

А. С. Хлебус, М. И. Цырлин // Железнодорожный транспорт и технологии: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Екатеринбург, 2025. – Вып. 1. – С. 210–217.

4. Юницкий А. Э. Оптимизация опорного седла по критериям комфорта пассажиров при движении подвижного состава по гибкой рельсо-струнной путевой структуре uST / А. Э. Юницкий, А. С. Хлебус, М. И. Цырлин // Железнодорожный транспорт и технологии: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Екатеринбург, 2025. – Выпуск 1 (263). – С. 218–227.

5. Simiu E., Wind effects on structures: fundamentals and applications to design / E. Simiu, R. H. Scanlan – 3rd ed. – New York: John Wiley & Sons, 1996. – 688 p.

6. Research on Wind Resistance Performance of a Pipeline Suspension Bridge without wind cable in Natural Wind / H. Yu, M. Zhang, T. Chen, [et al.] // Engineering Structures. – 2025. – Vol. 336. – P. 119102.

7. Дело о танцующем мосте // Synerjetics.ru. – URL: <http://www.synerjetics.ru/article/flutter.htm> (дата обращения: 05.03.2026).

8. Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Ветровые воздействия : СН 2.01.05-2025 . – Мн. : Минстройархитектуры, 2025 . – 104 с.

9. Сергей, И. И. О моделировании пляски проводов воздушных ЛЭП и параметрическом анализе эффективности маятниковых гасителей / И. И. Сергей, А. А. Виноградов, А. Н. Данилин // Вестник ПНИПУ: Механика. – 2018. – № 4. – [б. с.].

10. Zhan, H. Flutter stability studies of Great Belt East Bridge and Tacoma Narrows Bridge by CFD numerical simulation. Proceedings of the 7th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7) / H. Zhan, T. Fang // Shanghai. – 2012. – P. 1518–1527.

11. Simulation of aerodynamic instability of building structures on the example of a bridge section. Part 2: Solution of the problem in a coupled aeroelastic formulation and comparison with engineering estimates / A. M. Belostotsky, I. N. Afanasyeva, I. Y. Negrozova // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – no/ 17(3). P. 24–38. – DOI:10.22337/2587-9618-2021-17-3-24-38.

12. Abbas, T. Methods for flutter stability analysis of long-span bridges: a review / T. Abbas, I. Kavrakov, G. Morgenthal // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Bridge Engineering. – 2017. – Vol. 170, № 4. – P. 271–291. – DOI: 10.1680/jbren.15.00039.

*Поступила 20.04.2026*

**УДК 621.91**

**Фоменок М. Н., Невзорова А. Б.**

**СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ 3D МОДЕЛИ НАПРЯЖЕННО-  
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЗЦА  
В УСЛОВИЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

*Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого,  
Гомель, Беларусь*

*Приведены результаты промышленных испытаний разработанных рас-  
точных резцов на предприятии ОАО «Гомсельмаш». Определены оптималь-  
ные параметры конструкции для стандартных режимов резания и диапазон*

значений углов и плоскостей, которые обеспечивают качество изготовления резца. Проведен выбор материала режущей пластины и державки резца для конкретных задач предприятия (чистовая токарная обработка заготовки «Стакан»). Подобраны оптимальные режимы резания для расточного резца в зависимости от требуемого материала заготовки и типа обработки (чистовая). Разработаны предложения для внедрения державки малого диаметра в серийное производство, которые позволят обеспечить качество изготавливаемой продукции в соответствии с техническими требованиями.

**Ведение.** В настоящее время одной из актуальных задач по улучшению качества изготовления изделий является импортозамещение при усовершенствовании имеющегося вспомогательного инструмента. Для обеспечения параметров изготавливаемых деталей, согласно конструкторской документации в процессе механической обработки основную роль включает в себя правильно подобранный режущий инструмент [1].

Неотъемлемой частью производства является правильно подобранный режущий инструмент с унифицированными элементами [2] для токарных работ по металлу. В условиях современного обострения конкуренции предприятия вынуждены более интенсивно внедрять производительную вспомогательную оснастку. В области обработки металлов резанием главные усилия направлены на повышение производительности и замены изношенных элементов на быстросменные усовершенствованной конструкции [3; 8]. При выборе инструмента необходимо учитывать конструкцию узла и ее назначение, технологию производства, требование к прочности детали, учитывать механические свойства сплава, применяемого в заготовке, затраты на изготовление деталей и эксплуатационные свойства [4]. Для повышения надежности и работоспособности режущего инструмента: применяют современные дорогостоящие покрытия, внедряют композиционные инструментальные материалы широкого применения, применяют виброустойчивый режущий и вспомогательный инструмент [5]. Универсальность режущего инструмента определяется максимальным числом унифицированных и взаимозаменяемых узлов [6; 7].

В настоящее время при обработке токарными резцами традиционной конструкции применяются державки стандартных размеров. Размер державки зависит от величины изготавливаемой детали, наиболее распространено применение державок крупных размеров, такие как: 16, 20, 25. В этой связи практическое значение имеет исследование на примере разработанного резца с наименьшим диаметром державки.

**Цель работы** – провести статический анализ 3D модели напряженно-деформированного состояния резца в условиях механической обработки для оптимизации режимов резания резца с наименьшим диаметром державки в зависимости от требуемого материала заготовки и типа обработки.

**Результаты исследования.** При токарной обработке детали необходимо учитывать технические параметры металлорежущего станка, приспособления,

режущего инструмента, а также свойства обрабатываемой детали. Объектом исследования является расточной резец диаметром 30 мм и углеродистой стали 50, который используется для растачивания отверстий в детали «Станкан» на токарном станке с ЧПУ с противошпинделем DT 500 (Китай).

Установлено, что жесткость расточного резца с применением переходной втулки выше, чем стандартного. В связи с этим был внедрен более жесткий инструмент путем внедрения переходной втулки, подбора основных параметров и уменьшения диаметра державки.

В качестве материала для корпуса резца выбираем углеродистую сталь 50 с  $\sigma_B = 650$  МПа и пределом прочности на изгиб  $\sigma_{из} = 200$  МПа. Основные размеры: рабочая высота резца  $h = 70$  мм, диаметр державки резца  $D_B = 6$  мм, высота державки  $h_B = 10$  мм, длина резца  $L = 100$  мм (рис. 1).

Определим главную составляющую силы резания:

$$P_z = 9,81 C_{p_z} t^{x_{p_z}} S_0^{y_{p_z}} K_{p_z} = 9,81 \cdot 300 \cdot 3,5 \cdot 0,35^{0,75} = 4170 \text{ Н}, \quad (1)$$

где  $K_{p_z} = 1$  – суммарный поправочный коэффициент.

При условии, что  $h = 6b$ , ширина прямоугольного сечения корпуса резца:

$$b = \sqrt[3]{\frac{6P_z l}{2,56\sigma_{из}}} = \sqrt[3]{\frac{6 \times 4170 \times 60 \times 10^{-3}}{2,56 \times 20 \times 10^6}} = 0,013 \text{ м} = 13 \text{ мм}, \quad (2)$$

где  $l$  – вылет резца, мм;  $\sigma_{из}$  – предел прочности на изгиб материала державки, МПа.

Рассчитаем максимальную нагрузку, допускаемую жесткостью резца:

$$P_{z \text{ жёст}} = \frac{3fEI}{l^3} = \frac{3 \times 0,1 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^{11} \times 2,08 \times 10^{-8}}{(60 \times 10^{-3})^3} = 5770 \text{ Н}, \quad (3)$$

где  $f = 0,1$  – допустимая стрела прогиба для чернового точения, мм;

$E$  – модуль упругости материала резца, принимаем  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;

$I$  – момент инерции державки резца, мм<sup>4</sup>.

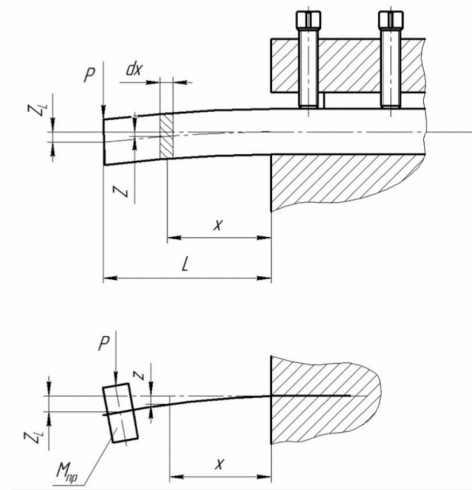


Рис. 1. Схема к расчету резца

Из условий соотношения  $P_z \leq P_{z \text{ жест}}$ , имеем  $4\,170 \text{ Н} \leq 5\,770 \text{ Н}$ , следовательно прочность и жесткость резца обеспечивается при определенных выше нагрузок и геометрических размеров детали при которых исключается появление деформаций и обеспечивается нормальная работа конструкции.

Согласно ГОСТ 19042–80, выбираем материал для клина штифта – сталь 40Х; для винта – сталь 45; материал резца: для пластины – твердый сплав Т15К6.

Твердость HRC 30–35 на головке винта достигается за счет применения закалки с последующим высокотемпературным отпуском. Оптимальный режим включает закалку в масле с  $t = 850\text{--}880^\circ\text{C}$  и отпуск при  $t = 500\text{--}600^\circ\text{C}$  для получения требуемой вязкости и прочности.

Технические требования по резцу выбираем по ГОСТ 20872-80.

Одной из важнейших характеристик инструментальной системы является ее собственная частота, т. е. частота свободных затухающих колебаний, так как частота автоколебаний, которые возникают в процессе резания, близка к собственной частоте системы. При анализе были приняты следующие допущения, соответствующие большинству встречающихся на производстве резцов:

- державка резца представляет собой брус круглого сечения;
- сечение державки постоянно по длине;
- нагрузка равномерно распределена по его длине державки.

Приведенная масса державки из условия равенства кинетических энергий в незатухающих движении державки и расчетной модели имеет вид:

$$\frac{M_{\text{пр}} \times z^2 L}{2} = \int_0^L \frac{b \times h \times \gamma \times z^2(x) \times dx}{2}, \quad (4)$$

где  $M_{\text{пр}}$  – масса державки, кг;

$z$  – скорость крайней точки державки при колебаниях, мм/с;  
 $b$  – ширина сечения державки, мм;  
 $h$  – высота сечения державки, мм;  
 $\gamma$  – плотность материала державки, кг/мм<sup>3</sup>;  
 $z(x)$  – скорость участка  $dx$  в колебательном процессе, мм/с.

При проектировании конструкций на стадии проектирования требуется проведение их статического и динамического анализа для определения нагрузок.

Статический анализ в машиностроении позволяет определить жесткость, линейные перемещения и нагрузки на неподвижные узлы по допускаемым напряжениям, определить наиболее уязвимые места конструкции и их своевременно изменить для обеспечения прочности конструкций.

Динамический анализ оценивает поведение машин при работе, включая вибрации, частотные характеристики и допустимые скоростные режимы. Эти методы необходимы для оптимизации конструкций. Системный подход в проектировании применяется для создания целостной системы «объект-процесс» с использованием предпроектного анализа. Например, реальная деталь державки моделируется стержневой системой, которая использует упрощенную схему с присоединением к узлам жестко, либо с помощью шарниров, учитывающую геометрические параметры и математическое описание модели, включающее ключевые влияющие факторы. Для успешной реализации прочностных расчетов державки процесс проектирования начинают с анализа упрощенной схемы [8; 9].

Для создания модели державки расточного резца использована программа *APM Structure3D*, в которой была запроектирована стержневая модель определенной длины с круглым сечением, разбитым на части с помощью алгоритмов (рис. 2).

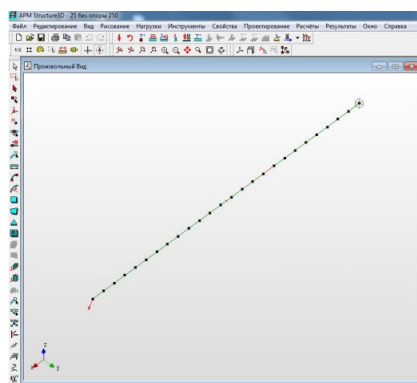


Рис. 2. Стержневая модель державки расточного резца в окне программы в окне программы *APM Structure3D*

Профильные сечения державки задаются в редакторе сечений, где вводятся рассчитанные нагрузки закрепления и нагрузки в окнах установки опоры и силы.

Исследование стержневых моделей является достаточно длительным процессом расчета математических моделей, которые включают в себя добавлении нескольких стержней и опор. В результате стержневого моделирования установлены оптимальные геометрические параметры державки, которые стали основой для трехмерного моделирования стержневой модели по методу конечных элементов (рис. 3) с учетом конструкторских элементов [3; 10].



Рис. 3. Конечно-элементная модель сборного расточного резца

Согласно заданным параметрам, был проведен статический анализ 3D-модели напряженно-деформированного состояния резца под нагрузкой в условиях механической обработки (рис. 4). Установленные критические зоны эквивалентных напряжений (по Мизесу), деформации и риск разрушения инструмента позволили оптимизировать геометрию резца для повышения стойкости при обработке.

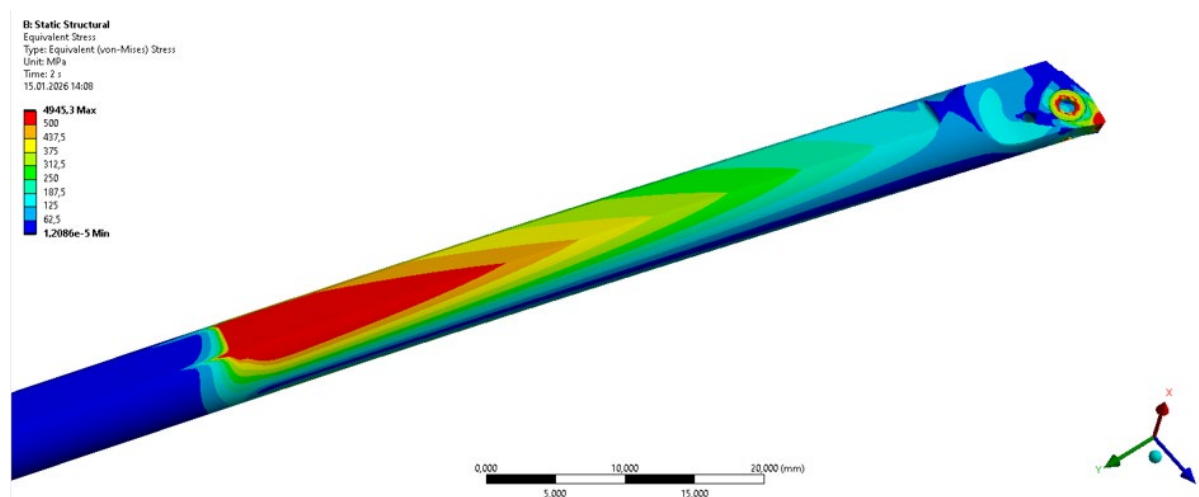


Рис. 4. Карта результатов расчета статических перемещений расточного резца

На стадии анализа процесса растачивания, во время обработки изделия с большим вылетом державки из резцедержателя, расточной резец является наименее жестким элементом системы. Рекомендуется применять инструмент с минимально возможным вылетом из резцедержателя и максимальным сечением державки для снижения амплитуд колебаний [4]. Однако вылет резца обусловлен глубиной обрабатываемого отверстия, а увеличение сечения державки ограничено параметрами резцедержателя используемого станка. Следствием указанных особенностей является низкая жесткость инструмента и недостаточная виброустойчивость процесса растачивания, что приводит к снижению стойкости расточных резцов [11].

На основании анализа разработанных математических и трехмерных моделей установлено, что использование разработанного резца с меньшим диаметром державки, обеспечивает требуемые напряжения, силы и режимы резания. Основным достоинством спроектированного резца являются простота конструкции, сменная режущая пластина, экономия металла за счет уменьшения размера державки и взаимозаменяемость элементов конструкции за счет сменной режущей пластины.

Рассмотрим производственные испытания расточного резца в производственных условиях на токарном станке с ЧПУ с противошпинделем *DT 500* (Китай) с применением СОЖ (рис. 5).

Режимы резания:

- подача  $S = 0,1$  мм/об,
- скорость резания  $V = 40,1$  мм/об,
- частота вращения шпинделя  $n = 300$  об/мин,
- припуск на один проход  $z = 0,5$  мм.



Рис. 5. Заготовка с обработанной внутренней поверхностью с револьверной головкой токарного станка

По результатам проведенных испытаний установлено, что расточной резец эффективен, и обладает значительно более высокой жесткостью, что

позволяет минимизировать упругие смещения, повысить точность обработки отверстий и улучшить чистоту поверхности. Резание происходит без вибраций, визуальная оценка качества обработанных поверхностей соответствует заданным требованиям согласно конструкторской документации [5]. При производственных испытаниях поломки расточного резца и дефекта режущей пластины не выявлено. Согласно проведенному испытанию, резец соответствует расчету напряжений и максимальной нагрузке.

Для исключения погрешностей проведем более точное измерение формы (допуск круглости) на координатно-измерительной машине (рис. 6).



Рис. 6. Рабочая деталь при измерении на координатно-измерительной машине

Для контроля формы требуется измерять координаты точек поверхности детали в трехмерном пространстве, следуя по запрограммированной траектории (рис. 7). В данном исследовании измерение проводится по восьми точкам.

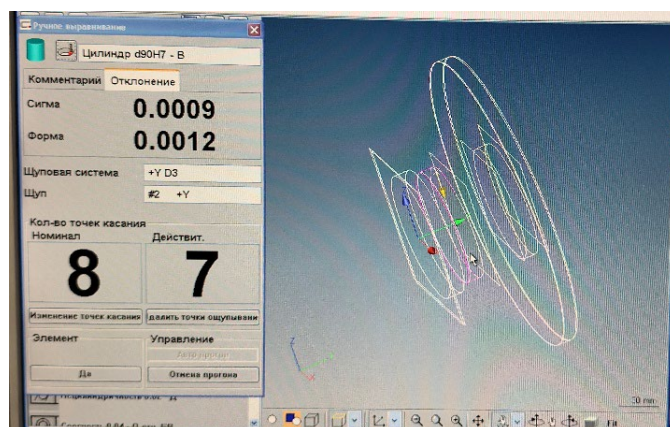


Рис. 7. Построение координат измерения в трехмерном пространстве

В результате измерения на координатно измерительной машины Ассига получены следующие данные:

- допуск цилиндричности 0,02 мм,
- соосность относительно внутреннего диаметра 0,04 мм,
- размер внутреннего диаметра  $90+0,004$  мм.

Исходя из полученных измерений все заданные параметры входят в поле допуска согласно конструкторской документации.

**Выводы.** Проведенные комплексные мероприятия на предприятии ОАО «Гомсельмаш» позволили спроектировать и изготовить расточной резец для конкретных задач предприятия (чистовая токарная обработка заготовки «Стакан»). Результаты статического и динамического анализа позволили спроектировать полную систему нагрузок и определить напряженно-деформированное состояние режущей части под нагрузкой. Рассчитаны критические зоны эквивалентных напряжений (по Мизесу), деформации и риск разрушения инструмента. Показано, что использование сменных твердосплавных пластин значительно повышает производительность по сравнению с переточкой цельных резцов. На основе результатов моделирования и расчета державки резца спроектирован расточной резец с более жесткой конструкцией и подобраны оптимальные режимы резания в зависимости от требуемого материала заготовки и типа обработки (чистовая). В дальнейшем предполагается внедрить в серийное производство державки малого диаметра, которые позволят обеспечить качество изготавливаемой продукции в соответствии с техническими требованиями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Денисова, Я. В. Оптимизация производственного процесса путем внедрения методов бережливого производства / Я. В. Денисова, А. С. Петрова, В. Ф. Сопин // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2022. – Т. 84. – №. 2 (92). – С. 315–323.
2. Жолобов, А. А. Прогнозирование и обеспечение качества технологических систем на этапах их проектирования и изготовления : монография / А. А. Жолобов. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 304 с.
3. Сотский, А. А. Опыт использования современных инновационных технологий в рамках проводимого перевооружения / А. А. Сотский // Инновационное станкостроение, технологии и инструмент : материалы I Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 30 нояб. 2023 г. / М-во пром-сти Респ. Беларусь [и др.]. ; под общ. ред. М. И. Михайлова. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – С.43–45.
4. Пашкевич, В. М. Функциональные семантические сети для обеспечения точности механической обработки : монография / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова. – Могилев: Белорус.-Рос. Ун-т, 2015. – 210 с.
5. Мурашова, М. С., К вопросу о координатно-измерительных машинах / М. С. Мурашова, М. А. Климовская, Т. А. Борисенко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2019 – №. 2. – С. 605–606.
6. Ящерицын, П. И. Основы резания материалов и режущий инструмент / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Н. И. Жигалко – Мн. : Выш. школа, 1981. – 560 с.

7. Болотеин, А. Н. Анализ напряженно-деформированного состояния деталей после механической обработки средствами компьютерного моделирования / А. Н. Болотеин // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. – 2014. – №. 1. – С.54–60.

8. Влияние вылета резца и глубины резания при токарной обработке на качество поверхностного слоя деталей машин / Д. Г. Алленов, К. Б. Девойнова, С. В. Соломатин [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – Т. 21. – №. 2. – С.105–112.

9. Михайлов, М. И. Моделирование точности позиционирования сменных многогранных пластин в корпусе инструмента плоскостным методом / М. И. Михайлов // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2009 – № 3 – С. 30–37.

10. Пестрецов, С. И. Компьютерное моделирование и оптимизация процессов резания : учеб. пособие / С. И. Пестрецов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009 – 104 с.

11. Хорошайло, В. В. Повышение эффективности растачивания отверстий на токарных станках путем создания виброустойчивой инструментальной системы: дисс....канд. техн. наук : 05.03.01 / В..... В..... Хорошайло. – Краматорк, 2016. – 180 л.

*Поступила 04.03.2026*