

Разрешение противоречия «жѐсткость ↔ мягкость» в зажиме для тонкостенной детали

Демонстрационный отчѐт для курсовых и дипломных работ по машиностроению: ТРИЗ-анализ инженерной задачи, инженерные расчѐты, технико-экономическое сравнение и план работы над проектом.

Тип задачи	Методология	Дата анализа	Формат
Инженерная / машиностроение (учебный кейс)	ТРИЗ: 9 фаз, 4 стратегии	28 сентября 2026	Демо-кейс для сайта

1. Резюме

Тема курсовой или дипломной работы: «Разработка зажимного приспособления для чистовой обработки тонкостенной втулки». Классическая проблема: чтобы удержать заготовку под нагрузкой резания, зажим должен быть жёстким и сильным; чтобы не исказить тонкую стенку, он должен быть мягким и нагружать деталь равномерно. Штатный трёхкулачковый патрон с твёрдыми кулачками даёт одно из двух: при большом усилии деталь после разжима теряет круглость, при малом — вибрирует и проскальзывает.

Агент Trizly прошёл полный девятифазный цикл анализа для инженерной задачи: сформулировал техническое и физическое противоречия, определил идеальный конечный результат (ИКР), провёл ресурсный аудит, сгенерировал решения по четырём стратегиям (принципы и матрица, су-поле и стандарты, физические эффекты, принципы разделения), объединил их, проверил «скептиком» и ранжировал. Дополнительно в отчёт включены образцы инженерных расчётов, технико-экономическое сравнение и таблица «что из анализа идёт в какой раздел работы».

Итог: лучший по составному критерию вариант — мягкие сегментные кулачки, расточенные «на месте» (0.75); в расчётном примере они снижают контактное давление примерно в 13 раз (с 3,7 до 0,28 МПа) при том же удерживающем моменте. Для дипломного проекта в качестве расширенного варианта рассматриваются осевой зажим и гидропластовая охватывающая втулка.

2. Описание задачи (кейс)

Контекст. Механический участок обрабатывает тонкостенные втулки из алюминиевого сплава Д16Т. На токарном станке с ЧПУ выполняется чистовая расточка отверстия; заготовка закрепляется за наружную поверхность в трёхкулачковом патроне. Кейс учебный: числа приближены к типичным и служат для иллюстрации методики.

Исходные данные (в формате задания на курсовую)

Деталь	Втулка тонкостенная Ø100 × Ø95 × 60 мм (стенка 2,5 мм, отношение стенки к диаметру 2,5%)
Материал	Д16Т
Операция	Растачивание отверстия с Ø93,0 до Ø95H7 (+0,035): черновой проход $t = 0,8$ мм, $f = 0,2$ мм/об; чистовой $t = 0,2$ мм, $f = 0,1$ мм/об
Оборудование	Токарный станок с ЧПУ, 3-кулачковый патрон Ø200 мм, $n = 1\,200$ мин ⁻¹
Требования к детали	Круглость отверстия $\leq 0,010$ мм; Ra 1,6 мкм; на наружной поверхности Ø100 (Ra 1,6) не допускаются следы кулачков
Программа выпуска	5 000 деталей в год

Усилие зажима сейчас: 1 800 Н на кулачок (жёсткие закалённые кулачки, площадка $\approx 20 \times 6$ мм)

Круглость после разжима: 0,035–0,050 мм (трёхгранность) **Брак по круглости:** 18% деталей

Следы кулачков: 12% деталей

При усилнии ≈ 450 Н на кулачок: дребезг, Ra 3,2 вместо 1,6, проскальзывание в 7% случаев, круглость 0,015–0,020 мм

Симптом. Оба «простых» решения не работают. Большое усилие удерживает заготовку, но упруго превращает тонкое кольцо в трёхгранное: отверстие растачивается круглым в деформированном состоянии и теряет форму после разжима. Малое усилие сохраняет форму, но не даёт достаточной динамической жёсткости закрепления, и процесс резания становится неустойчивым.

Цель проекта. Обеспечить круглость $\leq 0,010$ мм без следов на наружной поверхности, Ra $\leq 1,6$ мкм и брак $\leq 3\%$ при снижении производительности не более чем на 10%.

Кейс сконструирован как репрезентативный пример класса задач «зажим тонкостенных деталей» (втулки, кольца, корпуса подшипников, гильзы) — данные иллюстративные; студент подставляет данные своего задания и проверяет расчёты по своим нормативам и справочникам.

3. Классификация типа задачи ФАЗА 0 — INTAKE+

ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАДАЧА — технологическая оснастка, точность механической обработки, упругие деформации.

Границы системы: заготовка — кулачки — патрон — станок в пределах одной операции расточки

Главная полезная функция: удерживать заготовку неподвижно при резании, не искажая её форму

Условия эксплуатации: вращение 1 200 мин⁻¹, переменная нагрузка резания, серийная смена деталей

Ограничения: стандартный станок и патрон; бюджет на оснастку до 100 тыс. ₽; переналадка не более 15 минут

4. Техническое противоречие ФАЗА 1

ТП-1 (основное): Усиление зажима (парам. 14 — прочность, усилие фиксации) → рост вредного воздействия на деталь (парам. 30 — вредные факторы, действующие на объект: деформация формы, следы).

ТП-2 (вторичное — цена любого «умного» зажима): Улучшение прочности и жёсткости фиксации (парам. 14) → усложнение устройства (парам. 36).

Матрица (14 × 36) в справочнике агента рекомендует принципы:

№1 Сегментация

№35 Изменение параметров

№10 Предварительное действие

№28 Замена механической схемы

Для основной пары 14 × 30 ячейки в компактном справочнике агента нет, поэтому принципы для неё определяются стратегиями В-С и принципами разделения. Принципы из матрицы фиксируются в Фазе 1 и применяются в Фазе 4.

Цепочка «почему» (углубление до корня)

1. **Почему усилие зажима искажает деталь?** Стенка 2,5 мм при Ø100 имеет малую изгибную жёсткость; три кулачка передают нагрузку через узкие площадки, и кольцо упруго превращается в трёхгранное.
2. **Почему форма нарушена после разжима?** Отверстие растачивается круглым в упруго деформированной заготовке; после снятия зажима упругая деформация исчезает, и круглая расточка становится трёхгранной (упругий возврат).
3. **Почему нельзя просто снизить усилие?** Зажим должен воспринимать момент резания и динамические нагрузки; при малом усилии падает динамическая жёсткость закрепления. Одна конструкция (узкие жёсткие кулачки с единым усилием) отвечает и за удержание, и за форму детали: нет разделения «сколько силы» и «где и как она приложена».

Физическое противоречие (Уровень 3)

Зажимной элемент должен быть **жёстким** (высокая жёсткость и усилие), чтобы удержать заготовку при резании (функция 1),
и одновременно должен быть **мягким** (податливым, с малым локальным давлением), чтобы не деформировать тонкую стенку (функция 2).

Зона конфликта: по месту — три площадки контакта кулачков с наружной поверхностью Ø100; по времени — период резания (нужна жёсткость) и момент разжима (возвращается деформация); по условию — тонкая стенка, сплав Д16Т, режимы чернового и чистового проходов.

5. Идеальный конечный результат (ИКР) ФАЗА 2

ИКР-1 (функциональный): Зажим сам удерживает заготовку абсолютно неподвижно при резании и при этом не деформирует её — без усложнения конструкции и роста стоимости.

ИКР-2 (ресурсный): Используя только существующие ресурсы (упругость заготовки, геометрию торцев и наружной поверхности, давление станочной гидравлики или воздуха, паузы между проходами), зажим становится жёстким при резании и нагружает деталь равномерно по всей поверхности.

ИКР-3 (предельный — устранение элемента): Зажимных кулачков с локальным усилием нет вообще, но заготовка надёжно удерживается — например, равномерным давлением среды по всей окружности либо за жёсткую технологическую зону, а не за тонкую стенку.

6. Ресурсный анализ ФАЗА 3

Тип ресурса	Что доступно	Статус
Вещество	Заготовка Д16Т с возможным технологическим припуском; заготовки мягких кулачков (алюминий, полиамид); СОЖ; сжатый воздух	Свободно, дешево
Поле	Сила трения (основной механизм удержания); давление жидкости или воздуха; упругость; центробежные силы при вращении	Трение используется, давление среды — нет
Пространство	Длина втулки 60 мм (есть участки под опору и торцы); торцевая поверхность заготовки; место в кулачках под вкладыши	Частично свободно
Время	Черновой и чистовой проходы разделены — усилие можно менять между ними; пауза между проходами	Не используется
Информация	Замеры формы после операции; нагрузка шпинделя по данным станка; результаты МКЭ-расчёта	Замеры есть, но не связаны с усилием зажима
Функция/свойство	У станка уже есть привод патрона с регулируемым давлением; кулачки можно растачивать на рабочем диаметре	Не используется для управления формой

7. Генерация решений — 4 параллельные стратегии ФАЗА 4

Ниже — необработанные решения по каждой стратегии до объединения (Фаза 5) и проверки (Фаза 6).

А. Принципы + матрица противоречий

- **№1 Сегментация** (по матрице) — увеличить число контактных сегментов: вместо трёх узких площадок — сегментные дуги, а в пределе — контакт по всей окружности.
- **№35 Изменение параметров** (по матрице) — менять усилие по этапам обработки: высокое на черновом проходе, пониженное на чистовом; менять жёсткость контакта за счёт мягких вкладышей.
- **№10 Предварительное действие** (по матрице) — заранее расточить мягкие кулачки на рабочем диаметре 100 мм, чтобы контакт был по дуге; заранее оставить на заготовке технологический бурт.
- **№28 Замена механической схемы** (по матрице) — заменить локальную механическую силу кулачков давлением жидкой среды (гидропласт).
- **№3 Местное качество** (дополнительно) — разные зоны кулачка выполняют разные функции: жёсткая опорная часть и мягкая контактная вставка.
- **№17 Переход в другое измерение** (дополнительно) — заменить радиальный зажим осевым: втулка в осевом направлении намного жёстче, чем в радиальном.
- **№24 Посредник** (дополнительно) — разрезная втулка или цанга между кулачками и деталью распределяет усилие.

В. Су-поле + 76 стандартов

Модель: S1 (кулачок) — F (механическая сила) → S2 (заготовка). Полезное действие: удержание; вредное: деформация формы, следы. Модель с вредным эффектом (класс 2), управляемость поля низкая.

- **Стандарт 2.1.1** — ввести S3, поглощающий вредный эффект: мягкие сегментные вставки или эластичная прослойка между кулачком и деталью.
- **Стандарты 1.2.6 и 3.1.4** — увеличить степень дробления инструмента: больше сегментов; предельный случай — жидкая среда как «бесконечное число сегментов».
- **Стандарт 1.2.5** — заменить плохо управляемое поле (локальная сила кулачка) легко управляемым (давление среды, регулируемое станком).
- **Стандарт 2.1.2** — изменить S2, сделав заготовку менее чувствительной к зажиму: технологический бурт усиливает стенку в зоне зажима.
- **Стандарты 1.2.8 и 3.1.6** — сделать поле динамическим: менять усилие по фазам обработки.
- Магнитное поле (стандарт 2.2.2) неприменимо: сплав Д16Т не магнитится — идея отклонена (полезный пример «отрицательного результата» для пояснительной записки).

С. Физические эффекты

- **Упругость** — источник проблемы (упругий возврат после разжима) и инструмент решения: ослабление зажима перед чистовым проходом.
- **Трение** — основной механизм удержания; рост коэффициента трения без роста давления (шероховатая мягкая вставка) уменьшает требуемое усилие: при $\mu = 0,3$ вместо 0,2 требуемая суммарная нормальная сила уменьшается на 33%.
- **Фазовый переход** — фиксация в легкоплавком сплаве или воске даёт равномерную поддержку по всей поверхности; отклонено как основное решение из-за трудоёмкости и слабой жёсткости при резании.
- **Гранулярное заклинивание** — переменная жёсткость (мягко при заполнении, жёстко при откачке воздуха); потенциал только для лёгких режимов, для черногового прохода жёсткости недостаточно.

D. ARIZ-85V

Не потребовалось — стратегии А-С дали достаточное покрытие решения; переход к Фазе 5 без полного цикла ARIZ.

Принципы разделения противоречивых свойств

- **По времени:** высокое усилие на черновом проходе, пониженное и равномерное — на чистовом.
- **По месту:** жёсткая опора (торец, бурт, корпус кулачка) и мягкая контактная зона (сегменты, вкладыши).
- **По условию:** усилие или давление зависит от режима резания и регулируется станком.
- **Целое/часть:** жёсткий корпус (целое) + податливые сменные вкладыши (части).

8. Синтез решений ФАЗА 5

1. Мягкие сегментные кулачки, расточенные «на месте»

Накладные кулачки из алюминиевого сплава или полиамида растачиваются на рабочем диаметре $\varnothing 100$ мм; контакт по дуге 90° и ширине 20 мм вместо площадки 20×6 мм. Опора жёсткая (корпус кулачка), контактная зона мягкая. Принципы №1, №10; стандарты 2.1.1, 1.2.6.

2. Гидропластовая охватывающая втулка

Заготовка зажимается давлением рабочей среды по всей окружности и длине 40 мм. Механическая точечная нагрузка заменена равномерным давлением. Принцип №28; стандарты 1.2.5, 3.1.4.

3. Двухэтапный зажим: разное усилие на черновом и чистовом проходах

Программируемое давление патрона: полное на черновом проходе, пониженное на чистовом; между проходами кратковременный «отпуск» для упругого возврата заготовки. Принцип №35; стандарты 1.2.8, 3.1.6.

4. Зажим за технологический бурт

На заготовке оставляется утолщённый пояс (стенка ≈ 6 мм), за который держат кулачки; пояс отрезается на последней операции. Нагрузка передаётся через жёсткую зону, а не через тонкую стенку. Принципы №1, №3, №10; стандарт 2.1.2.

5. Осевой зажим вместо радиального

Втулка поджимается по торцу через оправку и кольцо: в осевом направлении тонкостенная труба намного жёстче, чем в радиальном. Удерживающий момент создаётся трением по торцу. Принципы №17, №13.

9. Адверсарная проверка ФАЗА 6

Каждое решение проверено «скептиком» (главный технолог, конструктор оснастки, экономист) по 4 критериям: физика, экономика, реализуемость, побочные эффекты.

Решение	Статус	Реализуемость	Трудоёмкость	Ключевые риски
1. Мягкие сегментные кулачки	ПОДТВЕРЖДЕНО	4,5/5	Низкая	Износ и необходимость перерасточки при смене типоразмера; точность центрирования зависит от расточки «на месте»; нужен контроль момента затяжки
2. Гидропластовая втулка	С ДОРАБОТКОЙ	3/5	Высокая	Стоимость и сложность изготовления, герметичность, стабильность рабочей среды; втулка под один размер; нужен расчёт давления и толщины стенки втулки
3. Двухэтапный зажим	С ДОРАБОТКОЙ	3,5/5	Низкая	Не устраняет деформацию на черновом проходе; при снижении усилия возможно проскальзывание — нужна опытная проверка и корректировка режима
4. Зажим за технологический бурт	ПОДТВЕРЖДЕНО	4/5	Средняя	Дополнительный припуск и расход Д16Т; лишняя операция отрезки; возможный перекося при отрезке бурта
5. Осевой зажим	С ДОРАБОТКОЙ	3,5/5	Средняя	Требуется высокой плоскостности и перпендикулярности торцев; риск коробления торца; ограниченный доступ инструмента; новая оснастка

10. Ранжирование по составному критерию ФАЗА 7

Composite = Инновационность×0,30 + Реализуемость×0,30 + Стоимость×0,20 + Универсальность×0,20

№1 · Мягкие сегментные кулачки — 0.75

Инновационность 0.45 · Реализуемость 0.95 · Стоимость 0.90 · Универсальность 0.75

№2 · Осевой зажим — 0.71

Инновационность 0.70 · Реализуемость 0.70 · Стоимость 0.80 · Универсальность 0.65

№3 · Гидропластовая охватывающая втулка — 0.68

Инновационность 0.80 · Реализуемость 0.60 · Стоимость 0.45 · Универсальность 0.85

№4 · Зажим за технологический бурт — 0.67

Инновационность 0.55 · Реализуемость 0.85 · Стоимость 0.70 · Универсальность 0.55

№5 · Двухэтапный зажим — 0.64

Инновационность 0.50 · Реализуемость 0.70 · Стоимость 0.90 · Универсальность 0.50

Рекомендуемая связка для проекта: мягкие сегментные кулачки как базовый вариант плюс пониженное усилие на чистовом проходе (решение №5 в рейтинге); осевой зажим или гидропластовая втулка — как расширенный вариант для дипломной работы с обоснованием выбора в сравнительной таблице.

11. Анализ эволюции и системный оператор ФАЗА 8

	Прошлое	Настоящее	Будущее
Надсистема	Универсальные патроны и ручная подгонка	Станок с ЧПУ и универсальная оснастка, не рассчитанная на тонкостенные детали	Адаптивная оснастка с датчиками усилия и цифровым двойником закрепления
Система	Жёсткий патрон с твёрдыми кулачками	Патрон с мягкими кулачками и ручной настройкой давления	Гидропластовые и самоцентрирующиеся оправки с регулируемым давлением и обратной связью по деформации
Подсистема	Твёрдый кулачок с узкой площадкой	Мягкий сегмент по диаметру детали	Распределённый контакт (жидкая или гранулярная среда) с управляемой жёсткостью

Закон эволюции: дробление инструмента (площадка → сегменты → жидкость → поле) и повышение управляемости поля (механическое → гидравлическое → электромагнитное); переход к динамическим, адаптивным системам.

Следующее вероятное новое противоречие: «точность закрепления ↔ универсальность и быстрота переналадки»: сегментные и гидропластовые решения точны, но рассчитаны на конкретный типоразмер, а в мелкосерийном производстве важна быстрая смена деталей.

12. Образец инженерных расчётов

Методический образец: справочные коэффициенты (k_c , μ , K) студент принимает по своим нормативам и справочникам, а осевую составляющую силы резания и потерю усилия кулачков от центробежных сил проверяет отдельно.

12.1. Сила зажима по условию неподвижности

$P_z = k_c \cdot t \cdot f = 700 \cdot 0,8 \cdot 0,2 = 112 \text{ Н}$ (черновой проход; $k_c \approx 700 \text{ Н/мм}^2$ — ориентировочно для алюминиевых сплавов)

$M_{\text{рез}} = P_z \cdot R = 112 \cdot 0,0475 = 5,32 \text{ Н} \cdot \text{м}$

$K \cdot M_{\text{рез}} \leq \mu \cdot \Sigma N \cdot R_3 \rightarrow \Sigma N \geq K \cdot M_{\text{рез}} / (\mu \cdot R_3) = 2,5 \cdot 5,32 / (0,2 \cdot 0,05) \approx 1\,330 \text{ Н}$

На один кулачок: $1\,330 / 3 \approx 443 \text{ Н}$. Сейчас: $1\,800 \text{ Н}$ на кулачок, то есть запас $K \approx 10$ (в четыре раза больше расчётного).

12.2. Контактное давление при разных схемах зажима ($\Sigma N = 1\,330 \text{ Н}$)

Схема	Площадь контакта	Давление	Комментарий
Жёсткие кулачки, площадка 20×6 мм	$3 \times 120 = 360 \text{ мм}^2$	$\approx 3,7 \text{ МПа}$ (при $1\,800 \text{ Н}$ на кулачок — 15 МПа)	Сейчас
Мягкие сегментные кулачки, дуга 90°, ширина 20 мм	$3 \times 1\,571 \approx 4\,712 \text{ мм}^2$	$\approx 0,28 \text{ МПа}$	Давление ниже в ≈ 13 раз
Гидропластовая втулка, длина 40 мм	$\pi \cdot 100 \cdot 40 \approx 12\,566 \text{ мм}^2$	$\approx 0,11 \text{ МПа}$ (нижняя граница по трению)	Рабочее давление выбирают по каталогу и условиям центрирования и герметичности

12.3. Осевой зажим

$F_{\text{ос}} \geq K \cdot M_{\text{рез}} / (\mu \cdot R_{\text{ср}}) = 2,5 \cdot 5,32 / (0,2 \cdot 0,04875) \approx 1\,364 \text{ Н}$

Площадь торца $A = \pi/4 \cdot (100^2 - 95^2) \approx 766 \text{ мм}^2 \rightarrow \text{давление } p = 1\,364 / 766 \approx 1,8 \text{ МПа}$

12.4. Влияние коэффициента трения и критерий деформации

- При росте μ с 0,2 до 0,3 (шероховатая мягкая вставка) требуемая ΣN снижается с 1 330 до $\approx 887 \text{ Н}$ (–33%).
- Критерий приемлемости: упругая деформация от зажима не более трети допуска круглости, то есть $\leq 3 \text{ мкм}$; проверяется МКЭ-моделью (четверть детали с симметрией, нагрузка — давление по площадкам контакта).
- Снижение контактного давления само по себе не гарантирует снижение деформации: решающую роль играет распределение нагрузки по окружности, поэтому вывод подтверждается расчётом и замером.

13. Технико-экономическое сравнение (образец)

Вариант	Оснастка, ₽	Ожидаемый брак	Потери, ₽/год	Экономия, ₽/год	Окупаемость
Базовый (жёсткие кулачки)	—	18%	378 000	—	—
Мягкие сегментные кулачки	15 000	≈6%	126 000	252 000	≈0,7 мес
Осевой зажим	60 000	≈4%	84 000	294 000	≈2,4 мес
Гидропластовая втулка	85 000	≈3%	63 000	315 000	≈3,2 мес

Допущения: программа 5 000 деталей в год; стоимость детали к моменту операции 420 ₽ (материал и предыдущие операции); потери = программа × доля брака × стоимость детали; ожидаемые значения брака — гипотезы, которые проверяются опытом и МКЭ; стоимость оснастки условная. Студент заменяет данные цифрами своего предприятия и добавляет затраты на изготовление, наладку и обслуживание.

14. Как использовать анализ в курсовой или дипломной работе

Раздел работы	Что берётся из анализа	Что студент делает сам
Введение	Формулировка противоречия и цели: круглость $\leq 0,010$ мм без следов при браке $\leq 3\%$	Обосновывает актуальность по своему предприятию и литературе
Аналитический раздел	Описание детали, ТП и ФП, ИКР, ресурсы	Обзор литературы и патентов, анализ существующих зажимов
Конструкторская часть	Варианты решений, критерии выбора, ранжирование	3D-модель, сборочный чертёж, спецификация, допуски и посадки
Расчётная часть	Методика: сила зажима, давление, осевой зажим, критерий деформации	Свои исходные данные и коэффициенты, МКЭ-проверка, расчёт погрешности установки
Технологическая часть	Двухпроходная схема и идея пониженного усилия на чистовом проходе	Режимы резания по нормативам, карта наладки
Экономическая часть	Структура сравнения вариантов	Реальные цены, объёмы, накладные расходы
Безопасность	—	Требования безопасности к оснастке и станку по действующим нормативам

Академическая честность. Отчёт — образец методики анализа. Исходные данные, расчёты, чертежи и выводы студент выполняет самостоятельно по своему заданию и указывает источники; цифры кейса иллюстративные. Расчёты и рекомендации обязательно проверяются по нормативам и согласуются с научным руководителем.

15. План работы над проектом (пример на 12 недель)

Недели	Этап	Результат
1–2	Постановка задачи, обзор литературы и патентов	Исходные данные, цель и задачи, список источников
3–4	ТРИЗ-анализ (противоречия, ИКР, ресурсы, генерация решений)	5–7 вариантов зажима, критерии выбора
5–6	Расчёты силы зажима, давления, осевого варианта	Расчётная часть, сравнительная таблица
7–9	Конструкция выбранного варианта	3D-модель, сборочный чертёж, спецификация
10	МКЭ-проверка деформации	Карты перемещений, вывод по критерию ≤ 3 мкм
11	Технологическая и экономическая части, безопасность	Карта наладки, срок окупаемости
12	Оформление, презентация, подготовка к защите	Пояснительная записка, доклад, слайды

16. Приложение: инструменты ТРИЗ, использованные в анализе

Матрица противоречий (39 параметров)

40 принципов изобретательства

Су-польный анализ

76 стандартов

Принципы разделения (время/место/условие/целое-часть)

Физические эффекты

ИКР (3 уровня)

Ресурсный чек-лист (6 типов)

Системный оператор

Законы эволюции технических систем

Адверсарная верификация

Многокритериальное ранжирование

Отчёт сгенерирован агентом Trizly (ТРИЗ-методология, 9 фаз, ARIZ-85V) в демонстрационных целях. Числовые данные кейса приближены к типичным и предназначены для иллюстрации методологии, а не для конкретного производства или учебного задания.