

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

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»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Москва – 2020

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. 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 производства 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. Так, с конца XX века стало возможным управлять циклограммой прессового оборудования по средству цифрового сигнала, благодаря появлению прессов с сервоуправлением.

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 выборочный летучий (или инлайн) контроль был

распространён на высокоскоростных автоматах, то теперь он активно внедряется и в менее скоростных процессах штамповки.

Объектом исследования является взаимосвязь процессов деформирования металлов с геометрической характеристикой поковок.

Предметом исследования является алгоритм автоматической настройки параметров прессовой линии для холодной штамповки изделий, с возможностью изменения технологических параметров штамповочного оборудования на основе данных оптического 3D-сканирования и численного моделирования.

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 прессы с использованием реальной модели и численного моделирования процесса ХОШ заготовки болта; 5) Проведение численного моделирования с применением уточнённых 3D-моделей.

Научная новизна. 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. Разработан алгоритм 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».

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.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимости, а также её апробация на действующем предприятии.

В первой главе рассматривается применение процесса 3D-сканирования в процессах обработки металлов давлением и возможность его интеграции на производственных участках. Для классификации соответствующего оборудования вводится разделение по нескольким признакам:

- выполнение лабораторных или производственных задач;
- скорость сканирования;
- плоскостное (2D) или объёмное (3D) сканирование, фотограмметрия;
- импульсного или непрерывного действия;
- сканирование по линии или по плоскости.

В машиностроительной практике наиболее успешно применяются 3D-сканеры на основе структурированного подсвета. Их применяют для выполнения следующих задач: получение информации о геометрии изделия, получение 3D-модели изделия для внесения в неё изменения или проектирования инструмента по геометрии детали; контроль технологических параметров, например, степень деформации.

3D-сканирование на основе лазерных модулей (точечные или линейные) подразумевает проведение замеров расстояния до объектов при помощи лазерного излучения, протекающее непрерывно или с паузами. Преимуществом этого типа 3D-сканирования является скорость добавления новых точек, которое осуществляется параллельно с процессом сканирования.

3D-сканирование по методу структурированного подсвета подразумевает поочерёдное проецирование интерференционных картин в виде линий разной толщины на объект исследования, отражение света от светлых линий и улавливание результата отражения от двух до четырёх камер, располагающиеся под определённым углом к вертикальной плоскости, которые и обеспечивают стереоэффект, к которому и применяется в дальнейшем метод триангуляции, т.е. производится автоматическое определение координат положения точек в пространстве. На экране монитора полученные точки ориентируются относительно глобальной системы координат и отображаются в виде «облака». Их количество напрямую связано со степенью детализации 3D-объекта. Для получения полноценной 3D-модели проводится операция полигонизации, подразумевающая объединение точек в группы (кластеры), создание соединения внутри групп по кратчайшему расстоянию, а также между группами. Полученная таким образом 3D-модель (в формате stl, пригодным для 3D-печати) представляет собой скорее оболочку, из которой можно удалить отдельные треугольники. Инструментами классической CAD-программы редактировать такие модели не представляется возможным, и необходима предварительная подготовка твердотельной геометрии на их основе. В отличие от 3D-сканирование на основе лазерных модулей сканирование проводится не по линии, а по плоскости, что увеличивает число захватываемых точек поверхности, а также замедляет процесс передачи полученных данных на компьютер.

Трёхмерное сканирование (3D-сканирование) является продолжением развития системы фотограмметрии, которая появилась в XX веке и позволяла фотографировать удалённые объекты, определять их высоты по методу триангуляции. Современные системы трёхмерного сканирования можно охарактеризовать как систему фотограмметрии, непрерывно определяющую расстояние до исследуемого объекта. Это позволяет получать не единичную информацию о высоте объекта, а облачное представление, которое в последствие может быть реконструировано до объёмной 3D-модели.

Известны методы фотограмметрического контроля, помогающие оценить пружинение детали после штамповки при помощи методики, основывающейся на проецировании структурированного подсвета на листовую деталь, распознавания отражённого света четырьмя стереокамерами и анализом изображения в специальном программном обеспечении. Также при помощи 3D-сканирования возможно проведение оценки степени износа штампового инструмента для горячего деформирования. Данная методика вряд ли может быть использована по принципу выборочного летучего (инлайн) контроля, так как сами бесконтактные методы чувствительны к колебаниям температур окружающей среды и объекта, что на данном этапе развития технологий усложняет их применение. Для оценки дефектов может быть применена камера высокого разрешения, установленная на позиции штамповки внутренней части двери. Показано, что такая система помогает обнаружить дефекты, вызванные пружинением материала.

Как правило, технологии оптического сканирования не находят применение на производственных участках и не связаны напрямую с изменением технологических (производственных) параметров. Например, контроль точности изготовления отдельных автомобильных кузовных деталей или всего кузова автомобиля. Исключением являются системы на основе высокоскоростных камер, устанавливаемые на поточные линии после всех операций, вдали от прессового или иного оборудования, и определяющие качество каждого изделия путём сопоставления полученной фотографии с исходным чертежом. После этого происходит отбраковка изделий, но без изменения рабочих параметров оборудования.

Введение системы принятия решения о технологичности процесса на основе результатов 3D-сканирования является новым междисциплинарным мало исследованным направлением.

Во второй главе рассматриваются теоретические основы 3D-сканирования и его реализация, заключающаяся в выборе оборудования и реконструкции 3D-модели. Методика получения полигональной 3D-модели заключается в следующем:

- обнаружение участков, на которых необходимо реализовать повышенную точность построения;
- определение внешних границ и их кривизны;
- создание патчей (патч представляет собой переходные участки в областях большой протяженности, которые разделяют области с одинаковой кривизной на ряд более мелких участков);
- создание полигональной сетки на основе патчей.

На каждом этапе требуется сохранение высокой точности, задаваемой техническим заданием на производстве детали. Не только машины, но и компьютерная техника имеют погрешности в результатах выполнения команд, связанных с построением 3D-модели. Например, при воссоздании макроструктуры поверхности образца, полученного после 3D-печати, создать текстуру поверхности представляется сложным. Полученная после 3D-сканирования stl-модель не имеет текстурированной поверхности (Рис. 1).

Для её решения требуется перейти на методы фотограмметрии и применения фотоаппаратов с высоким разрешением, что увеличит количество точек. В случае

обработки таких данных на компьютере это сможет заметно снизить производительность системы. Кроме этого, сама фотограмметрия работает в несколько раз медленнее, так как больше времени уходит на обработку полученных снимков.

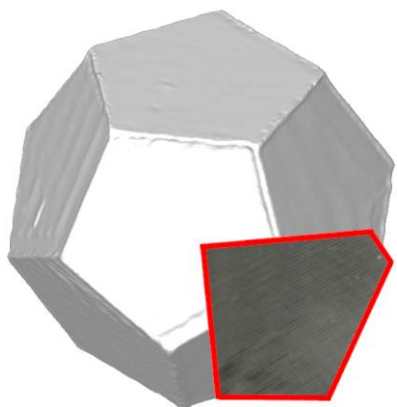


Рис. 1. Полученная stl-модель со сглаженной поверхностью и часть текстуры реальной поверхности, характерной для полимерных прототипов, изготовленных по технологии 3D-печати FFF

В третьей главе рассматривается способ оценки механических свойств материалов и влияние входной геометрии на результат моделирования. Исследование проводилось на модельных материалах, в качестве которых использовались полимеры (АБС- и ПЛА-пластики). Сами образцы были выращены по технологии 3D-печати FFF (Fused Filament Fabrication – Формообразование Плавящейся нитью). Для оценки прочностных свойств были выбраны эксперименты на одноосное растяжение (ЭОР) и сжатие (ЭОС), а также эксперимент на усталостную прочность (ЭУП). В качестве варьируемых параметров для ЭОР и ЭУП были выбраны: степень заполнения (СЗ), угол поворота в плоскости печати (УП) и в направлении перемещения экструдера (НП). Для ЭОС варьирование проводилось лишь по параметру СЗ в силу осесимметричности задачи. Объем экспериментальных работ включал два этапа. На первом этапе велось изготовление цилиндрических образцов по технологии FFF на принтере для трехмерной печати Picaso, в котором скорость печати устанавливается автоматически в зависимости от геометрии детали и ее степени заполнения (СЗ). На втором этапе изготовленные образцы осаживали на универсальной испытательной машине, оснащенной системой контроля, выполненной на основе программы графического программирования LabView. Деформирование велось в специальной оснастке, оснащенной системой самовыравнивания бойков для исключения их перекоса, позволяющей проводить исследования по определению физического предела текучести металлических материалов на основе термографического метода. Исследования проводились на двух типах полимерного материала, представленными термопластом акрилонитрилбутадиенстиролом (аббр. АБС-пластик с химической формулой $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$, международным CAS-номером 9003-56-9), и биоразлагаемым полимером – полилактидом (аббр. ПЛА с химической формулой $(C_3H_4O_2)_n$, международным CAS-номером 33135-50-1). Исходным материалом для изготовления образцов служила полимерная проволока $\varnothing 1,7$ мм.

На Рис. 2 и 3 показаны образцы для ЭОС и ЭОР соответственно. Подготовка геометрии образцов на сжатие велась по ГОСТ 4651-2014, а на растяжение – по ASTM D638. Общее количество образцов представлено в Табл. 1. На основании анализа диаграмм растяжения можно выделить три области, определяющие вид

диаграммы в зависимости от СЗ образца. Кривая каждой области характеризуется сначала участком резкого роста силы (упругая составляющая деформации), а после достижения предела текучести, плавно возрастающим участком (пластическая составляющая деформации).

Таблица 1. Характеристика и количество образцов для испытаний

Вид испытания	УП	НП	СЗ	Кол-во образцов
ЭОС	не исследовалось		25%, 50% и 100%	18 (АБС, ПЛА)
ЭОР	0°, 15°, 30° и 45°	1, 2, 3 (0°) и 1, 2, 3 (90°)		216 (АБС)

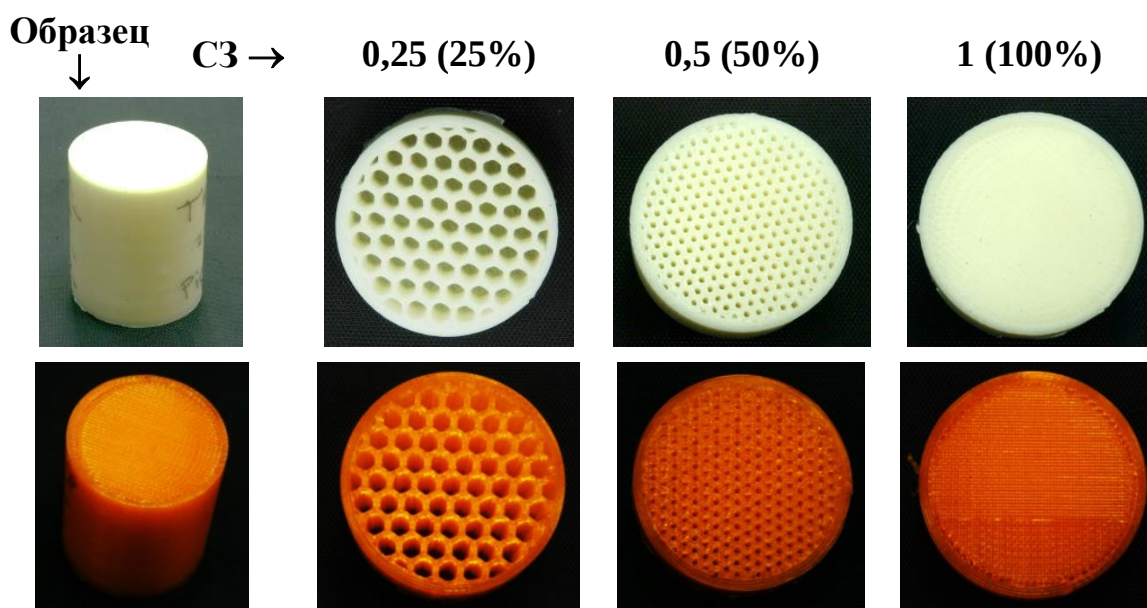


Рис. 2. Образцы из АБС-пластика (слева) и ПЛА (справа) (показаны с открытой внутренней структурой, поперечное сечение)

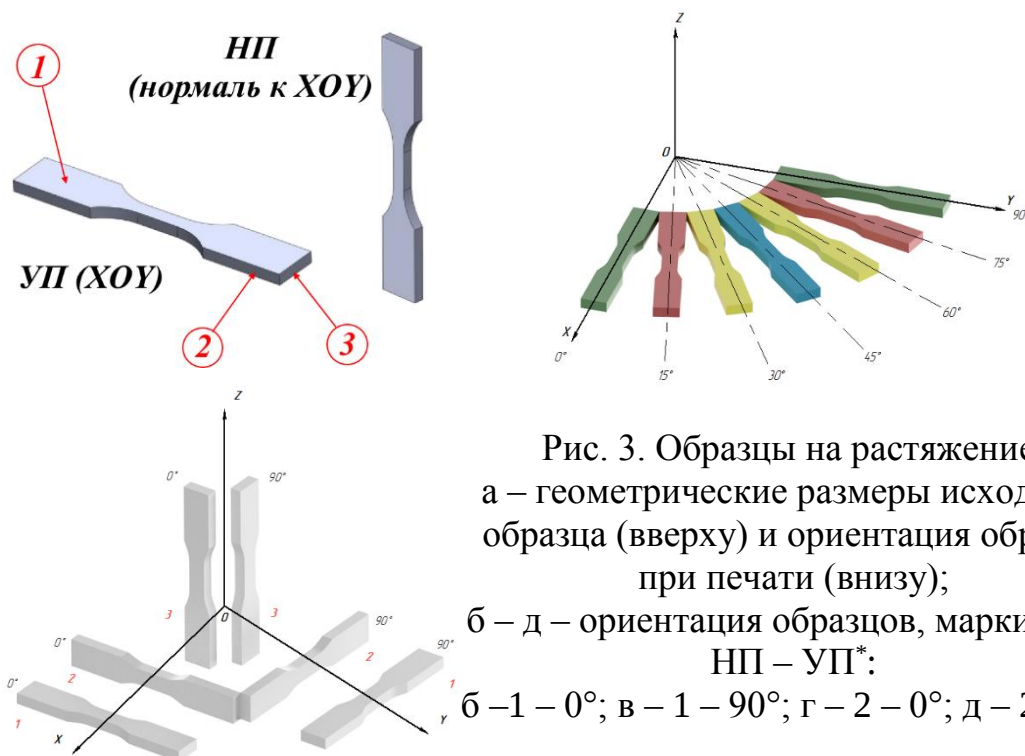


Рис. 3. Образцы на растяжение:
а – геометрические размеры исходного образца (вверху) и ориентация образца при печати (внизу);
б – д – ориентация образцов, маркировка НП – УП*:
б – 1 – 0°; в – 1 – 90°; г – 2 – 0°; д – 2 – 90°

Подобная форма кривых говорит о том, что материал образцов является не чистым аморфным полимером, а полимером с частично кристаллизованной структурой. Начало второго участка сопровождается образованием микротрещин, которые начинают развиваться от наиболее слабого микрообъема материала. Образование микротрещин было зафиксировано на боковой бочкообразной поверхности образца в виде множественных пересекающихся под прямым углом линий. В ходе вязкого разрушения при осадке происходит раскрытие наружной формирующейся бочкообразной поверхности образца по его образующей, начиная с поверхности торца, причем наиболее слабым торцом являлся тот, который был опорным основанием образца в процессе его трехмерной печати. Дальнейшее деформирование образца ведет к разрушению его внутренней каркасной структуры. Полученные машинные диаграммы приведены на Рис. 4.

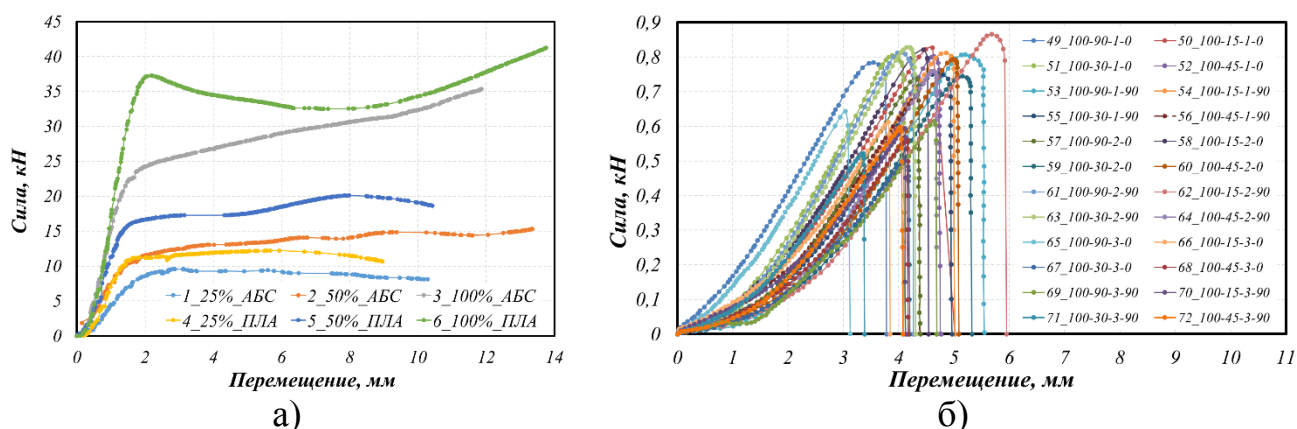
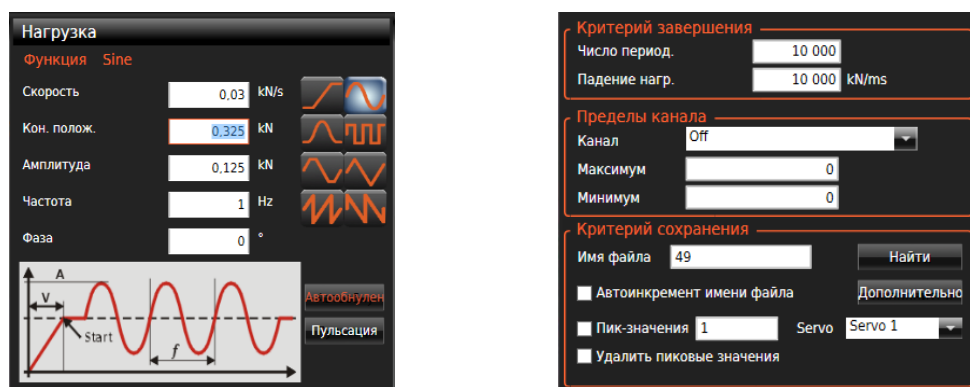


Рис. 4. Графики сила-перемещение для случая одноосного сжатия (а) и растяжения (б)

Несколько образцов были исследованы на усталостную прочность по циклической программе нагружения, представленной на Рис. 5.



а)

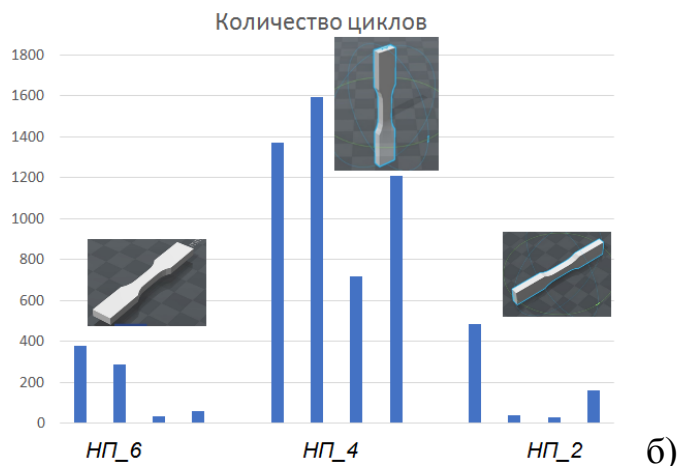


Рис. 5. Эксперимент на усталостную прочность: программа теста (а) и результаты экспериментов на усталостную прочность (б).

Была установлена зависимость НП от времени разрушения, а именно: при ориентации высоты образцов в направлении роста кол-во выдерживаемых циклов и время до разрушения возрастало в 4 раза (рисунок 5б).

Поскольку образцы имеют отклонения от формы, позволяющей однозначно определить деформацию по одному из направлений, так как имеет место быть сильная потеря устойчивости, то оценка прочностной характеристики материала была заменена оценкой энергопоглощающей способности (Рис. 6а, б). Полученная информация была сопоставлена с данными для металлических материалов и определена нелинейная зависимость её изменения (Рис. 6в).

Был зафиксирован менее интенсивный рост температуры, чем у металлического материала, в процессе пластической деформации.

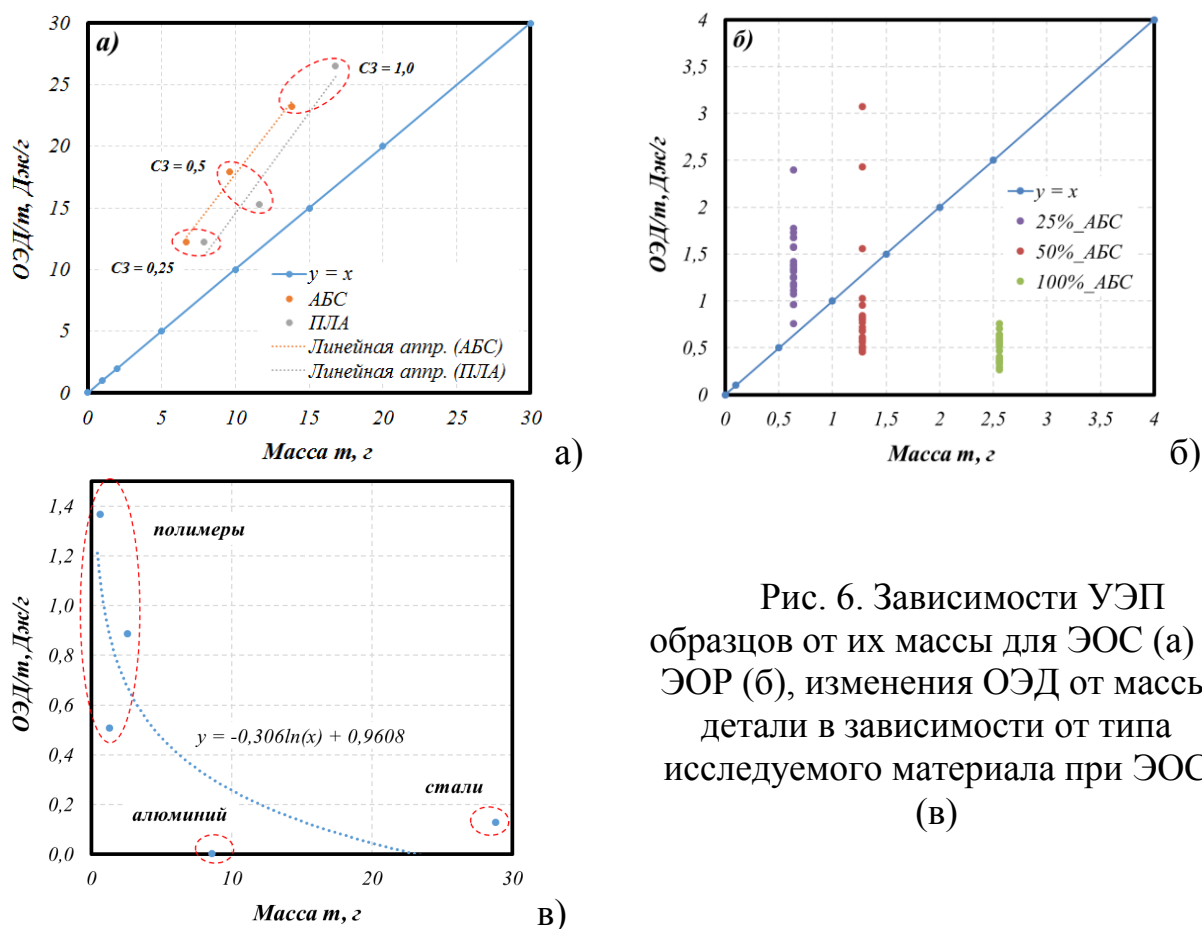


Рис. 6. Зависимости УЭП образцов от их массы для ЭОС (а) и ЭОР (б), изменения ОЭД от массы детали в зависимости от типа исследуемого материала при ЭОС (в)

Помимо экспериментальных данных, по определению максимальной силы разрушения, проводилось изучение изменения геометрии структуры при 3D-печати. Было установлено, что структура ослабляется в результате изменения формы поперечного сечения каждого филамента, появление нежелательной пористости, связанной с особенностью технологии, и, тем самым, прототип получает анизотропию свойств по всему объёму (объёмная анизотропия) (рисунок 6).

Таким образом можно сделать вывод о том, что помимо устанавливаемого процента пористости в прототипе развивается нежелательная пористость, контроль за которой на этапе реализации технологии FFF невозможен или очень трудоёмок. Отсутствие точной информации о внутреннем строении образца приведёт к тому, что предел прочности материала будет сильно изменяться в условиях одноосного сжатия/растяжения. Были сделаны следующие выводы для рассматриваемых термопластичных полимерных материалов:

- с ростом СЗ и плотности материала растёт и удельная энергопоглощающая способность материала;
- параметры ориентации (УП и НП) образцов на растяжение влияют на вид машинной диаграммы (её пологость), а СЗ влияет на максимальную силу разрушения материала;
- чем выше СЗ внутренней части образца, тем более единообразный вид имеют графики сила – перемещение;
- сочетание высокая сила к высокой степени деформации (без разрушения) выше у образцов на растяжение с ориентацией $2 - 0^\circ$ или $2 - 90^\circ$ (НП – УП*) с УП = 45° ;
- УЭП изменяется по логарифмической зависимости, причём наибольшее значение получены для полимеров;
- рекомендуется сопоставлять УЭП для образцов с одинаковой массой.

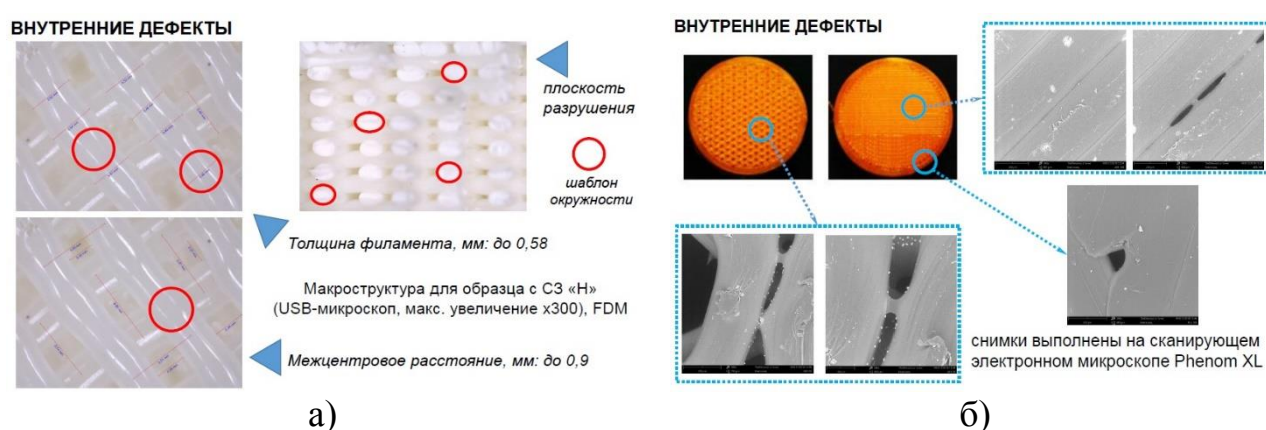


Рис. 7. Определение технологических дефектов прототипа при 3D-печати: изменение геометрии филамента (а) и неконтролируемое появление внутренних пор (б)

В четвёртой главе рассмотрен вопрос о влиянии параметров сканирования на точность реконструкции 3D-модели. Для проведения оцифровки напечатанных из полимеров образцов и определения степени точности/ошибок сканирования

применялся статический 3D-сканер на основе структурированного подсвета RangeVision двух модификаций: Professional, в котором точность которого определяется путём смены окуляров камер, и Spectrum, смена окуляров в котором не производится, а фокус настраивается автоматически. Экспериментальным путём были получены качественные 3D-модели, на поверхности которых имелись геометрические особенности. На детали «Кронштейн двигателя» (Рис. 8) невозможно получить одинаково хорошее качество для всей детали и идентификационной метки, так как последняя имеет достаточно малые размеры. Поэтому требовалось получение 3D-сканов, выполненных на разных окулярах камер, и объединение результатов.

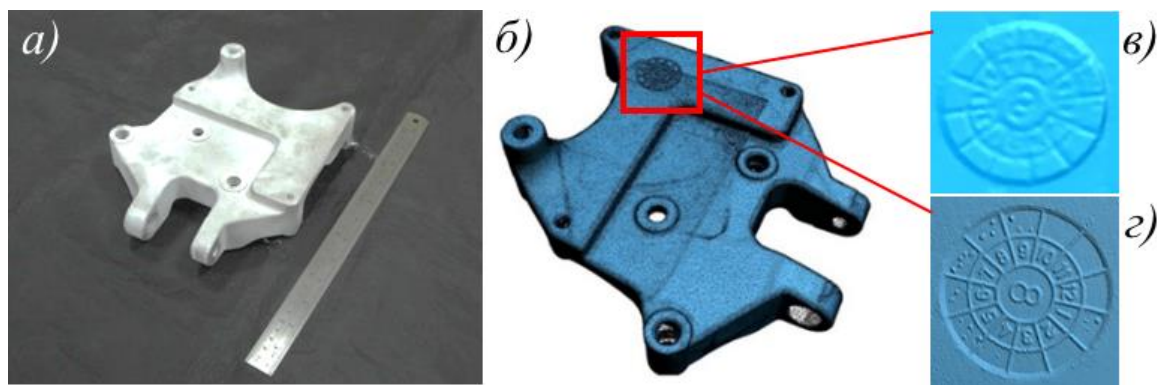


Рисунок 6. Пример получения детализированного изображения идентификационной метки кронштейна двигателя.

При производстве изделий по технологии FDM/FFF особое внимание уделяется качеству получаемого изделия, которое оценивалось по совокупности параметров, оцениваемых численно. Так, стандартными средствами измерения, такими как штангенциркуль, радиусомер, резьбомер, микрометр и т.д. определяются геометрические размеры с определённой точностью. Более качественным способом оценки являются измерения на координатно-измерительных машинах (КИМ), которые, однако требуют специальной подготовки оператора и специального оборудования (Δ_{3D-n}). Далее, определяется пористость (α) при помощи, например, пикнометров, включающая в себя не только отсутствие материала в результате заданного снижения процента/степени заполнения внутренней части полигональной геометрии, настраиваемой на этапе создания управляющей программы (gcode), но в результате появления дефектов 3D-печати, например, деламинация слоёв, попадание воздуха внутрь выдавленного филамента и другие. Помимо прямых дефектов существуют и ошибки в процессе полигонизации при переходе от полученных после 3D-сканирования точек к stl-модели. Их оценка является более трудоёмкой задачей, так как полигонизация выполняется в программах, например, Geomagic, в которых инструменты не оценивают ошибку, а удовлетворяют требованиям оператора, т.е. высокая точность stl-модели (Δ_{3D-m}) может быть получена/не получена оператором, который в совершенстве владеет/не владеет виртуальными инструментами программного обеспечения (ПО). В общем случае точность, численно выражаемая через ошибку сканирования (Δ_{Σ}), определяемая в микрометрах, может быть описана простой суммой трёх факторов по уравнению (1).

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{3D-n} + \Delta_{3D-c} + \Delta_{3D-m} \quad (1)$$

где Δ_{3D-n} – ошибка 3D-печати; Δ_{3D-c} – ошибка 3D-сканирования; Δ_{3D-m} – ошибка в результате обработки облака точек и создания stl-модели.

Оптическое сканирование применяется во многих отраслях: в машиностроении, медицине, ветеринарии, пищевой и других. В работах, относящихся к области оптического 3D-сканирования в машиностроении, исследуются следующие вопросы: точность, получаемая после матирования поверхности специальным составом на основе порошков кальция или оксида титана, с определением влияния размеров частиц покрытия на ошибку сканирования; точность определения шероховатости поверхности бетонного блока до и после пескоструйной обработки; точность оценки эффекта пружинения листового материала после гибки; степень износа инструмента для горячей штамповки и точность описания дефектов поковки; точность сканирования 3D-сканеров со структурированным подсветом; точность 3D-сканеров со структурированным синим подсветом для различных геометрических тел и калибровочных полей. Видно, что технологии оптического 3D-сканирования имеют много особенностей и требуют детального изучения, по результатам которого можно определить ошибку Δ_{3D-c} .

Рассмотрены 3D-модели прототипа «Крыльчатка», полученные прямым моделированием, а также сканированием. Установлено, что при заданной степени заполнения 35% разность в 2 – 5%, при сравнении с массами цифровых моделей, может быть объяснена наличием ошибок 3D-печати.

Для учёта всех особенностей бесконтактного метода оценки точности прототипа, полученного по технологии аддитивного производства, необходимо учитывать ошибки печати, сканирования и разработки 3D-модели по облаку точек. Эти три главных компонента могут быть представлены более расширенно и рассмотрены, как совокупность ошибок, связанных с конструктивными особенностями 3D-принтера, опытом оператора и условиями окружающей среды, в которой проводятся работы. Исходя из сказанного общая ошибка сканирования может вычисляться по уравнению 2.

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{3D-n} + \Delta_{3D-c} + \Delta_{3D-m} = (\Delta_{СПО} + \Delta_{СПТ}) + (\Delta_{НС} + \Delta_{ОС} + \Delta_{ОСО}) + (\Delta_{ППО} + \Delta_{ВОО} + \Delta_{ПР}) \quad (2)$$

где Δ_{3D-n} – погрешность 3D-печати; Δ_{3D-c} – погрешность 3D-сканирования; Δ_{3D-m} – погрешность в результате обработки облака точек и создания stl-модели; $\Delta_{СПО}$ – 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 САИ.

Некоторые представители исследованных на сжатие образцов были оцифрованы. Без смены окуляров камер были получены результаты, на которых отчётливо видны три артефакта (Рис. 7): лишние углубления, отсутствие разрыва поверхностей и сглаживание острых ребер.

Это свидетельствует о том, что в случае реальных производственных условий достоверная информация об изменениях в геометрии после деформации получена не будет.

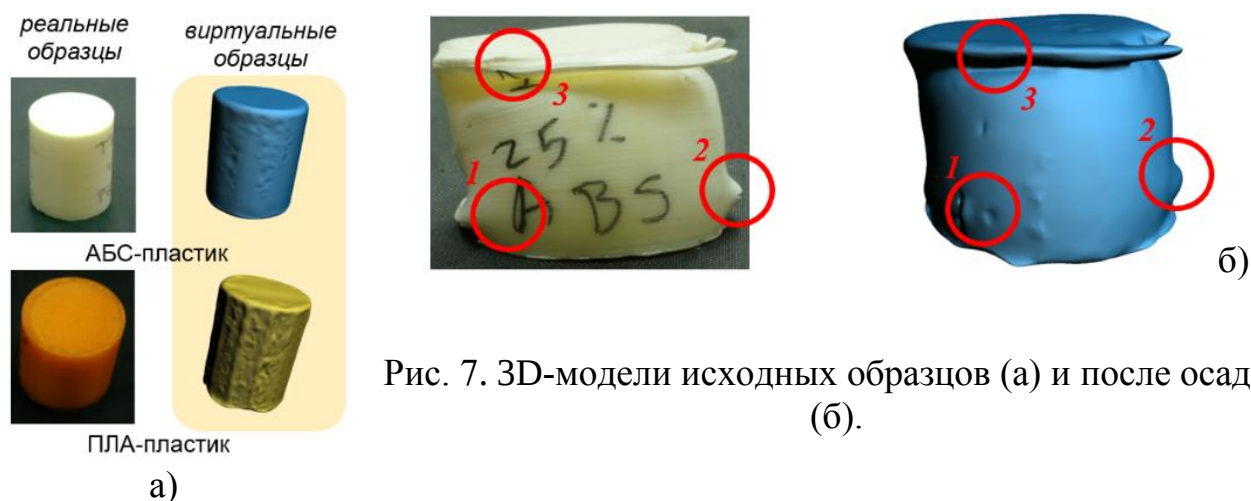


Рис. 7. 3D-модели исходных образцов (а) и после осадки (б).

Для улучшения результата сканирования необходимо, чтобы предварительно была проведена оценка возможных мест образования дефектов, в соответствии с которыми 3D-сканер автоматически выберет области, для которых будет выбран другой окуляр или проведена автофокусировка на более малоразмерном элементе, например, трещина, или автоматическое переключение на фотограмметрию, получения данных по уникальным областям, реконструкция этих областей и добавление к общему результату 3D-сканирования.

Кроме этого, при 3D-сканировании поковки после штамповки необходимо учитывать появление остатков смазки на поверхности поковки и небольшое повышение температуры в результате пластической деформации (ХОШ до 200°C), что негативно отражается на результате сканирования. Поэтому перед проведением процедуры 3D-сканирования обязательно следует проводить очистку поверхности. В течение этого времени температура поверхности снизится до комнатной. В случае, если поверхность после очистки рассеивает свет неравномерно, применяют специальное матирующее покрытие. Также его применяют и при 3D-сканировании тонколистовых и прозрачных объектов.

В пятой главе рассмотрен вопрос о влиянии исходной геометрии заготовки на результат численного моделирования процесса ЭОС и ЭОР, а также высадки заготовки карданного болта с шестигранной головкой методом ХОШ.

Моделирование в ПО QForm VX пористых материалов, являющихся эквивалентом СЗ полимерных образцов, велось по модели плотности Р. Дж. Грина, представленная уравнениями 3 – 5, в которой задание изменения плотности материала по сравнению с исходным значением осуществлялось через задание

значения относительной плотности (β), изменяющийся от 0 до 1. Для воспроизведения более реального случая СЗ были рассмотрены случаи заполнения внутреннего пространства шестигранниками и кубами ($\beta = 0 \div 1$) и отсутствия заполнения ($\beta = 0$).

$$f(\sigma_{ij}) = A J_2 + B I_1^2 = \sigma_R^2, \quad (3)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] = \frac{\bar{\sigma}}{3}, \quad I_2 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_m, \quad (4)$$

$$\sigma_R^2 = \eta \sigma_s^2. \quad (5)$$

По результатам расчётов установлено, что сплошные образцы с идеальной геометрией обладают более высокой предельной деформацией. Варьируя относительную пористость можно получить снижение этого показателя как при деформировании в условиях ЭОС, так и в условиях ЭОР. Для получения более качественных результатов необходимо проводить глобальную адаптацию конечных элементов по объёму заготовки. В противном случае наблюдалось сильное огрубление результатов геометрии после инициализации процесса расчёта. Однако, с другой стороны, это приводит и к увеличению затрачиваемого машинного времени, и к повышению объёма обрабатываемых и сохраняемых данных (Рис. 8).

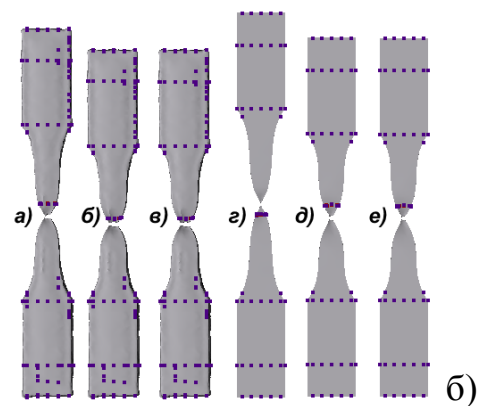
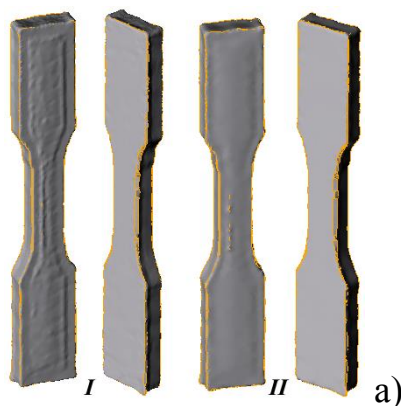
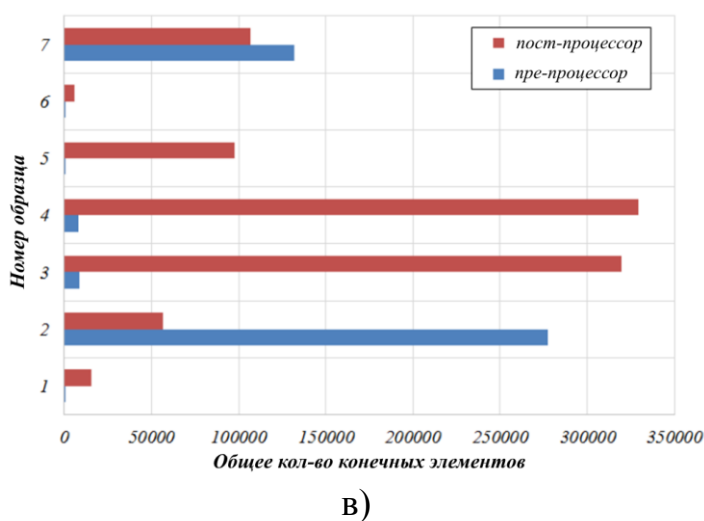


Рис. 8. Реальная модель до (I) и после (II) дискретизации в программе QForm на этапе пре-процессинга (а); образцы на растяжение для трёх рассмотренных материалов (слева-направо, попарное соответствие: 08кп, АБС- и ПЛА-пластики): (а) – (в) – для образцов, после 3D-сканирования (г) – (е) – для образцов после прямого моделирования в САД (б); в – изменение количества КЭ до начала и в конце расчёта



Для моделирования реального процесса был выбран процесс штамповки карданного болта с шестигранной головкой (Рис. 9) в условиях холодной деформации на предприятии «Параллель» (г. Орёл, Россия). Было выполнено пять расчётов моделирования многопозиционного процесса:

1. начиная от отрезки заготовки (ЗГ1) на первой операции и с ОБП1 на пятой операции;
2. с загрузкой САД-модели заготовки с вогнутыми торцевыми гранями (ЗГ2) на второй операции и с ОБП1 на пятой операции;
3. с загрузкой твердотельной модели заготовки, полученной по результатам 3D-сканирования (ЗГ3), на второй операции и с ОБП1 на пятой операции;
4. 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);
5. 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).

Поскольку в текущей версии QForm модель разрушения не предусмотрена, после сдвиговой деформации на позиции отрезка геометрия заготовки, состоящая из двух частей, выгружалась в сеточный формат (stl), проводилось преобразование в твердотельную модель и удаление ненужной части заготовки.

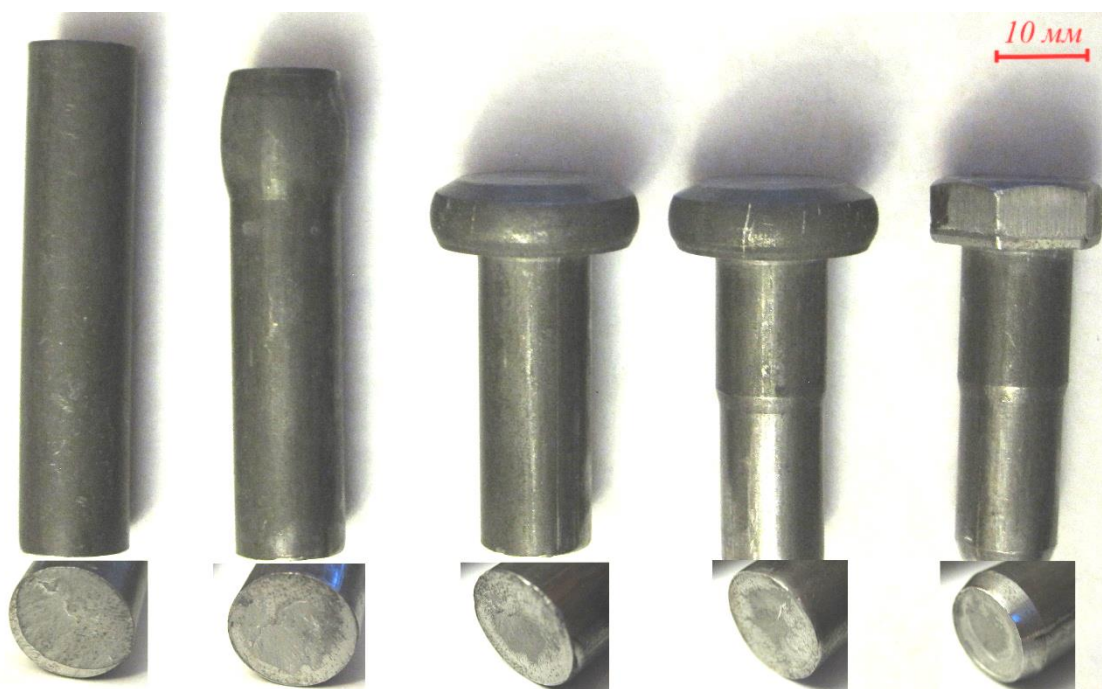


Рис. 9. Поковки заготовок болта, представлены для пяти переходов

Показано, что при моделировании заготовок с косым торцом, полученным после отрезки заготовки от прутка, с торцом, имеющим углубления, полученные в САД, и с реальной геометрией, полученной после компьютерного моделирования, были получены три разных результата. На Рис. 10 показаны машинные диаграммы сила – ход для последней обрезающей операции (формирование шестигранной головки) пяти вариантов и изменение высоты утяжины. На Рис. 11 показаны изменения

нижних торцевых поверхностей до и после деформации по результатам моделирования. Сравнивая результаты моделирования можно сказать, что большее совпадение результатов получается для геометрии заготовки, полученной после 3D-сканирования, и с локальной адаптацией сетки в нижней области ножки болта, максимальный размер конечного элемента в которой составил 0,1 мм. В этом случае образуется наиболее близкая по глубине, характерная утяжина на торце заготовки, не влияющая на качество итогового изделия, т.е. не являющаяся производственным браком. На Рис. 12 представлены stl-модели облоя после обрезной операции. Наиболее близкие к реальным результатам были получены для ОБП2 (варианты 5 и 6). Однако, толщина облоя в центральной части отличается в два раза от экспериментального результата, так как в проведённых вариантах расчётов не была учтена геометрия нижнего инструмента.

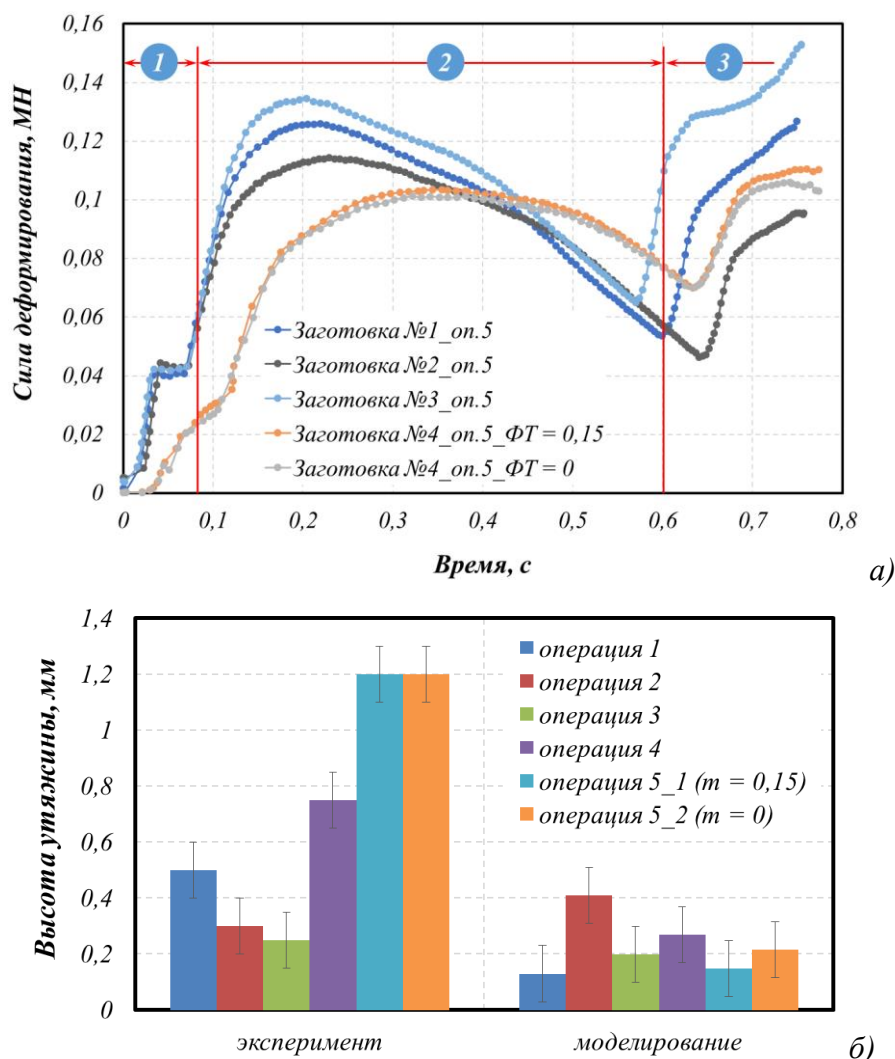
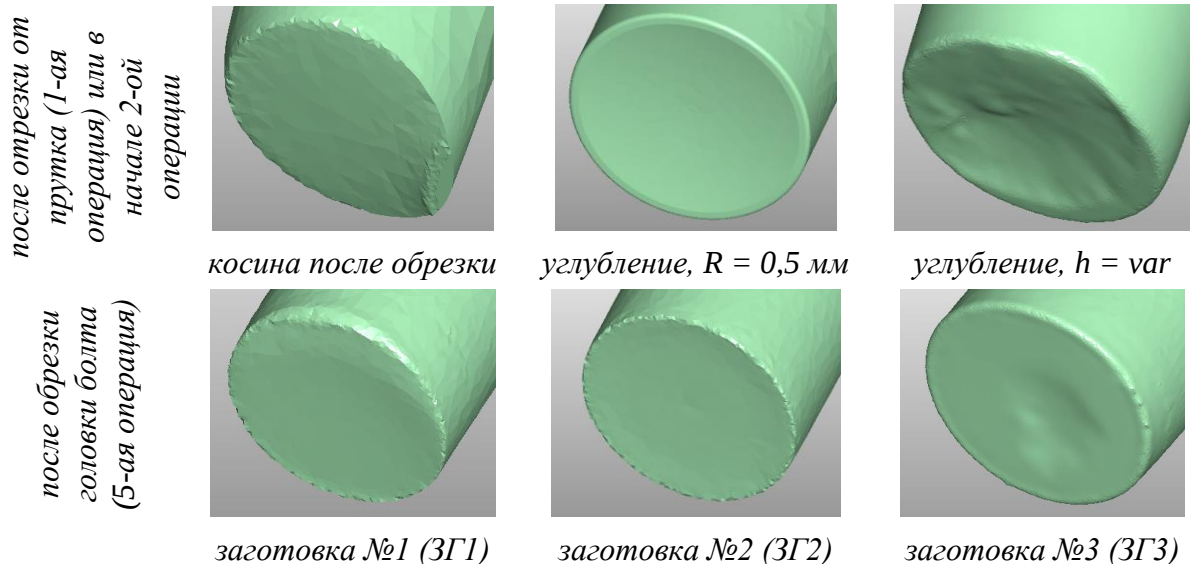
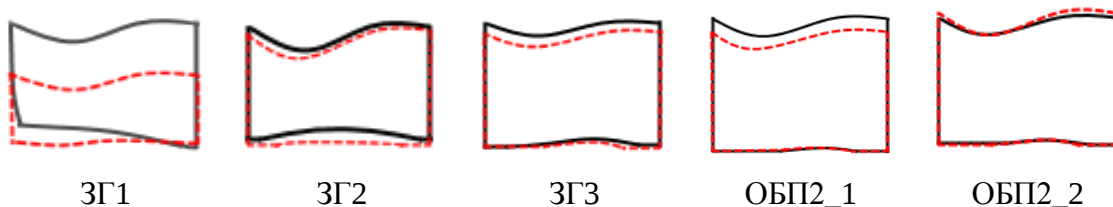


Рисунок 10. Машинные диаграммы после пятой операции и гистограмма изменения высоты утяжины.



а) торцы получаемых заготовок процесса высадки заготовки болта



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

Рисунок 11. Изменение кривизны нижнего торца заготовки в начале и в конце процесса.

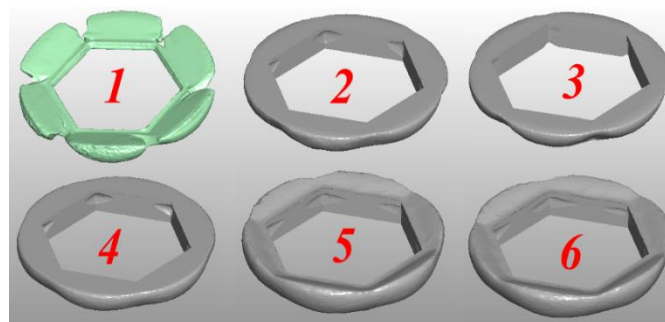


Рисунок 12. Вид облоя после выполнения пятой операции: 1 – эксперимент; 2, 3 и 4 – обрезной пуансон (ОБП1) с плоским торцом, варианты ЗГ1 – ЗГ3; 5 и 6 – обрезной пуансон с фигурным торцом (ОБП2), варианты ОБП2_1 и ОБП2_2.

В шестой главе представлен алгоритм реализации оптимизации процесса штамповки с настройкой оборудования, основанной на 3D-геометрии поковки и её сравнения с результатами численного моделирования.

Упрощённая схема реализации процесса контроля цифровой прессовой линии показана на Рис. 12. 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.

Ключевым шагом является сравнение полученной 3D-геометрии с результатами численного моделирования. На этом этапе возможно развитие двух сценариев. В случае первого сценария совпадение найдено и тогда происходит сравнение текущих технологических параметров на участке штамповки с параметрами численного моделирования. Далее принимается решение о внесении изменений в настройки оборудования. Во втором случае совпадений не найдено и численное моделирование проводится для реальной геометрии поковки, причём сначала реконструируется 3D-модель поковки, далее по ней проектируется инструмент, далее проводится численное моделирование и, наконец, определяются технологические параметры и возможные дефекты инструмента в результате износа или циклического нагружения. После этого определяется необходимость либо изменения технологических параметров на производственном участке, либо остановке прессы и замены инструмента.

По результатам операций, а также по результатам компьютерного моделирования система принимает решение в автоматическом режиме или после ручного подтверждения оператором согласия на изменение только тех технологических параметров в прессовой линии (темп штамповки, энергия удара, скорость деформирования и т.д.), которые непосредственно влияют на устранение дефектов. Алгоритм управления в виде блок-схемы представлен на Рис. 13.

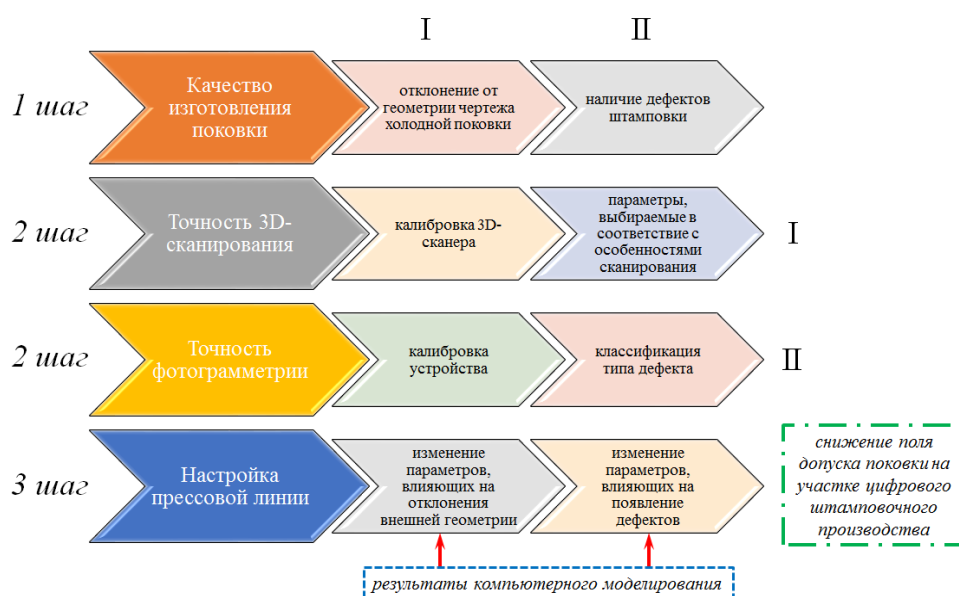
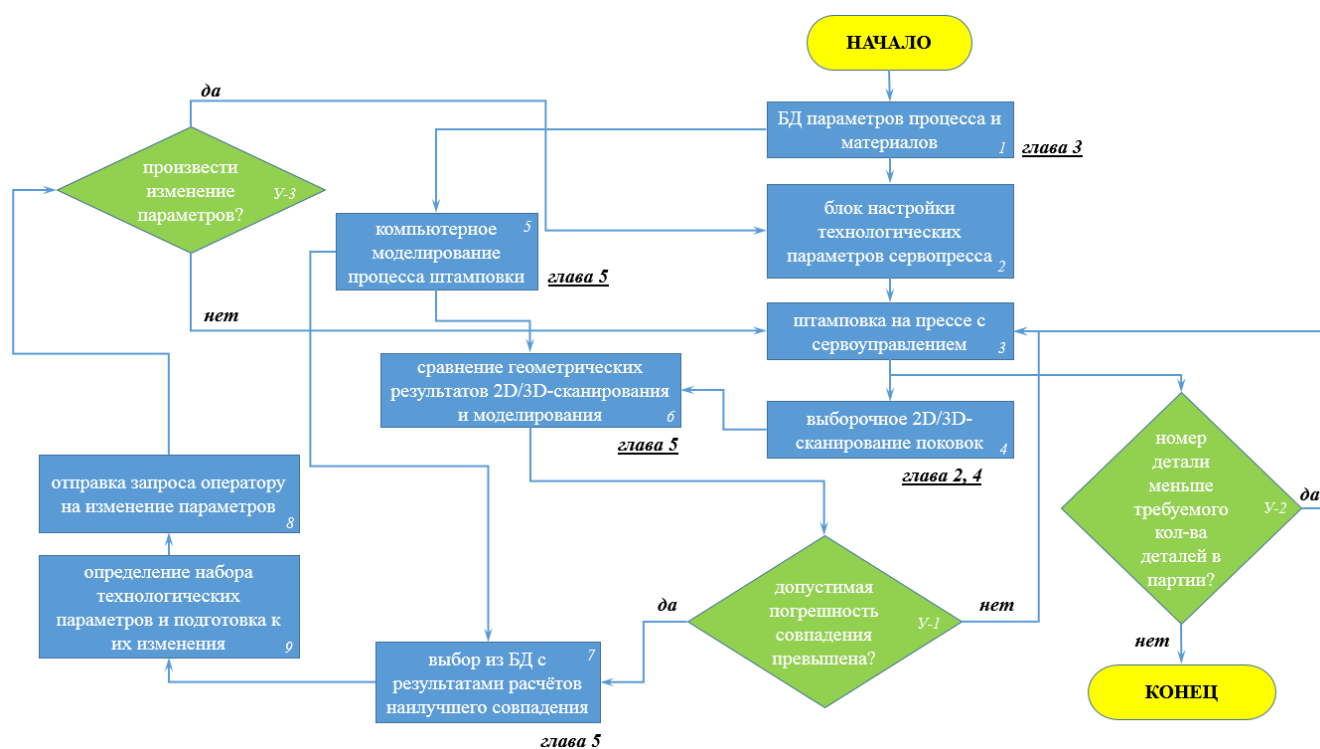


Рис. 12. Схема управления оптимизацией процесса (римскими цифрами обозначены уровни)

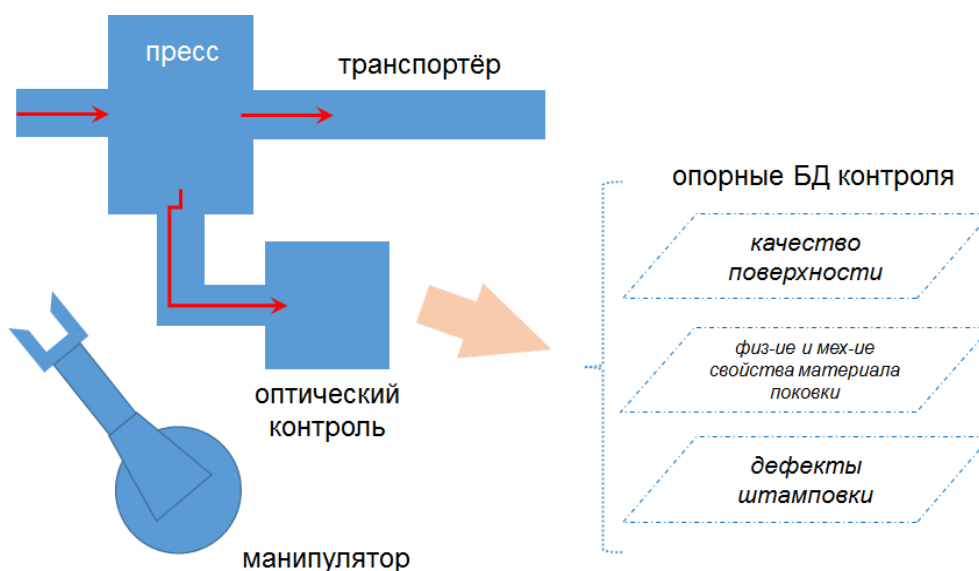
Качество изготавливаемой продукции может регламентироваться глубиной проведения оптического сканирования, т.е. учитывать требуемое качество поверхности, сортировку поковок по наличию дефектов, прогнозирование свойств по конечной степени деформации и особенности течения металла.

В ходе проведения экспериментов на производственной площадке ООО «Параллель» была также определена последовательность проведения 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 производительность 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-сканирование. 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. 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) и показана на Рис. 14. В цепочку оборудования была включена операция фотограмметрической проверки и накатки резьбы (скорость накатки на автомате составляет 60 шт./мин.).

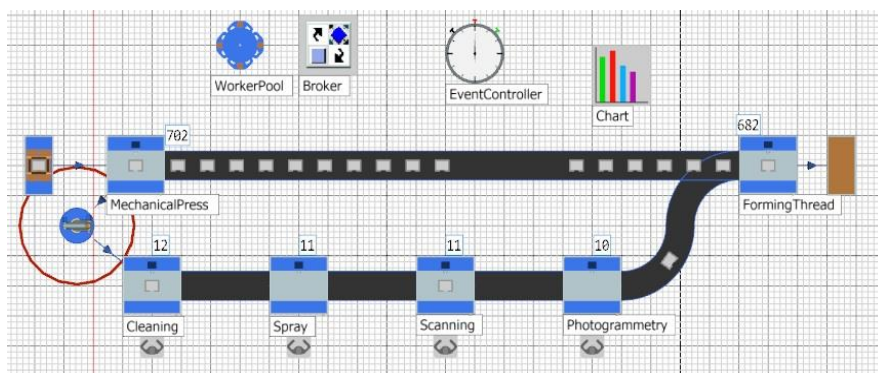


а) основная блок-схема (верхний уровень)

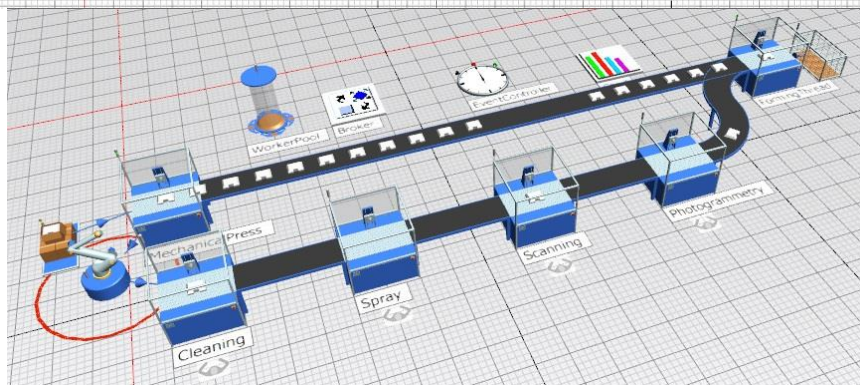


б) уровни контроля при проведении оптического сканирования

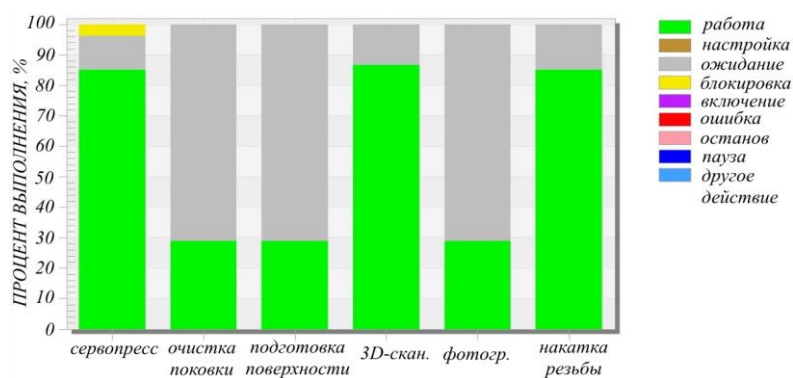
Рис. 13. Блок-схема управления прессовой линией



а) 2D-вид участка



б) 3D-вид участка



в) столбчатая диаграмма загрузки оборудования на участке

Рис. 14. Организация производственной цепочки для реализации алгоритма

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

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

2. Установлено влияние степени заполнения (СЗ) образцов из модельного 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 и результаты распространены на металлические материалы при помощи логарифмической зависимости.

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

4. Разработан алгоритм настройки прессы 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Петров М.А., Эльдиб И.С.А., Куров А.Н., Численное моделирование холодной объёмной штамповки заготовки болта с шестигранной головкой с применением уточнённых 3D-моделей, Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2020, №3, стр. 32 – 40 (**BAK**).

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

3. Петров М.А., Эльдиб И.С.А., 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.

4. Прасолова А.А., Куликов М.А., Эльдиб И.С.А., Воронков В.И., Анализ возникновения дефекта на поверхности холодноштампованной детали «Корпус» при помощи компьютерного моделирования, Известия Тульского Государственного Университета. Серия: Технические науки, 2019, №5, стр. 269 – 276.

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

6. Эльдиб И.С.А., Петров М.А., 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.

7. Петров М.А., Эльдиб И.С.А., Смирнов А.Д., Косачев Н.В., Методика определения удельной энергопоглощаемости полимерных образцов, изготовленных по технологии 3D-печати, Известия ТулГУ. Серия: Технические науки, 2019, №12, стр. 110 – 117.

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