

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
(наименование)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Цифровые процессы и системы автоматизированного машиностроения
(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Исследование напряженно-деформированного состояния деталей
машиностроения

Обучающийся

А.Г. Заворотнюк

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный руководитель

к.т.н., доцент В.А. Гуляев

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024 г

Содержание

Введение.....	3
1 Анализ крепежных элементов для фиксации деталей	7
1.1 Виды крепежных элементов, используемых в автомобильной отрасли.....	7
1.2 Анализ материалов, применяемых для крепежных элементов	8
1.3 Способы изготовления пластиковых крепежных элементов.....	14
2 Аналитическое исследование прочности крепежных элементов.....	20
2.1 Факторы, влияющие на работоспособность пластиковых изделий....	20
2.1.1 Влияние термического нагружения на изменение механических свойств пластиковых элементов.....	20
2.1.2 Внутренние напряжения в изделиях, выполненных методом литья под давлением	23
2.1.3 Влияние конструкции проектируемых упругих элементов на работоспособность изделия.....	26
2.1.4 Влияние процесса изготовления на качество полученного изделия.....	34
2.2 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния исследуемых зажимов.....	38
2.2.1 Характеристики для анализа напряженно-деформированного состояния с помощью МКЭ.....	38
2.2.2 Конечно-элементный анализ пластикового зажима	49
3 Проведение экспериментальных исследований	57
3.1 Анализ технологий для получения прототипов.....	57
3.2 Прототипирование образца изделия.....	68
3.3 Анализ работоспособности прототипных изделий.....	71
3.4 Сравнение вычисленных и экспериментальных результатов.....	73
Заключение.....	75
Список используемой литературы и используемых источников.....	76

Введение

Пластмассы играют одну из важнейших ролей в автомобильной промышленности. Сложно было бы представить современный автомобиль, в котором не использовались бы пластмассовые элементы. Использование пластмасс в автомобилестроении имеет множество преимуществ, таких как: комфорт, безопасность, низкая стоимость, снижение веса, устойчивость к коррозии и ударам, потенциал интеграции и свобода дизайна. Благодаря этим преимуществам пластмассы прочно заняли свое место в дизайне кузовов автомобилей и в будущем будут продолжать играть важную роль в автомобилестроении.

Одной из основных областей применения пластмасс является внутренняя и внешняя отделка кузова транспортных средств. Использование пластмасс для изготовления наружных деталей началось в 1960-х годах, и сегодня пластмассы можно использовать для широкого спектра применений. За последние годы доля пластмасс, используемых для изготовления наружных деталей, значительно возросла. В настоящее время 30 % экстерьеров автомобилей изготавливаются из пластика. Тяжелый стальной бампер и стеклянные линзы фар являются примерами деталей, подлежащих замене на пластмассовые. Внешние детали, замененные пластмассовыми, полностью интегрированы в кузов и используют преимущества пластмасс в дизайнерских целях [1, с. 3-6].

Внешние пластиковые детали могут крепиться к кузову автомобиля с помощью пластиковых зажимов, болтов или других крепежных элементов. В данной статье основное внимание уделяется пластиковым зажимам. Пластиковые зажимы являются альтернативой традиционным металлическим зажимам и являются распространенными компонентами автомобилей. Они имеют множество применений и выпускаются в широком разнообразии стилей и размеров, что позволяет использовать различные материалы и размеры панелей.

В автомобилестроении пластиковые зажимы используются для соединения элементов отделки с металлическими панелями кузова автомобиля. Они должны соответствовать некоторым требованиям, таким как: высокое качество и высокая надежность, долговечность, возможность установки в отверстия деталей и удержания элементов отделки, а также обеспечивать минимальное усилие вытягивания, чтобы элемент отделки можно было снять, не повредив панель автомобиля. Использование пластиковых зажимов в автомобильной промышленности имеет много преимуществ, таких как: возможность упрощения сборки и процесса монтажа, экономия энергии и затрат на производственной линии, устойчивость к коррозии и малый вес [2, с. 315].

Недостатком металлических зажимов является то, что при установке металл может повредить покрытие, нанесенное на панель автомобиля, что может привести к возникновению проблем с коррозией. Все пластиковые зажимы были разработаны для уменьшения повреждений панели автомобиля. Также недостатком пластиковых зажимов является невозможность соответствовать многократному вытягиванию или удерживающему усилию, создаваемому металлическими зажимами.

Актуальность темы исследования заключается в том, что начиная с 2022 года в отношении Российской Федерации были введены различные санкции, в том числе связанные с возможностью поставки деталей для автомобильной отрасли. На сегодняшний день российская автомобильная промышленность испытывает дефицит деталей оригинальной конструкции в том числе крепежа. В настоящее время в России отсутствуют поставщики, обладающие определенными технологиями, например тонколистовой штамповки для производства крепежа.

Объектом данной работы является напряженно-деформированное состояние пластиковых деталей транспортных средств.

Предметом работы выступает конструкция фиксатора для крепления деталей внутренней отделки автомобиля.

Цель исследования заключается в изучении напряженно-деформированного состояния пластиковых изделий.

Содержание указанной цели определило постановку следующих задач.

- проанализировать конструкцию, материалы, способы изготовления крепежных элементов и выбрать оптимальный для применения в детали-аналоге;
- проанализировать факторы, влияющие на конструкцию пластиковых изделий;
- выполнить анализ методом конечных элементов для определения усилий и напряжений в оригинальной детали и детали-аналоге;
- изготовить прототип и провести испытания для подтверждения конструкции;
- провести сравнение между проведенными экспериментами.

При проведении исследования использовались общенаучные и частные методы познания.

Практическая значимость заключается в минимизации рисков остановки производства действующих и переноса сроков разрабатываемых проектов, в виду применения существующих в РФ технологий для изготовления импортзамещаемых деталей.

Научная новизна исследования заключается в том, что была разработана электронная модель пластикового зажима с характеристиками, не уступающими аналогичной детали из металла без необходимости изменения окружающих деталей интерьера автомобиля, что позволит исключить дополнительные инвестиции для изменения действующей оснастки.

Данная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемых источников.

В первой главе дается анализ существующих конструкции крепежных изделий, их характеристик, условий применения, материалов и технологий их изготовления.

Вторая глава посвящена аналитическому исследованию прочности крепежных элементов, факторам, влияющим на работоспособность при использовании, выбору материала и проведению анализа методом конечных элементов.

В третьей главе рассматриваются методы прототипирования деталей для проведения экспериментальной части, проверки работоспособности их, а также проведению сравнения полученных результатов с виртуальными исследованиями.

В работе была разработана электронная модель пластикового зажима с характеристиками, не уступающими аналогичной детали из металла без необходимости изменения окружающих деталей интерьера автомобиля, что позволило исключить дополнительные инвестиции для изменения действующей оснастки.

Заключение содержит выводы по проанализированным проблемам.

1 Анализ крепежных элементов для фиксации деталей

1.1 Виды крепежных элементов, используемых в автомобильной отрасли

Все детали в автомобиле должны быть правильно установлены и закреплены. Для крепления различных деталей применяют различные виды крепежных элементов, такие как, клипсы, втулки, зажимы, закладные и вытяжные гайки и другие. На этих деталях из пластика или металла держатся автомобильные молдинги, бампера, решетки, обивки стоек и дверей салона, багажника, а также шумопоглощающие детали подкапотного пространства.

Ассортимент автомобильных клипс очень широк. Каждый автоконцерн или альянс придерживается своих правил проектирования и уже ранее разработанных и освоенных крепежных элементов.

Современные клипсы из пластика и другие детали крепления для автомобилей имеют проверенную конструкцию и выполнены с соблюдением высоких стандартов качества.

В зависимости от назначения клипсы разделяют на универсальные и специализированные.

Универсальные могут применяться на нескольких моделях и марках автомобилей. Данные клипсы возможно подобрать под уже имеющееся отверстие. Специальные крепежные элементы подходят только под определенную функцию и используются для крепления конкретной детали, например, крепления подушки безопасности, стойки, молдинга дверей.

Клипсы по способу фиксации они делятся на три основные группы:

- нажимные клипсы (пистоны);
- с нажимным штырьком;
- с резьбовым фиксатором.

Для установки нажимных пистонов необходимо приложить усилие на его шляпку до полной фиксации в посадочное отверстие. Монтаж резьбовых

и нажимных клипс происходит в два этапа. Сначала защёлкивается вставка с раздвижными лепестками, затем в неё вкручивается винт или дощелкивается внутренний штырь.

Втулки и вытяжные гайки представляют собой крепежные изделия необходимые для фиксации в автомобиле деталей по средствам винтов и саморезов. Это важно, когда мы рассматриваем фиксацию деталей интерьера, участвующих в сертификации, в том числе на боковой и фронтальный удар. Данные элементы сначала монтируются в кузов и затем через деталь в них вкручивается винт. Данные изделия изготавливают из пластика и металла.

Различные виды крепежных элементов показаны на рисунке 1.



Рисунок 1 – Основные виды крепежных элементов

1.2 Анализ материалов, применяемых для крепежных элементов

Для производства автомобильного крепежа применяются различные виды материалов с разными физико-механическими свойствами и характеристиками. Так для крепления деталей подкапотного пространства клипсы должны обладать высокой термостойкостью, а данное свойство присуще не всем видам пластика.

Рассмотрим, основные виды пластика, используемые для изготовления крепежных элементов.

Полиамид 6 (РА6) (найлон-6, поликапроамид, капрон, капролон) – «нетоксичный конструкционный высокомолекулярный полимерный материал. Полимер обладает следующими физическими характеристиками: высокая твердость и механическая прочность, износостойкость, низкий коэффициент трения, малая плотность, хорошие антифрикционные и диэлектрические свойства. Полиамид 6 хорошо окрашивается, обладает хорошей способностью к склеиванию. Поверхность полиамидных материалов гладкая, устойчивая к выцветанию и изменению формы. Полимер не выделяет токсинов при контакте с пищевыми продуктами. Полиамид - один из самых дешевых и широко используемых полимеров» [18, с. 109].

«Полиамид химически стоек к воздействию масел, смазок, эфиров, бензина, дизельного топлива, керосина, спиртов, слабых кислот, разбавленных и концентрированных щелочей, органических растворителей, морской воды и пр. Полимер растворяется в концентрированной серной кислоте, фторированных спиртах, муравьиной кислоте. Муравьиной кислотой его можно склеивать. Кислота растворяет кромку, и при присоединении двух кусков полиамида 6 получается прочное соединение» [31, с. 105].

Полиамид 6 (РА 6) является высокопрочным материалом и имеет малую плотность. Этот вид пластика легче стали в шесть раз. Часто его используют для замены деталей из мягких металлов такие как латунь и бронза. РА 6 отличается прочностью и эластичностью в широком температурном диапазоне.

Основные свойства РА 6:

- механическая прочность: высокая прочность при растяжении (60–120 МН/м²) и изгибе (70–100 МН/м²);
- термостойкость: хорошая теплостойкость, выдерживает стерилизацию паром до плюс 140 °С;
- химическая устойчивость: устойчив к разбавленным кислотам и щелочам;

- эластичность и водопоглощение: значительное водопоглощение может ограничивать применение в некоторых условиях.

Основным недостатком полиамида является его «высокий уровень водопоглощения. Так, например, даже на воздухе, в зависимости от относительной влажности воздуха, полиамид-6 может впитывать в себя 2-3% влаги по массе. При выдерживании в воде продолжительное время полиамид-6 может впитать 6% воды, а для вторичного полиамида-6 этот показатель может иногда достигать 8%. Именно поэтому не рекомендуется использовать данный пластик для изделий, постоянно контактирующих с водой, ведь физико-механические свойства полиамида-6 насыщенного влагой заметно падают. Перед и после переработки полиамида-6 он должен быть тщательно высушен, иначе наличие влаги в экструдере (термопластавтомате) или хранение в неподготовленном месте может серьезным образом повлиять на качество конечной продукции не в лучшую сторону» [32, с. 54].

«Полиамид 66 (РА 66) (полигексаметиленадипамид) относится к алифатическим полиаидам, термопластам инженерно-технического назначения и представляет собой конструкционный кристаллизирующийся материал. За рубежом полимер обозначается как Polyamide 66, РА 66, РА 6.6, Nylon, Nylon 66. Полимер является продуктом поликонденсации адипиновой кислоты и гексаметилендиамина» [32, с. 54].

Стоит отметить, что нейлон отличается своей химической стойкостью, он устойчив к нефтепродуктам, топливу и растворителям. Сравнивая его с ПА 6 обратим внимание, что он меньше поглощает воды, а также обладает высокой теплостойкостью. Температура плавления равна 260°C. Полимер способен постоянно сохранять форму при температуре до 180°C и временно при 200°C.

«Две шестерки в альтернативном названии полиамид 66 соответствуют количеству атомов углерода в исходном мономере: 6 атомов в адипиновой кислоте и 6 - в гексаметилендиамина».

Достоинствами РА66 являются:

- полимер может быть вторично переработан. Добавление до 10% рециклата к первичному материалу не влияет на его физико-механические свойства;
- высокая защищенность материала при контакте с различными химическими соединениями, например, щелочами и СОЖ;
- воздействие гамма-излучения на материал не меняет его характеристик;
- обладает хорошей текучестью, высокой скоростью отверждения и коротким временем цикла;
- рекомендуется применять при точном литье.

Основными недостатками материала являются:

- достаточно высокий уровень водопоглощения;
- низкая стойкость к солнечной радиации (более стойкий по сравнению с РА 6);
- при нагревании на открытом воздухе термоокисляется, что ведет к снижению прочностных характеристик, например при выдержке при температурах от плюс 100 до плюс 120 °С предел прочности на растяжение снижается в пять раз. Окисление увеличивается при дополнительном воздействии ультрафиолета;
- сложности в процессе производства в виду высокой температуры плавления что увеличивает цену изделий из этого пластика;
- высокая стоимость материала.

«Полиацеталь, POM-C (полиформальдегид) – инженерный пластик конструкционного назначения с высокими физико-химическими свойствами, который применяется в большинстве сфер промышленности на сегодняшний день. Полиацеталь POM-C обладает высококристаллической структурой и сочетает высокий модуль упругости при растяжении и изгибе с достаточно большой ударной вязкостью, является одним из лучших материалов для изделий, которые подвергаются многократным повторяющимся

механическим воздействиям, ударным нагрузкам, растягиванию и вибрации. Еще POM-C обладает хорошими антифрикционными характеристиками, высокой стойкостью по отношению к органическим растворителям, щелочам, техническим жидкостям (кроме концентрированных кислот), воздействию ультрафиолета. Полимер легко окрашивается, допускает маркировку лазером, сварка производится при помощи ультразвука. Полиацеталь POM-C практически не впитывает влагу, детали из ацетала используют для работы в воде» [16, с. 202].

Основные характеристики POM-C:

- «плотная кристаллическая структура;
- высокая молекулярная масса и плотность;
- хорошая степень ударной вязкости, в том числе в диапазоне низких температур, эластичность и упругость;
- высокая прочность, твердость и жесткость;
- очень хорошие показатели трения/скольжения, устойчивость к истиранию, антиадгезионные свойства;
- высокая химическая стойкость, в особенности к щелочам, растворителям и топливу;
- хорошая стабильность в диапазоне рабочих температур;
- низкое поглощение влаги;
- хорошая стабильность размеров, даже при большой влажности и в водной среде;
- очень низкая диэлектрическая постоянная;
- может контактировать с пищевыми продуктами, человеком; физически инертный материал» [16, с. 203].

Полиацеталь используют при изготовлении деталей и частей механизмов, которые испытывают циклические нагрузки при температуре от минус 50 °С до плюс 90 °С (кратковременно может выдерживать до плюс 140 °С), а также подвержены воздействию коррозии, бензина и другим СОЖ.

Получил большое распространение в автомобилестроении, сельскохозяйственной отрасли, в медицине, а также при производстве бытовой техники и электроники.

«АБС-пластик – ударопрочная техническая термопластическая смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом (название пластика образовано из начальных букв наименований мономеров)» [14, с. 128].

Популярность и широкое распространению ABS-пластик получил благодаря техническим характеристикам и свойствам, которые выделяют его среди других, а именно:

- «высокие показатели износостойкости и прочности в сочетании с эластичностью;
- долговечность при условии эксплуатации без воздействия ультрафиолетовых лучей;
- высокая сопротивляемость воздействию моющих средств и щелочей
- устойчивость к воздействию влаги, кислот, масел;
- в нормальных условиях материал не токсичен;
- может эксплуатироваться при температурах от минус 40 °С до плюс 90 °С с сохранением технических характеристик;
- в чистом виде имеет матовую поверхность желтоватого оттенка, но при помощи пигментных добавок может окрашиваться в любые цвета и становиться прозрачным;
- легкость обработки различными методами (ручное шлифование, механическая полировка, химическое сглаживание и другое);
- высокая механическая прочность» [16, с. 208].

Но у данного материала так же, как и у других имеются минусы:

- сильный и резкий запах при плавлении;
- высокая температура плавления (около 230 °С);
- деформация при охлаждении;

– вероятность расслаивания при неравномерном остывании изделия.

ABS растворяется в определенном числе жидкостей таких как, ацетон, анилин, бензол, что накладывает определенные ограничения на использование деталей изготовленных из него.

«Широкое применение рассматриваемого материала обусловлено вариациями его производства, превосходных технических характеристик и регулируемостью свойств. Так, пластик встречается в автомобильной панели приборов, панелях внутренней и внешней отделки, рулевого управления, в дверных замках, бамперах и воздуховодах».

Для крепления деталей интерьера часто используют не только пластиковые клипсы, но и металлические. Данные клипсы должны иметь возможность снятия и вторичной установки, как минимум пять раз. Это обуславливается послепродажным обслуживанием автомобиля.

Металлические клипсы и зажимы покрываются различными противокоррозионными покрытиями, например хром цинк.

1.3 Способы изготовления пластиковых крепежных элементов

Один из самых распространенных и современных методов изготовления изделий из пластика является литье под давлением. Данный метод позволяет получать детали различной конфигурации. «Процесс изготовления изделий основан на заполнении формующей полости формы расплавом, его уплотнением за счет давления с последующим охлаждением» [21, с. 303].

«Литьем под давлением можно перерабатывать все без исключения термопластичные полимеры, вид и марку которых выбирают в зависимости от назначения изделий, прочности, теплостойкости и других свойств. Для литья под давлением обычно используют полимеры с показателем текучести расплава от 2 до 70 г/10 мин. Однако можно перерабатывать полимеры и с меньшей текучестью, но при этом требуется более высокая температура, что

не всегда допустимо, так как может произойти термическая деструкция [4, с. 201].

Процесс изготовления происходит за короткое время (рисунок 2), поэтому расплав входит в форму с высокой скоростью, что приводит к неизбежному его разогреву. «Степень ориентации повышается также за счет больших сдвиговых напряжений, возникающих в формующей полости, при течении расплава между двумя охлаждаемыми пластинами. Очень быстрое двухстороннее охлаждение расплава приводит к сильному изменению объема, а так как полимер охлаждается снаружи, то образующийся наружный твердый слой полимера препятствует уменьшению объема, поэтому возможно появление утяжин. Для предотвращения этого необходимо перед охлаждением повышать давление в форме. Однако охлаждение под высоким давлением затрудняет протекание релаксационных процессов и сильно изменяет условия кристаллизации» [27, с. 32].

С помощью литья под давлением изготавливают детали различной конструкции, поэтому сложно обеспечить равномерное охлаждение всего изделия, а значит релаксационный процесс в различных зонах изделия завершаются по-разному, поэтому после охлаждения детали в ней остаются внутренние напряжения, которые могут вызвать коробление, появление трещин и утяжин.

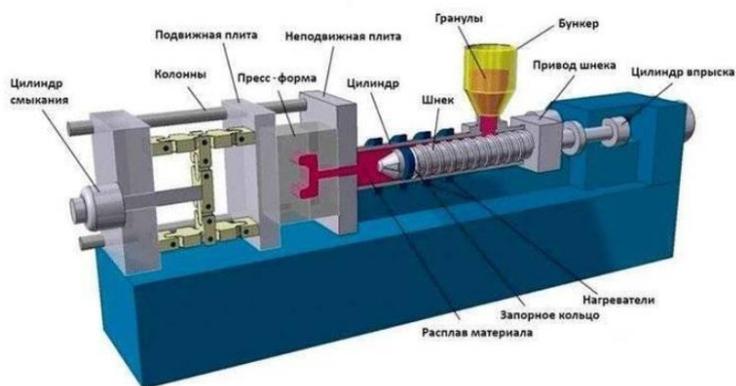


Рисунок 2 – Процесс литья под давлением

Метод литья под давлением обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами переработки пластмасс:

- «высокая производительность за счет нагрева термопласта вне литьевой формы, что позволяет впрыскивать расплав в непрерывно охлаждаемую форму;
- высокая точность размеров и чистота поверхности готовых изделий, которая сводится только к удалению следов литника, так как изделие не имеет заусенцев по плоскости разъема литьевой формы;
- экономичность, достигаемая вследствие небольшого износа литьевых форм (отсутствие трущихся частей, кроме шпилек и колонок) и небольших размеров формы;
- возможность изготовления изделий сложной конфигурации, тонкостенных, с арматурой, с длинными оформляющими знаками;
- возможность полной автоматизации процесса изготовления изделия.

Недостатки метода литья под давлением:

- большие начальные затраты на оборудование, высокая стоимость литьевых форм;
- сложность в получении изделий с большой разнотолщинностью без поверхностных или других дефектов. Рекомендуемая толщина изделия 3...4 мм» [4, с. 201].

«Процесс литья под давлением ведут на литьевых машинах с температурой литьевого цилиндра 160 – 280 °С (в зависимости от применяемого материала) выдавливанием расплавленной пластмассы в охлаждаемую форму, где материал остывает и отверждается. Существуют маленькие литьевые машины для изготовления изделий массой всего в несколько граммов и большие литьевые машины – для изделий массой до 30 кг» [5, с. 332].

«Экструзия пластмасс — это крупносерийный производственный процесс, при котором необработанный пластик расплавляется и формируется в непрерывный профиль. Экструзией изготавливаются такие изделия, как

трубы, уплотнители, ограждения, перила для палубы, оконные рамы, пластиковые пленки и листовое покрытие, термопластичные покрытия и изоляция проводов» [10, с. 212].

Этот процесс начинается с подачи пластикового материала (пеллет, гранул, хлопьев или порошков) из бункера в цилиндр экструдера (рисунок 3). Материал постепенно расплавляется под действием механической энергии, вырабатываемой вращающимися винтами и нагревателями, расположенными вдоль корпуса. Затем расплавленный полимер подается в матрицу, которая придает полимеру форму, которая затвердевает при охлаждении.

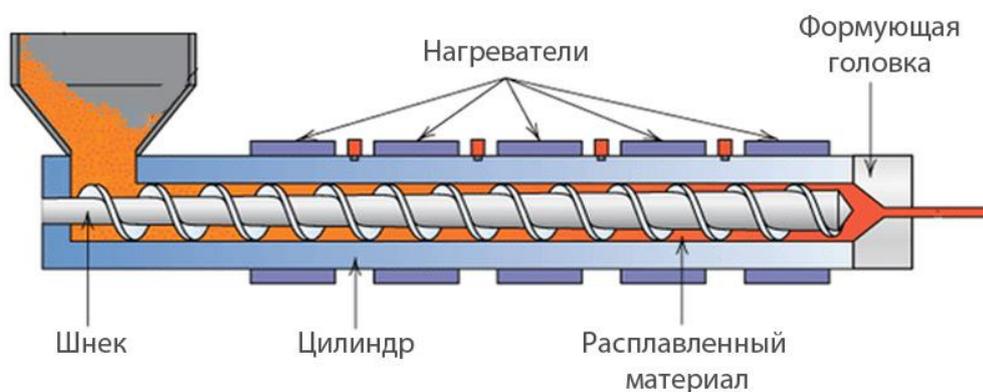


Рисунок 3 – Процесс экструзии

«При экструзии пластмасс исходный составной материал обычно имеет форму шариков (маленьких шариков, часто называемых смолой), которые самотеком подаются из установленного сверху бункера в цилиндр экструдера. Часто используются добавки, такие как красители и ингибиторы УФ-излучения (в жидкой или гранулированной форме), которые могут быть подмешаны в смолу перед поступлением в бункер. Этот процесс имеет много общего с литьем пластмасс под давлением с точки зрения технологии экструдирования, хотя и отличается тем, что обычно это непрерывный процесс» [9, с. 12]. Хотя пултрузия может предложить множество аналогичных профилей непрерывной длины, обычно с дополнительным

армированием, это достигается вытягиванием готового изделия из матрицы вместо выдавливания расплава полимера через матрицу.

Для экструзии обычно применяют пластики такие как, PE, PP, POM, PA6, PA66, PVC, ABS и PC.

Большим преимуществом экструзии является то, что профили могут быть изготовлены любой длины. Если материал достаточно гибкий, профиль возможно наматывать на катушку.

Аддитивное производство – процесс создания трехмерных объектов различной геометрической формы на основе их 3D моделей. «Концепция 3D-печати основана на построении объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры модели. Фактически, 3D-печать является полной противоположностью таким традиционным методам механического производства и обработки, как фрезеровка или резка, где формирование облика изделия происходит за счет удаления лишнего материала (субтрактивное производство)» [23, с. 31-34].

«Автоматизированное аддитивное производство невозможно без источника информации о взаиморасположении элементов объекта печати, его геометрии. Таким источником информации служат цифровые трехмерные модели, или 3D-модели. Они создаются методом ручного компьютерного графического дизайна или методом 3D сканирования. Ручное моделирование, или подготовка геометрических данных для создания трехмерной компьютерной графики, несколько напоминает скульптуру. 3D-сканирование – это автоматический сбор и анализ данных реального объекта, а именно формы, цвета и других характеристик, с последующим преобразованием в цифровую трехмерную модель» [29, с. 31].

«Во время печати принтер считывает 3D-печатный файл (как правило, в формате STL), содержащий данные трехмерной модели, и наносит последовательные слои жидкого, порошкообразного, бумажного или листового материала, выстраивая трехмерную модель из серии поперечных сечений. Эти слои, соответствующие виртуальным поперечным сечениям в

CAD-модели, соединяются или сплавляются вместе для создания объекта заданной формы. Основным преимуществом данного метода является возможность создания геометрических форм практически неограниченной сложности» [22, с. 96].

«Традиционные производственные методы, такие, как литье под давлением или прессование, могут обходиться дешевле при производстве крупных партий полимерных изделий, но аддитивные технологии обладают преимуществами при мелкосерийном производстве, позволяя достигнуть более высокого темпа производства и гибкости дизайна, наряду с повышенной экономичностью в пересчете на единицу произведенного товара. Кроме того, настольные 3D-принтеры позволяют дизайнерам и разработчикам создавать концептуальные модели и прототипы, не выходя из офиса» [6, с. 93].

На основании проведенного анализа материалов, для детали-аналога крепежного элемента обивки двери задка автомобиля и, учитывая применение в массовом производстве автомобилей, предпочтительно выбрать полиамид (РА66) в виду его хорошей теплостойкости и высокой прочности. Солнечная радиация и высокое водопоглощение не влияет на данное изделия в виду применения в закрытом пространстве автомобиля.

В качестве технологии изготовления детали предполагается литье под давлением, в виду высокой скорости изготовления и малых трудозатрат.

2 Аналитическое исследование прочности крепежных элементов

2.1 Факторы, влияющие на работоспособность пластиковых изделий

2.1.1 Влияние термического нагружения на изменение механических свойств пластиковых элементов

Свойства некоторых пластмасс могут меняться в зависимости от теплового воздействия. Одним из наиболее важных свойств материалов является модуль упругости, который является мерой жесткости эластичного материала и величиной, используемой для характеристики материалов. Таким образом, температурная зависимость модуля упругости является очень важным фактором и должна быть исследована на этапе разработки детали [2, с. 315].

В данной статье модуль упругости внутренних пластиковых компонентов при различных температурах измеряется с помощью испытания на изгиб в трех точках. Цель данного теста – получить зависимость изменения модуля упругости от окружающей температуры различных видов пластика, используемых в отделке автомобиля [30].

Испытание на изгиб в трех точках представляет собой метод испытания для измерения усилия необходимого для изгиба балки в условиях трехточечной нагрузки. Иными словами, этот тип испытаний измеряет поведение таких материалов, как металлы, дерево, стекло, бетон, пластмассы и композиты, которые подвергаются простым изгибающим нагрузкам. Испытание проводят, поддерживая образец двумя опорными поверхностями и прикладывая осевую нагрузку к его центру третьей опорной нагрузкой. Этот метод может быть использован для расчета модуля изгиба или модуля упругости при изгибе E_f (по наклону кривой зависимости изгибной нагрузки от прогиба), напряжения при изгибе σ_f , деформации при изгибе ε_f и реакции материала на напряжение при изгибе.

Преимуществом использования испытаний на изгиб для измерения модуля упругости является легкость подготовки образца и проведения испытаний, так как образец для испытаний просто вырезается из детали, а не изготавливается специально, в то время как при испытаниях на растяжение необходимо изготовить испытуемый образец (рисунок 4). Основным недостатком испытаний на изгиб является то, что результат метода испытаний чувствителен к геометрии образца, нагрузке и скорости деформации.

Модуль упругости при изгибе рассчитывается, используя следующие формулы:

$$d = \frac{FL^3}{48EL}, \quad (1)$$

$$I = \frac{wh^3}{12}, \quad (2)$$

где w – ширина балки, м;

E – модуль упругости (модуль Юнга), Па;

h – высота балки, м;

l – расстояние между двумя внешними опорами, м;

d – прогиб балки, м;

F – сила приложенная к центру балки, Н.

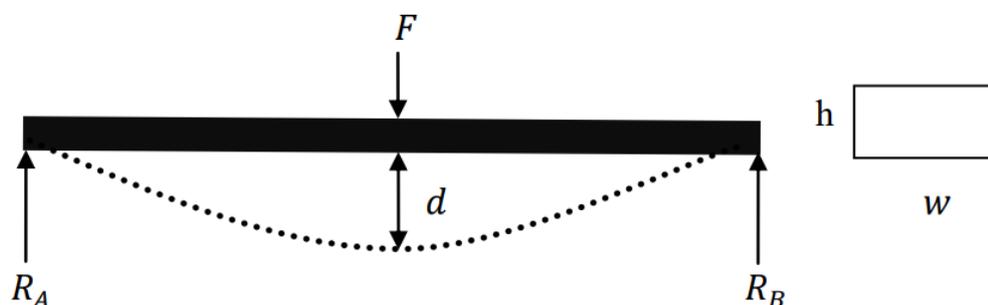


Рисунок 4 – Параметры при расчете модуля упругости

В эксперименте тестируемая конструкция представляет собой пластиковый стержень, изготовленный из PC, PC/ABS, PA6 и PP. Тестовые стержни изготавливаются размером 150×15 мм и 75×10 мм из внутренних пластиковых деталей. Эксперимент выполняется в трех точках с размахом 100 мм, скоростью 1 мм/мин и площадками контактов радиусом около 2 мм при различных температурах минус 40 С°, минус 30 С°, минус 15 С°, минус 10 С°, 23 С°, 40 С°, 80 С°. Осевая сжимающая нагрузка составляет 15 Н.

По полученным в эксперименте значениям построены графики зависимости модуля упругости от температуры (рисунок 5).

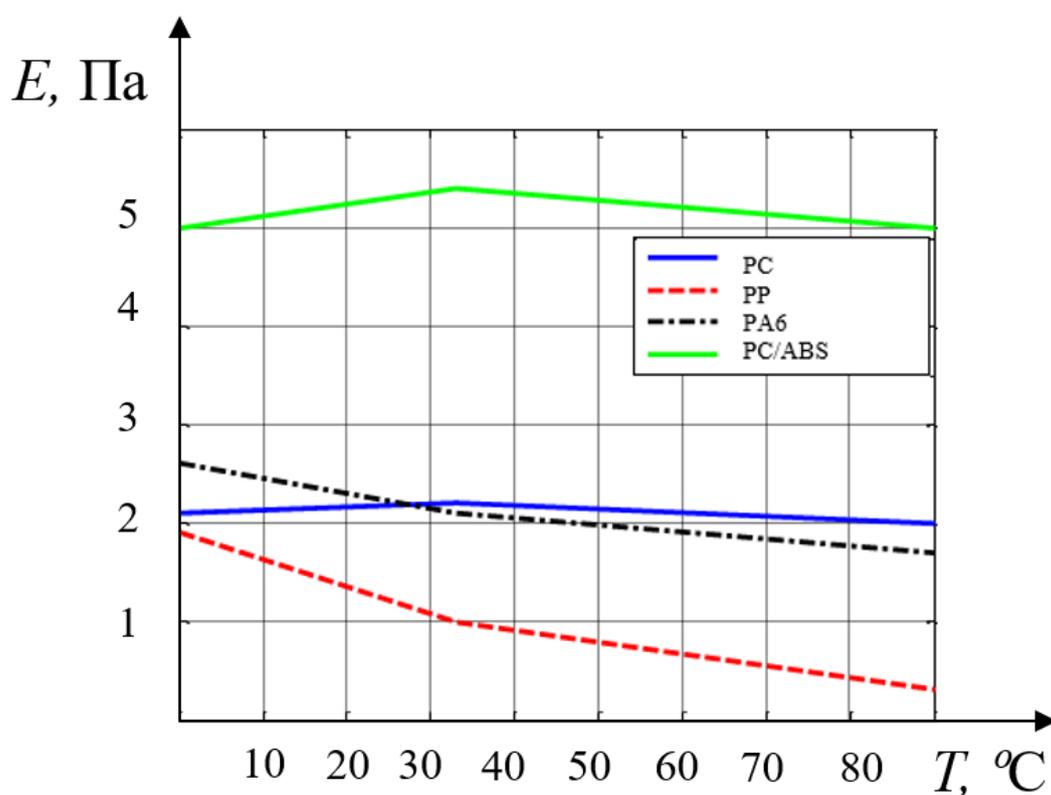


Рисунок 5 – Изменение модуля упругости от температуры

Исходя из полученных измерений можно сделать вывод, что температура оказывает незначительное влияние на модуль упругости для материалов PC и PC/ABS в тестируемом диапазоне, а для остальных

материалов уже имеет большее значение, особенно для РР. Следовательно, что для отделки автомобиля лучше использовать материалы на основе поликарбоната [15].

2.1.2 Внутренние напряжения в изделиях, выполненных методом литья под давлением

Внутренние напряжения являются недостатком изделий, изготовленных методом литья под давлением. Это отражается на механических свойствах и поведении деталей при эксплуатации.

Внутренние напряжения могут быть полезными. Так, благодаря внутренним напряжениям литьевые детали обнаруживают повышенную механическую прочность в определенных направлениях. «С другой стороны, внутренние напряжения могут приводить к короблению литьевых изделий в процессе эксплуатации при температурах ниже температуры стеклования. Таким образом, физико-механические свойства литьевых деталей в значительной степени зависят от внутренних напряжений, которые, в свою очередь, зависят от технологических параметров процесса литья под давлением» [14, с. 174].

Как утверждает Т.С. Фетисова существуют следующие виды внутренних напряжений:

- «ориентационные напряжения, возникающие вследствие изменения формы макромолекул и их фиксирования в процессе течения полимера при заполнении формы и при его охлаждении;
- объемные температурные напряжения, возникающие вследствие неравномерного охлаждения полимера в процессе литья;
- напряжения, связанные с нарушением равновесного состояния молекул полимера и образованием неравновесного его объема в процессе литья;
- напряжения, связанные с деформацией детали при ее выталкивании из полости формы» [27, с. 94].

Наиболее важными считаются ориентационные и температурные напряжения, потому что они, определяют физико-механические свойства деталей при литье.

«Напряжения, возникающие при выталкивании изделия из формы вследствие его изгиба и связанные с тем, что термопласт затвердел не по всему сечению, могут быть сведены до минимума при использовании рациональных конструкций толкающих систем, при обеспечении оптимальных условий литья и снижении остаточного давления в форме при ее раскрытии» [34, с. 902].

«Процессы ориентации в условиях быстрого охлаждения приводят к возникновению в полимере внутренних напряжений, которые не могут быстро релаксировать, поскольку вязкость полимера при низких температурах слишком высока. Внутренние напряжения влияют на стабильность размеров и физические свойства изделия» [33, с. 105].

«На ориентационные напряжения в изделиях влияют различные параметры процесса литья. Наибольшее влияние на ориентационные напряжения оказывает температура расплава. При повышении температуры расплава понижается его вязкость, а следовательно, уменьшаются напряжения сдвига и ориентации. При увеличении времени выдержки под давлением ориентационные напряжения возрастают до тех пор, пока не будет сброшено давление или термопласт не затвердеет во впускном канале литниковой системы. С увеличением толщины детали ориентационные напряжения уменьшаются, поскольку медленное охлаждение толстых изделий обуславливает минимальное повышение вязкости и достаточно большое время для протекания релаксационных процессов. Высокая температура литьевой формы обеспечивает медленное охлаждение изделия и обуславливает возникновение меньших по величине ориентационных напряжений» [7, с. 11].

Т.С. Фетисова полагает, что «при литье под давлением существует большая разница между температурой расплава и температурой литьевой

формы. Это приводит к быстрому охлаждению полимера вблизи стенок формы и возникновению неравномерно распределенных в объеме изделия механических напряжений. Поверхностные слои изделия охлаждаются быстрее по сравнению с его внутренними слоями вследствие большой теплоемкости и низкой теплопроводности полимера. На поверхности изделия образуется затвердевшая оболочка. В результате внутри изделия возникают напряжения растяжения, а во внешнем слое – напряжение сжатия» [27, с. 94].

В полость формы во время выдержки под давлением поступает некоторое количество полимера, что приводит к растяжению затвердевшей оболочки и возникновению в ней растягивающих напряжений. «Если полимер охлаждается в форме под давлением, которое больше, чем давление, возникающее за счет температурной усадки полимера, то напряжения, связанные с охлаждением, могут и не возникнуть, поскольку они компенсируются давлением в форме. При недостаточном уплотнении, когда давление в форме или время выдержки под давлением мало, давление в форме быстро падает до нуля, и внутри изделия возникают напряжения растяжения, а снаружи – напряжения сжатия» [25, с. 86].

«Если нулевое давление в форме возникает на ранней стадии охлаждения изделия, когда внутри еще находится относительно горячий полимер, а внешняя оболочка недостаточно затвердела, то эта оболочка может легко деформироваться с образованием на ее поверхности углублений. На более поздней стадии охлаждения, когда внешняя оболочка изделия обладает достаточной прочностью, а давление в форме упало до нуля, внутри изделия могут образоваться пустоты за счет разделения внутренних слоев. В связи с этим большое значение имеет установление оптимальных условий процесса литья термопластов с целью получения изделий с минимальными внутренними напряжениями» [28, с. 110].

Для обеспечения долговечности изделия и минимизации вероятности деградации пластика в процессе эксплуатации необходимо аккуратно рассчитать и выравнять внутренние напряжения вдоль сечений детали. Это

особенно важно, когда изделие подвергается воздействию тепла, солнечного света и агрессивных сред, которые могут значительно ускорить процесс деградации материала. Тщательное контролирование и уменьшение внутренних напряжений поможет сохранить целостность и функциональность изделия на протяжении всего его срока службы.

2.1.3 Влияние конструкции проектируемых упругих элементов на работоспособность изделия

Защелкивающиеся соединения – это самый простой, быстрый и экономичный способ сборки двух деталей. При правильном проектировании детали с защелкивающимися креплениями можно собирать и разбирать множество раз без каких-либо негативных последствий для соединения.

Несмотря на то, что защелкивающиеся элементы могут быть изготовлены из многих материалов, идеальным материалом является термопластик из-за его высокой гибкости и способности легко и недорого формировать сложные геометрические формы. Другие преимущества включают его относительно высокое удлинение, низкий коэффициент трения и достаточную прочность и жесткость для удовлетворения требований большинства областей применения.

Конструктор должен знать, что при установке, возможен некоторый «люфт» из-за смещения двух сопрягаемых деталей. Некоторые типы защелок также могут увеличить стоимость оснастки для литья под давлением из-за необходимости установки знаков в форму. Опытный конструктор при возможности может устранить необходимость в знаках, добавив отверстие непосредственно под защелкой или расположив защелки по краю детали так, чтобы они были обращены наружу (рисунок 6).



Рисунок 6 – Пример защелкивающегося соединения

При проектировании консольной защелки конструктору нередко приходится выполнять несколько итераций (изменять длину, толщину, размеры прогиба и т.д.), чтобы спроектировать защелкивающуюся посадку с наименьшим допустимым натяжением для конкретного вида материала.

Другими типами защелкивающихся соединений, являются консольные защелки в форме буквы «U» или «L» (рисунок 7). Они используются, когда напряжение прямой консольной защелки может быть ниже допустимого напряжения для данного материала.

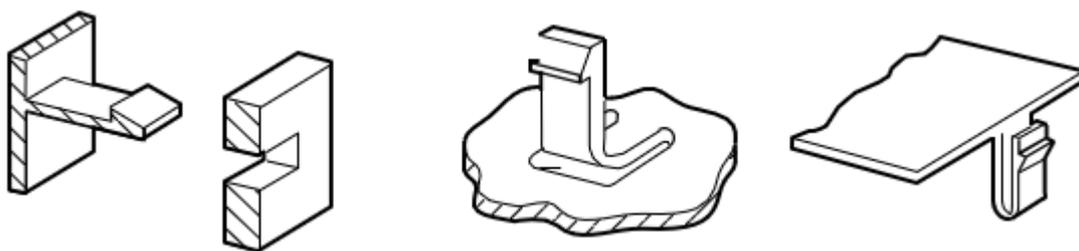


Рисунок 7 – Консольные защелки

Задача инженера-конструктора заключается в том, чтобы найти баланс между прочным соединением и прочностью консольной защелки. Хотя консольная защелка с большим выступом может обеспечить надежность соединения, но она также увеличивает нагрузку на соединение при сборке и разборке.

Для обзора параметров защелки рассмотрим стандартную консольную защелку с выступом на конце. Глубина выступа определяет величину прогиба при сборке. Выступ обычно имеет острый угол со стороны входа заходной части, и менее острый с обратной стороны защелкивания (рисунок 8). Небольшой угол со стороны входа α помогает снизить трудоемкость сборки, в то время как острый угол со стороны втягивания α' значительно затрудняет или делает невозможным демонтаж. Усилия при монтаже и демонтаже (рисунок 9) можно оптимизировать, изменив углы, указанные выше.



Рисунок 8 – Основные параметры защелки

Расчет силы сцепления W (рисунок 9) ведется по формуле ниже:

$$W = P * \tan(\alpha + \beta), \quad (3)$$

где P - усилие установки;

α и β – углы приложения сил.

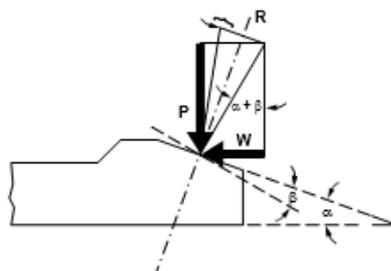


Рисунок 9 – Сила сцепления и усилие монтажа

При проектировании защелкивающейся конструкции основное внимание уделяется качеству соединения и прочности самой защелки. Качество соединения определяется жесткостью защелки и величиной прогиба, необходимой для сборки или разборки. Жесткость может быть увеличена либо за счет использования материала с более высоким модулем упругости, либо за счет увеличения момента инерции поперечного сечения балки. Произведение этих двух параметров будет определять общую жесткость защелки данной длины.

Целостность конструкции также может быть улучшена за счет увеличения глубины выступа. В результате балка должна отклоняться еще больше и, следовательно, требуется большее усилие для снятия выступа с фиксирующего крюка. Однако с увеличением прогиба балки увеличивается и напряжение в балке. Это приведет к излому защелки, если напряжение превысит предел текучести материала.

Таким образом, прогиб должен быть оптимизирован с учетом предела текучести или деформации материала. Это достигается за счет оптимизации геометрии сечения защелки, обеспечив достижение желаемого прогиба без превышения предела прочности или деформации материала [26, с. 303].

Усилие при монтаже и демонтаже увеличивается с увеличением жесткости и максимального отклонения защелки. Усилие, необходимое для отклонения защелки, пропорционально произведению этих двух факторов:

$$P = k * Y, \quad (4)$$

где P – усилие установки, Н;

k – жесткость защелки, Н/м;

Y – максимальное отклонение защелки, мм.

Величина жесткости зависит от геометрии балки, как показано на рисунке 10:

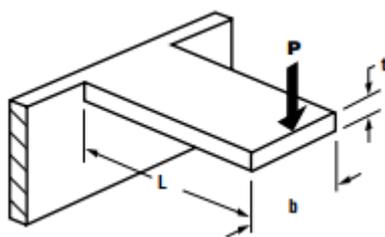


Рисунок 10 – Параметры сечения защелки

Расчет жесткости защелки ведется по формуле:

$$k = \frac{P}{Y} = \frac{Eb}{4} \left(\frac{t}{L} \right)^3, \quad (5)$$

где E – модуль упругости, Па;

b – ширина защелки, мм;

t – толщина защелки, мм;

L – длина консольной части защелки, мм.

Расчитанное значение напряжения или деформации должно быть меньше предела текучести материала, чтобы предотвратить разрушение.

При выборе модуля упругости при изгибе (E) для гигроскопичных материалов, например, нейлона, следует соблюдать осторожность. В сухом отформованном состоянии значение из спецификации может быть использовано для расчета жесткости, прогиба или удерживающей силы защелкивающейся конструкции. Однако при нормальной относительной влажности воздуха 50 % физические свойства ухудшаются, и, следовательно, жесткость и удерживающая сила уменьшаются, а прогиб увеличивается.

Формулы для консольных защелок, используемые в традиционной конструкции с защелкивающимся креплением, недооценивают величину деформации на стыке балки и ответной части, поскольку они не учитывают деформацию статичного элемента. Вместо этого предполагается, что ответная

часть полностью жесткая, а прогиб происходит только в балке. Это предположение может быть справедливым, если отношение длины балки к толщине превышает примерно 10:1. Однако для получения более точного прогноза общего допустимого прогиба и деформации для коротких балок следует применять коэффициент увеличения в соответствии со стандартной формулой. Это обеспечит большую гибкость конструкции, в то же время в полной мере используя способность материала выдерживать нагрузку.

Конструкция защелки с консольной балкой подходит не для всех применений. Иногда при проектировании возможно столкнуться с тем, что невозможно спроектировать консольную защелкивающуюся конструкцию так как натяжение превышает допустимый предел текучести для выбранного материала. Обычно это происходит из-за ограниченного пространства проектируемом узле, которое ограничивает длину защелки. В данном случае возможно рассмотреть конструкцию защелки в форме «L» или «U» (рисунок 11).

Защелка в форме «L» выполнена в виде пазов в стенке основания, что значительно увеличивает длину и гибкость балки по сравнению со стандартной консольной балкой. Это позволяет конструктору снизить нагрузку при сборке для выбранного материала. Следует отметить, что в некоторых конструкциях добавление прорези в стенку основания может быть неприемлемым из-за видовых соображений или проблем с воздушным потоком.



**«L» образная
защелка**



**«U» образная
защелка**

Рисунок 11 – «L» и «U» образные защелки

U-образная защелка — это еще один способ увеличить эффективную длину балки в ограниченном пространстве. Благодаря такой конструкции даже материалы с низкими допустимыми пределами деформации (например, материалы с высоким содержанием стеклонеполненных материалов) могут быть сконструированы в соответствии с требованиями к монтажу. Конструкция в форме «U» обычно включает в себя выемку на внешнем крае детали, чтобы исключить необходимость использования знака в пресс-форме, за исключением случаев, когда в стенке, из которой выступает защелка, имеется паз [25, с. 201].

Перед окончательной разработкой конструкции с защелкивающимся креплением необходимо рассмотреть три основных вопроса: концентрацию напряжений, ползучесть/релаксацию и усталость. Ниже приведены описания этих проблем и рекомендации по их предотвращению. Все это следует учитывать в рамках имеющейся практики проектирования любой конструкции из термопластичных материалов.

Единственной наиболее распространенной причиной поломки защелок является концентрация напряжений из-за острого угла между защелкивающейся балкой ответной частью, к которой она крепится. Поскольку это место обычно совпадает с точкой максимального напряжения, острый угол может увеличить напряжение, превышающее прочность материала, что может привести к податливости или поломке. Это особенно важно для жестких пластмасс, таких как армированный стекловолокном нейлон, которые имеют относительно низкое предельное удлинение. Более пластичные материалы, такие как неармированный нейлон, имеют тенденцию поддаваться и деформироваться перед разрывом, перераспределяя пиковое напряжение на более широкую область. Одним из решений является использование радиуса скругления в месте соединения балки со стеной таким образом, чтобы отношение радиуса к толщине стенки составляло не менее 50%. Превышение 50% приводит к незначительному увеличению прочности и может вызвать другие проблемы, такие как внутренние пустоты и утяжины.

Если утяжины являются проблемой, можно использовать меньший радиус, но это вызовет увеличение нагрузки в этой области. Другой вариант - добавить радиус только на стороне растяжения балки.

Ползучесть, или, ослабление напряжений, может привести к уменьшению удерживающего усилия между двумя компонентами, соединенными с помощью защелкивающегося соединения. Ослабление напряжений будет происходить постепенно с течением времени. Если между деталями имеется прокладка или уплотнение, ослабление соединения может привести к потере герметичности. Другой часто встречающейся проблемой является чрезмерный люфт между деталями из-за различий в допусках, что иногда приводит к шуму и вибрации. Существует несколько способов свести к минимуму эти явления: сконструировать защелкивающуюся балку с низким напряжением, предусмотреть в конструкции защелкивающейся посадки угол возврата 90° , чтобы она уменьшалась при растяжении, а не при изгибе. Это предотвратит соскальзывание или расшатывание соединяемой детали. Другой способ - использовать больший угол возврата и увеличить длину площадки в области угла возврата. Увеличение перекрытия и оценка наихудшего сценария в ходе анализа допусков позволяют конструкции сохранить заданное усилие расфиксации даже после того, как произойдет ослабление.

Усталость, или повторяющиеся нагрузки, являются третьей основной причиной поломок. Проблемы усталости возникают, в первую очередь, в том случае, если ожидается большое количество циклов фиксации и расфиксации. Хотя расчетный уровень напряжений может находиться в пределах прочности материала, повторное приложение этого напряжения может привести к усталостному разрушению в будущем.

Некоторые полимеры в этом отношении работают лучше, чем другие, что делает их идеальными кандидатами для защелкивающихся соединений или шарниров, которые должны многократно изгибаться. Первый способ избежать усталостного разрушения - выбрать материал, который, как известно, хорошо выдерживает усталость. Это можно сделать, сравнив так

называемые кривые S-N материалов, которые показывают ожидаемое количество циклов до разрушения при различных уровнях напряжения и при различных температурах воздействия. Второй способ, по-прежнему использующий кривые S-N, заключается в выборе расчетного уровня напряжения при правильной температуре, который обеспечивает требуемое количество применений нагрузки до выхода из строя. Этот метод, как правило, является консервативным, поскольку кривые S-N обычно формируются с гораздо большей частотой, чем можно было бы ожидать при повторном применении защелкивающегося узла.

Для гигроскопичных материалов, таких как нейлон, также необходимо учитывать влияние влаги на конечные размеры и механические свойства деталей.

2.1.4 Влияние процесса изготовления на качество полученного изделия

«В настоящее время существует целый ряд компьютерных программ (pro-Ingeneering, Moldflow), позволяющих с высокой точностью рассчитать технологические параметры процесса литья в зависимости от марки используемого материала, формы и размеров изделия и конструкции формы. Для получения изделий с оптимальными эксплуатационными свойствами здесь же мы рассмотрим качественное влияние основных технологических параметров литья под давлением (давление литья, температура расплава и формы, время выдержки под давлением, время охлаждения) на качество изделий» [17, с. 64].

«Полимеры перерабатываются при различных температурах, но для каждого метода выбираются температуры, обеспечивающие необходимые значения вязкости расплава. При изучении реологических зависимостей различных полимеров при температурах переработки было замечено, что для каждого метода переработки выделяется отдельная реологическая область, определяемая вязкостью расплава. Экспериментально установлено, что температура литья должна обеспечивать определенный интервал вязкости

расплава полимера, что на реологической зависимости выражается определенной областью. Обычно в справочной литературе приводится диапазон температур, в котором рекомендуется перерабатывать данный вид (марку) полимера» [35, с. 728].

Литьевые машины или термопластавтоматы (ТПА) – «это сложные технические устройства, оснащенные всеми необходимыми средствами автоматизированного управления параметрами технологического процесса. Практически все фирмы выпускают типоразмерные ряды ТПА по двум основным параметрам таким как усилие запирающая формы и объем впрыска» [20, с. 31].

Основными характеристиками при выборе ТПА являются:

- возможность изготовления деталей с необходимой точностью;
- гарантийным срок;
- простота обслуживания и ремонта.

После определения фирмы-производителя и марки литьевой машины выбирается конкретная литьевая машина по требуемому усилию смыкания и объему впрыска по уравнениям:

$$N_{см} \geq P_{ф} * (J_{изд} * n + J_{лит}), \quad (6)$$

$$V_{впр} \geq \frac{G_{изд} * n + G_{лит}}{\rho_p}, \quad (7)$$

где $G_{изд}$, $G_{л}$ – масса изделия и литниковой системы;

ρ_p – плотность расплава при температуре литья;

$P_{ф}$ – давление в форме;

$J_{изд}$, $J_{лит}$ – площадь изделия и литников в плоскости разъема формы;

n – гнездность формы.

«Мировая практика в настоящее время такова, что литьем под давлением из пластмасс общего, и специального конструкционного назначения могут

быть получены изделия, любой разумной сложности и габаритов, к ним могут предъявляться весьма высокие требования точности. Для каждого изделия (а расширение номенклатуры, появление новых изделий безграничны) требуются индивидуальные решения, тем более что повышаются требования к точности литевых изделий. Принимая во внимание затраты, необходимые для обеспечения более высокого качества изделия, понятна цена ответственности разработчика изделия и всех участников процесса его создания. Сейчас конструктор изделия и пресс-формы в подавляющем большинстве случаев вынужден делать выбор «в условиях неопределенности» и повышенного риска в отношении ожидаемого результата» [13, с. 94].

«Время выдержки под давлением определяется, с одной стороны, необходимостью передать в формулирующую полость необходимую дополнительную порцию расплава полимера для уменьшения усадки. С другой стороны, выдержка под давлением должна быть минимальной, чтобы обеспечить максимальное время на набор следующей дозы материала. При использовании форм с традиционной литевой системой время выдержки под давлением зависит от температуры расплава и объема впускного литника. Графически минимальное время выдержки под давлением соответствует перегибу кривой зависимости массы изделия от времени выдержки под давлением (см. рис. 2.14). Теоретический расчет усложняется тем, что литье происходит при нестационарных условиях теплопроводности, а охлаждение расплава в литники – во время течения через литник расплава со скоростью, зависящей от изменения объема полимера в формулирующей полости» [11, с. 135].

Выдержка под давлением приводит к повышению внутренних напряжений в изделии, поэтому время выдержки под давлением пытаются свести к нулю. «Наиболее распространенный метод – применение форм с точечными литниками при одновременном значительном увеличении давления литья. Давление литья увеличивают до такого уровня, чтобы количество материала в полости формы уже при впрыске соответствовало точке Т» [25, с. 121], которая показана на рисунке 12.



Рисунок 12 – График давление литья

При определении времени охлаждения необходимо учитывать конфигурацию изделий, их размеры, температуру расплава и формы, а также коэффициент теплопроводности расплава. Расчет обычно проводят по уравнениям нестационарной теплопроводности, которые в зависимости от формы изделий имеют различный вид:

$$t_0 = \left[\frac{\delta^2}{\pi^2 \alpha} \ln \frac{8(T_3 - T_0)}{T_d - T_0} \right] - t_B, \quad (8)$$

где δ – толщина изделия;

T_d – средняя температура изделия по толщине стенки после извлечения его из формы;

T_3 – температура затвердевания;

T_0 – температура окружающей среды;

α – коэффициент теплопроводности.

Необходимо отметить, что реальный процесс охлаждения изделия существенно отличается от расчетного. В процессе меняется температура формы, условия теплопередачи затвердевающего изделия и текущие значения коэффициента теплопроводности материала. В виду этого, длительность охлаждения часто определяют эмпирически:

$$T = \frac{T_{\text{пл}} - T_{\text{ф}}}{T_{\text{изд}} - T_{\text{ф}}}, \quad (9)$$

где $T_{\text{пл}}$ – температура пластика;

$T_{\text{изд}}$ – температура изделия;

$T_{\text{ф}}$ – температура формы.

2.2 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния исследуемых зажимов

2.2.1 Характеристики для анализа напряженно-деформированного состояния с помощью МКЭ

Для анализа методом конечных элементов (МКЭ) необходимо знать следующие механические характеристики материала:

- модуль упругости – характеризует способность материала сопротивляться растяжению/сжатию;
- коэффициент Пуассона – показывает, насколько материал способен к поперечной деформации при приложении нагрузки в продольном направлении;
- предел текучести – это напряжение, при котором материал начинает деформироваться пластически (необратимо);
- предел прочности – максимальное напряжение, которое материал способен выдержать до разрушения;
- коэффициент теплового расширения – показывает изменение размеров материала при изменении температуры;
- ударная вязкость – способность материала выдерживать ударные нагрузки без разрушения.

Рассмотрим каждую характеристику и методы ее определения.

Важнейшими из деформационных свойств являются упругость, эластичность (высокоэластичность), способность тела восстанавливать форму и размеры после прекращения действия внешних сил.

Упругость — это деформации, развивающиеся в полимере со скоростью звука, т.е. мгновенно.

Эластичность — это высокоэластические деформации, запаздывающие во времени. Количественно упругость и эластичность оцениваются модулем упругости (модуль Юнга), определяемым согласно закону Гука:

$$\sigma = E * \varepsilon , \quad (10)$$

где σ – механическое напряжение, МН/м² (МПа);

ε – относительная деформация, %;

E – модуль упругости, Па

Определение модуля упругости проводится по ГОСТ 9550-81.

Образцы для испытаний термопластов и армированных пластиков должны соответствовать типу и размерам, указанным на рисунке 13 и в таблице 1.

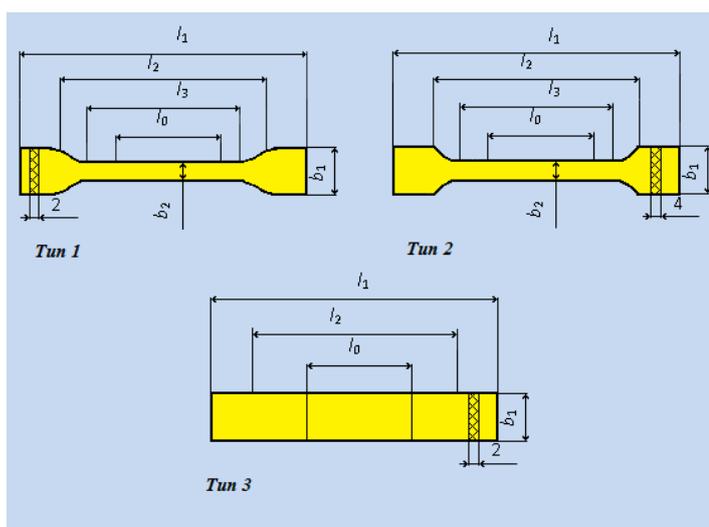


Рисунок 13 – Образцы для испытаний материалов на растяжение

Образец типа 1 применяют для испытаний пластмасс с высоким относительным удлинением при разрыве (полиэтилен, пластифицированный поливинилхлорид), образец типа 2 – для испытаний большинства материалов (терморезистивные, термопластичные и слоистые пластики), образец типа 3 в форме полоски – для испытаний стеклопластиков.

Таблица 1 – Размеры образцов

Размеры образцов, мм	Тип образца		
	1	2	3
Общая длина l_1 , не менее	115	150	250
Расстояние между метками, определяющими положение кромок зажимов на образце, l_2	80 ± 5	115 ± 5	170 ± 5
Длина рабочей части, l_3	33 ± 1	60 ± 1	–
Расчетная длина, l_0	25 ± 1	50 ± 1	50 ± 1
Ширина головки, b_1	$25 \pm 0,5$	$20 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$
Ширина рабочей части, b_2	$6 \pm 0,4$	$10 \pm 0,5$	–
Толщина, h	$2 \pm 0,2$	$4 \pm 0,4$	$2 \pm 0,2$

Перед испытанием измеряют ширину и толщину образцов в рабочей части с точностью до 0,01 мм не менее чем в трех местах и вычисляют площадь поперечного сечения. В расчет принимают наименьшую площадь поперечного сечения.

«Перед испытанием на образец наносят необходимые метки (без повреждения образцов), ограничивающие его базу и положение кромок захватов. Образцы закрепляют в зажимы испытательной машины по меткам, определяющим положение кромок зажимов, таким образом, чтобы продольные оси зажимов и ось образца совпадали между собой и с направлением движения подвижного зажима. Зажимы затягивают

равномерно, чтобы не было проскальзывания образца в процессе испытания, но при этом не происходило его разрушение в месте закрепления. Далее настраивают прибор для замера деформаций»[18, с. 6].

Общий вид разрывной машины показан на рисунке 14.



Рисунок 14 – Разрывная машина.

Затем образец нагружают возрастающей нагрузкой, величину которой фиксируют по шкале динамометра. Скорость нагружения составляет 25 мм/мин. В момент разрушения фиксируют наибольшее усилие и определяют прочность при растяжении по формуле:

$$\sigma_p = \frac{F_p}{S_0} , \quad (11)$$

где F_p – нагрузка, при которой образец разрушился, Н;

S_0 – начальное поперечное сечение образца, мм².

Образцы, разрушившиеся за пределами рабочей части, за результат не принимают.

По удлинению в момент разрушения определяют относительное удлинение при разрыве (рисунок 15):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} 100\%, \quad (12)$$

где Δl – изменение расчетной длины образца в момент разрыва, мм;

l_0 – расчетная длина, мм.

По полученным данным строится диаграмма напряжение-деформация:

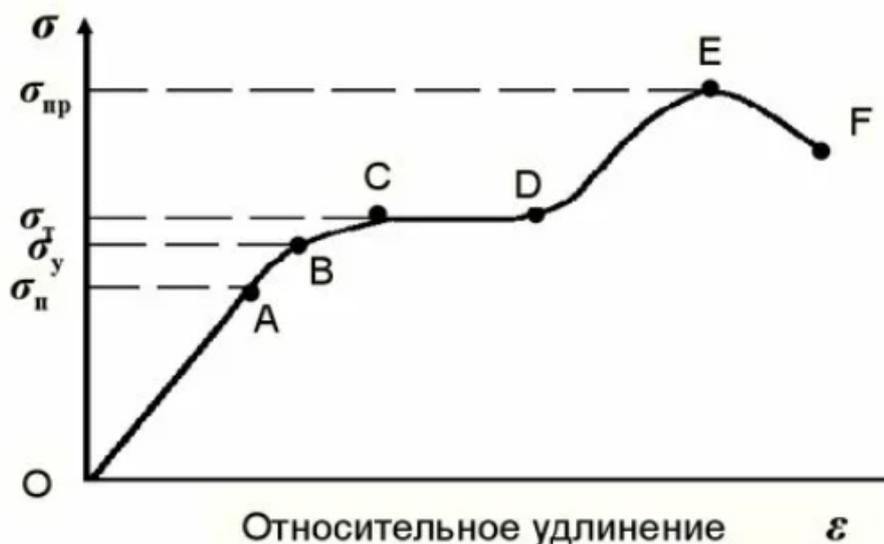


Рисунок 15 – Диаграмма напряжений-деформации

Модуль упругости определяют по формуле:

$$E_p = \frac{(F_2 - F_1) * l_0}{S_0(\Delta l_2 - \Delta l_1)}, \quad (13)$$

где F_1, F_2 – значения нагрузок, соответствующих относительному удлинению 0,1 % и 0,3 %, Н;

$\Delta l_1, \Delta l_2$ – удлинение при нагрузках F_1, F_2 соответственно, мм.

За результат измерения прочности, относительного удлинения и модуля упругости принимают среднее арифметическое значение для всех образцов.

Результаты испытаний заносят в протокол.

Для изотропного материала, подчиняющегося закону Гука, модули упругости связаны друг с другом через коэффициент Пуассона.

Коэффициент Пуассона μ – величина отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению.

$$\mu = -\frac{\Delta d}{d} \frac{l}{\Delta l} \quad (14)$$

Для несжимаемого упругого тела μ принимают равным значению 0,5, для реальных тел справедливо неравенство:

$$0 < \mu < 0,5 \quad (15)$$

«Предел текучести определяет точку, при которой материал начинает пластическую деформацию без увеличения нагрузки. Это означает, что материал начинает течь и изменять свою форму без возвращения к исходному состоянию после снятия нагрузки. Физический смысл предела текучести заключается в том, что он показывает, насколько материал гибок и способен адаптироваться к нагрузке. Если предел текучести низкий, то материал будет легко деформироваться и подвержен пластическим изменениям. Если предел текучести высокий, то материал будет более жестким и устойчивым к деформации» [12, с. 323].

Предел текучести материала определяет максимальное напряжение, при котором материал начинает пластическую деформацию. При повышении температуры материала, предел текучести обычно снижается из-за увеличения энергии атомов, что способствует движению дефектов и дислокаций. На низких температурах дефекты и дислокации имеют меньшую энергию, что

затрудняет пластическую деформацию материала. Однако, с увеличением температуры, атомы материала приобретают большую энергию, что упрощает движение дефектов и дислокаций и приводит к снижению предела текучести.

Для определения предела текучести проводят испытание на растяжение. Образец материала подвергается растяжению до разрушения. В процессе испытания на растяжение измеряются сила, действующая на образец, и его деформация.

По полученным данным строится диаграмма напряжение-деформация.

По диаграмме можно определить предел текучести и предел прочности:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0} , \quad (16)$$

где P_T – нагрузка при пределе текучести;

F_0 – площадь поперечного сечения образца.

На рисунке 15 предел текучести показан на участке С–D.

Предел прочности определяет точку, при которой материал разрушается. Это означает, что материал больше не может выдерживать нагрузку и происходит его разрушение.

Физический смысл предела прочности заключается в том, что он показывает, насколько материал прочен и способен выдерживать нагрузку без разрушения. Если предел прочности низкий, то материал будет легко разрушаться при небольших нагрузках. Если предел прочности высокий, то материал будет более прочным и способным выдерживать большие нагрузки без разрушения.

Влияние температуры на предел прочности зависит от типа материала и его структуры.

Для определения предела прочности применяют такой же метод испытаний, как и для определения предела текучести, только оценивают силу

при которой заканчивается пластическая деформация и происходит разрушение.

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{max}}}{F_0} , \quad (17)$$

где P_{max} – нагрузка, при которой происходит разрушение, Н;

F_0 – площадь поперечного сечения образца, м².

Предел прочности показан на рисунке 15 в точке Е.

Коэффициент линейного теплового расширения — это относительное приращение длины образца, вызванное повышением его температуры на один градус.

Различают так же понятие дифференцированного коэффициента линейного теплового расширения α .

Подразумевает под собой понятие, что дифференцированный коэффициент для любого из трех размеров образца при температуре T и при постоянном давлении P , будет равен:

$$\alpha = \frac{(\Delta L)_P}{(\Delta T)_P} * \frac{1}{L_0} , \quad (18)$$

где ΔL – изменение размера испытуемого образца за время Δt при постоянном давлении P , мм;

ΔT – изменение температуры за время d_i при постоянном давлении P , °С;

L_0 – размер испытуемого образца при температуре 23 °С по оси измерения, мм.

Для определения коэффициента линейного теплового расширения проводят испытание, при котором образец с помощью оборудования ТМА, нагревают, оказывают давление $4,0 \pm 1,0$ кПа и измеряют изменение размеров.

На основании этих замеров получают кривую ТМА (рисунок 16).

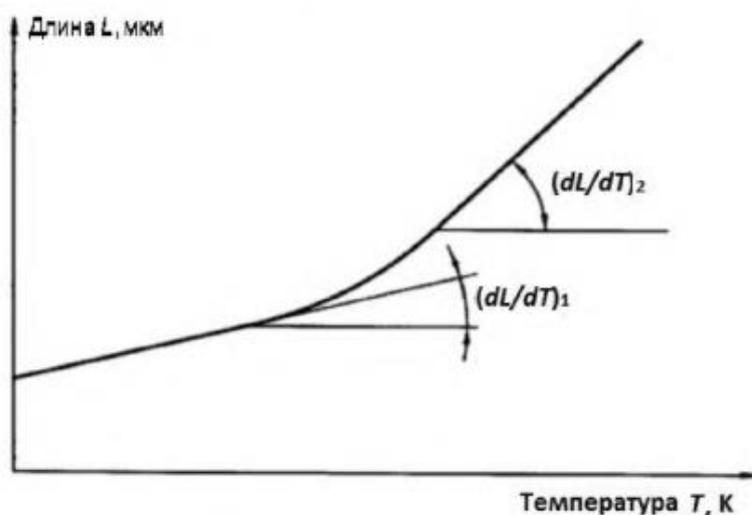


Рисунок 16 – Кривая линейного теплового расширения.

«Ударная вязкость полимеров — это свойство полимерных тел сопротивляться кратковременным ударным воздействиям. Ударная вязкость измеряется отношением работы, затрачиваемой на разрушение образца, к площади поверхности, образовавшейся в результате разрушения. Ударная вязкость является свойством, в известной мере противоположным хрупкости. При переходе от хрупкого разрушения к пластическому, ударная вязкость возрастает» [16, с. 411].

Значение ударной вязкости полимерных материалов определяют в соответствии с ГОСТ 4647–80.

«Для эксперимента применяют образцы в виде брусков прямоугольного сечения размерами $10 \times 15 \times 120$ мм, образец показан на рисунке 17. При изготовлении образцов из листовых материалов, имеющих толщину менее 10 мм, толщина остается равной толщине листа. При изготовлении образцов из плит толщиной более 10 мм плита срезается с обеих сторон до толщины $10 \pm 0,5$ мм».

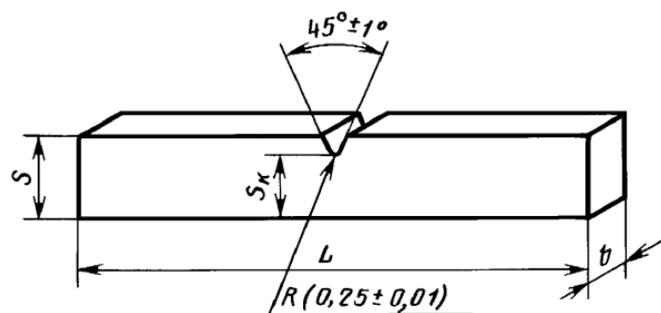


Рисунок 17 – Образец для проведения испытаний.

Для проведения испытаний используют не менее пяти образцов, при этом их поверхность должна быть без видимых дефектов.

«Испытания проводят на маятниковом копре, в котором образец свободно лежит на двух опорах, показан на рисунке 18. Нагрузка осуществляется при помощи маятника, производящего удар по всей ширине образца. Необходимо, чтобы плоскость качания была перпендикулярна оси образца, уложенного на опоры, и проходила в середине пролета между ними. Центр удара должен совпадать с центром тяжести маятника и лежать на середине ширины образца» [18, с. 10].

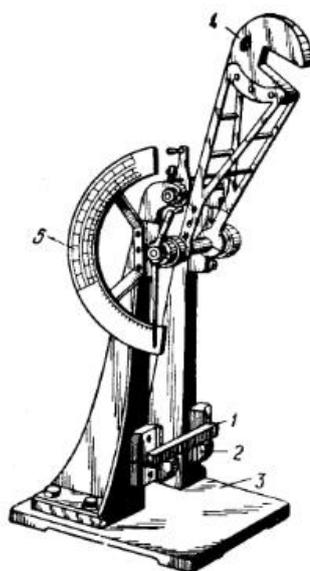


Рисунок 18 – Маятниковый копер

«Расстояние между опорами должно составлять $40 \pm 0,2$ мм для образцов толщиной $4 \pm 0,2$ мм и $70 \pm 0,2$ мм для образцов толщиной более 4 мм. Общие потери энергии копра определяются по стрелке указателя, установленной в начальном положении, соответствующем максимальному значению шкалы. Перед началом эксперимента определяют угол взлета маятника на холостом ходу. Для этого стрелку шкалы устанавливают в начальное положение и дают маятнику свободно падать из его верхнего положения. При правильной работе копра стрелка указателя остановится напротив нулевого положения шкалы» [18, с. 10].

Испытуемый образец укладывают на опоры так, чтобы удар пришелся по его широкой стороне. При этом образец должен полностью прилегать к стенкам опор.

Стрелку прибора опускают вниз до совпадения с максимальным значением шкалы. Поднимают маятник до верхнего исходного положения, в котором он удерживается защелкой. Затем маятник освобождают и дают ему свободно падать.

После разрушения образца маятник останавливают и по шкале производят отсчет значения работы, затраченной на разрушение образца с точностью, равной половине цены деления соответствующей шкалы копра.

Удар по образцу наносят только один раз. Если образец не разрушился, то его заменяют другим.

Ударную вязкость образца, a в кДж/м² определяют из соотношения:

$$a = \frac{A}{S} , \quad (19)$$

где A – работа, затраченная на разрушение образца, кДж;

S – площадь поперечного сечения образца в месте разрушения, м².

За результат испытаний принимают среднее арифметическое значение не менее трех измерений.

2.2.2 Конечно-элементный анализ пластикового зажима

«Использование компьютерных программ для проведения линейного и нелинейного структурного анализа повышают точность и скорость расчетов. Компьютеры используются для решения задач структурного проектирования с помощью численных методов или метода конечных элементов. При использовании метода конечных элементов, сложные задачи могут быть разбиты на несколько взаимосвязанных менее сложных задач. Эти методы были разработаны десятки лет назад для металлических конструкций, но сейчас часто используются для анализа механических и тепловых свойств пластмассовых изделий. Линейный метод конечных элементов используется для расчета напряжений и деформаций в тех случаях, когда нагрузки и изменение размеров относительно малы. Метод конечных элементов также применим в случае нелинейной зависимости между напряжением и деформацией, зависимости напряжение-деформация от времени и температуры, анизотропии свойств и наличия гистерезиса. Метод конечных элементов помогает конструктору обратить внимание на зоны потенциально высоких напряжений и дает возможность оптимизировать такие параметры, как радиусы кривизны, толщина стенок или расположение крепежных элементов. Метод конечных элементов значительно оптимизирует процедуру прототипирования, поскольку с помощью расчетов можно заранее обнаружить «проблемные» области в изделии. Благодаря этому сокращается количество необходимых прототипов при разработке изделия» [19, с. 101].

Для оценки свойств изделия из пластмасс или деталей необходимо четко определить задачи структурного проектирования и сформулировать их в виде, возможном для аналитического решения [3]. «Перед расчетом любой сложности необходимо рассмотреть и оценить ряд факторов, таких как:

- геометрическая форма изделия;
- тип опоры или крепления;
- условия приложения нагрузки;
- условия окружающей среды;

- поведение/механические свойства материала;
- условия безопасности.

Каждый из факторов должен быть рассмотрен таким образом, чтобы имелась возможность провести серию проектных расчетов, проверить результаты, изменить конструкцию, выполнить повторный расчет и повторять эти операции, пока не будут получены приемлемые результаты расчетов» [36, с. 62].

«В настоящее время на рынке программного обеспечения имеется большое количество комплексов МКЭ, в том числе ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, COSMOS и др. Традиционно эти продукты относятся к категории CAE (Computer Aided Engineering) программного обеспечения, применяемого при проектировании машиностроительных, строительных и других конструкций. Эта категория программного обеспечения занимает прочное место в списке CAD/CAM/CAE/GIS/PDM, продуктами из которого в том или ином виде пользуется большинство инженеров во всем мире» [24].

«Одним из важнейших этапов точного моделирования методом конечных элементов является процесс построение сетки. Сетка состоит из элементов, содержащих узлы, координаты в пространстве, которые могут варьироваться в зависимости от типа элемента, формирующие геометрию. Решатель конечно-элементного анализа может работать только с правильными формами. Поэтому в качестве элементов сетки обычно используются тетраэдры и пирамиды» [3, с. 101].

Для проведения конечно-элементного анализа пластикового зажима определим необходимые входные данные о материалах клипсы и ответной части входного элемента конструкции.

Расчет производился для двух вариантов материала клипсы Технамид А-101 и Технамид А-СВ30-ЛЮ. В анализе не учитывались нелинейные свойства материалов клипсы из-за отсутствия таковых данных. Для ответной части защелки использовался материал для обивки двери задка Армлен РР MF 13-8IM.

Характеристики материала Технамид А-101 (РА66):

- плотность $\rho = 1130 \text{ кг/м}^3$;
- прочность при разрыве $\sigma_{\epsilon} = 83 \text{ МПа}$;
- относительное удлинение при разрыве: $\delta = 18\%$;
- модуль упругости при изгибе: $E = 2950 \text{ МПа}$;
- изгибающее напряжение при максимальной нагрузке: $\sigma_{\text{м}} = 107 \text{ МПа}$.

Характеристики материала Технамид А-СВ30-ЛЮ (стеклонаполненный РА66):

- плотность $\rho = 1350 \text{ кг/м}^3$;
- прочность при разрыве $\sigma_{\epsilon} = 155 \text{ МПа}$;
- относительное удлинение при разрыве: $\delta = 3,5 \%$;
- модуль упругости при изгибе: $E = 7600 \text{ МПа}$;
- изгибающее напряжение при максимальной нагрузке: $\sigma_{\text{м}} = 240 \text{ МПа}$.

Характеристики материала Армлен РР MF 13-8IM (PP):

- модуль упругости при изгибе: $E = 1760 \text{ МПа}$;
- плотность: $\rho = 980 \text{ кг/м}^3$;
- предел прочности: $\sigma_{\epsilon} = 22,07 \text{ МПа}$;
- относительное удлинение при разрыве: $\delta = 4,94 \%$.

Анализ проводился в среде программного обеспечения HyperWorks 2014.

Общий вид примененного изделия и расположения детали в автомобиле показаны на рисунке 19.

Исследуемые объекты показаны на рисунке 20.

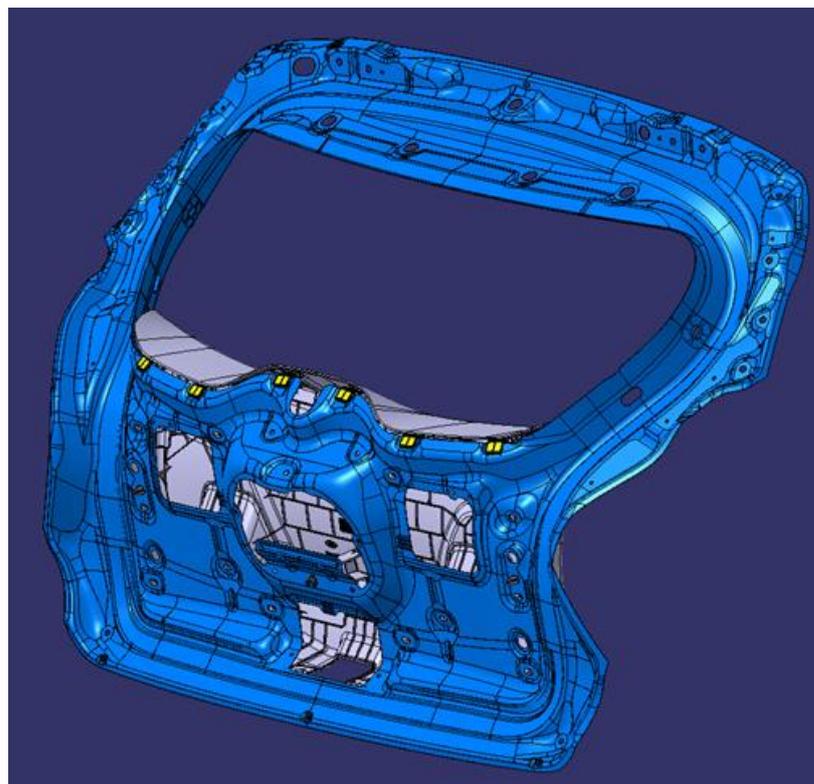


Рисунок 19 – Предмет исследования.

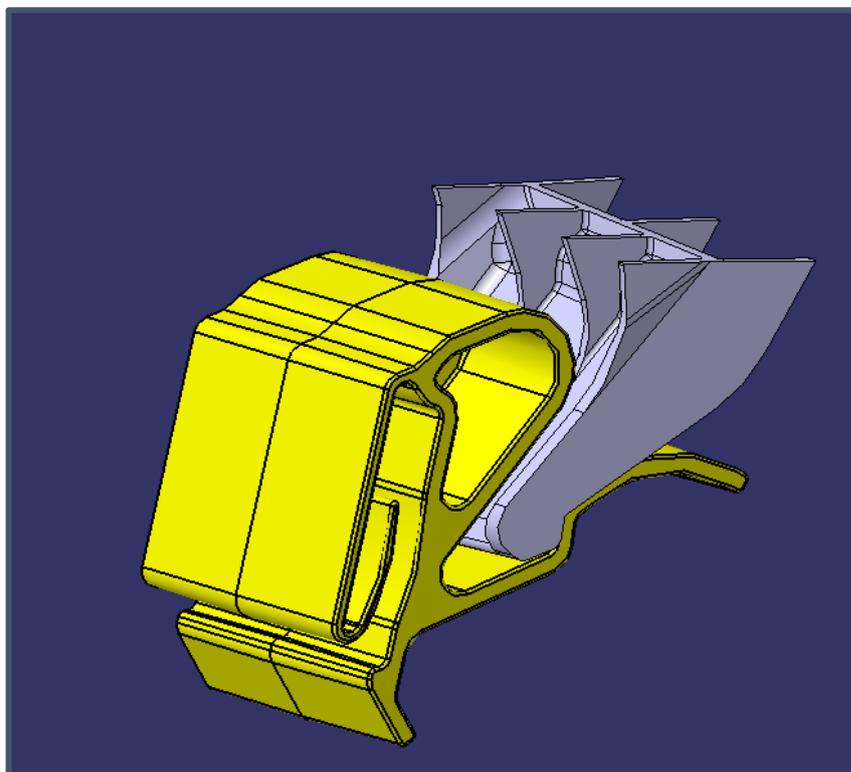


Рисунок 20 – Клипса крепления обивки двери задка с ответной частью

Для проведения анализа построим сетку на исследуемую модель защелки (рисунок 21).

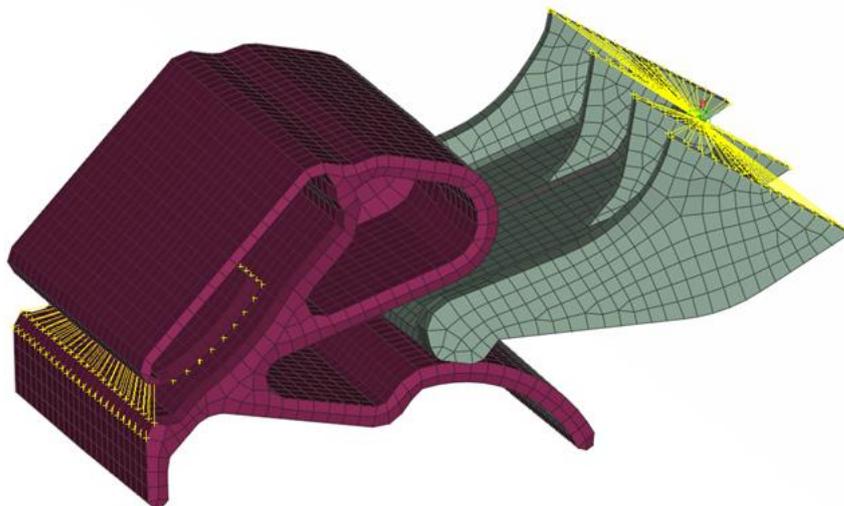


Рисунок 21– Построение сетки МКЭ

Нагрузка смоделирована принудительным перемещением заходной части обивки двери задка в направлении монтажа/демонтажа и показана на рисунке 22.

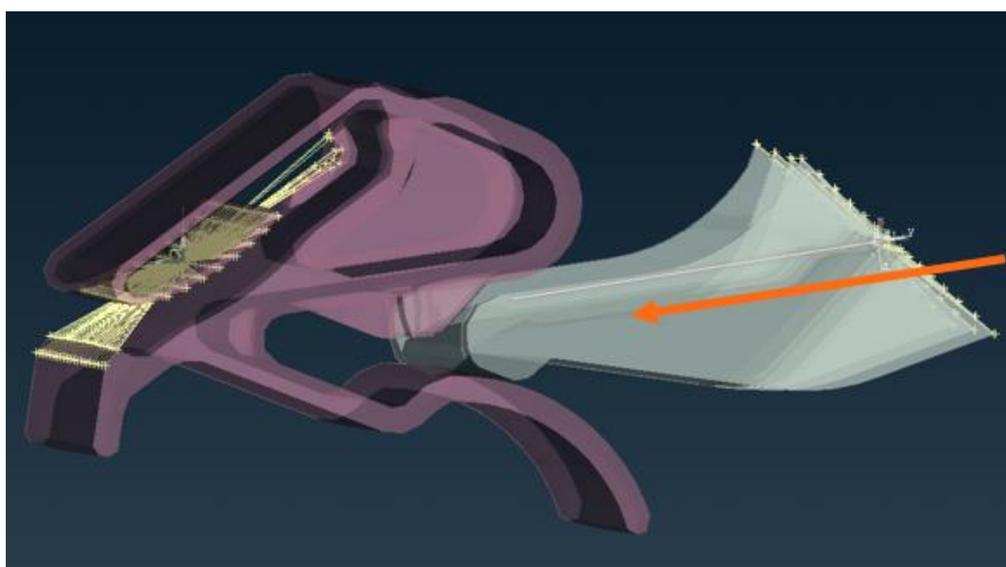


Рисунок 22 – Направление прилагаемого усилия

Результаты расчета защелки с материалом Технамид А-101 показаны на рисунке 23.

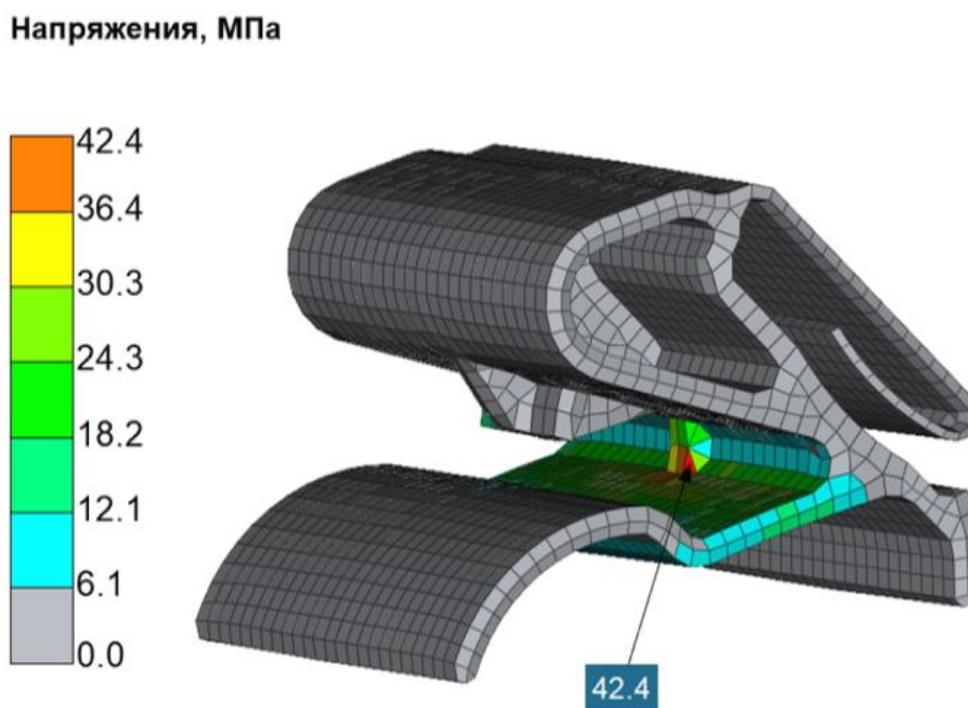


Рисунок 23 – Анализ защелки с материалом Технамид А-101

Максимальное напряжение при установке ответной части возникает в зоне ребра и составляет 42,4 МПа. Значение максимального напряжения в конструкции клипсы не превышает предел прочности, следовательно работоспособность конструкции клипсы подтверждена.

Усилие при монтаже ответной части составляет 15 Н, при демонтаже 13,3 Н.

Результаты расчета защелки с материалом Технамид А-СВ30-ЛО показаны на рисунке 24.

Напряжения, МПа

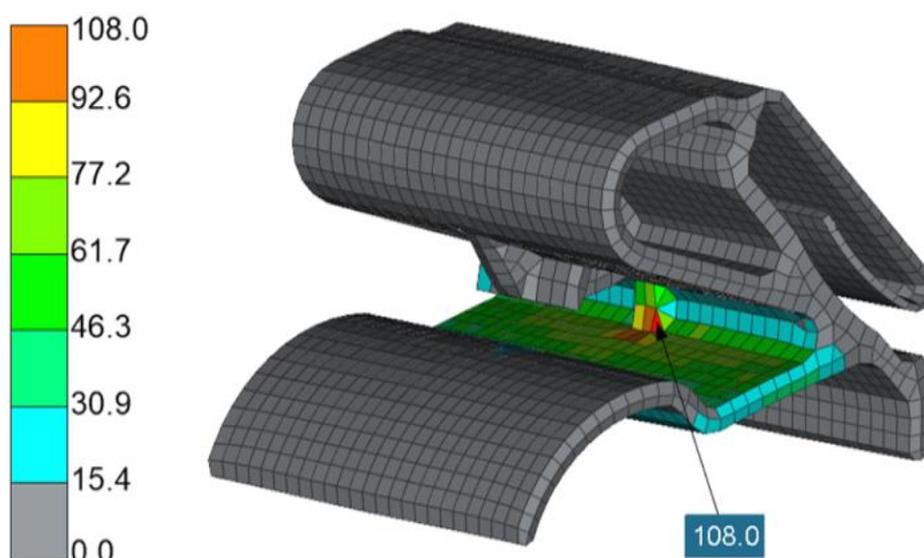


Рисунок 24 – Анализ защелки с материалом Технамид А-СВ30-ЛО

Распространение напряжений при установке ответной части возникает также в зоне ребра и его максимальное значение составляет 108 МПа. Значение максимального напряжения в конструкции защелки не превышают предел прочности, следовательно работоспособность конструкции клипсы подтверждена.

Усилие при монтаже ответной части составляет 40 Н, при демонтаже 33,9 Н.

Результаты полученных расчетов сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты проведенного анализа пластиковой защелки

Материал	Усилие монтажа, Н	Усилие демонтажа, Н	Максимальное напряжение, МПа	Предел прочности, МПа
Технамид А-101	15	13,3	42,4	83
Технамид А-СВ30-ЛО	40	33,9	108	155

Рассмотрев факторы, влияющие на работоспособность, можно сделать вывод что влияние температуры и внутренние напряжения вносят существенный вклад в конечные характеристики изделий из пластмасс.

В ходе проведённого исследования методом конечных элементов для разработанной электронной модели установлено, что конструкция спроектированной защелки работоспособна.

В результате расчетов получены значения усилий монтажа и демонтажа, а также максимальных напряжений, возникающих в защелке при воздействии со стороны ответной части обивки двери задка. Эти данные подтверждают возможность фиксации и расфиксации обивки. Необходимо отметить, что в зависимости от использованной для расчета марки пластика изменяются только величины усилий монтажа и демонтажа, характер и место возникновения максимальных напряжений остаются неизменными.

3 Проведение экспериментальных исследований

3.1 Выбор технологии и материала для получения прототипа

А.Г. Перов в своей статье указывает, что «прототипирование является обязательным этапом в процессе разработки любого нового изделия. Создание качественного прототипа, максимально похожего на будущее изделие - весьма непростая задача. Приходится решать проблему точного повторения геометрической формы, собираемости, внешнего вида и поиска материалов, максимально похожих на заданные. В последнее время популярными стали технологии быстрого прототипирования (RP - rapid prototyping), то есть послойного синтеза макета по компьютерной модели изделия, Современный прототип позволяет не только оценить внешний вид детали, но и проверить элементы конструкции, провести необходимые испытания, изготовить мастер-модель для последующего литья. Использование RP-технологий в прототипировании способно на 50 – 80 % сократить сроки подготовки производства, практически полностью исключить длительный и трудоемкий этап изготовления опытных образцов вручную, или на станках с ЧПУ» [23, с. 31-34].

С.И. Семченков утверждает, что «построение прототипа обычно происходит на основе твердотельной модели из САД-систем или модели с замкнутыми поверхностными контурами. Эта модель разбивается на тонкие слои в поперечном сечении с помощью специальной программы, причем толщина каждого слоя равна разрешающей способности оборудования по z-координате. Обычно при разбиении дается припуск на механическую обработку. Построение детали происходит послойно тех пор, пока не будет получен физический прототип».

Необходимо отметить, что схема установок прототипирования ничем не отличается между собой. Так, «на рабочий стол, элеватор установки, наносится тонкий слой материала, воспроизводящего первое сечение изделия,

затем элеватор смещается вниз на один шаг и наносится следующий слой. Так слой за слоем воспроизводится полный набор сечений модели повторяя форму требуемого изделия. При этом на некотором слое может оказаться, что отдельные элементы "повисают" в воздухе, поскольку они должны крепиться к верхним слоям. Чтобы избежать такой проблемы, 3D модель предварительно подготавливается, в ней строится система поддержек на каждый такой элемент» [23, с. 31].

Главным отличием между технологиями прототипирования считается специальный прототипирующий материал и способ нанесения. Сегодня встречается пару организаций, которые изготавливают RP-установки, они совершенствуются, внедряют что-то новое в свои разработки. Целесообразно рассмотреть основные технологии, которые применяются на сегодняшний день, в том числе их преимущества, основные признаки и недостатки.

Одной из технологий прототипирования выступает стереолитография. «Стереолитография (SL) была представлена компанией 3D Systems в 1987 году, и в настоящее время многие из этих стереолитографических систем (Stereo Lithography Apparatus –SLA) установлены и используются компаниями во всем мире. И с каждым днем число этих систем растет. Стереолитографические системы производят точные фотополимерные твердотельные объекты из трехмерных CAD данных. Основой стереолитографии является локальное изменение фазового состояния однородной среды (переход "жидкость – твердое тело") в результате фотоинициированной в заданном объеме полимеризации. Суть фотополимеризации состоит в создании с помощью инициирующего (в данном случае лазерного) излучения в жидкой реакционноспособной среде активных центров (радикалов, ионов, активированных комплексов), которые, взаимодействуя с молекулами мономера, инициируют рост полимерных цепей. Следствием этого является изменение фазового состояния среды, то есть в облученной области образуется твердый полимер» [23, с. 34].

Схема стереолитографической установки изображена на рисунке 25.

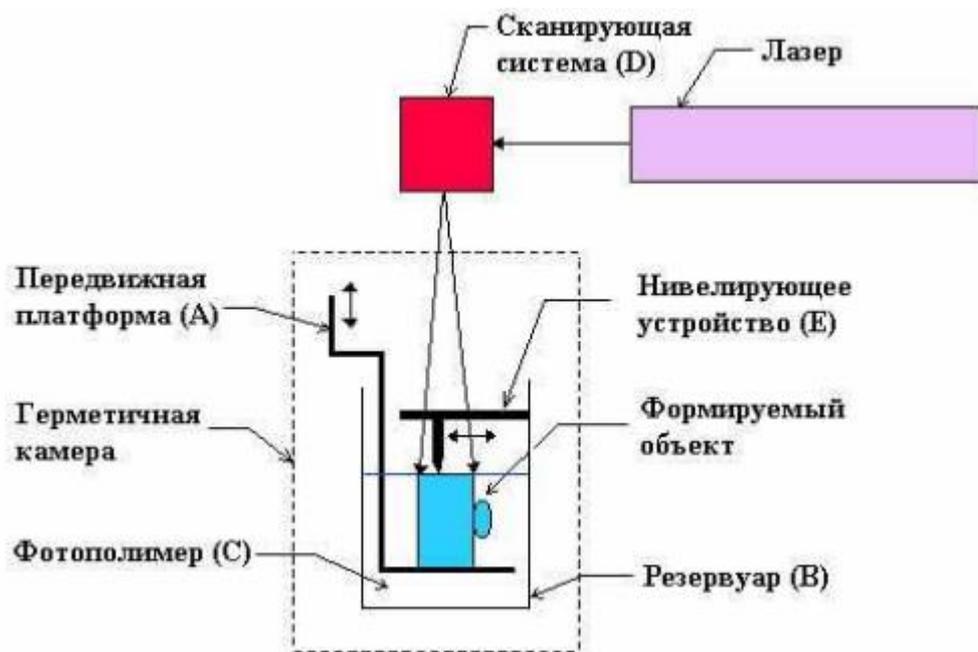


Рисунок 25 – Схема стереолитографической установки

«Передвижная платформа или подъемник (А), первоначально помещены на низ поверхности резервуара (В), который заполняется жидкой полимерной смолой (С). Этот материал имеет особенность – отверждаться под действием ультрафиолетового излучения. В основном используются He-Cd или Ar-ионный лазеры, работающие в области УФ излучения (длина волны 320-370 нм). Физика процесса основана на поглощении фоточувствительным полимером лазерного излучения конкретной длины волны, в результате чего в месте поглощения наблюдается процесс радикальной полимеризации полимера» [18, с. 26].

В.А. Валетов отмечал, что «обычно используются материалы, которые отвердевают при использовании ультрафиолетового излучения, но бывают смолы, которые отвердевают под воздействием видимого излучения. Фотополимер очень светочувствителен и токсичен, поэтому ванна должна быть защищена от света и иметь проточную вентиляцию. Лазерный луч перемещается по поверхности жидкого фотополимера, чтобы "очертить" геометрию сечения объекта. Смола застывает только там, где ее касался

лазерный луч, который перемещается в плоскости X-Y под управлением сканирующей системы (D). Сканирующая система включает в себя дефлекторы, которые управляют зеркалами, причем информация о перемещениях поступает из САД данных. Таким образом, лазерный луч перемещается очень быстро и по заданному контуру» [8, с. 153].

Как отмечал Ю.П. Кузьмин «изделие опускается вниз (прибл. на 0,5–1,3 мм) на некоторое время, в течении которого ее поверхность заполняется неполимеризованной жидкостью, далее нивелирующее устройство (E) удаляет излишки жидкого полимера с поверхности. (Заметим, что амплитуда колебаний жидкости должна быть заранее выверена). Изделие опускается вниз, в то время как сфокусированный лазерный луч остается на поверхности полимера. При отверждении происходит усадка полимера. Эта усадка может привести к изменению объема жидкости в ванне и должна все время проверяться. В случае отклонения уровень восстанавливается. Толщины слоев составляют от 50 до 500 мкм. Это контролируется для определения, на какую величину опускать платформу. Чем тоньше отвержденные слои, тем точнее, "глаже" поверхность изделия, но с другой стороны процесс идет дольше. Параметры лазерного излучения стабилизированы, но дефлектора позволяют управлять движением луча по X-Y поверхности жидкости» [28, с. 301].

Вышеуказанные шаги повторяются до тех пор, пока объект не будет изготовлен в полном объеме. Стоит отметить, что все же некоторые конфигурации предмета могут иметь нависающие конструкции, которые поддерживаются в ходе изготовления. Поддержки (т.е. внутренние или внешние "переборки") создаются на стадии компьютерной обработки 3-х мерного вида изделия при помощи различных программ (напр. Solid Concepts, Los Angeles, California).

Они позволяют:

- «стабилизировать выступы, консоли на краях изделия;
- предотвратить расслаивание в сложных участках изделия;
- корректировать возможное искривление слоев на платформе;

– позволяет легко отделять синтезированное изделие от основания платформы;

– облегчает синтез сложных моделей, создавая их из нескольких частей».

«После того, как объект изготовлен, его поднимают над жидкостью, и излишнее с него стекает, впоследствии оно переносится в печь с целью отверждения полимера. Стоит отметить, что мощность лазера должна быть минимум 10, а максимум 200, чем больше будет мощность, тем быстрее произойдет полимеризация. Лазерная стереолитография позволяет получить очень сложные цельно выращенные изделия. Практически же ограничения по форме связаны только с невозможностью вырастить изделия с полностью изолированными внутренними полостями. Точнее, вырастить-то можно, но при этом в полости останется не удаленная жидкая смола, которая в дальнейшем полимеризуется» [28, с. 302].

«При SLS-технологии (Selective Laser Sintering) 3D объект создается из порошкообразных материалов (рисунок 26). Частицы порошка, диаметром 50-100 мкм, находящиеся в емкости, расплавляются под воздействием лазерного излучения. Лазерный луч, попадая на тонкий слой порошка, спекает порошковые частицы, которые затвердевают при охлаждении, формируя твёрдый слой. Подвижная платформа опускается. Сверху при помощи ролика наносится порошок, и процесс повторяется до полного изготовления прототипа. В данной технологии строящееся изделие не нуждается в подпорках (как, например, при стереолитографии), так как нерасплавленный порошковый материал остается лежать в камере, тем самым, обеспечивая необходимую поддержку. После построения, изделие полностью окружено неиспользованным материалом. Порошок очень осторожно удаляется только после полного застывания изделия, которое, в зависимости от материала, может длиться несколько часов. После очистки изделие может быть подвергнуто дальнейшей обработке. Преимущество этого метода заключается в том, что наряду с пластмассами, можно изготавливать изделия из всех

материалов, которые под воздействием тепла расплавляются, а затем при охлаждении вновь отверждаются. Основными производителями установок для метода лазерного спекания порошковых материалов являются компании DTM Corp. (США) и EOS (Германия). Обе компании создают установки для изготовления изделий из пластмасс, металла и песка» [28, с. 305].

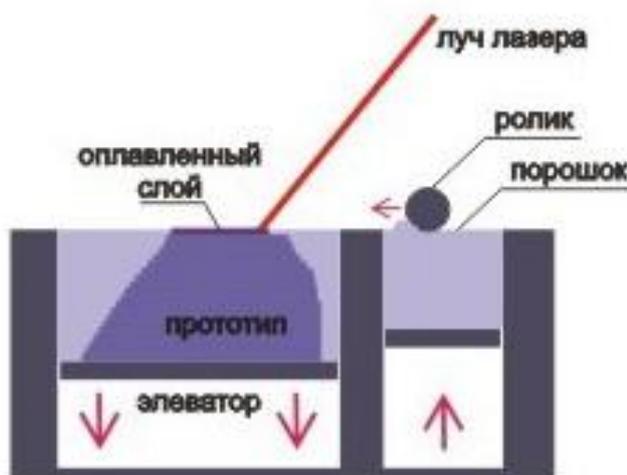


Рисунок 26 – Процесс прототипирования методом SLS

LOM (Laminated Object Manufacturing) - изготовление слоистых моделей (рисунок 27). «Технология создания трехмерных изделий методом послойного склеивания элементов, вырезанных из листового материала. Изготовленные по этой технологии изделия идеально подходят для решения задач, требующих оценки формы и эстетических свойств изделий. Прочность LOM-объектов в большинстве случаев позволяет использовать их для проверки функциональности проектируемого изделия. Для изготовления изделий используется бумага или листовый пластик с нанесенным сухим связующим веществом. Изготовленные LOM-изделия по составу имеют сходство с древесиной и легко обрабатываются» [7, с. 14].



Рисунок 27 – Процесс прототипирования методом LOM

«FDM (FDM – Fused Deposition Modeling) – процесс послойного наложения расплавленной полимерной нити. FDM-система позволит превратить концепцию изделия в реальный экземпляр, проверить его на соответствие форме и размерам и даже смоделировать работоспособность изделия, не прибегая к излишним временным и материальным затратам. При помощи FDM-технологии можно создавать трехмерные объекты из твердотельных или поверхностных электронных моделей, полученных в CAD системе. Термопластичный моделирующий материал в форме тонкой нити, диаметром 0,07 дюйма (1,78 мм), подается в экструзионную (выдавливающую) головку с системой регулировки температуры, где он разогревается до полужидкого состояния. Выдавливающая головка наносит материал очень тонкими слоями на неподвижное основание, формируя за один проход законченный слой изделия. Последующие слои наносятся на предыдущие, отвердевают, соединяются друг с другом» [28, с. 307].

Процесс FDM печати показан на рисунке 28.

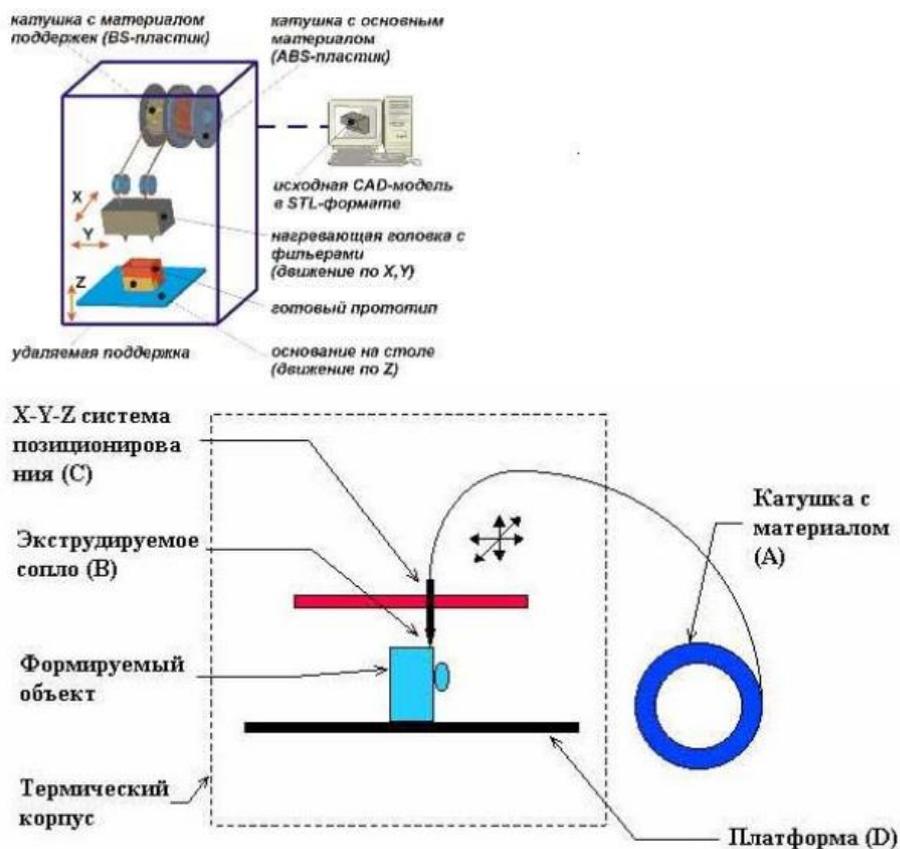


Рисунок 28 – Процесс прототипирования методом FDM

«Все начинается с того, что необходимо спроектировать концептуальную геометрическую модель на CAD-системе, а сам ход изготовления изделия благодаря программному обеспечению QuickSlice фирмы Stratasys, которое за короткий промежуток времени осуществляет обработку stl-файла, осуществляя разбивку модели на слои, сечения. При возникшей необходимости нужно обратиться к SupportWorks, который автоматически формируются поддерживающие (опорные) структуры. При создании изделия используется два вида материала: первый (основной) – для формирования самого изделия, а другой – в качестве опорного (материал поддержки). Поддержка легко удаляется, оставляя чистую и гладкую поверхность раздела между поддержкой и изделием, что в результате даст

превосходное качество законченного изделия. Траектория перемещения инструмента задается оператором простым нажатием соответствующей клавиши, и эти данные в цифровой форме вводятся затем в FDM-установку. Установка обеспечивает перемещение по осям X, Y и Z, при этом за один проход создается один слой изделия. Полученные таким способом изделия можно затем маркировать, шлифовать, красить, сверлить. Преимущество этого способа заключается в том, что существует огромная палитра материалов, позволяющая пользователю подбирать именно тот материал, который лучше всего соответствует его требованиям к изготавливаемому изделию. Кроме того, важен тот факт, что в процессе построения объекта можно изменять материал» [7, с. 16].

«Системы FDM имеют модульную конструкцию, что позволяет пользователям наращивать возможности системы по мере роста сложности изготавливаемых изделий. Базовая система любой модели включает все необходимые компоненты для изготовления изделий из материала одного типа (обычно из ABS-пластика). Существуют дополнительные модули, позволяющие расширять функциональные возможности системы благодаря использованию других типов моделирующих материалов – литьевой воск, специальный медицинский ABS-пластик, полиэстер (полиэфирный компаунд). Разработчиком технологии FDM и производителем оборудования является компания Stratasys. Фирма Stratasys была основана в 1988 году и является одним из первых производителей изделий. В установках FDM 1000/1500/1600 систематически увеличивался размер камеры, где происходит построение изделий, что дало возможность изготавливать их большего размера» [20, с. 55].

Многие системы аддитивных технологий в настоящее время считаются громоздкими и довольно дорогими установками. «Небольшие компании не могут себе позволить их приобрести. Поэтому они заказывают свои изделия на фирмах, специализирующихся на этих технологиях или услугах по АТ. Некоторые крупные компании покупают одну или две аддитивных установки,

которые используются различными службами, что приводит к задержке изготовления изделий. Для многих специалистов, которые занимаются концептуальным проектированием и которым необходимо только взглянуть на конструкцию и затем продолжить разработку, очень важен фактор быстрого, недорогого и простого получения прототипов проектируемых изделий. Для той трети рынка АТ, которой требуются прототипы для визуальной оценки, начали производиться так называемые "принтеры твердотельных объектов" (Three Dimentional Printer – 3D Printer) – системы, которые строят физические изделия движением материала из одной или нескольких струйных головок, подобно обычному принтеру» [12, с. 604].

Как отмечает В.А. Валетов «как и традиционные аддитивные машины, 3D принтеры изготавливают физические модели, основанные на САД-модели, используя, в основном, технологии струйного моделирования и технологии использования для формирования изделия порошка, который затвердевает при помощи связывающего вещества на водной основе» [8, с. 153].

Принцип работы 3D принтера показан на рисунке 29.

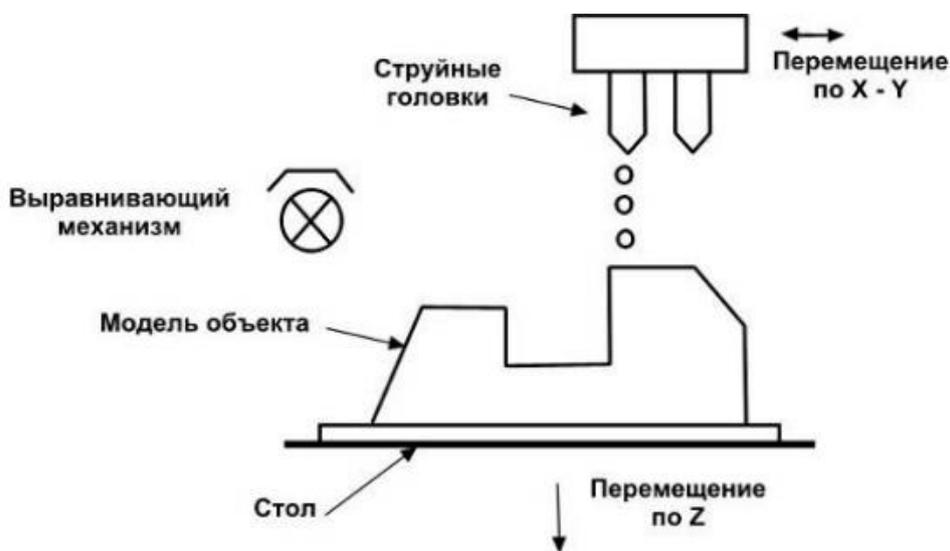


Рисунок 29 – Процесс прототипирования на 3D принтере

Технология струйного моделирования (Ink Jet Modelling) он основывается на том, что головка, содержащая от двух до девяти до шести сопел, наносит модельный и поддерживающий материал на плоскость слоя (рисунок 30). «После нанесения слоя, могут проводится его фотополимеризация и механическое выравнивание. В качестве поддерживающего материала обычно используется воск, а в качестве модельного - широкий спектр материалов, очень близких по свойствам к конструкционным термопластам. Данный метод позволяет получать прозрачные и окрашенные прототипы с различными механическими свойствами - от мягких, резиноподобных до твердых, похожих на пластики» [12, с. 610].

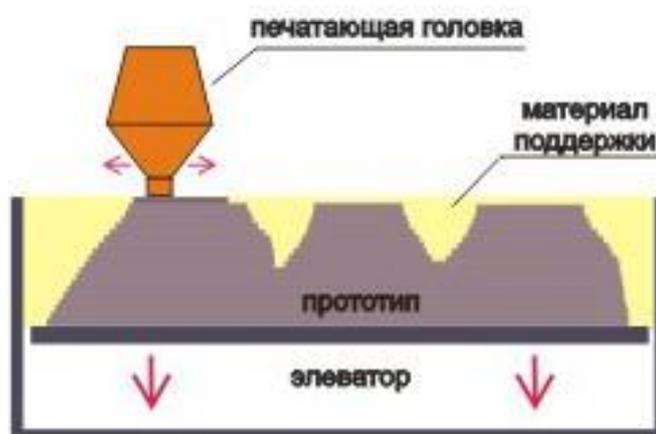


Рисунок 30 – Процесс прототипирования по технологии струйного моделирования

Еще одной методом прототипирования, показан на рисунке 31, как отмечает А.Г. Перов является «технология склеивания порошков (binding powder by adhesives). Используются крахмально-целлюлозный порошок и жидкий клей на водной основе, который поступает из струйной головки и связывает частицы порошка, формируя контур модели. По окончании

построения излишки порошка удаляются. Для увеличения прочности модели, имеющиеся пустоты могут быть заполнены жидким воском. Такие технологии позволяют не просто создавать 3D-объекты произвольной формы, но еще и раскрашивать их» [23, с. 32].

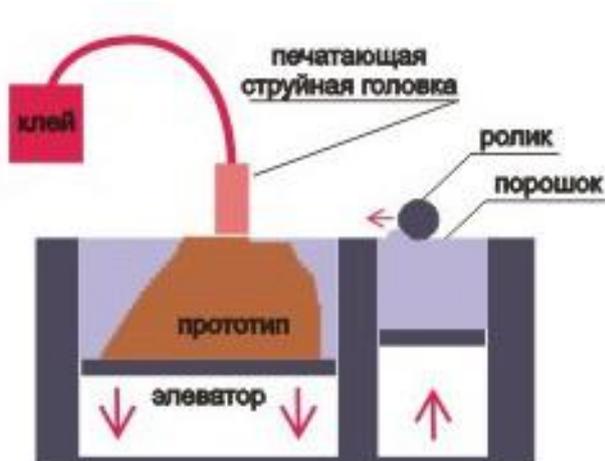


Рисунок 31– Процесс прототипирования по технологии склеивания порошков

Проанализировав имеющиеся технологии прототипирования и конструкцию клипсы, предлагается использовать технологию послойного наложения расплавленной нити методом FDM печати.

3.2. Прототипирование образца изделия

Для изготовления пластиковой детали необходима цифровая трехмерная модель, которую загружают в принтер в формате STL. В процессе подготовки 3D модели к печати объект разделяется на слои (слайсинг), каждый из которых обладает двумя закодированными параметрами - контуром и процентом заполнения. В процессе 3D печати экструдер принтера перемещается вдоль горизонтальных осей, выполняя движения, заложенные в G-коде модели. По завершении печати одного слоя модели, происходит вертикальное

перемещение экструдера или рабочей платформы для печати следующего слоя.

Электронная модель детали должна быть технологична с точки зрения выполнимости по технологии FDM печати. В 3D модели не должно быть поднутрений, толщина стенок не должна быть меньше, чем диаметр сопла. Подготовленная электронная модель показана на рисунке 32.

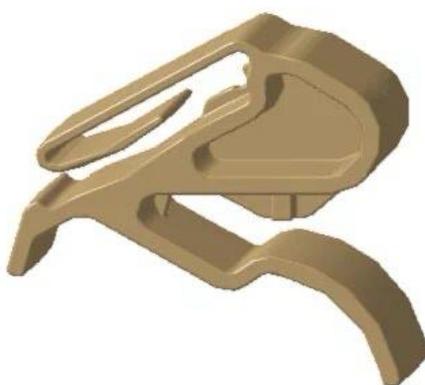


Рисунок 32 – Подготовленная 3D модель для печати

Филамент (расходный материал) для FDM-принтера — это термопластик в виде нити или прутка, намотанный на катушки. Он поступает в печатающий модуль принтера (экструдер). В печатающем блоке пластиковая нить нагревается, расплавляется и методом экструзии подается через отверстие металлического сопла на рабочую поверхность. Печать изделия происходит послойно снизу вверх; слои разогретого пластика спекаются (склеиваются) между собой.

Для прототипирования будет использоваться материал ABS, как широко распространенный и обладающий хорошими физико-механическими свойствами полимер.

ABS пластик популярен в системах быстрого прототипирования благодаря своей высокой температуре стеклования. В следствие чего, не возникает нежелательных деформаций при небольшом нагреве в бытовых условиях. «ABS ударопрочный материал, который относится к инженерным пластикам. Обладает более высокой стойкостью к ударным нагрузкам по сравнению с полистиролом общего назначения, ударопрочным полистиролом и другими сополимерами стирола. Превосходит стиролы по механической прочности и жесткости. Выдерживает кратковременный нагрев до 90-100 °С, а максимальная температура длительной эксплуатации находится в пределах 75 – 80 °С» [21, с. 270]. Сравнение характеристик показано в таблице 3.

Основные характеристики материала ABS:

- плотность $\rho = 1080 \text{ кг/м}^3$;
- прочность при разрыве $\sigma_{\text{с}} = 50 \text{ МПа}$;
- относительное удлинение при разрыве $\delta = 15\%$;
- модуль упругости при изгибе $E = 2900 \text{ МПа}$.

Таблица 3 – Сравнение характеристик материалов

	Плотность ρ , кг/м ³	Прочность при разрыве $\sigma_{\text{с}}$, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Модуль упругости при изгибе E , МПа
ABS	1080	50	20	2900
Технамид А-101	1130	83	18	2950
Технамид А-СВ30-ЛО	1350	155	3.5	7600

Как видно из таблицы, материал ABS сопоставим с Технамид А-101 (РА66), соответственно характеристики «выращенной» детали должны быть схожими с результатами симуляций.

Полученное изделие показано на рисунке 33.

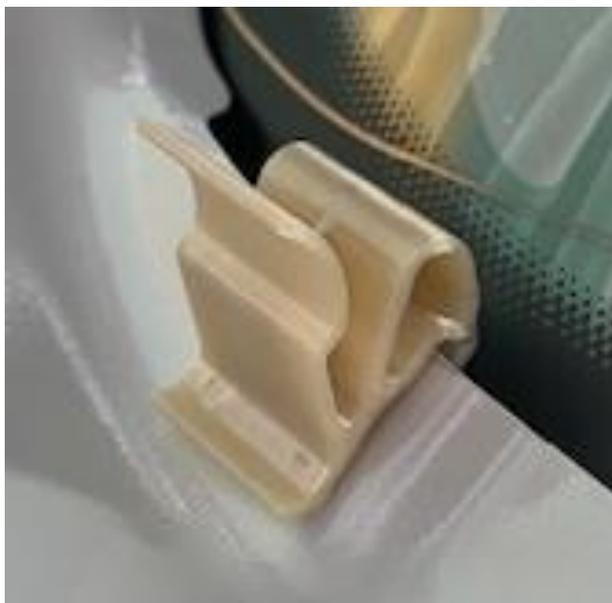


Рисунок 33 – Прототип клипсы

3.3 Анализ работоспособности прототипных изделий

Для проверки работоспособности защелки, из тела детали обивки двери задка была вырезана ответная часть. Данный элемент показана на рисунке 34.



Рисунок 34 – Ответная часть с прототипной клипсой

Для получения адекватных значений усилий вектор приложения силы должен соответствовать направлению установки детали. Испытания проводились при температуре окружающей среды плюс 23° С, замер усилий фиксации и расфиксации произведен с помощью измерителя силы, цифрового динамометра РСЕ-FG500. Процесс измерения усилий показан на рисунке 35.



Рисунок 35 – Процесс проведения опыта

Для получения достоверных результатов опыт проводился пять раз.

Расчет среднего значения усилий проводим по формуле:

$$X_{\text{cp}} = \frac{1}{n_i} \sum_{q=1}^{n_i} x_{iq} , \quad (20)$$

Результаты полученных измерений сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты опыта

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X _{cp}
Усилие монтажа, Н	15,5	16	15,9	15,5	15,7	15,72
Усилие демонтажа, Н	14,1	13,9	14,2	14	13,8	14

3.4 Сравнение вычисленных и экспериментальных результатов

Подтверждение данных расчетов методом конечных элементов с помощью натуральных экспериментов, когда это возможно, является исчерпывающим средством валидации модели.

Сравнение полученных значений методом конечных элементов и в ходе эксперимента показаны в таблице 5.

Таблица 5 – Сравнение полученных результатов

	Усилие монтажа, Н	Усилие демонтажа, Н
ABS	15,72	14
Технамид А-101 (РА66)	15	13,3
Технамид А-СВ30-ЛО (РА66)	40	33,9

Сравнивая экспериментальные данные и расчетные результаты видно, что значения усилий монтажа и демонтажа для материалов ABS и Технамид А-101 отличаются незначительно.

Согласно КД на оригинальную стальную клипсу усилие фиксации и расфиксации ответной части должно находиться в пределах от 30 до 50 Н. Так как, значения в КД выше полученных для материалов ABS и Технамид А-101, и принимая во внимание, что экспериментальные и расчетные данные для этих материалов схожи, можно сделать вывод, что для возможности применения, разработанной клипсы-аналога из пластика в качестве серийной детали для крепления обивки двери задка автомобиля необходимо использовать материал Технамид А-СВ30-ЛО.

Заключение

Подводя итог вышеизложенному, можно сделать следующие выводы.

В качестве крепежных элементов для крепления деталей интерьера и экстерьера, применяются различные виды клипс и защелок. Применение различных типов и видов материала обусловлено функцией и расположением данных изделий.

Влияние различных факторов воздействия, таких как, термическое нагружение и внутренние напряжения существенно влияют на поведение детали при эксплуатации. Различные конструкции, применяемые для крепежных элементов, несут различный функционал в зависимости от мест и условий применения.

При изготовлении изделия необходимо четко придерживаться нормативной документации, правил проектирования и технологии изготовления так как это существенно влияет на конечный продукт.

Проведенный анализ методом конечных элементов показал работоспособность предлагаемой конструкции аналога фиксатора. Полученные значения усилий фиксации и расфиксации напрямую зависят от применяемого вида материала и его наполнения.

Для проведения экспериментальной части работы были проанализированы различные технологии прототипирования деталей. В качестве технологии изготовления выбрана технология FDM печати.

Полученные прототипы подтвердили свою работоспособность. Усилия монтажа и демонтажа сравнимы с проведенными расчетами МКЭ.

Для возможности применения, разработанной клипсы-аналога из пластика в качестве серийной детали с усилиями, соответствующими оригинальной клипсы для крепления обивки двери задка автомобиля необходимо использовать материал Технамид А-СВ30-ЛО.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Абрамов В.В. Состояние и перспективы развития промышленности переработки пластмасс в России // Пластические массы. 1999. № 5. С. 3-6.
2. Авери Дж. Специальные технологии литья под давлением / Дж. Авери, Кельвин. Т, Т. Окамото – Профессия, 2009. 416 с.
3. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / Под общ. ред. Д.Г. Красковского. М.: КомпьютерПресс, 2002. 224 с.
4. Беккер М.Б. Литье под давлением / М.Б. Беккер - Высшая школа, 1978. 349 с.
5. Белопухов А.К. и др. Литье под давлением. Под ред. А. К. Белопухова. М., «Машиностроение», 1975. 400 с.
6. Бихлер М. Параметры процессов литья под давлением / М. Бихлер – Demag Plastservice, 2001. 129 с.
7. Валетов В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы). Учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 63 с.
8. Валетов В.А., Кузьмин Ю.П., Орлова А.А., Третьяков С.Д., Технология приборостроения. Учебное пособие, СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 336 с.
9. Вольфсон С.И. Прогрессивные технологии переработки динамических термоэластопластов / С.И. Вольфсон – Казань, КГТУ, 200. 40 с.
10. Гастров В. Конструирование литьевых форм в 130 примерах / В. Гастров, А. П. Пантелеева – Профессия, 2006. 336 с.
11. Глазман Б.С. Автоматизированное и роботизированное литье под давлением / Б. С. Глазман - Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2014. 137с.
12. Гордон Дж. М. Управление качеством литья под давлением / М. Дж. Гордон – Научные основы и технологии, 2012. 823 с.
13. Горюнов И.И. Пресс-формы для литья под давлением. Справочное пособие / И.И. Горюнов – Машиностроение, 1973. 256 с.

14. Давид О. Казмер. Разработка и конструирование литьевых форм / Казмер. Давид. О – Профессия, 2011. 464 с.
15. Заворотнюк А.Г. Изменение модуля упругости пластиковых элементов в зависимости от температуры // Научное сообщество студентов XXI столетия. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ: сб. ст. по мат. СXXXVI междунар. студ. науч.-практ. конф. 2024, № 4(134).
16. Кацнельсон М. Ю., Балаев Г. А. Пластические массы. Свойства и применение/ Справочник /- М.: Химия, 1978. 567 с.
17. Категоренко Ю.И. Автоматизированная система расчета технологических параметров при литье под регулируемым давлением / Ю. И. Категоренко - Екатеринбург: РГППУ, 2013. 103 с.
18. Клинков А.С. Оборудование и технология вторичной переработки отходов полимерных материалов : методические указания / сост. : А.С. Клинков, И.В. Шашков, М.В. Соколов, П.С. Беляев. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. 48 с.
19. Лейкин Н.Н. Конструирование пластмассовых пресованных изделий /Н.Н. Лейкин – Изд. Машиностроение, 1964. 220 с.
20. Ложечко Ю.П. Литье под давлением термопластов / Ю.П. Ложечко – Профессия, 2010. 224 с.
21. Мэллой Р.А. Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением/ Р.А.-Мэллой Профессия, 2006. 512 с.
22. Освальд Т. Литье пластмасс под давлением/ Т. Освальд, Л.-Ш Тунг, П. Дж. Грэмманн- Профессия, 2006. 308 с.
23. Перов А.Г., Семченков С.И. О некоторых проблемах современной технологии 3D печати // Вестник ИМСИТ. № 1-2 (45-46). 2011. С. 31-34.
24. Почекуев Е.Н. Проектирование в Siemens NX технологических процессов изготовления деталей листовой штамповкой: электронное учеб.-Метод, пособие / Е.Н. Почекуев, П.А. Путеев, П.Н. Шенбергер. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2014.- 1 электрон, опт. Диск.

25. Садова А.Н. Проблемы выявления и устранения возможных дефектов в процессе получения изделий из реактопластов прессованием и литьем под давлением / А. Н. Садова – Казань ; КНИТУ, 2011. 246 с.
26. Стеинко В. Оптимизация литья пластмасс под давлением/ Стеинко В. – Профессия, 2012. 620 с.
27. Фетисова Т.С. Проектирование литьевых форм для изготовления пластмассовых изделий : учеб. пособие / Т.С. Фетисова. –Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. 102 с.
28. Фишер Дж. Усадка и коробление отливок из термопластов / Фишер Дж. Профессия, 2009. 424 с.
29. Хохлов С.В. Компьютерное моделирование теплового и напряженно деформированного состояния непрерывнолитой заготовки/ С.В. Хохлов, О.В. Мартынова - Тула, 2002. 189 с.
30. Campo E.A. Complete Part Design Handbook. For Injection Molding of Thermoplastics/ E.A Campo - Hanser Publications, 2006. 870 с.
31. Douglas M. Bryce Plastic Injection Molding: Manufacturing Process Fundamentals / Douglas M.B Society of Manufacturing Engineers, 1996. 227 с.
32. Jerry Fischer Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage / Fischer.J William Andrew, 2003. 263 с.
33. Olmsted, Bernie A. Practical injection molding / Bernie A. Olmsted, Martin E. Davis New York Basel : Dekker , Cop. 2001 - XII, 217 с.
34. Rosato.D.V. Injection molding handbook / / Ed. by Dominick V. Rosato [et al.]. - 3. Ed. Boston [etc.]: Kluwer acad. publ., Cop. 2000 - XXXI, 1457 с.
35. Tadmor Z. Principles of Polymer Processing / Z. Tadmor WileyInterscience; 2 editions. 2006. 984 с.
36. Temperierung von Spritzgusswerkzeugen durch vollständig integrierte induktive Beheizung / Michael Zülch Stuttgart: Inst. für Konstruktion u. Fertigung in der Feinwerktechnik der Univ. Stuttgart, 2011. 129 с.