площадки полученное облако точек было отфильтровано. Оставшиеся точки использовали для реконструкции заготовки болта. Итоговый объём геометрических данных был снижен более, чем в 10 раз, и составил 40 МБ.

Для уточнения влияния геометрии ОБП на результат ХОШ было проведено 3D-сканирование и получена информация о его геометрии. На

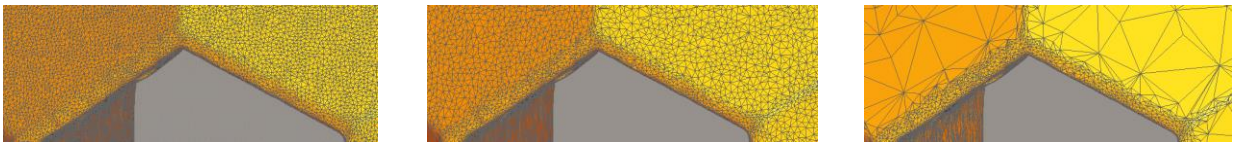
рисунке 71 представлены итоговые результаты, которые использовались в дальнейшем для моделирования процесса пластической деформации.

Итоговые файлы с геометрической информацией об объектах были экспортированы в формат stl. При работе с такими полигональными 3D-моделями, полученными на основании 3D-сканирования, требуются преобразования полигональной сетки с целью уменьшения количества её составных элементов в виде поверхностных треугольников для снижения времени переразбиения сетки в процессе решения численной задачи.

а) ребро заготовки нижнего торца



б) обрезная кромка пуансона (операция 5)



Количество ПГЭ сетчатых 3D-моделей (приведено слева-направо)	а)	298 954	224 216	149 477
	б)	1 115 116	111 512	55 756

Рис. 72 – Влияние количества элементов полигональной сетки 3D-моделей на детализацию поверхностей.

Снижение числа полигональных элементов (ПГЭ) сетки приводит к уменьшению детализации поверхностной геометрии. На рисунке 72 показаны варианты снижения количества элементов и изменение морфологии сетки для заготовки и обрезной кромки пуансона.

Численное моделирование (ЧМ) процесса пластического деформирования в условиях ХОШ было проведено в ПО QForm v9. В таблице 15 представлены данные по исходным геометриям, загруженным в программу численного моделирования на этапе пре-процессора, и результаты переразбиения сетки на первом этапе решателя.

Было проведено пять расчётов последовательного многопозиционного деформирования:

– начиная от отрезки заготовки (ЗГ1) на первой операции и с ОБП1 на пятой операции;

– с загрузкой CAD-модели заготовки с вогнутыми торцевыми гранями (ЗГ2) на второй операции и с ОБП1 на пятой операции;

– с загрузкой твердотельной модели заготовки, полученной по результатам 3D-сканирования (ЗГ3), на второй операции и с ОБП1 на пятой операции;

– с загрузкой твердотельной модели заготовки на второй операции и ОБП2 на пятой операции, полученными по результатам 3D-сканирования для фактора трения m = 0,15 (ОБП2_1);

– с загрузкой твердотельной модели заготовки на второй операции и ОБП2 на пятой операции, полученными по результатам 3D-сканирования для фактора трения m = 0 (ОБП2_2).

Расчёты проводился на компьютере со следующими техническими характеристиками: Intel i7 (8 ядер), 3,4 ГГц, 16 ГБ RAM DDR3, дискретная видеокарта NVidia Quadro 600 с 1 ГБ DDR3. В таблице 1 представлены характеристики полигональных сеток обрезного пуансона и исходных заготовок, показанных на рисунке 71.

В таблице 16 показаны основные граничные условия (ГУ) численных моделей. В вариантах расчётов ЗГ1 – ЗГ3 применялся плоский обрезной пуансон на пятом переходе (рисунок 71г). Для сохранения детализации геометрии ЗГ и ОБП2 вводились ограничения по наибольшему размеру

конечного элемента (глобальная адаптация), а также количеству элементов на торце заготовки (локальная адаптация), согласно таблице 16.

Таблица 15. Характеристика полигональных 3D-моделей.

Кодировка детали	**Объём, мм^3**	**Кол-во элементов полигональной 3D-модели (QFprep/QFsol)**	
		вершин	**треугольников**
обрезной пуансон (ОБП)	12 581,9	16 451/3 024	32 902/14 937
заготовка №1 (ЗГ1)	5 762,1	11 116/21 872	22 228/127 174
заготовка №2 (ЗГ2)	5 631,3	4 461/21 922	8 918/126 621
заготовка №3 (ЗГ3)	5 826,0	216 429/19 576	432 854/113 491

На рисунке 73 показаны места приложения силы (проталкивающая/деформирующая сила) на заготовке со стороны деформирующих инструментов.

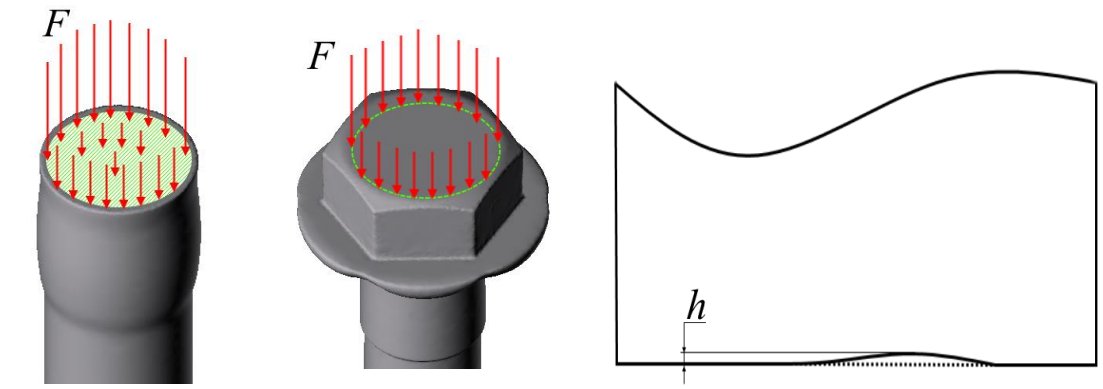
Таблица 16. Параметры моделирования.

Параметр	**Ед. изм.**	**Значение**
Скорость перемещения пуансона (оп. 2 – 5)	мм/с	9,44
Номинальная сила автомата	МН	0,15
Закон трения по Леванову, фактор трения	-	0,15 или 0
Модель теплообмена	-	совместная
Макс. размер элемента (вар. 1 и 2)	мм	0,8
Локальная адаптация (вар. 3 и 4), макс. разм.	мм	0,1
Расчет с двумя сетками (вар. 3)	-	да

На операциях 2 – 4 приложение силы происходит по грани (поверхности), что позволяет говорить о монотонном изменении скорости течения металла в направлении оси OZ в ножке с учётом сил контактного

трения о внутреннюю поверхность матрицы, при допущении об отсутствии анизотропии свойств в рассматриваемом объёме металла. На операции 5 контакт осуществляется по линии, соответствующей проекции обрезной кромки пуансона. Возможно перемещение внешних слоёв металла в ножке в направлении OZ в случае, если сила трения меньше проталкивающей силы.

Измерение высоты утяжины проводилось в соответствии с рисунком 4б в диаметральной плоскости сечения заготовки на каждой операции ХОШ. Поскольку в ПО QForm v9 нет возможности работы с геометрическими данными, полученными по результатам расчётов, то после разделительной операции геометрия заготовка, состоящая из двух частей, экспортировалась в сеточный формат (stl), проводилось её преобразование в твердотельную модель и удаление ненужной части заготовки, а затем полученный результат снова загружался (импортировался) на вторую операцию.



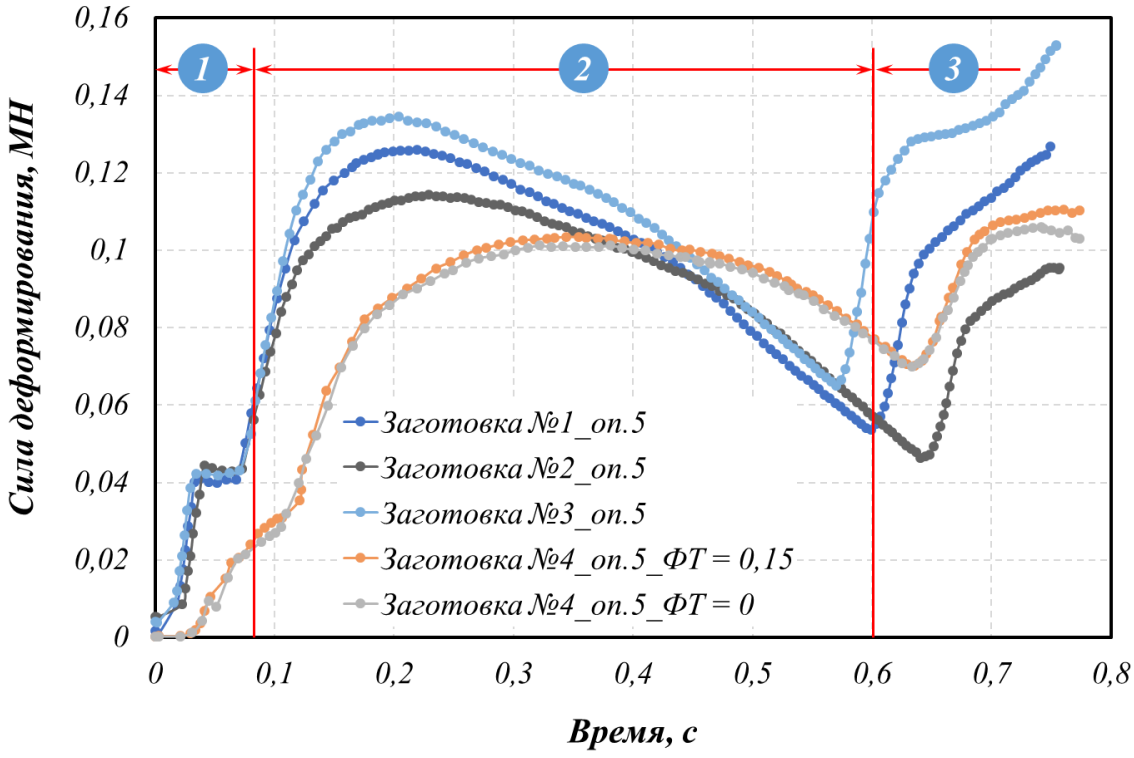
операции 2 – 4 *операция 5*

а) *б)*

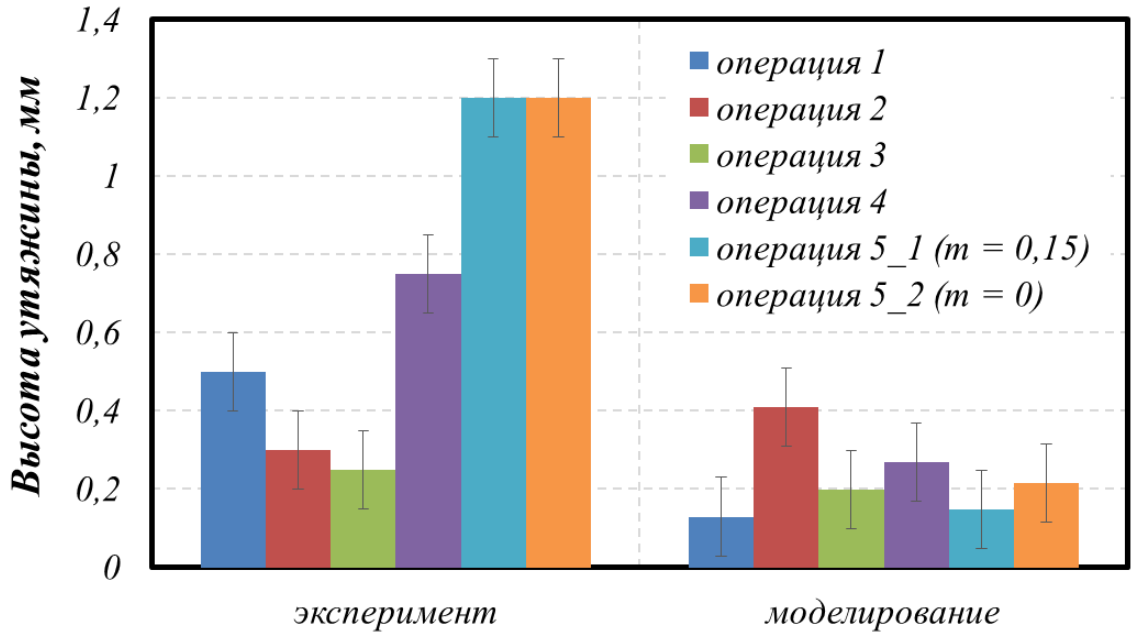
Рис. 73 – Места приложения сил при нагружении заготовок (а) и контролируемый высотный размер утяжины (б).

На рисунке 74 показаны машинные диаграммы сила – время для последней, пятой операции (формирование шестигранной головки) для пяти вариантов расчётов процесса, а также сравнение высот утяжин. На рисунке

75 дано сравнение поверхности нижних торцев исходной и итоговой заготовок. На рисунке 76 показано изменение скоростей течения металла в направлении оси OZ по каждой из операций для варианта расчёта ЗГЗ.



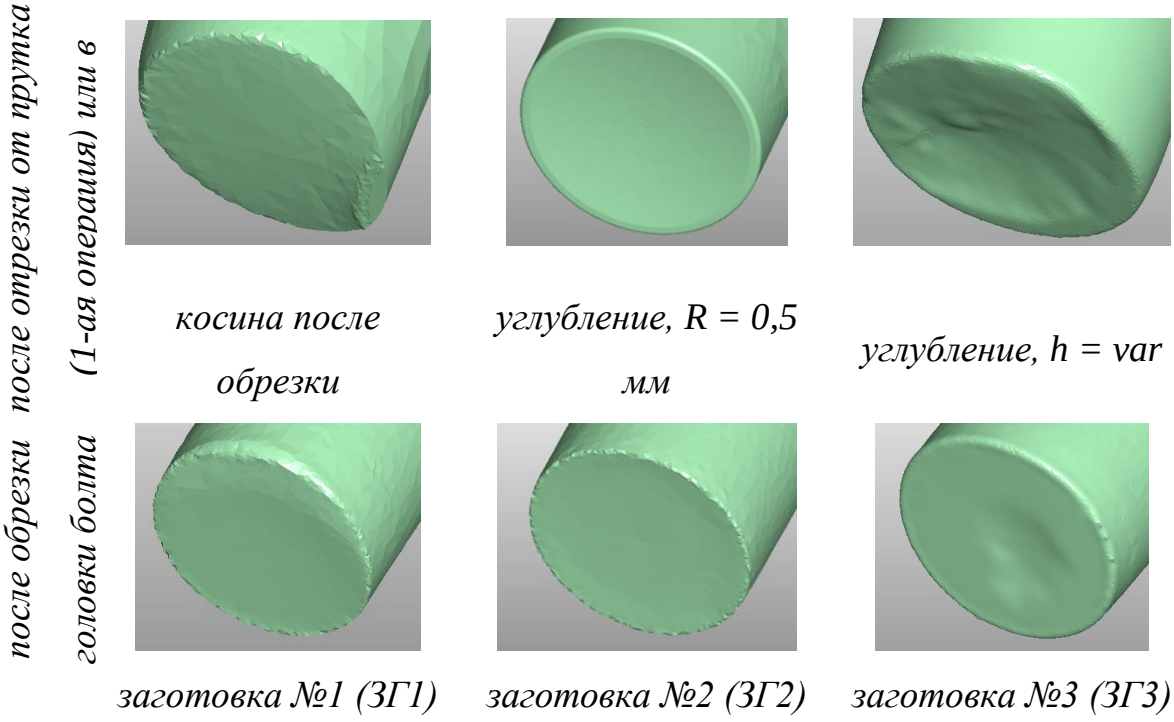
а)



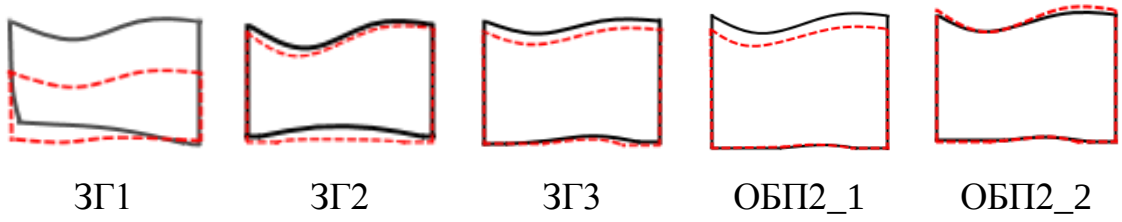
б)

Рис. 74 – Машинные диаграммы после пятой операции и гистограмма изменения высоты утяжины.

Графики функции сила – время имеют одинаковую тенденцию на рассматриваемой области определения и имеют два экстремума (рисунок 74а). Также можно выделить три характерные области. Первая область характеризуется проталкиванием заготовки в направлении OZ и выборкой зазором между нижней гранью шестигранной головки и верхней гранью нижнего инструмента. Вторая область характеризуется монотонным ростом и последующим убыванием силы.



а) торцы получаемых заготовок процесса высадки заготовки болта



б) контуры торцев в плоскости главного сечения (сплошная линия – исходный контур, пунктирная линия – итоговый контур)

Рис. 75 – Изменение кривизны нижнего торца заготовки в начале и в конце процесса.

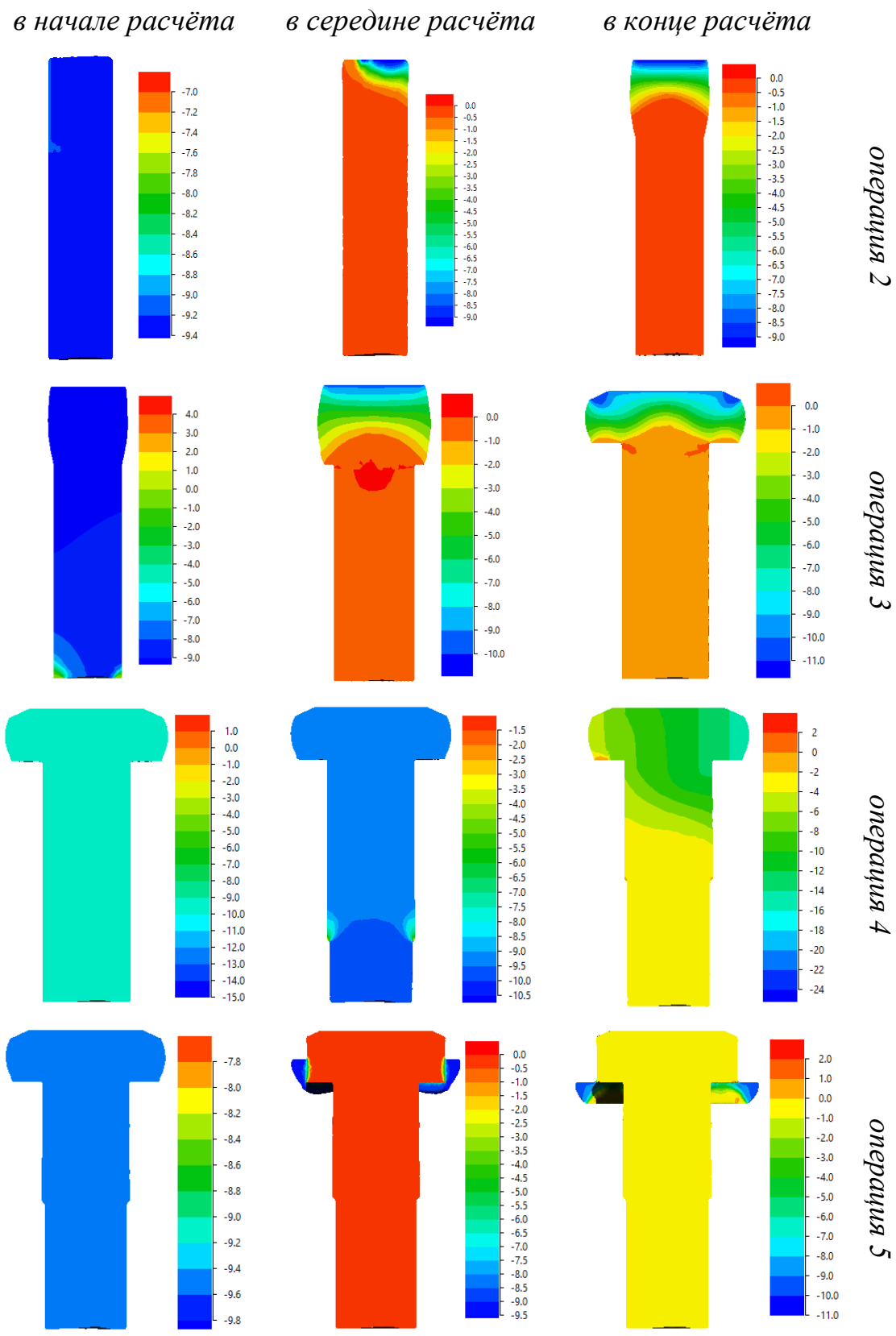


Рис. 76 – Изменение скорости течения металла заготовки (в мм/с).

Это объясняется повышением напряжения текучести по линии контакта обрезной кромки пуансона и заготовки (рост силы) и достижения предела разрушения материала (убывание силы). Третья область характеризуется повторным ростом силы, связанный с одноосным сжатием облоя и возникновением контактных поверхностей между вертикальными гранями шестигранной головки и внутренними поверхностями ОБП.

После измерения высоты утяжины на каждой операции (рисунок 75б) и сравнением с результатами экспериментов было установлено, что хорошее совпадение наблюдается лишь на второй и третьей операциях. Однако, если сравнивать изменение (эволюцию) контура нижнего торца заготовки по главному сечению, то наилучшее совпадение было получено для случаев ЗГ3, ОБП2_1 и ОБП2_2 (рисунок 76).

Видно, что наиболее интенсивно скорость течения металла в ножке меняется на третьей и четвёртой операциях. На второй операции изменение скорости локализовано в наборной части, а на пятой – в шестигранной кольцевой области снятия материала.

5.3 Сравнение геометрии полученных 3D-моделей

На рисунке 77 показано сравнение 3D-моделей облоя, полученных в эксперименте (№1) и по результатам численного моделирования по пяти вариантам (№2 – 6). В случае расчётов с ОБП1 отсутствуют наклонные к горизонтальной плоскости «лепестки» облоя. При применении ОБП2, наоборот, видно, что скорость истечения материала из очага деформации соответствует экспериментальному результату. Во всех расчётных случаях высота облоя в центральной части не соответствует одноимённой высоте в облое №1. Кроме этого, нижняя часть инструмента на операции 5 не соответствует реальной геометрии, которая не была учтена при моделировании.

На рисунках 78 и 79 приведены результаты инспектирования размеров с построением карт отклонений геометрических размеров (КОГР), которые представлены по отклонению размеров (рисунок 78) и по полю допуска (рисунок 79).

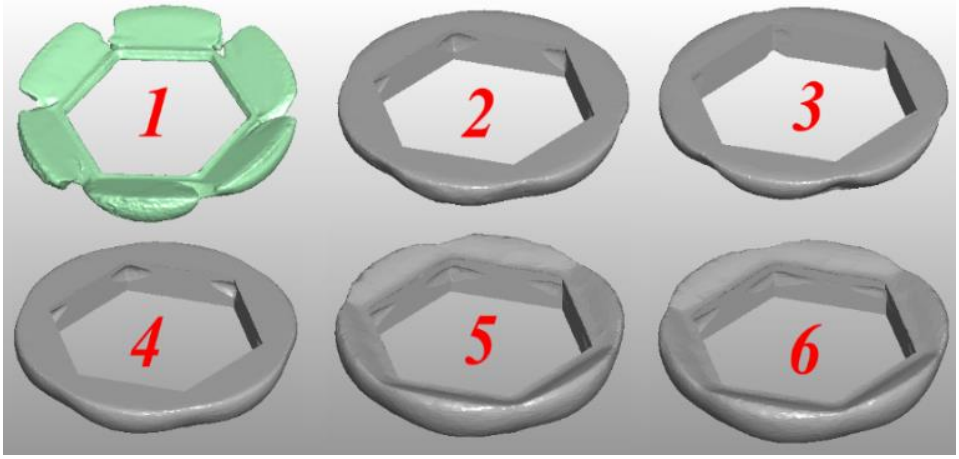
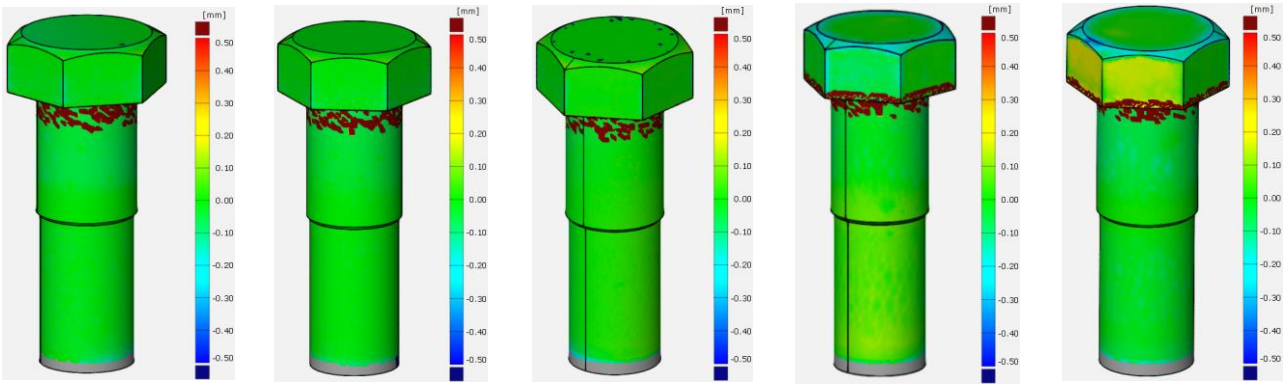


Рис. 77 – Вид облоя после выполнения пятой операции: 1 – эксперимент; 2, 3 и 4 – обрезной пуансон (ОБП1) с плоским торцем, варианты ЗГ1 – ЗГ3; 5 и 6 – обрезной пуансон с фигурным торцем (ОБП2), *варианты ОБП2_1 и ОБП2_2*.

На рисунке 78 показаны результаты сравнения идеальной 3D-модели без облоя, разработанной в CAD-программе, на основании размеров реальной заготовки болта, и 3D-модели с облоем пятой операции, полученной по результатам 3D-моделирования. Наибольшее отклонение размеров наблюдается в области образования облоя, что не требует изменения ГУ ЧМ, а также в нижней части ножки (серая область), что требует изменения ГУ ЧМ, например, скорости деформирования или фактора трения, и/или изменения геометрии, например, добавление фаски на операции 5 (рисунок 71).

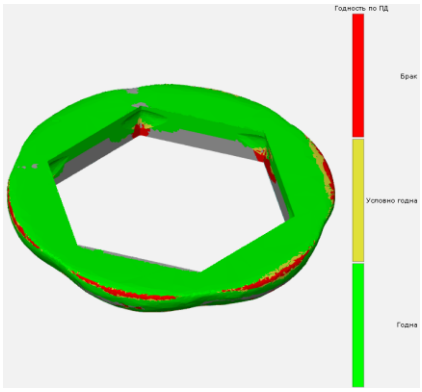
На рисунке 79 показано сравнение полигональной 3D-модели облоя, полученной при помощи 3D-сканирования реального объекта, и 3D-модели пятой операции, полученной по результатам 3D-моделирования, с указанием массы. Средняя масса облоя после эксперимента составила m =

5,15 г. Таким образом, разность масс облоя после 3D-моделирования и эксперимента составила от 2% до 26%.

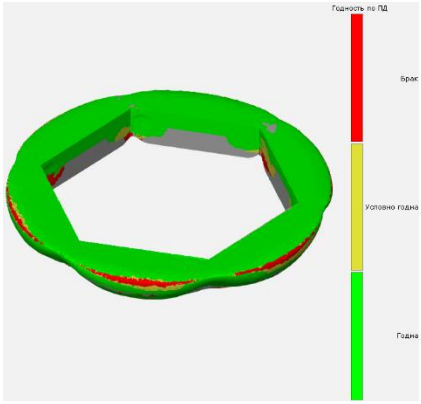


ЗГ1 *ЗГ2* *ЗГ3* *ОБП_1* *ОБП_2*

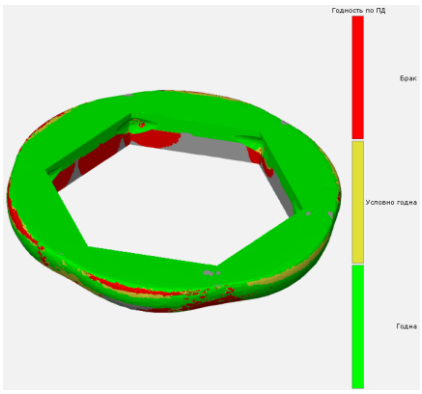
Рис. 78 – Сравнение результатов расчётов пятой операции с реальной поковкой (с облоем), шкала отклонений размеров (±0,5 мм).



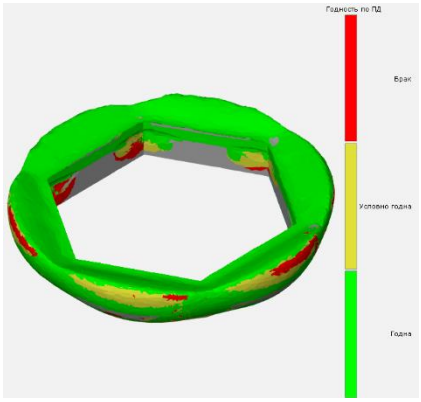
ЗГ1 (m = 4,607 г)



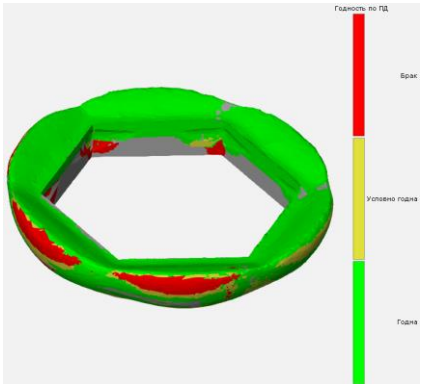
ЗГ2 (m = 3,796 г)



ЗГ3 (m = 5,042 г)



ОБП_1 (m = 4,976 г)



ОБП_2 (m = 4,999 г)

Рис. 79 – Сравнение результатов расчётов облоя на пятой операции с реальным облоем, шкала по допускам (отклонения ±2,0 мм, поле допуска 4 мм).

5.4 Оценка временных затрат на проведение КЭ-моделирования

Общее расчётное время по операциям для пяти вариантов расчётов представлено на рисунке 80. Среднее суммарное время расчёта по вариантам ЗГ1 – ЗГ3 для пяти переходов составило 2 212 минут или ~ 37 часов, а для вариантов ОБП1 и ОБП2 – 3 923 минуты или ~ 65,5 часов.

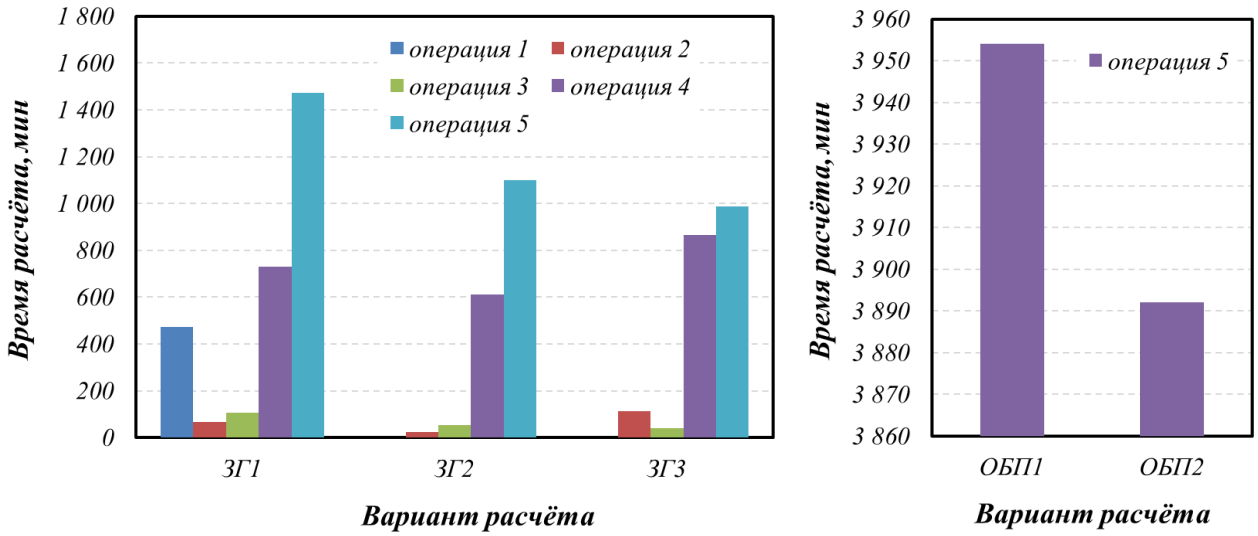


Рис. 80 – *Пооперационное расчётное время для пяти вариантов расчётов.*

Таким образов на втором этапе моделирования показано, что при моделировании заготовок с косым торцем, полученным после отрезки заготовки от прутка, с торцем, имеющим углубления, полученные в CAD, и с реальной геометрией, полученной после 3D-сканирования, были

получены три разных результата, из которых наиболее близким к экспериментальному оказался последний вариант.

Форма ОБП оказывает влияние на итоговый вид облоя, но не на изменение утяжины в нижнем торце заготовки. Кроме этого, уменьшение фактора трения на пятой операции в малой степени оказывает влияние на итоговый результат (искажение нижнего торца и геометрии облоя).

Время расчёта увеличивается с увеличением элементов КЭ-сетки, а число составляющих КЭ-сетку элементов наследуется из полигональной модели. Соответственно, для ускорения расчётов требуется уменьшение полигональных элементов, что негативно повлияет на итоговую точность геометрии поковки.

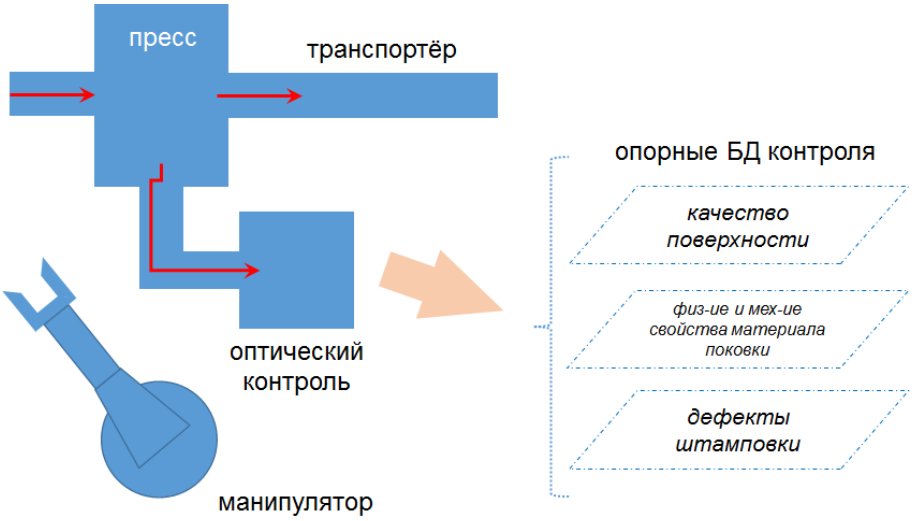
Глава 6. Разработка алгоритма управления участком холодной объёмной штамповки

На действующем предприятии ведётся изготовление заготовок болтов с шестигранной головкой. Штамповка ведётся на холодновысадочном автомате с производительностью 60 штук в минуту. Каждую минуту из магазина извлекается одна заготовка болта, очищается от смазочного вещества, на её поверхность наносится покрытие, увеличивающее отражательную способность, 3D-сканирование на основе структурированного подсвета, фотограмметрия областей с высоким риском образования дефектов, определяемыми при помощи ЧМ. Таким образом на участке штамповки обеспечивается выборочный летучий контроль (инлайн контроль). Если полученная геометрия изделия не совпадает с той, которая получена для наиболее желательных технологических параметров, то включается обратная связь и происходит настройка оборудования. Для этого у современного оборудования имеются блоки удалённой настройки оборудования. Например, механические холодновысадочные автоматы могут быть заменены на холодновысадочные автоматы с сервоуправлением.

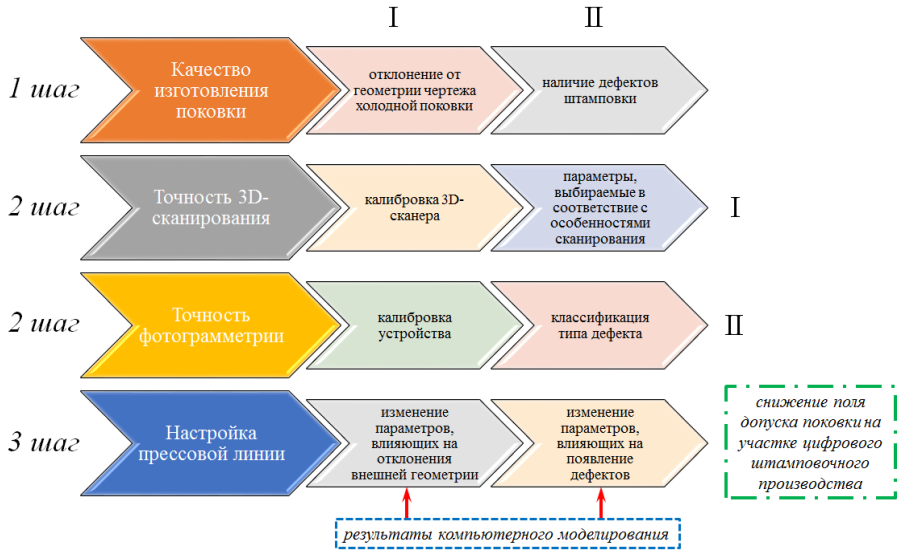
Упрощённая схема реализации процесса контроля цифровой прессовой линии показана на рисунке 81. Трёхшаговое выполнение действий, внутреннее наполнение которых может изменяться, связано по уровням. На первом шаге выбираются искомые параметры и подключаются экспертные базы данных. Второй шаг разделяется на параллельное выполнение двух операций: операция 3D-сканирования на основе структурированного подсвета и операция фотограмметрии. Вторая операция задействуется в том случае, если есть области с дефектами, размеры которых выходят за размер области сканирования.

Тогда при помощи камеры высокого разрешения (метод фотограмметрии) или линейного лазера (лазерное сканирование) создаётся облако точек, которое уплотняется и соединяется поверхностями

(процедура сшивки модели). Классический вариант триангуляции подразумевает получение серии снимков и их анализ, по результатам которого также создаётся облако точек.



а) уровни контроля при проведении оптического сканирования



б) схема управления оптимизацией процесса (римскими цифрами обозначены уровни)

Рис. 81 – Схема выполнения контроля на участке штамповки (а) и пошаговая схема настройки параметров процесса (б)

Для дискретно-событийного моделирования (DES) двухпоточной системы применялась программа Plant Simulation 15 (Tecnomatix, Siemens NX). Для выполнения численного моделирования течения деформируемого материала применялась программа QForm 9, работающая на методе конечных элементов (FEA). Оценка качества реализации процесса

штамповки осуществляется по сравнению итоговой геометрии поковки по результатам 3D-сканирования и численного моделирования (ЧМ). Для получения набора геометрии после численного моделирования вводится варьирование по наиболее важным параметрам, входящих в реологическую математическую модель (степень деформации, скорость деформации и температура). Если по результатам реальной штамповки полученная геометрия не совпадает ни с одной из геометрий, полученных по результатам ЧМ, то в онлайн режиме проводится ЧМ по обратной (инверсионной) схеме, то есть от реальной геометрии к набору технологических параметров.

6.1 Производственный участок (DES)

Рассматривая производственный процесс холодной объёмной штамповки заготовки болта с шестигранной головкой необходимо определить время протекания процесса и реальную производительность оборудования. При этом, моделирование пластического течения деформируемого материала не рассматривается, важен итог операции, а именно полученная реальная заготовка болта. Далее между начальной и конечной точками выстраивается производственная цепочка. Для каждой позиции выбирается время работы, требуемое для совершения операции. В базе данных программы имеются 3D-модели, которые использовались для построения производственного участка.

6.2 Реологическое течение материала (FEA)

При проведении моделирования была задействована система QForm 9, в которой существует несколько способов задания модели пластического течения или сопротивления пластической деформации материала. Такая модель может быть задана постоянным значением предела текучести,

описываться моделью, например, моделью Хензеля-Шпиттеля, уравнение которой представляет собой произведение эмпирических коэффициентов и степенных функций, табличной функцией или подпрограммой. В реологических моделях пластичных металлов, как правило, используется представление о том, что течение металла при наступлении пластической деформации зависит от трёх параметров, а именно: температуры, степени и скорости деформации. Однако, в силу сложности определения эмпирических коэффициентов, функцию будет проще задать в табличном виде, значения в которой определены стандартными методами испытания на растяжение, сжатие или кручение.

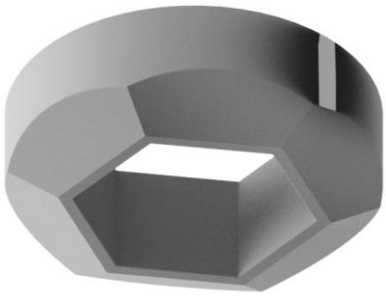
6.3 Применение сценариев для оценки работы алгоритма

Для отработки взаимодействия результатов моделирования и сканирования предлагается рассмотреть два сценария моделирования. Для первого сценария («Сценарий 1») необходимо заранее посчитать реализуемую на участке штамповки задачу, сформировать БД с набором геометрических и технологических параметров, и полученные геометрические результаты сравнить с теми, которые будут получены после 3D-сканирования. Для второго сценария («Сценарий 2») необходимо сравнить получаемую геометрию поковки и при отсутствии совпадения с результатами численного расчёта провести моделирование, которое даст желаемый геометрический вариант (решение обратной задачи).

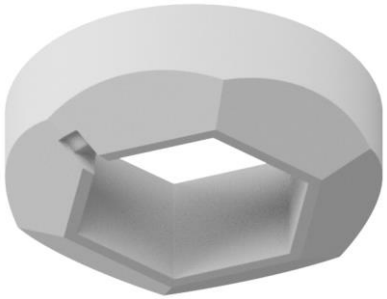
Для моделирования процесса была выбрана сталь 35, имеющаяся в БД стандартных материалов ПО QForm 9, с табличной формой представления кривых текучести (упрочнения), определённые для интервалов: температура от 20° до 300°С, скорость деформации от 0,01 до 500 $с^{-1}$ и степень деформации от 0,04 до 2. В качестве процесса была выбрана последняя операция штамповки заготовки болта с шестигранной головкой, операция обрезки, причём ножка заготовки была удалена из рассмотрения,

что позволило сократить время расчётов и ввести контролируемую величину. За такую величину была принята высота материала «h», образующаяся в результате затекания материала из головки заготовки болта внутрь матрицы. 3D-модели инструментов для «Сценария 1» показаны на рисунке 82а и 82в. Для реализации «Сценария 2» вводились два дефекта на верхнем инструменте (незначимый дефект, рис. 82б) и на входном отверстии внутрь матрицы (значимый дефект, рис. 82г).

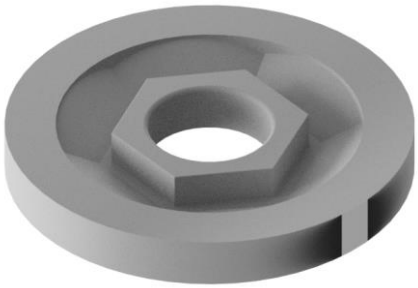
Далее предполагалось, что система сама перестроит инструмент по геометрии получившейся поковки, полученной после 3D-сканирования, и проведёт оценку необходимости замены инструмента или изменения параметров на прессовом оборудовании. При выполнении «Сценария 1» итогом является выбор совпадения по контролируемой величине высоты «h» (рассматривается в статье) и согласование параметров по протоколу двусторонней связи с оборудованием (не рассматривается в статье).



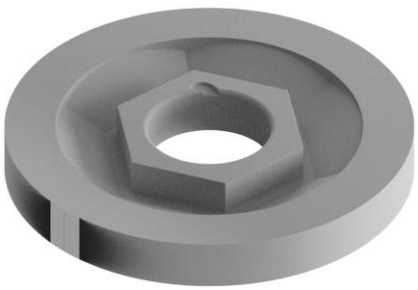
а) обрезной пуансон (без дефекта)



б) обрезной пуансон (с дефектом)



в) матрица (без дефекта)



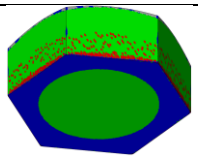
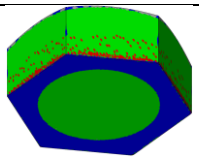
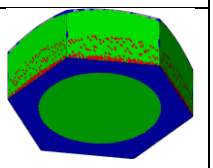
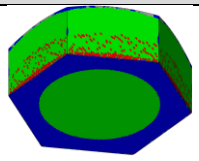
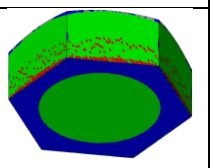
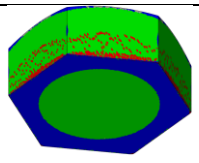
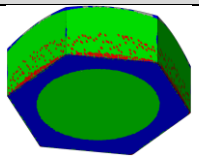
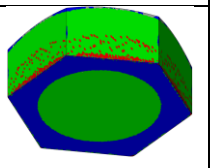
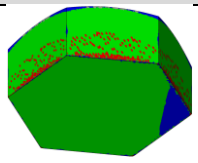
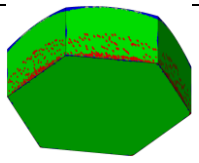
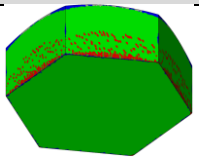
г) матрица (с дефектом)

Рис. 82 – Фотореалистичные изображения 3D-моделей

При выполнении «Сценария 2» итогом является сравнение результатов с теми, которые имеются в сформированной БД после численного моделирования. В таблицах 17 и 18 показаны результаты численного моделирования процесса обрезки головки для разных значений технологических параметров (температуры обработки, скорости перемещения ползуна и фактора трения). Цветовая шкала соответствует допустимому отклонению ±0,16 мм, взятому как среднее значение параметра «h».

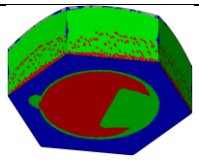
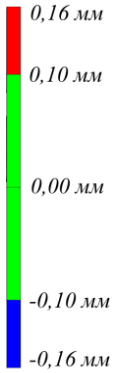
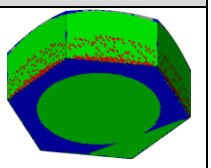
Предположим, что согласно «Сценарию 1» при помощи численного моделирования была получена поковка заготовки болта, геометрия которой соответствует штамповке на холодновысодочном автомате со скоростью перемещения пуансона 40 мм/с, при факторе трения 0,3 и исходной температуре заготовки до деформирования 140°С.

Таблица 17. Карта выборочного моделирования (Сценарий 1)

Фактор трения	Скорость перемещения ползуна, мм/с				
	T = 20°C			*T = 60°C*	*T = 140°C*
	9,44	20	40	40	40
0					
0,15					
0,30					
0,70					

Однако, после 3D-сканирования и реконструкции 3D-модели было установлено, что геометрия совпадает со случаем, соответствующим скорости перемещения пуансона 40 мм/с, но для фактора трения 0,7 и исходной температуры заготовки до деформирования 60°С. Значит, система управления может создать запрос на увеличение кол-ва распыляемого на поверхности инструмента смазочного вещества, что позволит дополнительно уменьшить потери температуры заготовкой, за счёт создания области с худшими, чем у металла теплопроводящими свойствами.

Таблица 18. Карта выборочного моделирования (Сценарий 2)

Фактор трения	Скорость перемещения ползуна, мм/с (для $T = 20°C$)			
	20	40		
0				цветовая шкала размеров для отклонения ±0,16 мм
0,30				

Кроме этого, система может предположить, что произошёл износ инструмента и требуется контроль его размеров. Согласно «Сценарию 2» после 3D-сканирования и реконструкции 3D-модели поковки была получена геометрия, соответствующая случаю скорости перемещения пуансона 20 мм/с, при факторе трения 0 и исходной температуре заготовки до деформирования 20°С. При сравнении геометрических данных из БД будет выявлено изменение характера поля отклонения, т.е. появление дополнительной области, связанной со сколом в нижнем инструменте. В этом случае система проведём обратное проектирование инструмента, промоделирует процесс и выдаст технологические параметры и геометрические данные по процессу. Кроме этого, система укажет на то, что

полученный дефект является нежелательным и потребует дополнительной механической операции обработки ножки болта.

Изменения контролируемого параметра «h» показаны на рисунке 83а. Правильность выполнения технологической операции можно также контролировать по времени её проведения (рисунок 83б). При инспектировании размеров геометрий после численного моделирования было также установлено, что глобальное отклонение позиционирования двух 3D-моделей увеличивается с уменьшением темпа штамповки и находится в прямой пропорциональной зависимости с параметром «h» (рисунок 83в).

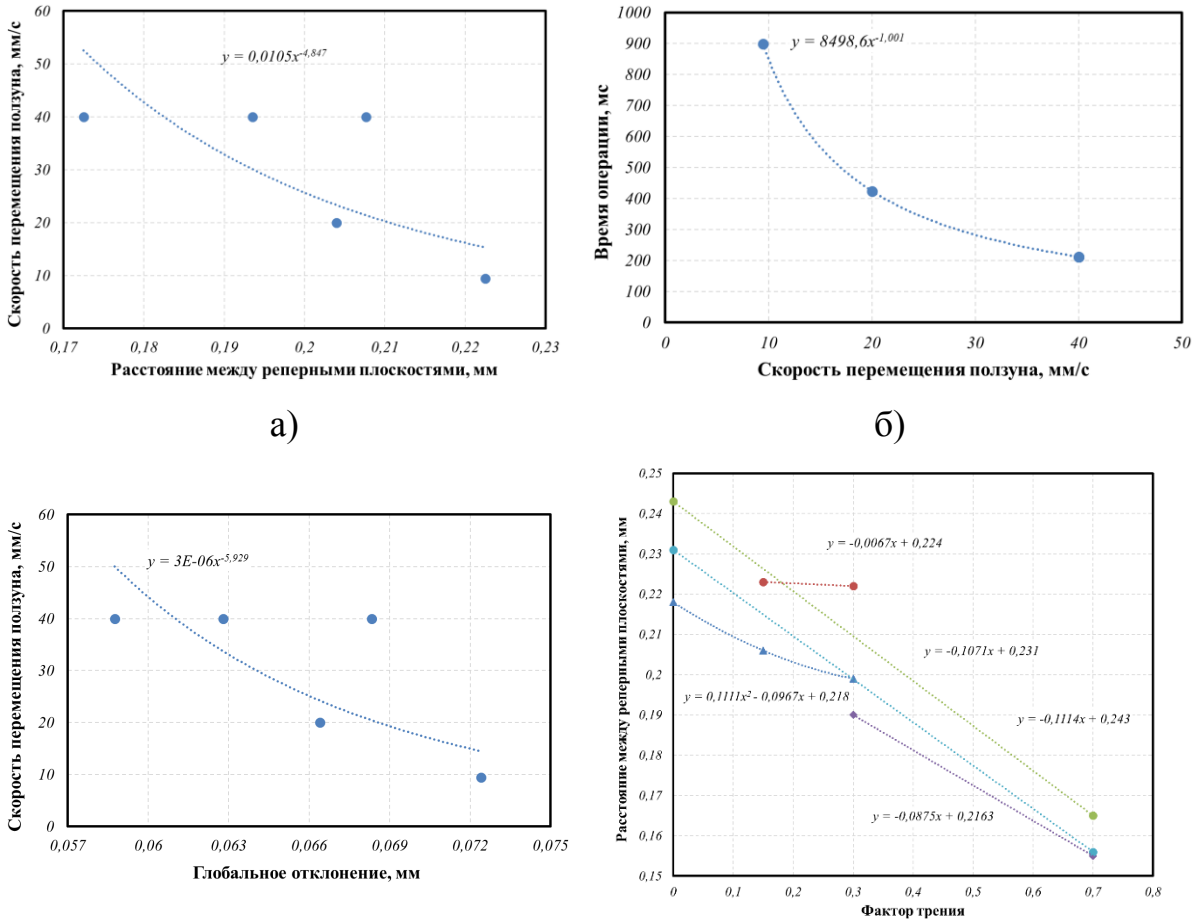


Рис. 83 – Графики изменения технологических параметров

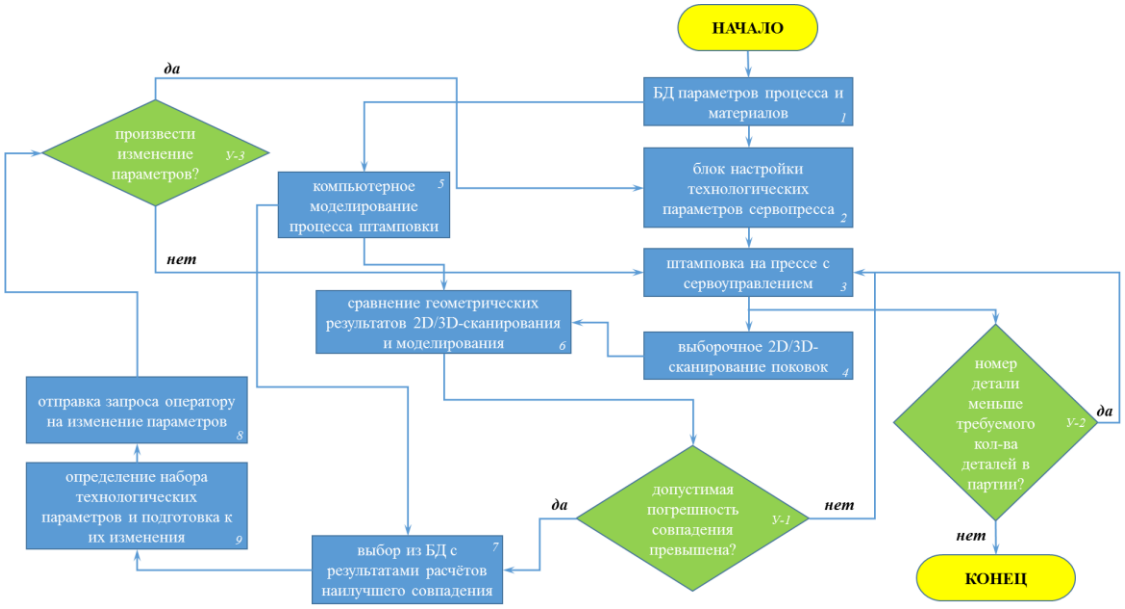
Изменение расстояния «h» измеренного между двумя аппроксимационными реперными поверхностями, созданными по методу Гаусса в программе GOM Inspect, от фактора трения, показано на рисунке 83г. Таким образом, можно сказать, что контрольное расстояние «h» уменьшается с ростом темпа штамповки и значения фактора трения. Все полученные данные были аппроксимированы полиномами второй степени, линейной или степенной функциями. Такая функциональная зависимость между рассмотренными параметрами позволит увеличить степень прогнозирования системы и уменьшить число необходимых задач моделирования, которые система будет проводить автоматически.

На рис. 84а представлен разработанный алгоритм управления оборудованием в виде блок-схемы (общий уровень), для которого более подробно показана работа подуровней 4 (рис. 84б) и 5 (рис. 84в). На рис. 85 показаны реализованные шаги с применением систем 3D-сканирования RangeVision, программы численного моделирования процесса штамповки QForm 9 и программы инспектирования геометрических размеров 3D-моделей GOM Inspect. При проведении численного моделирования возможна реализация метода планирования эксперимента (DoE) и проведение численного моделирования по полученному регрессионному уравнению.

По результатам выполнения технологической операции, реконструкции модели поковки заготовки болта, а также по результатам компьютерного моделирования, система в автоматическом режиме или после ручного подтверждения оператором принимает решение об изменении тех технологических параметров в прессовой линии (темп штамповки, энергия удара, скорость деформирования и т.д.), которые непосредственно влияют на устранение дефектов.

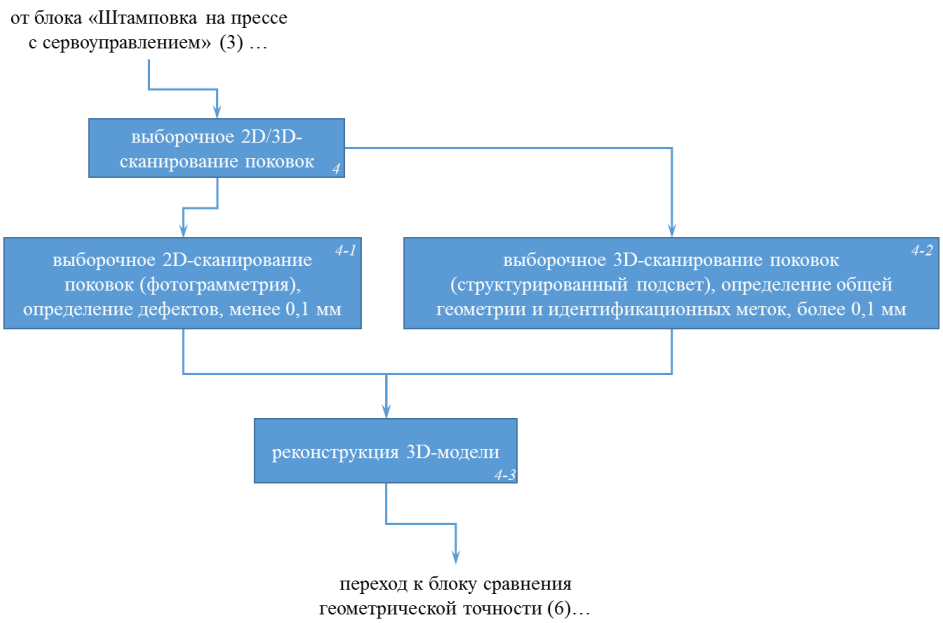
Качество изготавливаемой продукции может регламентироваться глубиной проведения оптического сканирования, т.е. учитывать требуемое качество поверхности, сортировку поковок по наличию дефектов,

прогнозирование свойств по конечной степени деформации и особенности течения металла. Осуществление производственных исследований по «Сценарию 1» и «Сценарию 2» затруднено отсутствием открытой площадки, на которой было бы размещено необходимое оборудование.

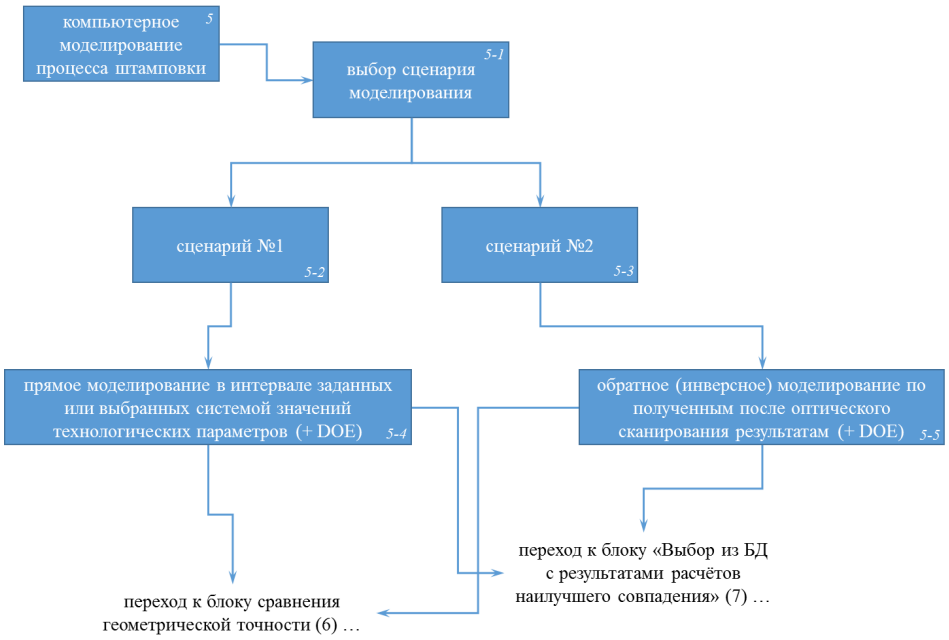


а)

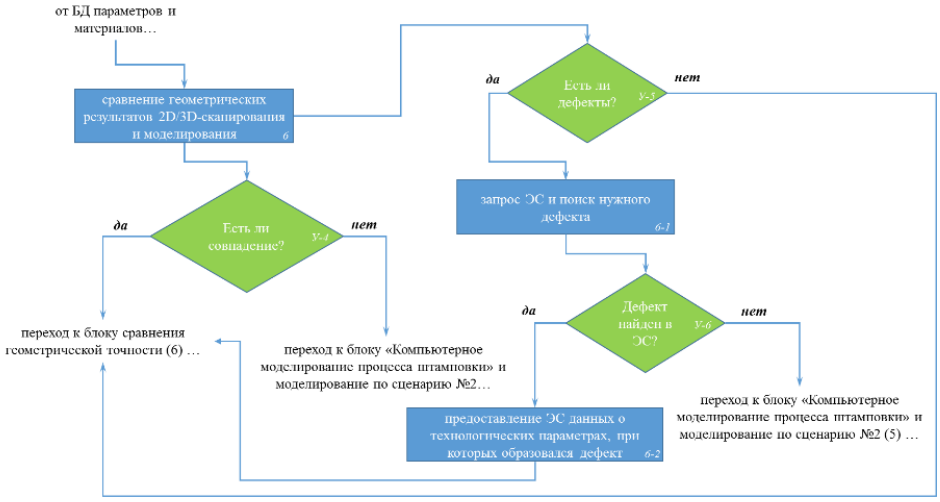
б)



в)



г)



д)

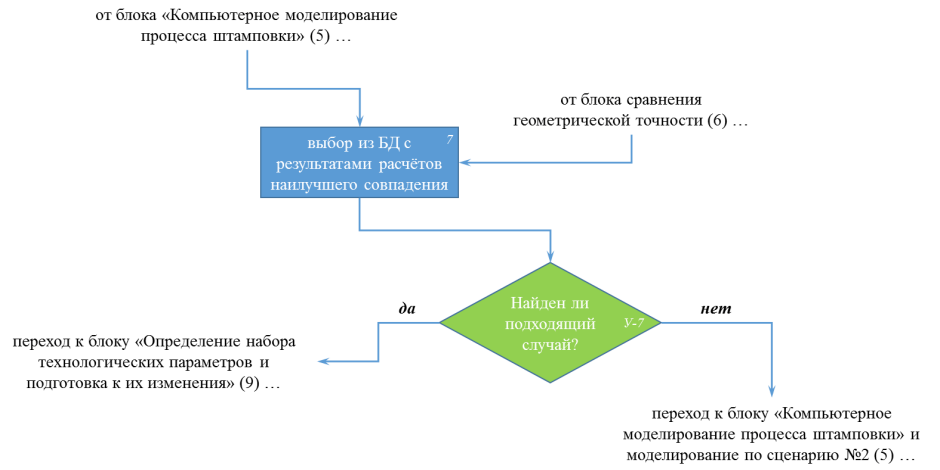


Рис. 84 – Основная блок-схема управления прессовым оборудованием на участке (а), подробное описание блока 4 (б) и блока 5 (в)

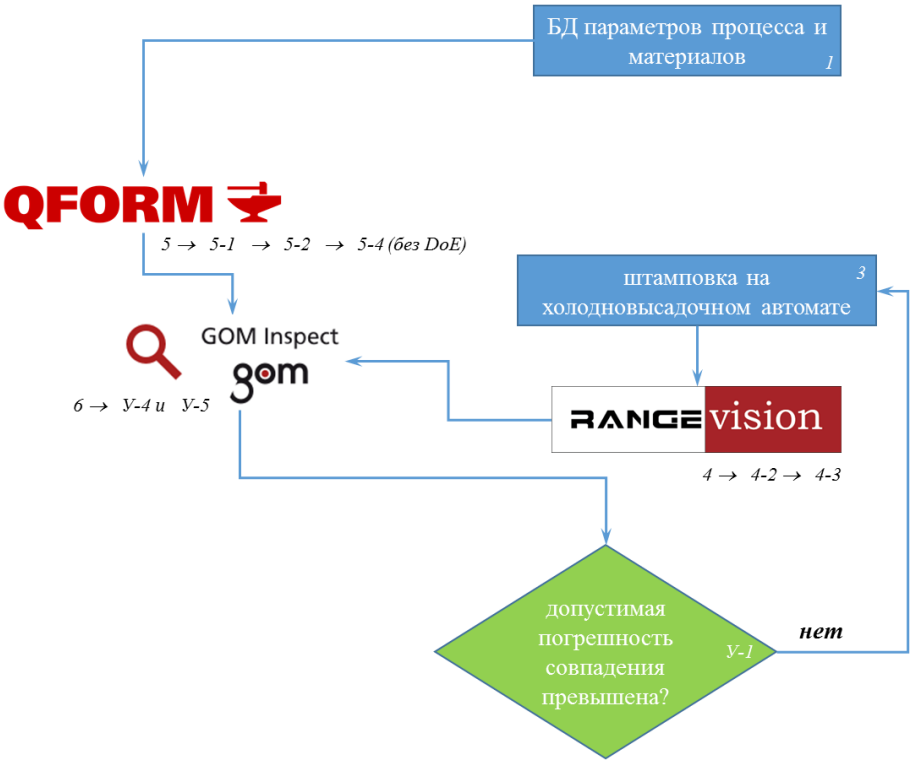


Рис. 85 – Схема реализации блоков 4, 5 и 6 алгоритма

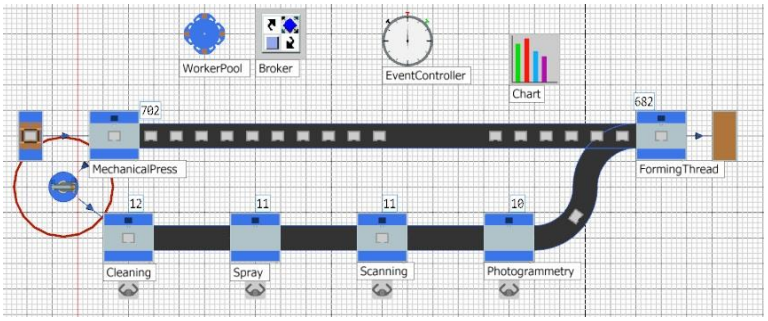
Поэтому апробация работы велась экспериментально с целью сбора информации о «живучести» технологии 3D-сканирования в производственных условиях штамповочного производства, а также при помощи моделирования (рис. 6), позволяющего виртуально проектировать и проводить анализ будущего производственного участка.

6.4 Разработка виртуального участка ХОШ на примере действующей производственной площадки метизного производства

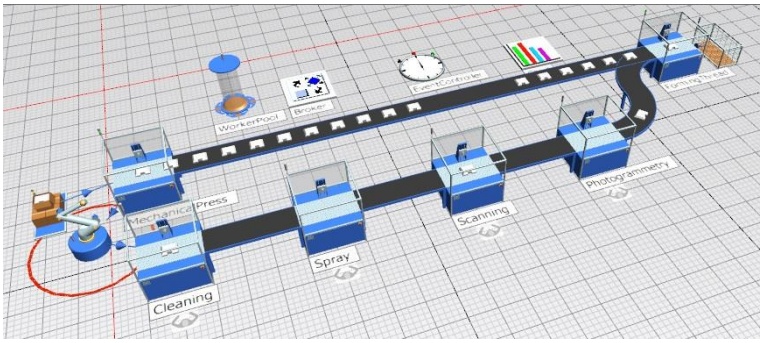
В ходе проведения экспериментов на производственной площадке ООО «Параллель» была определена последовательность проведение 3D-сканирования. Операции ХОШ выполнялись на холодновысадочном автомате Malmedie QPB 101 Заготовки получались на первой операции отрезкой от прутка из бунта проволоки $\varnothing 11{,}8_{-0{,}08}$. На второй операции осуществлялась первая осадка, на третьей – вторая осадка и формирование фаски (плющение), на четвёртой – редуцирование ножки, на пятой –

формирование шестигранной головки отрезной матрицей. Общая производительной машины составляла 60 шт./мин.

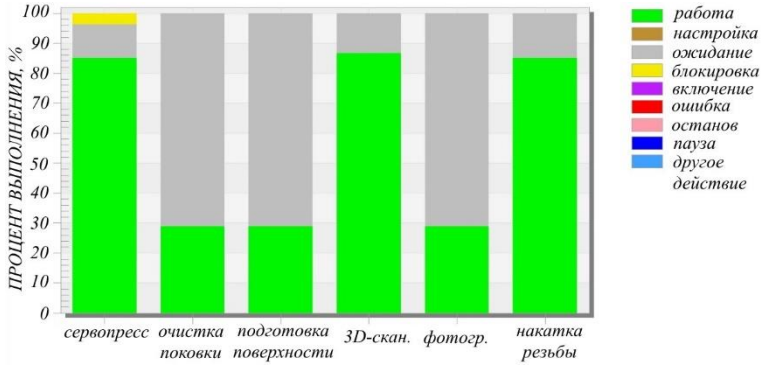
После пятой операции из контейнера извлекали заготовку болта, очищали её от остатков смазки, наносили матирующий спрей для создания поверхности с равномерно отражающими свойствами, проводили 3D-сканирования. Общая продолжительность работ по сканированию включая подготовку составила 2,5 – 3 минуты. Полученный объём необработанных данных одного сканирования составил порядка 500 МБ. В дальнейшем заготовки подвергались заключительной операции – накатке резьбы.



а) 2D-вид участка



б) 3D-вид участка



в) столбчатая диаграмма загрузки оборудования на участке

Рис. 86 – Организация производственной цепочки для реализации алгоритма

Для повышения качества продукции после операции 3D-сканирования может быть включена операция фотограмметрии, которая позволяет распознать дефекты, размеры которых составляют не более 1 мм (внешние трещины, прострелы). Последовательность проделанной работы была промоделирована в программе Plant Simulation (Tecnomatix, Siemens) [129] и показана на рисунке 86. В цепочку оборудования была включена операция фотограмметрической проверки и накатки резьбы (скорость накатки на автомате составляет 60 шт./мин.). Разработанный алгоритм рассматривает выполнение прямого и обратного сценариев оценки геометрии поковок и технологических параметров процесса ХОШ пятой операции заготовки болта с шестигранной головкой при помощи численного 3D-моделирования и 3D-оптического сканирования. Получены зависимости, позволяющие выявить изменения геометрии поковки, которая может быть определена с точностью до ±0,01 мм, от технологических параметров. На ряду с кажущимися преимуществами алгоритма существует необходимость инфраструктурного изменения на предприятиях и вводом дополнительных компьютерных мощностей, т.е. создание собственных компьютерных центров с возможностью шифрования данных и проведения параллельных вычислений, скорость которых должна быть достаточной для проведения численного моделирования в пределах времени одной или нескольких рассматриваемых технологических операций. Так, например, полученное по результатам данных исследований соотношение реального времени процесса, затрачиваемого на выполнение операции обрезки, ко времени, требуемому для выполнения численного моделирования, образует интервал $8{,}9*10^{-6}$ – $1{,}5*10^{-5}$. Для реализации предлагаемого алгоритма это значение должны быть равным или большим 1.

Заключение

В представленной диссертационной работе были решены поставленные задачи, а именно:

1. Проведена оценка геометрической точности 3D-модели, полученной методом 3D-сканирования, построена методика её проведения для изделий из модельного полимерного и металлических материалов. Также была обоснована причина применения нескольких технологий оптического контроля.

2. Установлено влияние степени заполнения (СЗ) образцов из модельного полимерного материала на характер их разрушения, что может быть применено для прогнозирования внутренних дефектов, влияющих на итоговую степень деформации. Проведена оценка характеристики модельного материала на основе вычисления удельной энергопоглощаемости материала образца с распространением результатов на металлические материалы при помощи логарифмической зависимости.

3. Проведены производственные исследования по 3D-сканированию заготовок и обрезного пуансона на участке ХОШ заготовки болта на предприятии ООО «Параллель» (группа компаний «Северсталь»). Получены уточнённые 3D-модели, которые в последствие были использованы при КЭ-моделировании процесса ХОШ.

4. Разработан алгоритм настройки пресса на основании результатов оптического 3D-сканирования и численного моделирования. Показана загрузка виртуального участка штамповки и выявлена высокая степень загрузки оборудования (85%) при темпе штамповки 60 шт./мин.

5. Проведено численное моделирование процесса высадки заготовки болта, а также ЭОС и ЭОР с использованием истинной геометрии заготовки. Показано, что описание исходной геометрии влияет на итоговые результаты и отличаются от результатов, в которых используется идеальная геометрия, соответствующая чертежу.

Проведённые исследования показали принципиальную возможность применение инструментов цифрового производства таких, как оптическое 3D-сканирование и численное моделирование, и достигаемое качество взаимосвязи реальных и виртуальных параметров. Разработанные методики взаимосвязи блоков в алгоритме могут быть использованы для создания цифрового участка холодной объёмной штамповки на основе сервопресса.

Библиографический список

1. Ковка и объемная штамповка стали, под ред. М.В. Сторожева, справочник: в 2 томах, том 2, М.: Машиностроение, 1968. с. 448.
2. А.Н. Брюханов, Ковка и объемная штамповка: учебное пособие для машиностроительных вузов, М.: Машиностроение, 1975, с. 408.
3. Ковка и штамповка, под общ. редакцией Е.И. Семёнова, справочник: в 4 томах, том 2, М.: Машиностроение, 1986. с. 586.
4. И.А. Норицын, В.И. Власов, Автоматизация и механизация технологических процессов ковки и штамповки, М.: Машиностроение, 1967. с. 388.
5. ГОСТ 16504–81, Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения, 2011.
6. Ю.В. Димов, Метрология, стандартизация и сертификация, 2-е издание, С.-Петербург: Питер, 2006. с. 432.
7. М.А. Петров М.А., Т.С. Басюк, А.Н. Петров, Ю.Г. Калпин, П.А. Петров, Определение зависимости качества поковки от температуры вспышки смазочного вещества и температуры пуансона на примере штамповки поршня ДВС из алюминиевого сплава, Заготовительные производства в машиностроении, №6, 2015. стр. 26–33.
8. А.А. Прасолова, М.А. Куликов, И.С.А. Эльдиб, В.И. Воронков, Анализ возникновения дефекта на поверхности холодноштампованной детали «Корпус» при помощи компьютерного моделирования, Известия Тульского Государственного Университета. Серия: Технические науки, 2019, №5. стр. 269–276.
9. X.Z. Lu, L.C. Chan, Micro-voids quantification for damage prediction in warm forging of biocompatible alloys using 3D X-ray CT and RVE approach Journal of Materials Processing Technology, Vol. 258, 2018. pp. 116–127.

10. X.Z. Lu, L.C. Chan, X-ray CT assisted damage identification in warm forging, Procedia Manufacturing, Vol. 15, 2018. pp. 535–541.

11. M. Wojtaszek, T. Śleboda, Design and verification of thermomechanical parameters of P/M Ti6Al4V alloy forging, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 615, Suppl. 1, 2014. pp. S546–S550.

12. ГОСТ 18442-80, Контроль неразрушающий. Капиллярные методы.

13. Machine Vision Handbook, eds. B.G. Batchelor, Springer, 2012. p. 2271.

14. Siemens. The digital twin // Advance. – 2015. – №2, p. 4–9 (https://www.siemens.com/content/dam/ inten-et/siemens-com/customer-magazine/old-mam-assets/print-archiv/advance/adv152-en-screen.pdf) (дата обращения 06.04.2020).

15. S. Ezell, How cloud computing enables modern manufacturing. / S. Ezell, B. Swanson // ITIF Report. – 2017. – p. 1–33 (http://www2.itif.org/2017-cloud-computing-enables-manufacturing.pdf) (дата обращения 06.04.2020).

16. Autodesk. Civil Infrastructure. Strategic industry foresight. The digitalization of infrastructure. / Autodesk Inc. // White-paper. – 2017. p. 1–30. (https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/draftr/1399/aec-civil-infrastructure-whitepaper-strategic-foresight-en.pdf) (дата обращения 06.04.2020).

17. General Electric. GE Digital Twin. Analytic engine for the digital power plant. / General Electric // Whitepaper. – 2016. p. 1–30. (https://www.ge.com/digital/sites/ default/files/Digital-Twin-for-the-digital-power-plant-.pdf) (дата обращения 06.04.2020).

18. Deloitte. Industry 4.0 and the digital twin. / Deloitte Consulting LLP, University Press // Whitepaper. – 2017. – p. 1–20. (https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/ arti-cles/3833_Industry4-0_digital-twin-technology/DUP_ Indus-try-4.0_digital-twin-technology.pdf) (дата обращения 06.04.2020).

19. M.J. Walker, Hype cycle for emerging technologies. / M.J. Walker // Gartner Inc., Whitepaper. – 2017. – p. 1–63. (http://www2.caict.ac.cn/zscp/qqzkgz/qqzkgz_zdzsq/201708/P020170831493337899927.pdf) (дата обращения 06.04.2020).

20. T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, J. Boehm, Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging, Walter de Gruyter, 3rd edition, 2019, p. 843.

21. B. Denkena, P. Huke, Development of a high resolution pattern projection system using linescan cameras, Proceedings of SPIE – The international society for optical engineering, Vol. 7389, 2009, 73890F.

22. W. Liu, Z. Jia, F. Wang, X. Ma, W. Wang, X. Jia, D. Song, An improved online dimensional measurement method of large hot cylindrical forging, Measurement, Vol. 45, 2012. pp. 2041–2051.

23. X. Fua, Y. Zhangb, K. Taob, S. Li, The outer diameter detection and experiment of the circularforging using laser scanner Optik, Vol. 128, 2017. pp. 281–291.

24. D. Zhengchun, W. Zhaoyong, Y. Jianguo, 3D measuring and segmentation method for hot heavy forging Measurement, Vol. 85, 2016. pp. 43–53.

25. D. Zhang, Y. Li, J. Liu, G. Xie, E. Su, A novel 3D optical method for measuring and evaluating springback in sheet metal forming process, Measurement, Vol. 92, 2016. pp. 303–317.

26. T. Koutecky, D. Paloušek, J. Brandejs, Sensor planning system for fringe projection scanning of sheet metal parts, Measurement, Vol. 94, 2016. pp. 60–70.

27. M. Ellenrieder, C. Wohler, P. d'Angelo, Reflectivity function based illumination and sensor planning for industrial inspection, Proceedings of SPIE, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV, Vol. 5856, 2005.

28. C. Wohler, 3D Computer Vision: Efficient Methods and Applications, 2nd ed., Springer, 2013. p. 390.

29. M. Hawryluk, J. Ziemba, Application of the 3D reverse scanning method in the analysis of tool wear and forging defects, Measurement, Vol. 128, 2018, pp. 204–213.

30. Z. Gronostajski, M. Hawryluk, M. Kaszuba, J. Ziemba, Application of a measuring arm with an integrated laser scanner in the analysis of the shape changes of forging instrumentation during production, Maintenance and Reliability, Vol. 18(2), 2016, pp. 194–200.

31. M. Hawryluk, J. Ziemba, P. Sadowski, A Review of Current and New Measurement Techniques Used in Hot Die Forging Processes, Measurement and Control, 2017, Vol. 50(3), pp. 74–86.

32. Z. Gronostajski, M. Hawryluk, M. Kaszuba, P. Widomski, J. Ziemba, Application of the reverse 3D scanning method to evaluate the wear of forging tools divided on two selected areas, International journal of automotive technology, Vol. 18(4), 2017. pp. 653–662.

33. E. Hu, Y. Zhu, 3D online measurement of spare parts with variable speed by using line-scan non-contact method, Optik, Vol. 124, 2013, pp. 1472–1476.

34. T. Reyno, C. Marsden, D. Wowka, Surface damage evaluation of honeycomb sandwich aircraft panels using 3D scanning technology NDT and E International, Vol. 97, 2018. pp. 11–19.

35. D. Mejia-Parra, J.R. Sánchez, O. Ruiz-Salguero, M. Alonso, A. Izaguirre, E. Gil, J. Palomar, J. Posada, In-Line dimensional inspection of warm-die forged revolution workpieces using 3D mesh reconstruction, Applied Sciences, Vol. 9, 2019. 1069.

36. Y. Bokhabrine, R. Seulin, L.F.C. L. Yan Voon, P. Gorria, G. Girardin, M. Gomez, D. Jobard, 3D characterization of hot metallic shells during industrial forging, Machine Vision and Applications, Vol. 23, 2012, pp. 417–425.

37. Z. Tian, F. Gao, Z. Jin, X. Zhao, Dimension measurement of hot large forgings with a novel time time-of-flight system, International journal of advanced manufacturing technology, Vol. 44(1–2), 2009, pp. 125–132.

38. W. Kesheng, Q. Yu, Accurate 3D object measurement and inspection using structured light systems, Proceedings of the 12th International Conference on Computer Systems and Technologies (CompSysTech '11), eds. B. Rachev, A. Smrikarov, New York, 2011. pp. 221–227.

39. C. Labergère, S. Remy, P. Lafon, A. Delespierre, L. Daniel, G. Kang, Benchmark of a forging process with a hammer: Comparison between fem simulation results and real part shapes using 3D digitising scanner, Vol. 12(3), 2011. pp. 215–222.

40. D. Zhang, Y. Li, J. Liu, G. Xie, E. Su, A novel 3D optical method for measuring and evaluating springback in sheet metal forming process, Measurement, Vol. 92, 2016. pp. 303–317.

41. M.M. Htay, G. Shunsheng, A.R. Asa, Quality management information in automotive stamping process, American Journal of Industrial Engineering, Vol. 1 (1), 2013. pp. 1–4.

42. E. De la Fuente-López, F.M. Trespaderne, Inspection of Stamped Sheet Metal Car Parts Using a Multiresolution Image Fusion Technique. In: Fritz M., Schiele B., Piater J.H. (eds) Computer Vision Systems. ICVS 2009. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 5815, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.

43. A. Zoescha, T. Wiener, M. Kuhl, Zero Defect Manufacturing: Detection of Cracks and Thinning of Material during Deep Drawing Processes, Procedia CIRP, Vol. 33, 2015. pp. 179–184.

44. Y. Zhang, J. Han, X. Fu, H. Lin, An online measurement method based on line laser scanning for large forgings, International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, Vol. 70, 2014, pp. 439–448.

45. A. Zatocˇilová, D. Paloušek, J. Brandejs, Image-based measurement of the dimensions and of the axis straightness of hot forgings, Measurement, Vol. 94, 2016. pp. 254–264.

46. S.B. Dworkin, T.J. Nye, Image processing for machine vision measurement of hot formed parts, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 174, 2006. pp. 1–6.

47. Z. Jia, B. Wang, W. Liu, Y. Sun, An improved image acquiring method for machine vision measurement of hot formed parts, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, 2010. pp. 267–271.

48. M. Babu, P. Franciosa, D. Ceglarek, Adaptive Measurement and Modelling Methodology for In-line 3D Surface Metrology Scanners, Procedia CIRP, Vol. 60, 2017. pp. 26–31.

49. W. Boesemann, R. Godding, H. Huette, Photogrammetric measurement techniques for quality control in sheet metal forming, Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol. 33, 2000. p. B5.

50. S.J. Maier, , Inline-Qualitätsprüfung im Presswerk durch intelligente Nachfolgewerkzeuge, 2018, Technische Universität München.

51. М.Н. Лысыч, М.Л. Шабанов, В.В. Романов, Оборудование для 3D сканирования, Современные наукоемкие технологии, №12(2), 2014. стр. 170–174.

52. J.-A. Beraldin, F. Blais, L. Cournoyer, G. Godin, M. Rioux, Active 3D Sensing. Modelli e metodi per lo studio e la conservazione dell'architettura storica, University: Scola Normale Superiore, Pisa. 10, 2000.

53. http://old.digitaleng.news/de/3d-scanning-101/ (дата обращения: 04.04.2020).

54. B. Gapinskia, M. Wieczorowskia, L. Marciniak-Podsadnaa, B. Dybalab, G. Ziolkowskib, Comparison of Different Method of Measurement Geometry using CMM, Optical Scanner and Computed Tomography 3D, Procedia Engineering, Vol. 69, 2014. pp. 255–262.

55. M. Daneshmand, A. Helmi, E. Avots, F. Noroozi, F. Alisinanoglu, H.S. Arslan, J. Gorbova, R.E. Haamer, C. Ozcinar, G. Anbarjafari, 3D Scanning: A Comprehensive Survey, pp. 1–18, https://arxiv.org/pdf/1801.08863.pdf (дата обращения 06.04.2020).

56. H. Gross, F. Blechinger, B. Achtner, Handbook of optical systems. Survey of optical instruments, Vol. 4, Darmstadt: Betz-Druck GmbH, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2008. p. 1064.

57. G.F. Marshall, G.E. Stutz, Handbook of optical and laser scanning, 2nd edition, Boca Raton: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2012. p. 749.

58. D. Belton, D.D. Lichti, Classification and segmentation of terrestrial laser scanner point clouds using local variance information, ISPRS Commission V Symposium “Image Engineering and Vision Metrology”, Vol. XXXVI, Vol. 5. pp. 44–49 (http://www.isprs.org/proceedings/xxxvi /part5/paper /BELT_619.pdf) (дата обращения 06.04.2020).

59. В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова, Наземное лазерное сканирование, Новосибирск: СГГА, 2009. с. 261.

60. G. Sansoni, M. Trebeschi, F. Docchio, State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation, Sensors, Vol. 9(1), 2009. pp. 568–601.

61. П. Косушкин, Лазерное 3D-сканирование и портативные КИМ для контроля геометрических параметров и обратного проектирования, Вектор высоких технологий, №2, 2016, стр. 56–63.

62. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002, Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения.

63. https://www.gom.com/metrology-systems/atos.html (дата обращения 06.04.2020).

64. https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/optical-systems/3d-scanning.html (дата обращения 06.04.2020).

65. https://rangevision.com/ (дата обращения 06.04.2020).

66. В.О. Тишкин, Качество электронных копий физических объектов, Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, №52, 2008. стр. 69–72.

67. В.О. Тишкин, Методика сборки и обработки данных, полученных в процессе 3D-сканирования, Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. №1(71), 2011. стр. 87–92.

68. И.В. Цапко, С.Г. Цапко, Алгоритмы и методы обработки информации в задачах трехмерного сканирования объектов, Известия Томского политехнического университета, №5, 2010. стр. 134–140.

69. Reverse engineering – resent advances and applications, eds. by A. C. Telea, Rijeca: InTech, 2012. p. 276.

70. А. Назаров, Фотограмметрия: учеб. пособие для студентов вузов, Минск: ТетраСистемс, 2006, с. 368.

71. А.Н. Лобанов, Фотограмметрия, 2-ое изд. перераб. и доп., Москва: Недра, 1984. с. 552.

72. М.А. Петров, И.С.А. Эльдиб, Исследование процесса 3D-сканирования изделий и создание виртуальных копий изделий для оценки качества внутри производственных линий, труды III международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), 2018. стр. 202–207.

73. М.А. Петров, И.С.А. Эльдиб, Разработка алгоритма инлайн проверки качества поковок для оптимизации работы штамповочных линий, Известия ТулГУ. Серия: Технические науки, №9, 2019. стр. 471–479.

74. М.А. Петров, И.С.А. Эльдиб, Э.М. Азатьян, Оптическое 3D-сканирование и оценка точности изготовления деталей и прототипов, Известия ТулГУ. Серия: Технические науки, №12, 2019. стр. 151–158.

75. https://www.stemmer-imaging.com/en/videos/sheet-metal-processing-with-machine-vision/ (дата обращения 06.04.2020).

76. М.А. Петров, Н.В. Косачев, Ф.Б. Прокопов, Исследования по определению силовых характеристик процесса одноосного сжатия цилиндрических образцов, изготовленных из АБС-пластика по методу

трехмерной печати, Известия Тульского государственного университета. Технические науки, №10(2), 2014. стр. 84–90.

77. M.A. Petrov, N.V. Kosatchyov, P.A. Petrov, Research into material behaviour of the polymeric samples obtained after 3D-printing and subjected to compression test, AIP Conference Proceedings, Vol. 1769, 2016. 190008.

78. https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_4/illustr/s4_1_1c.html (дата обращения 06.04.2020).

79. A. A. Rubinstein, Macrocrack-microdefect interaction, Journal of Applied Mechanics, Vol. 53(3), 1986. pp. 505–510.

80. M. F. Kanninen, C. A. Popelar, H. Saunders, Advanced Fracture Mechanics, Oxford University Press, 1985. p. 563.

81. M. F. Ashby, S. D. Hallam, The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states, Acta Metallurgica et Materialia, Vol. 34(3), 1986. pp. 497–510.

82. D. Gross, T. Seelig, Dynamic fracture mechanics, Fracture Mechanics, Mechanical Engineering Series, Springer, Berlin, Germany, 2011. pp. 207– 228.

83. J. Milios, G. Spathis, Dynamic interaction of a propagating crack with a hole boundary, Acta Mechanica, Vol. 72(3-4), 1988. pp. 283–295.

84. I.V. Simonov, B.L. Karihaloo, Dislocation model of an asymmetric weak zone for problems of interaction between crack-like defects, Philosophical Magazine, Vol. 85(17), 2005. pp. 1847–1864.

85. Н.В. Косачев, П.А. Петров, Ф.Б. Прокопов, В.И. Воронков, Разработка оснастки для нахождения предела текучести материалов термографическим методом, Известия МГТУ «МАМИ», №2 (16), 2013. стр. 194–198.

86. https://www.gom.com/metrology-systems/aramis.html (дата обращения 06.04.2020).

87. И.С.А. Эльдиб, М.А. Петров, Применение системы 3D-сканирования RangeVision для подготовки качественных stl-моделей, труды XXXI Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС-2019), 4 – 6 декабря 2019, М.: ИМАШ РАН, 2020. стр. 711–714.

88. М.А. Петров, И.С.А. Эльдиб, Разработка алгоритма инлайн проверки качества поковок для оптимизации работы штамповочных линий, Известия ТулГУ. Серия: Технические науки, №9, 2019. стр. 471–479.

89. M.A. Petrov, I.S.A. El-Deeb, Experimental and Numerical Investigations of Mechanical Properties of 3D-Printed Polymeric Samples with Ideal and Roughed Surfaces, AIP Conference Proceedings, Vol. 2113, 2019. 150021.

90. R. Green, A plasticity theory for porous solids. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 14(4), 1972. pp. 215–224.

91. Б.Г. Лившиц, В.С. Крапошин, Я.Л. Линетский, Физические свойства металлов и сплавов, М.: Металлургия, 1980. с. 320.

92. F. Fritzen, S. Forest, D. Kondo, T. Boehlke, Computational homogenization of porous materials of Green type. Computational Mechanics, Vol. 52(1), 2013. pp. 121–134.

93. G. Cricrì, M. Perrella, Modelling the mechanical behaviour of metal powder during Die compaction process. Frattura ed Integriti Strutturale, Vol. 10(37), 2016. pp. 333–341.

94. Н.А. Шестаков, В.Н. Субич, В.А. Дёмин, Уплотнение, консолидация и разрушение пористых материалов, М.: Физматлит, 2011. с. 264.

95. Low cost 3D printing for science, education and sustainable development, eds. E. Canessa, C. Fonda, M. Zennaro, ICTP, 2013. p. 199.

96. C.K. Chua, K.F. Leong, C.S. Lim, Rapid prototyping: principles and applications, World Scientific, Vol. 1, 2003.

97. B. Berman, 3-D printing: The new industrial revolution. Business horizons, Vol. 55(2), 2012. pp. 155–162.

98. Т.Т. Кулагина, Термодинамика полилактида, Высокомолекулярные соединения, №24, 1982. стр. 1496–1501.

99. V.K. Stokes, Thermoplastics as engineering materials: the mechanics, materials, design, processing link, Journal of engineering materials and technology, Vol. 117(4), 1995. pp. 448–455.

100. В.Е. Бахарева, Г.И. Николаев, А.В. Анисимов, И.В. Блышко и другие, Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы. Под общей редакцией И.В. Горынина и А.С. Орыщенко, - Санкт-Петербург: Профессионал, 2014. с. 916.

101. S. Weber, H. Schäffler, S.G. Bruy, Baustoffkunde, 10. Auflage Vogel Fachbuch, Kamprath-Reihe, 2012. S. 278.

102. В.А. Каргин, Энциклопедия полимеров: в 3-х томах, Москва: Советская энциклопедия, 1972. с. 1152.

103. В.Н. Кулезнев, В.А. Шершнев, Химия и физика полимеров, М.: Высшая школа, 1988. с. 312.

104. Г.М. Бартенев, С.Я. Френкель, Физика полимеров, Издательство «Химия», 1990. с. 432.

105. С.И. Мишкин, Н.Н. Тихонов, Полимерные композиты на основе акрилонитрилбутадиенстирола и полимолочной кислоты, Успехи в химии и химической технологии, №25(3), 2011. стр. 19–24.

106. A. Bellini, S. Güçeri, Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling, Rapid Prototyping Journal, Vol. 9(4), 2003. pp. 252–264.

107. B. Tymrak, M. Kreiger, J.M. Pearce, Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions, Materials & Design, Vol. 58, 2014. pp. 242–246.

108. B. Wittbrodt, J.M. Pearce, The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. Additive Manufacturing, Vol. 8, 2015. pp. 110–116.

109. A.R.T. Perez, D.A. Roberson, R.B. Wicker, Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials, Journal of Failure Analysis and Prevention, Vol. 14(3), 2014. pp. 343–353.

110. O. Es-Said, J. Foyos, R. Noorani, M. Mendelson, R. Marloth, B.A. Pregger, Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples, Materials and Manufacturing Processes, Vol. 15(1), 2000. p. 107–122.

111. S.H. Ahn, C. Baek, S. Lee, S. Ahn, Anisotropic tensile failure model of rapid prototyping parts-fused deposition modeling (FDM), International Journal of Modern Physics B, Vol. 17(08n09), 2003. pp. 1510–1516.

112. S.H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Raundy, P.K. Wright, Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, Rapid Prototyping Journal, Vol. 8(4), 2002. pp. 248–257.

113. S. Lee, M. Munro, Evaluation of in-plane shear test methods for advanced composite materials by the decision analysis technique, Composites, Vol. 17(1), 1986. pp. 13–22.

114. A.K. Sood, R.K. Ohdar, S.S. Mahapatra, Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts, Materials & Design, Vol. 31(1), 2010. pp. 287–295.

115. C.S. Lee, S.G. Kim, H.J. Kim, S.H. Ahn, Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts, Journal of Materials Processing Technology, 187, 2007. pp. 627–630.

116. ASTM (2010) D638-10 Standard test method for tensile properties of plastics. American Society for Testing and Materials, USA.

117. L. Engel, H. Klingele, G.W. Ehrenstein, H. Schaper, An Atlas of polymer damage: surface examination by scanning electron microscope, Munich/London : Wolfe Science in association with Hanser, 1981.

118. M. Montero, S. Roundy, D. Odell, S.H. Ahn, P.K. Wright, Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments, Society of Manufacturing Engineers, 2001. http://groups.csail.mit.edu/drl/wiki/images/e/e7/Montero_Roundy_Odell_Ahn_Wright_2001_Material_Characterization_of_Fused_Deposition_Modeling_FDM_ABS_by_Designed_Experiments.pdf (дата обращения 06.04.2020).

119. J.F. Rodríguez, J.P. Thomas, J.E. Renaud, Design of fused-deposition ABS components for stiffness and strength, Journal of Mechanical Design, Vol. 125(3), 2003. pp. 545–551.

120. S. Shaffer, K. Yang, J. Vargas, M.A.D. Prima, W. Voit, On reducing anisotropy in 3D printed polymers via ionizing radiation, Polymer, Vol. 55(23), 2014. pp. 5969–5979.

121. A.R.T. Perez, Defeating anisotropy in material extrusion 3D printing via materials development, PhD thesis, The University of Texas at El Paso, 2015. p. 137.

122. C. Ziemian, M. Sharma, S. Ziemian, Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling, Mechanical engineering, InTech, 2012. https://www.intechopen.com/books/mechanical-engineering/anisotropic-mechanical-properties-of-abs-parts-fabricated-by-fused-deposition-modeling- (дата обращения 06.04.2020).

123. A.R. Torrado, C.M. Chemely, J.D. English, Y. Lin, R.B. Wicker, D.A. Roberson, Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing, Additive Manufacturing, Vol. 6, 2015. pp. 16–29.

124. J. Giannatsis, K. Sofos, V. Canellidis, D. Karalekas, V. Dedoussis, Investigating the influence of build parameters on the mechanical properties of FDM parts, Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping, Publisher: CRC Press, Taylor & Francis, London, Editors: P.J. Bártolo, 2012. pp. 525–529.

125. J. Lee, A. Huang, Fatigue analysis of FDM materials, Rapid Prototyping Journal, Vol. 19(4), 2013. pp. 291–299.

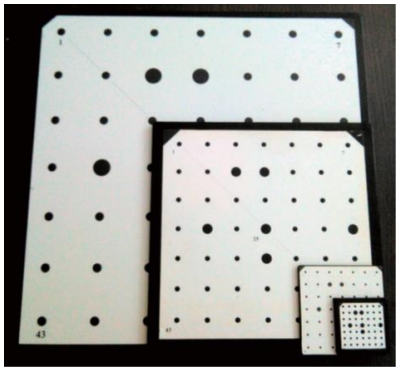
126. M.F. Afrose, S.H. Masood, P. Iovenitti, M. Nikzad, I. Sbarski, Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material, Progress in Additive Manufacturing, Vol. 1(1), 2016. p. 21–28.

127. В.И. Караваев, И.В. Караваев, В.Е. Румянцева, Испытания образцов из пластиков ABS и PLA, изготовленных на 3D-принтере, Новые информационные технологии в научных исследованиях, Материалы XXI Международной научно-технической конференции, Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново, 2014. p. 635–637. https://isv.ivgpu.com/sbornik-za-2017-god/sbornik-materialov/sbornik-za-2014-god/ (дата обращения 06.04.2020).

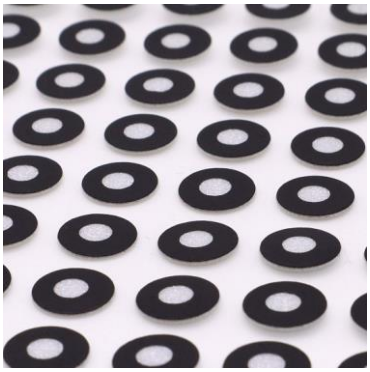
128. ГОСТ 4651-82, «Пластмассы. Метод испытания на сжатие». ИПК Издательство стандартов, Москва.

129. https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/manufacturing-planning/plant-simulation-throughput-optimization.html (дата обращения 06.04.2020).

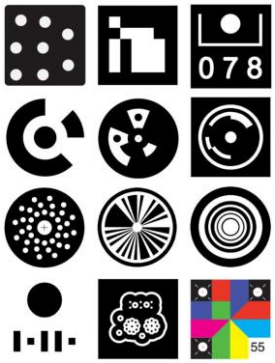
Приложения 1. Комплектующие для ССП и ЛС



калибровочные поля



некодируемые маркеры (наклейки, 2D)



кодируемые маркеры (магниты, 2,5D)



кодируемые маркеры (3D)



кодируемые доменные маркеры (2D)



наклонные метки (3D)



крестообразный маркер (магниты, 2,5D)



балочный маркер с возможностью масштабирования (3D)



сферический маркер (3D)





поворотный маркер-мешень (2D)



крупные некодируемые маркеры (2D)



поворотный маркер-мешень с 3D-отражателем (3D)



малая призма (3D)



проявитель, требующий последующего удаления





самоисчезающий проявитель

Приложение 2. Примеры бесконтактных сканеров, классифицированных по размерам объектов (не роботизированные)

Название сканирующей системы	Тип устройства
для сканирования мелких-средних объектов (менее 2 м)	
Artec Micro	статический
GOM Atos Triple Scan	статический
RangeVision Spectrum	статический
Hexagon (Blaze 600M)	динамический
Zeiss (Comet, Abis II)	статический
Gocator, Cognex	статический
Sense	динамический
для сканирования средних-крупных объектов (до 5 м)	
Artec (Eva, Space Spider, Leo)	динамический
Faro Freestyle	динамический
Creaform (HandyScan, MetraScan)	динамический
GOM Atos 5X	статический
Zeiss (T-Scan)	динамический
Hexagon (Leica T-Scan 5)	динамический
Hexagon (AICON StereoScan neo)	статический
для сканирования крупных объектов (свыше 5 м)	
Artec Ray	полустатический
Faro Focus	полустатический
Surphaser 10	полустатический
Riegl VZ	полустатический

динамический – портативный, переносной, ручной

статический – установленный на штативе или треноге, стационарный

полустатический – статический, но с подвижными элементами сканирования

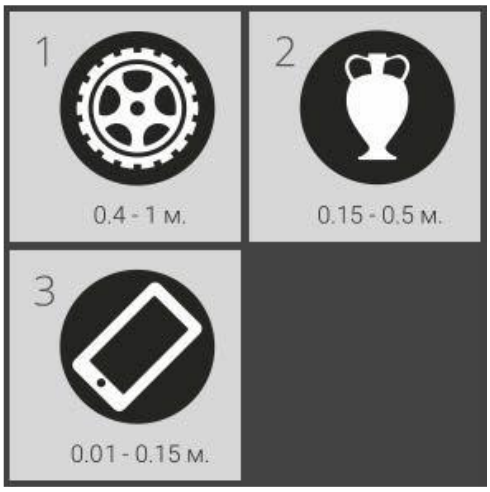
Приложение 3. Калибровка 3D-сканера RangeVision и сравнение характеристик применяемых в работе 3D-сканеров

Постановка задачи



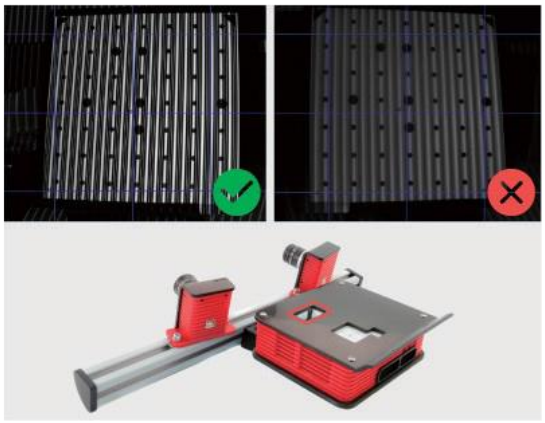
Настройка 3D-сканера

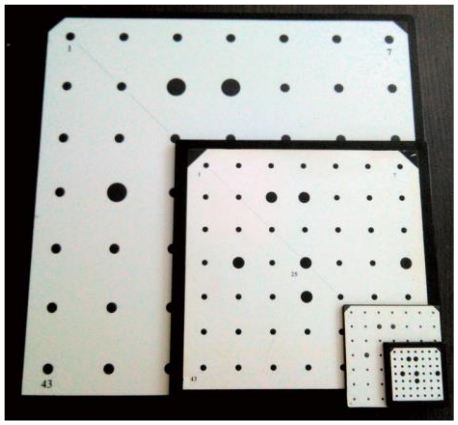
- Оптическое сканирование проводилось на 3D-сканере rangevision Premium и rangevision Spectrum. Для получения облака точек и STL-модели применялась программа rangevision scancentre.
- Выбор правильной зоны (области) сканирования в зависимости от габаритов сканируемого объекта.
- Настройка сканера, необходимо следовать указаниям на каждом шаге



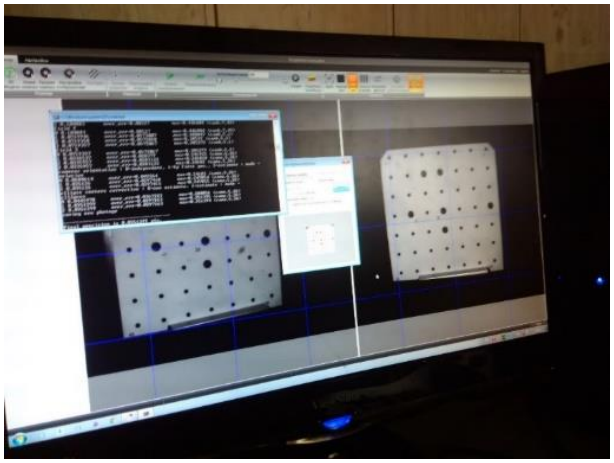
Калибровка 3D-сканера

- Настройка диафрагм и фокуса объективов так, чтобы изображение было максимально резким, приемлемой яркости, без красных зон пересвета и не слишком темное.
- Правильно расположение камер
- Нахождение рабочего расстояния
- Настройка фокуса проектора





- Калибровка с помощью калибровочного поля
- Пошаговое изменение положения поля для каждого снимка камер
- Результирующая точность калибровки не больше 0.1 pix



сравнение параметров сканирования 3D-сканеров

RANGE VISION	**SENSE**	**KINECT**
		
статический 0,02 –0,2 мм проектор + 2 камеры	динамический (ручной, портативный) от 0,2 мм лазер + 2 камеры	динамический (ручной, портативный) от 0,2 мм лазер + 2 камеры

выбор размера области сканирования для RangeVision

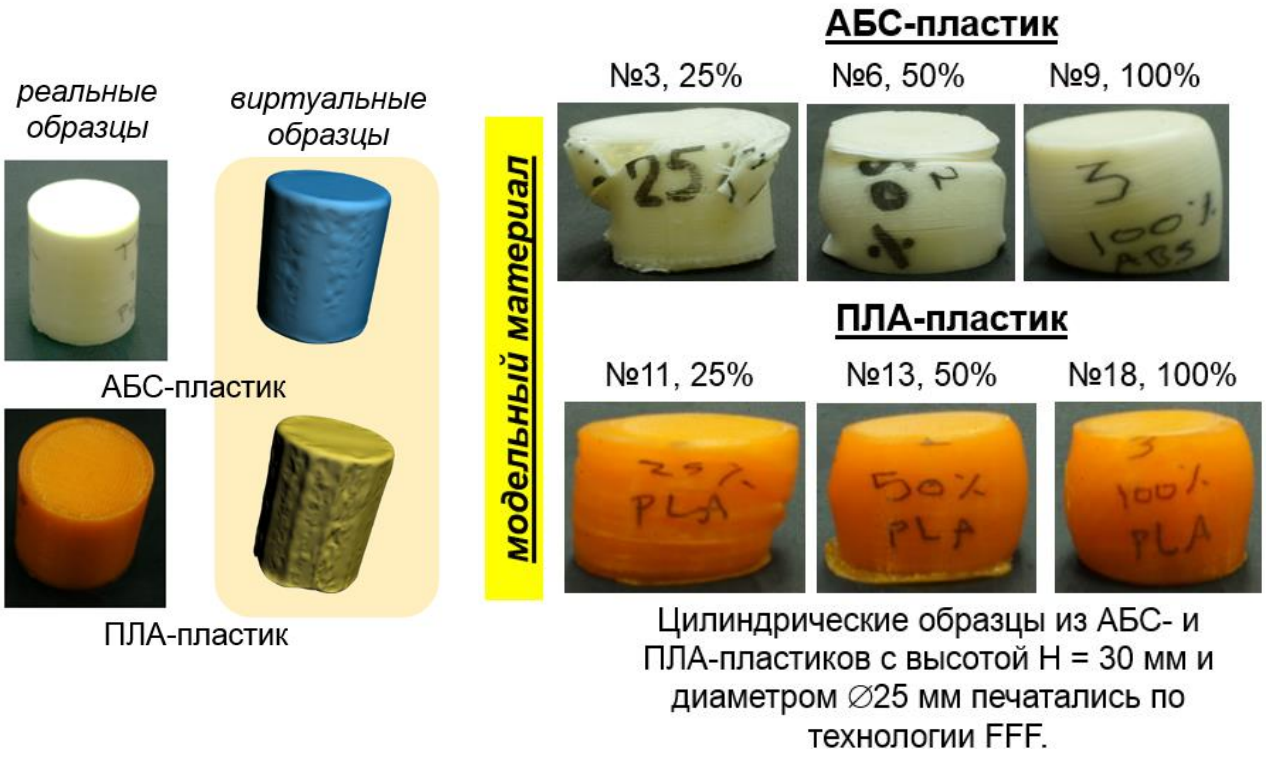
Название области	**Размер объекта, м**	**Номер калибровочного поля**
Большая	0,40 – 1,00	414,05
Средняя	0,15 – 0,50	237,59
Маленькая	0,05 – 0,15	94,877
Очень маленькая	0,01 – 0,05	47,524

выбор размера области сканирования для Sense

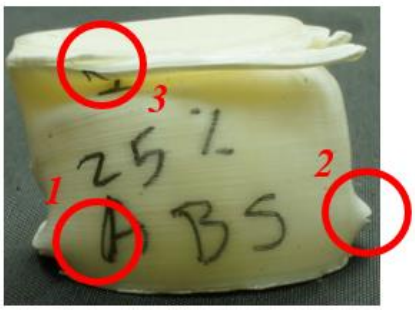
Номер области	**Человек**	**Другой объект**
1	торс	маленький (0 – 0,15 м)
2	во весь рост	средний (0,15 – 0,4 м)
3	н/д	большой (≥ 0,5 м)

Приложение 4. 3D-сканирование цилиндрических образцов на сжатие

камера 16 мм



до деформации *после деформации*



натурный образец



3D-модель

№1, 25% АБС-полимер

камера 16 мм

Три артефакта (ошибки):

1) лишние углубления;
2) отсутствие разрыва поверхностей;
3) сглаживание острых ребер.

Результат натурного эксперимента (слева) и виртуальная модель, полученная 3D-сканированием (справа), для одинакового % заполнения; камера 16 мм. Визуально точность сканирования уменьшилась, т.е. увеличилась ошибка сканирования.

Приложение 5. Примеры 3D-сканирования автомобильных компонентов

№1 *поперечина КПП а/м ВАЗ-2107*

Особенности

-листовая деталь;

-отверстия с разной геометрией;

-изгибы.



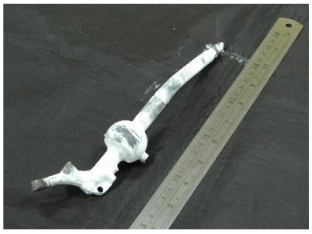
№2 *рычаг переключения передач а/м ВАЗ*

Особенности

-объёмная деталь;

-мелкие элементы;

-много изгибов.



№3 *кронштейн компрессора кондиционера а/м ВАЗ Приора*

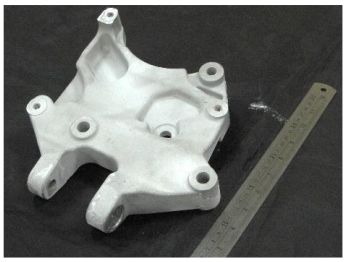
Особенности

-объёмная деталь;

-рёбра жёсткости;

-много изгибов;

-есть метка контроля.



№4 *кронштейн а/м ВАЗ-2105 генератора ТЗА*

Особенности

-объёмная деталь;

-рёбра жёсткости;

-изгибы;

-отверстия разной глубины;

-есть метка контроля.



№5 *кронштейн а/м ВАЗ-2108 генератора ДААЗ*

Особенности

-объёмная деталь;

-рёбра жёсткости;

-фигурные элементы;

-отверстия разной глубины.



№6 *рычаг выключения сцепления а/м ВАЗ-21010*

Особенности

-листовая деталь;

-составная деталь;

-отверстия;

-заклепки;

-есть метка контроля.



№7 *кронштейн правой опоры двигателя а/м ВАЗ-1118*

Особенности

-объёмная тонкостенная деталь;

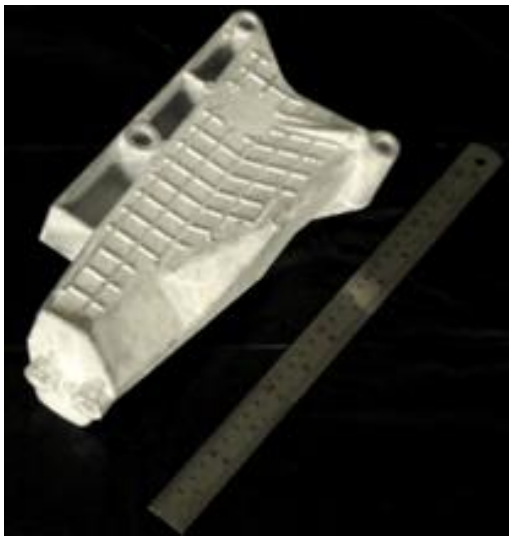
-рёбра жёсткости;

-изгибы;

-отверстия разной глубины;

-глубокая полость;

-есть метка контроля.



№8 *поковки кованных поршней из алюминиевых сплавов*

Особенности

-объёмная тонкостенная деталь;

-глубокая полость;

-тонкий облой по периметру головы поршня.



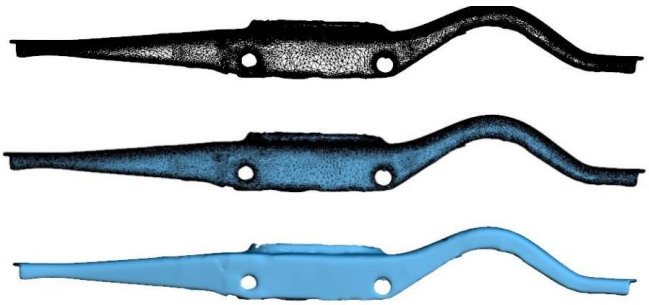
Источник: www.nppavto.ru

№1 *поперечина КПП а/м ВАЗ-2107*

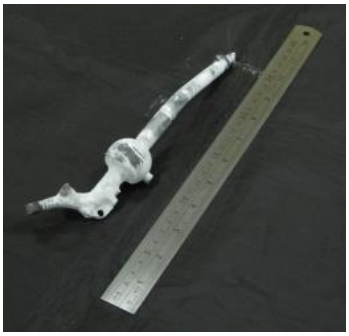




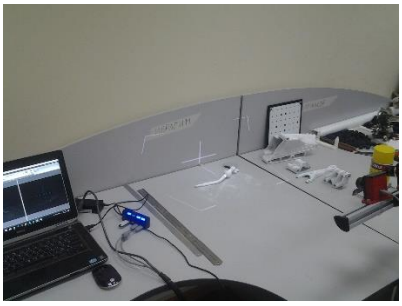


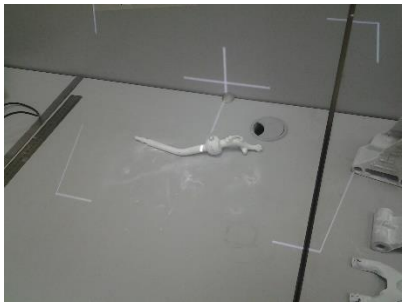


№2 *рычаг переключения передач а/м ВАЗ*

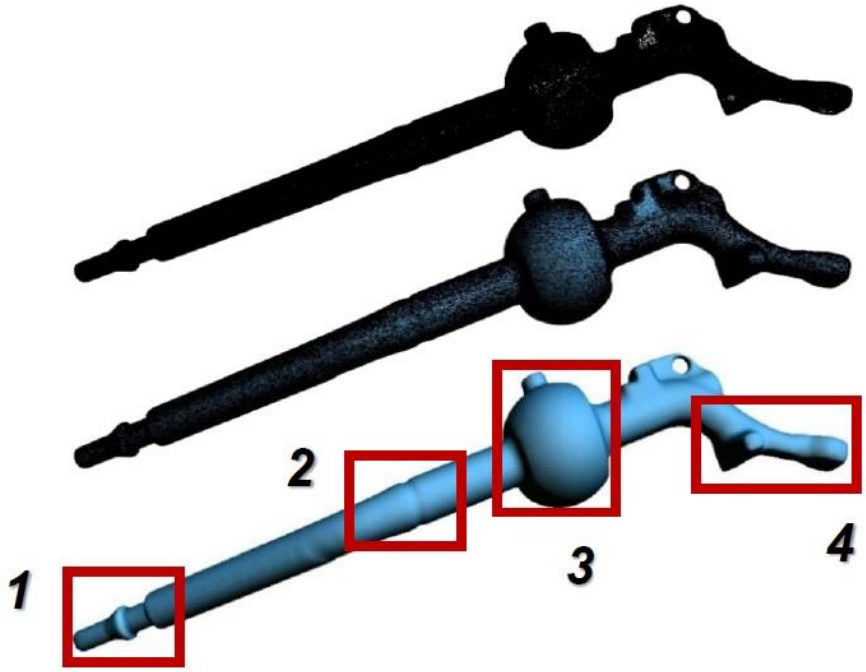


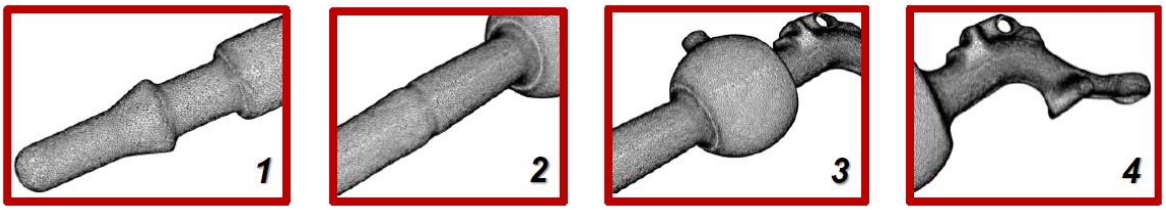




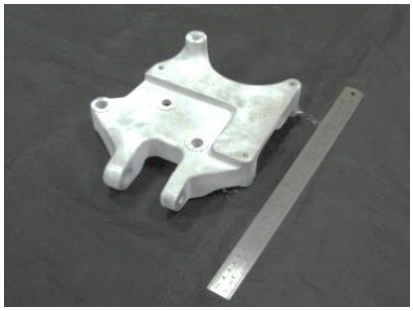


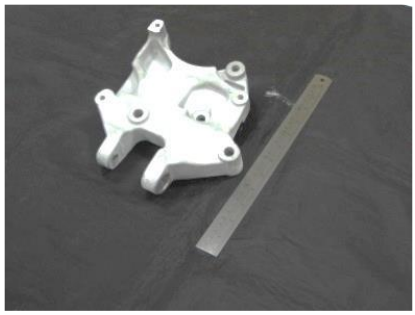






№3 *кронштейн компрессора кондиционера а/м ВАЗ Приора*

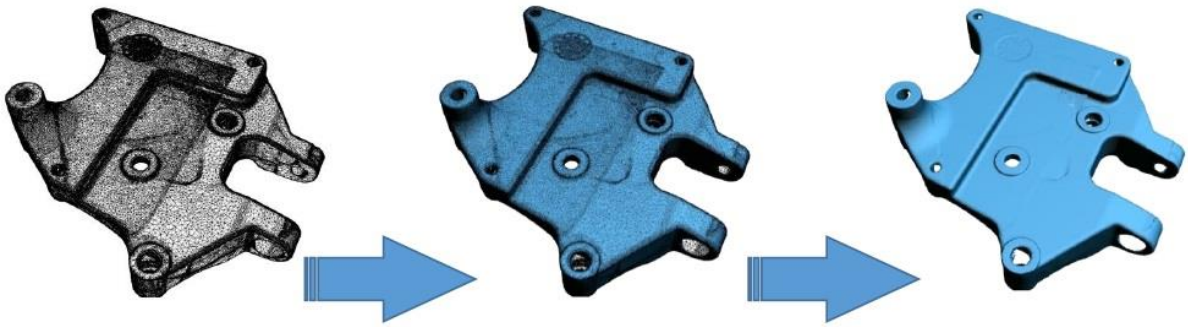






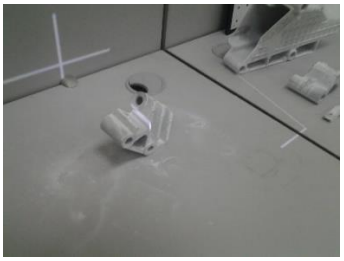




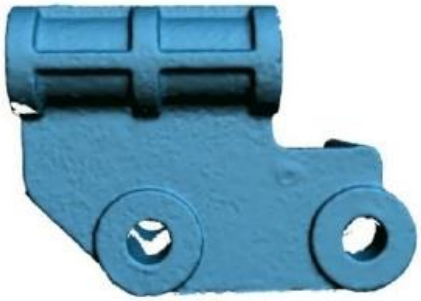




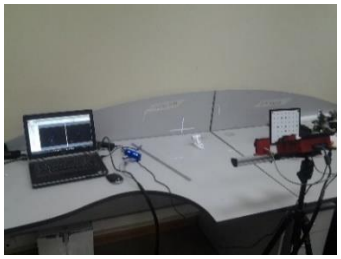
№4 *кронштейн а/м ВАЗ-2105 генератора ТЗА*





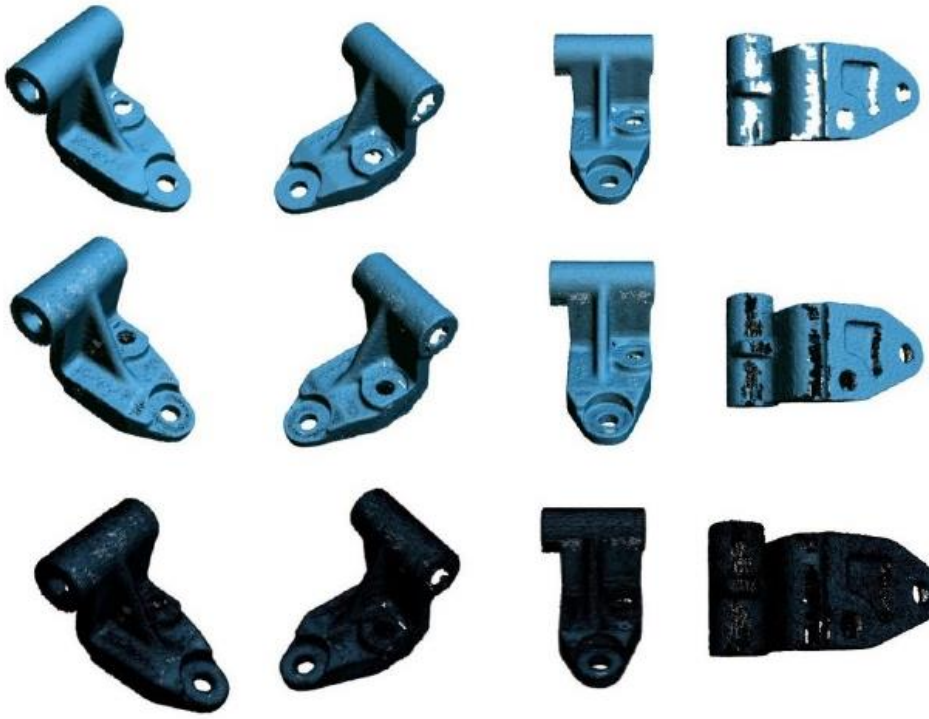

№5 *кронштейн а/м ВАЗ-2108 генератора ДААЗ*







камеры 16 мм



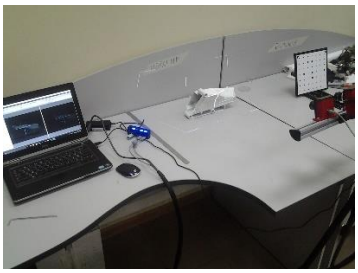
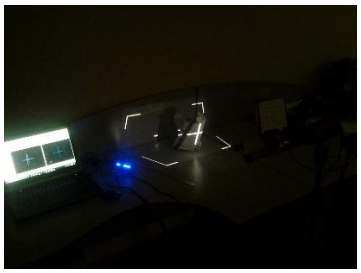
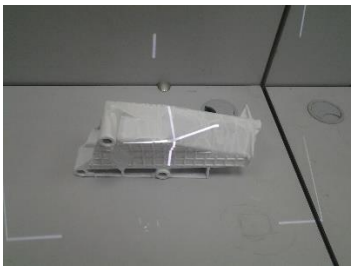
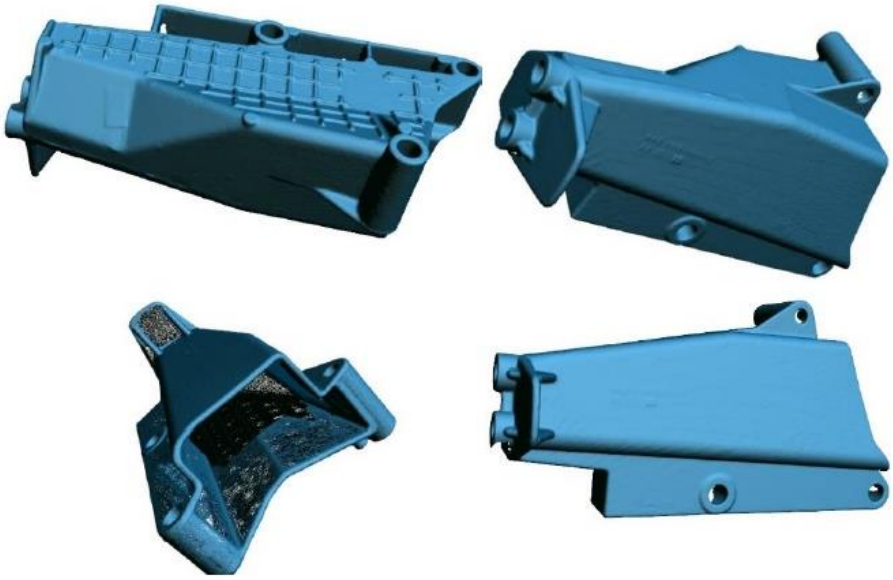
камеры 9 мм

№6 *рычаг выключения сцепления а/м ВАЗ-21010*






№7 *кронштейн правой опоры двигателя а/м ВАЗ-1118*

№8 *поковки кованных поршней из алюминиевых сплавов*

поршень ДВС (Т= 250 –450°С)











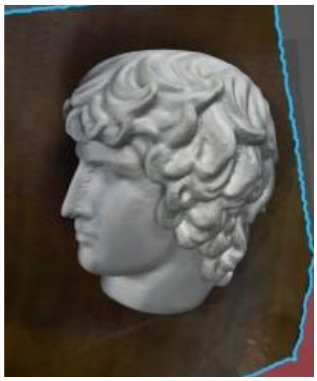



поршень ДВС (T= 20°C)

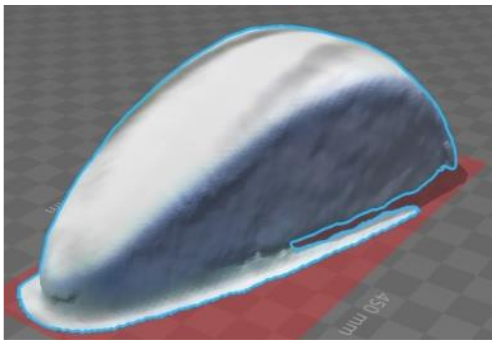


Приложение 6. Примеры 3D-сканирования объектов из разных материалов и в разных условиях эксплуатации (разные 3D-сканеры)

3D-сканер SENSE


Гипсовые головы (без светоотражающего покрытия)



Металлический корпус фары со светоотражающим покрытием

3D-сканер KINECT




Гипсовые головы (без светоотражающего покрытия)



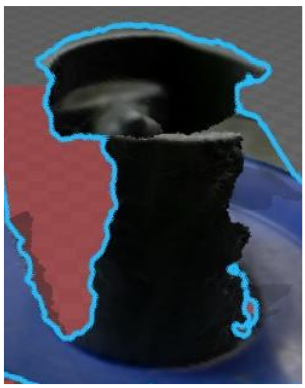
Холодная поковка поршня ДВС



Горячая поковка поршня ДВС









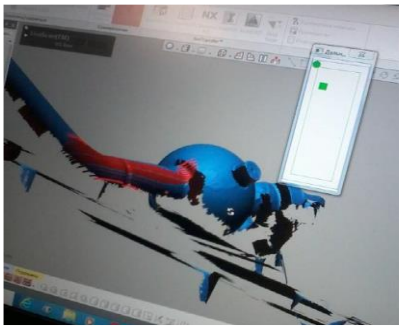
измерительная рука и 3D-сканер FARO Edge

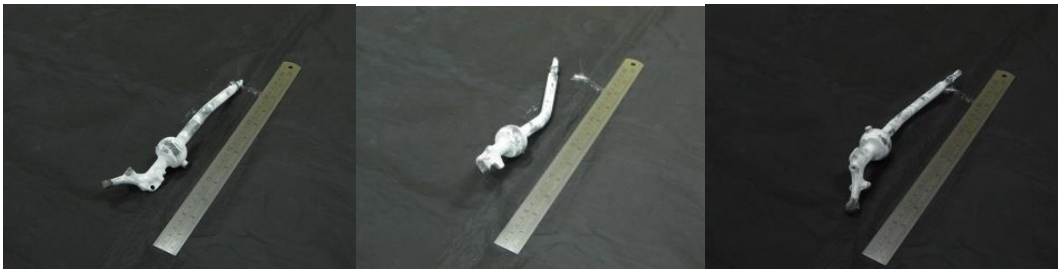


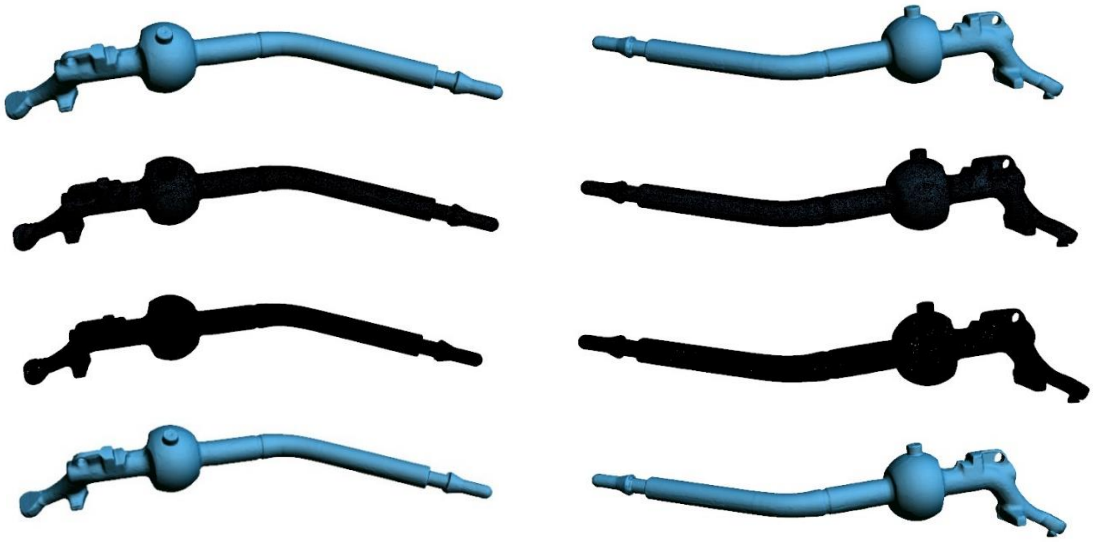


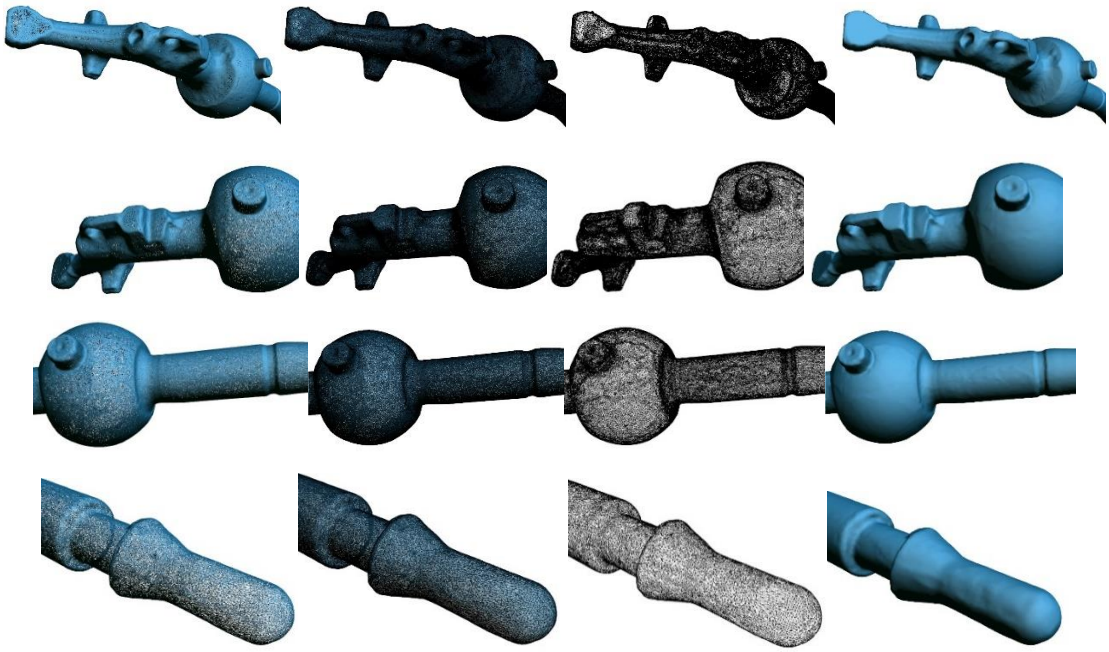
Модель №2 – рычаг переключения передач, как есть





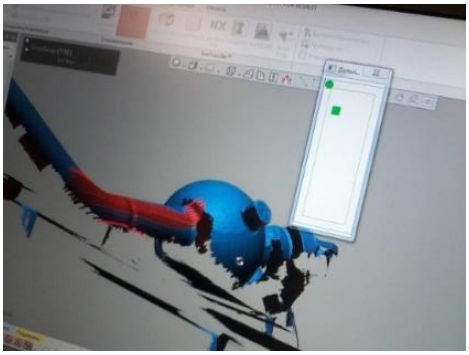


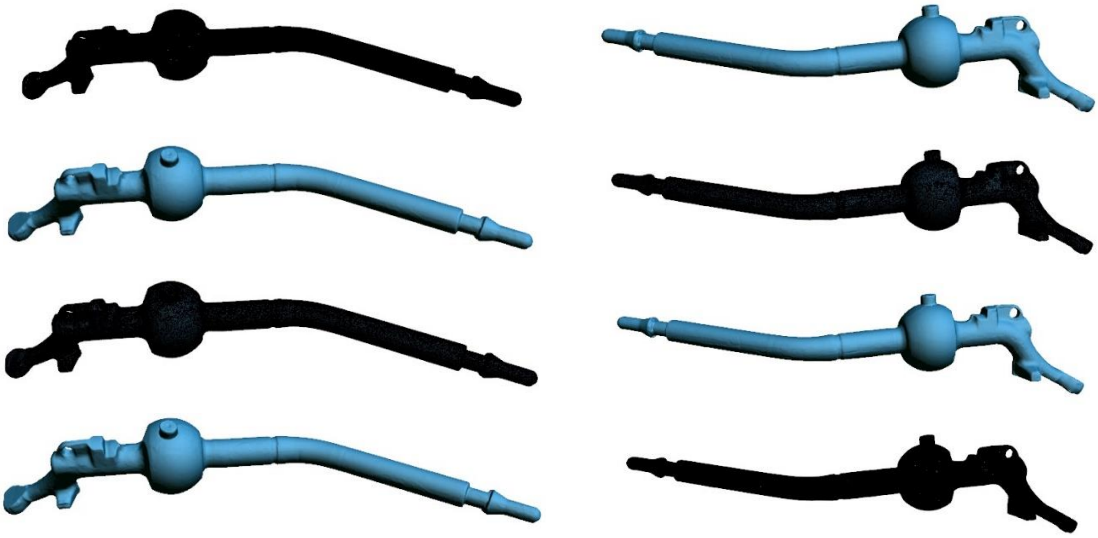


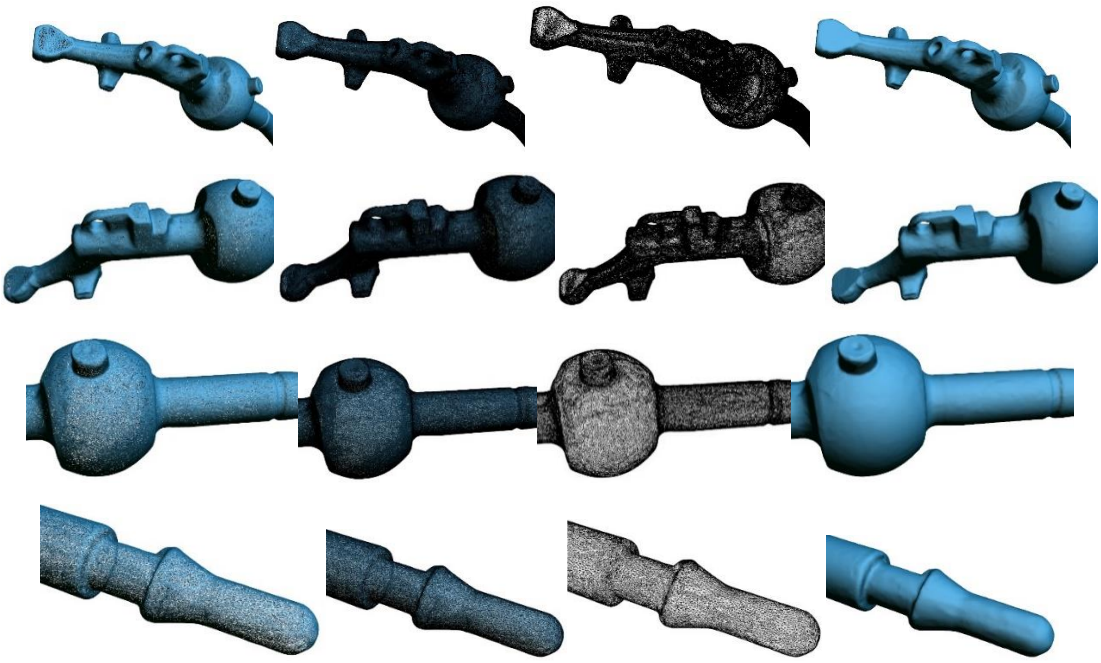


Модель №2 – рычаг переключения передач, с матирующим спреем

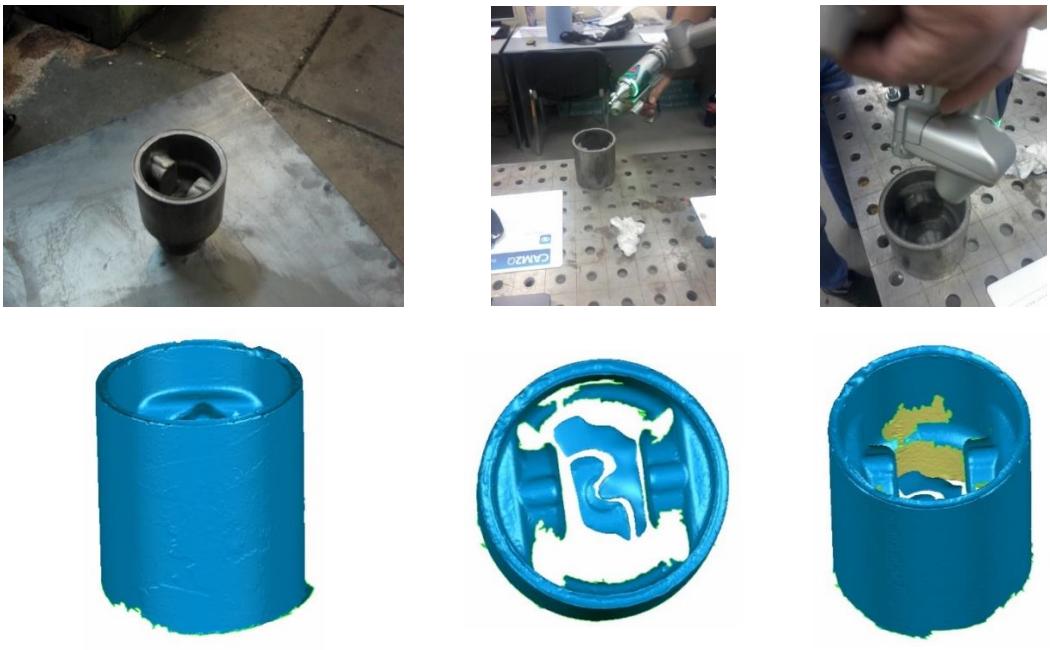






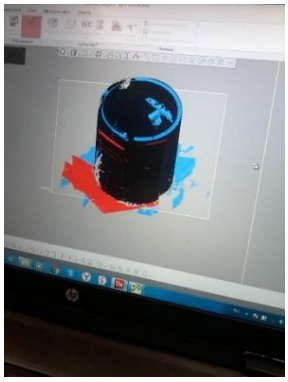
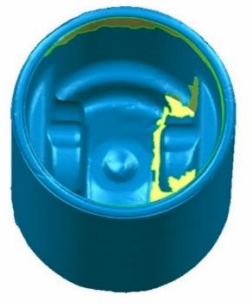


Модель №8 – поршень ДВС, как есть



Модель №8 – поршень ДВС, со смазкой для ГОШ

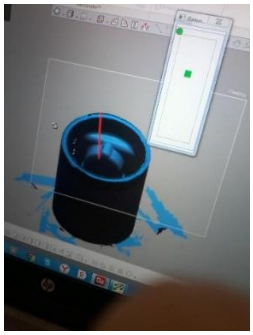


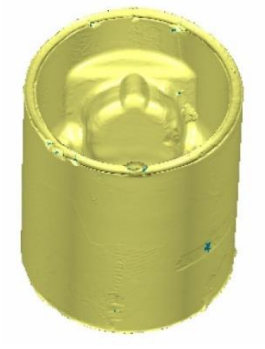





Модель №8 – поршень ДВС, с матирующим спреем

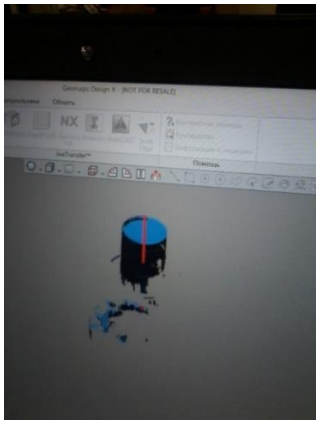




цилиндрические образцы из АБС-пластика, без матирующего спрея







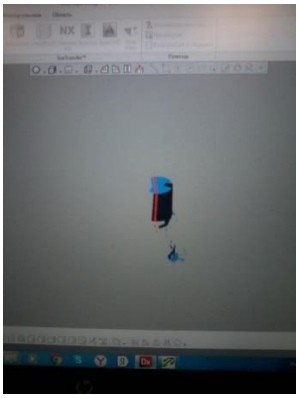
цилиндрические образцы из ПЛА-пластика, без матирующего спрея

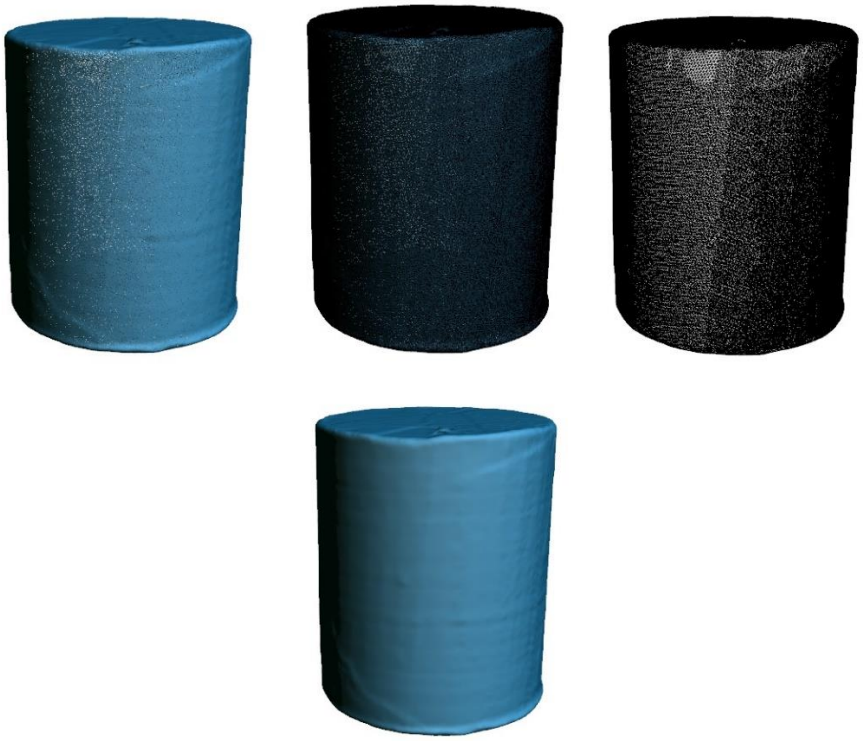


Без покрытия лучи сильно рассеиваются внутри материала и слабо отражаются обратно!

Модель №8 – поршень ДВС, с матирующим спреем





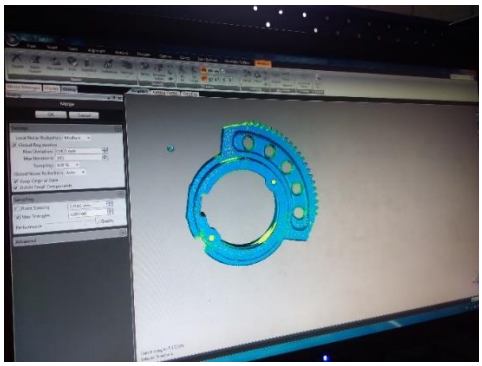


Приложение 7. Примеры 3D-сканирования разных изделий

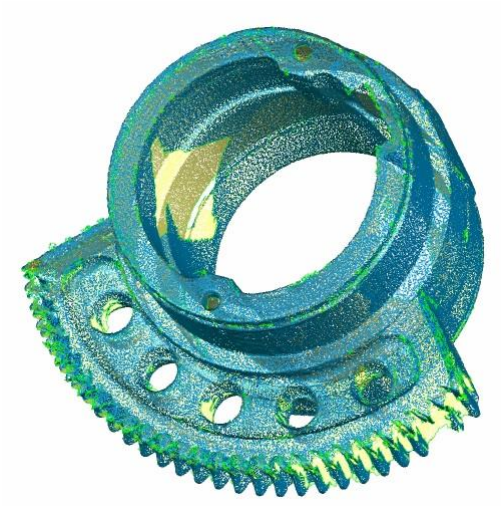
зубчатый квадрант редуктора дроссельной задвижки



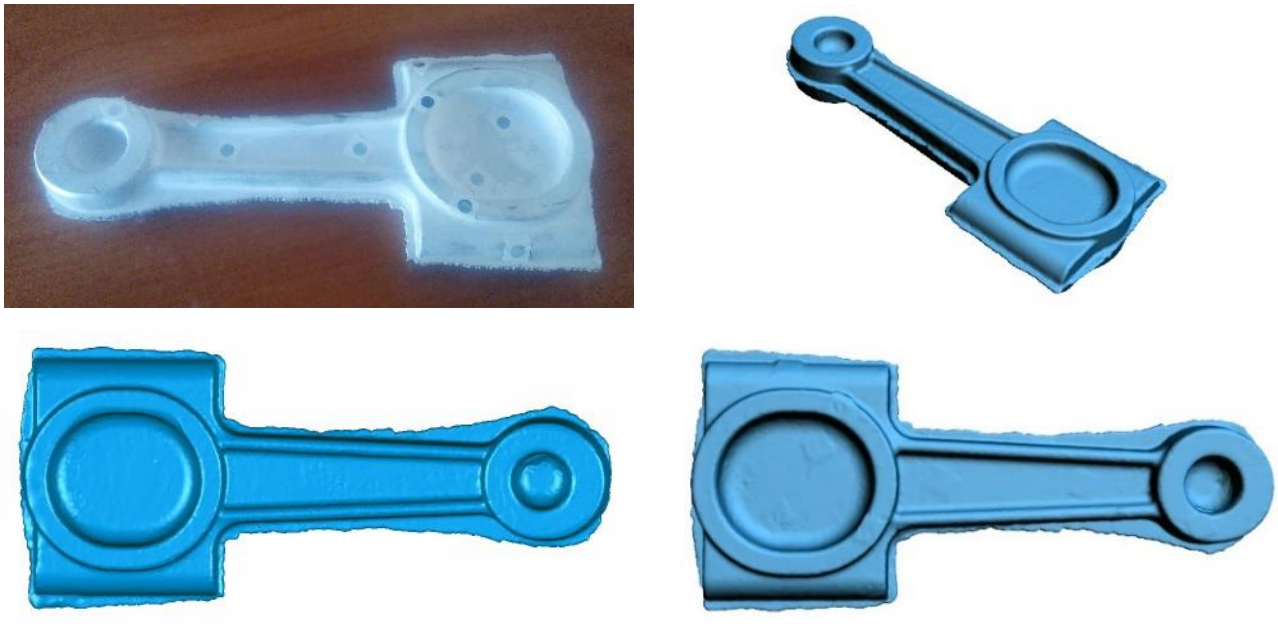








поковка алюминиевого шатуна



прототип двойного алюминиевого шатуна (3D-печать, SLM)



брелок для ключей из поливинилхлорида (ПВХ, литьё в форму)













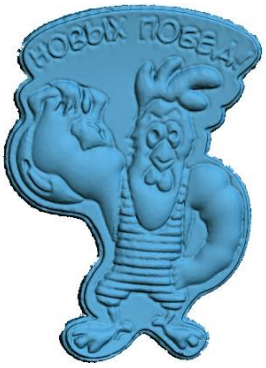














медаль/жетон из латуни (чеканка)

















ключи и флешка (штамповка)

камеры 25мм, маленькое калибровочное поле













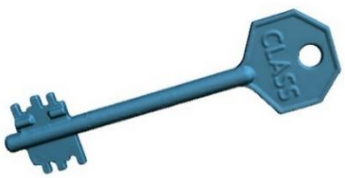


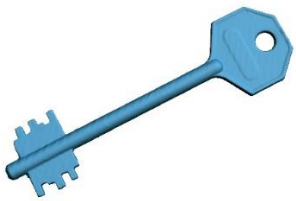










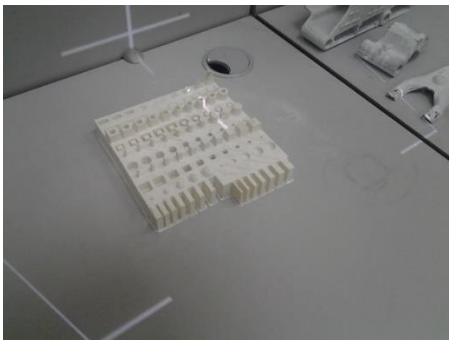


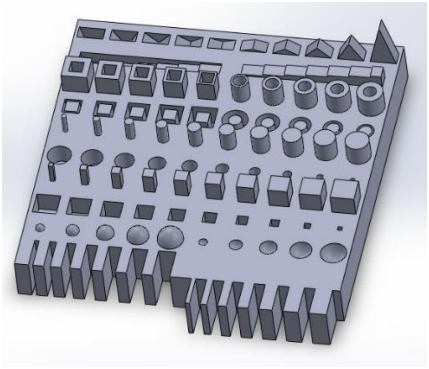


калибровочные элементы

3D-модель калибровочных образцов, изготовленных по технологии 3D-печати FFF

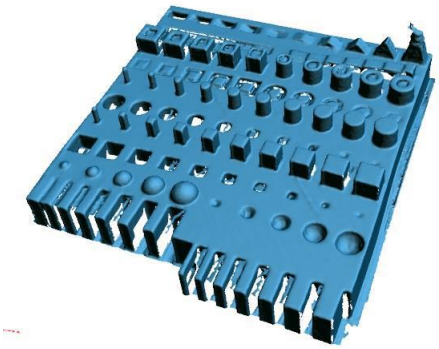


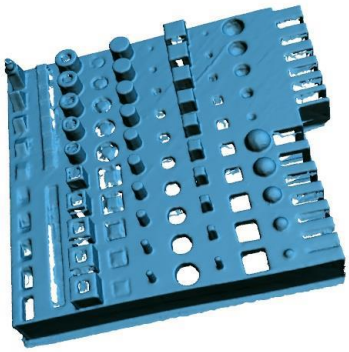






3D-модель (CAD) *прототип*





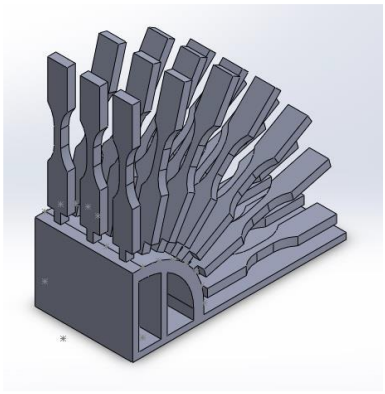
полигональная 3D-модель

образцы для механических испытаний

3D-модель образцов на растяжение, изготовленных по технологии 3D-печати FFF



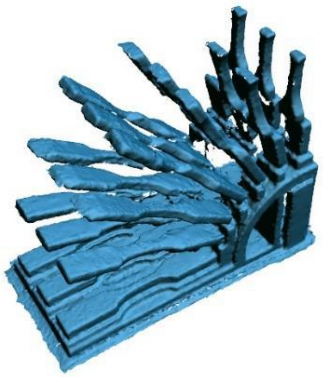


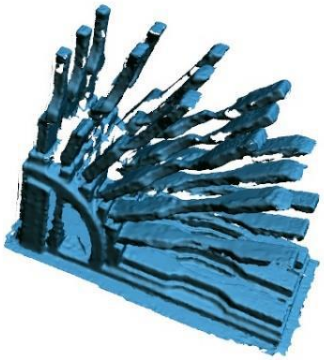


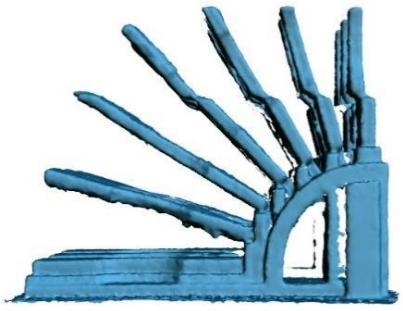
3D-модель (CAD)

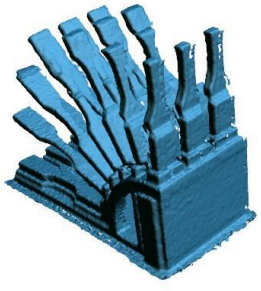


прототип









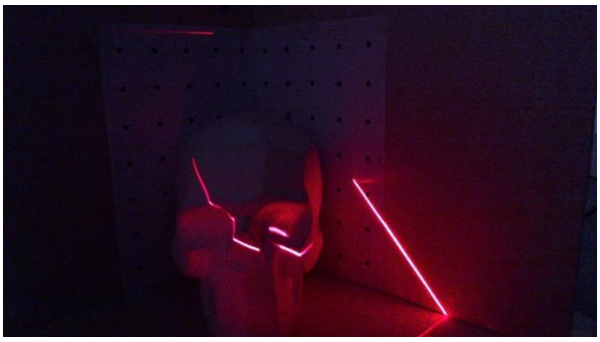
полигональная 3D-модель

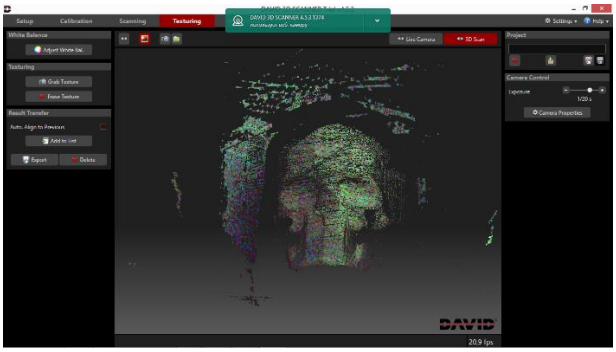
Приложение 8. Примеры других экспериментальных работ

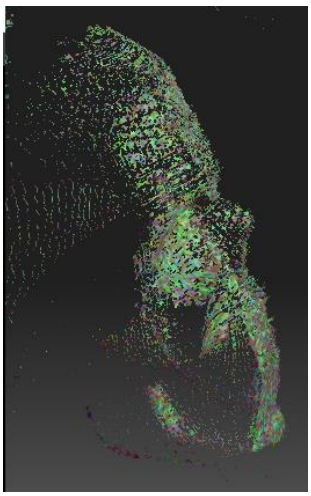
лазерное сканирование, проект David (www.david-laserscanner.com)

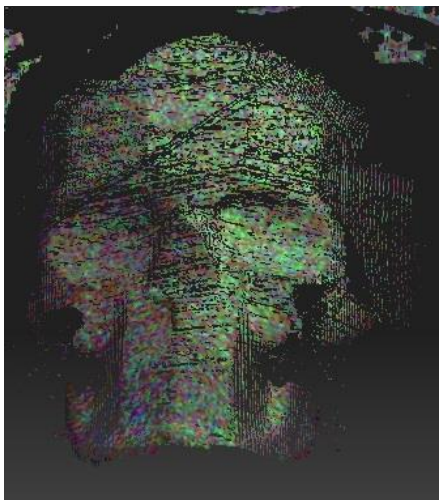


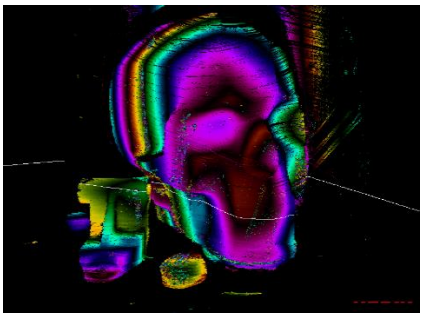






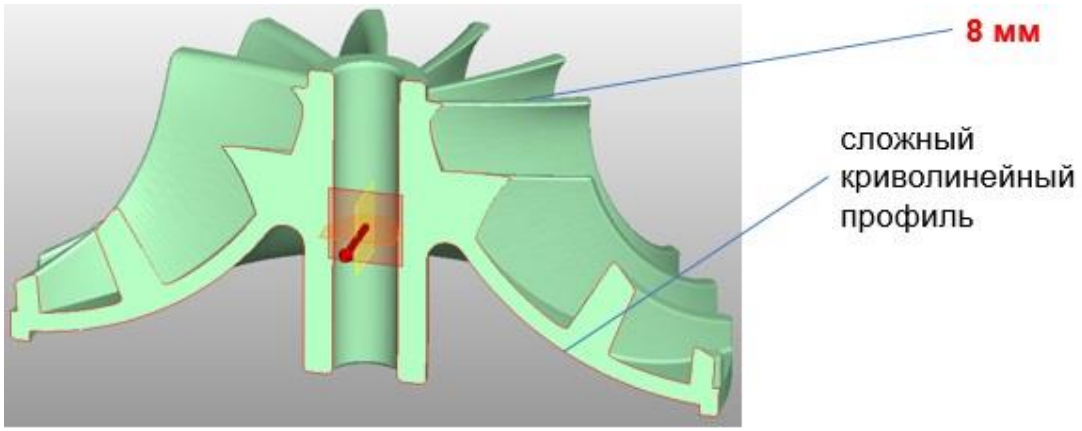








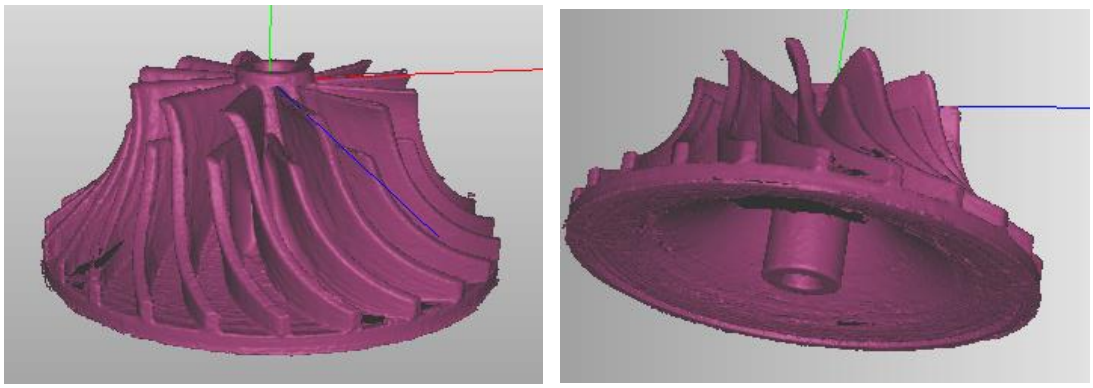
деталь «Крыльчатка»



твердотельная модель (https://grabcad.com/library/impeller-189)



прототип детали «Крыльчатка» (технология FFF, 3D-принтер Picaso)



STL-модель, после сканирования (RangeVision Spectrum)