



Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Машиностроительный факультет

НИРС МСФ-2025

Сборник материалов

81-й студенческой научно-технической конференции

Секция «Металлорежущие станки и инструменты»

Электронное издание

Минск БНТУ 2025

УДК 621.91.
ББК 34.4.я43
Н68

Р е д к о л л е г и я :

А.В. Ажар, А.А. Данилов, В.А. Данилов, С.С. Довнар, Ю.И. Касач,
Л.А. Колесников, А.Д. Лапука, Е.А. Маркова, Р.В. Фёдорцев,
А.М. Якимович, О.К. Яцкевич

С о с т а в и т е л ь :

Л.А. Колесников

В сборник включены материалы докладов 81-й студенческой научно-технической конференции (секция «Металлорежущие станки и инструменты»).

Белорусский национальный технический университет
Машиностроительный факультет
Кафедра «Технологическое оборудование»
Пр-т Независимости, 65, уч. корп. 6,
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: mstools@bntu.by
<http://www.bntu.by/mstools.html>

© Белорусский национальный
технический университет, 2025

Содержание

Ажар А.В., Деревяго Д.Д., Тарасевич А.А. Разработка кинематической 3D-модели станка в рамках цифровой трансформации обучения	4
Ажар А.В., Деревяго Д.Д., Тарасевич А.А. Учебная 3D-модель заточного станка	15
Гордиенко А.В., Блёскин А.Д., Булгаков В.Б. Свёрла с механическим креплением перетачиваемых сменных пластин	19
Гордиенко А.В., Блёскин А.Д., Булгаков В.Б. Свёрла с механическим креплением сменных головок	25
Гордиенко А.В., Блёскин А.Д., Булгаков В.Б. Свёрла монолитные и с неразъёмным соединением рабочей и присоединительной частей	32
Гордиенко А.В., Щербин П.Р. Стандартные твёрдосплавные зенкеры для цилиндрических отверстий	36
Данилович В.С., Захарова А.М. Керамика в узлах трения: виды и применение	46
Довнар С.С., Пехота А.Н., Лапука А.Д., Абраменко А.Д. Бионическая грибовидная самодействующая опреснительная башня для реализации концепции солнце-паро-ветрового опреснения соленой воды	48
Довнар С.С., Касач Ю.И., Жаврид Ю.Ю., Шушунов В.А., Лапука А.Д. Концепция полый торфяной сферы как структурно-топливного элемента для поддержки арктических проектов	59
Касач Ю.И., Алейников И.А. Концевая фреза с оптимизированной конструкцией режущей части	67
Касач Ю.И., Брайчук Ю.В., Буршко Д.А. Прототипирование станка в виртуальной реальности	72
Колесников Л.А., Чернушевич А.А. Состояние и тенденции развития мировой промышленной робототехники	76
Колесников Л.А., Чернушевич А.А. Роботы в Республике Беларусь	81

УДК 621.914.31:004.94

РАЗРАБОТКА КИНЕМАТИЧЕСКОЙ 3D-МОДЕЛИ СТАНКА В РАМКАХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ОБУЧЕНИЯ

Студенты гр. 10305221 Деревяго Д.Д., Тарасевич А.А.
Научный руководитель – ст. преподаватель Ажар А.В.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Цифровая модель изделия стала неотъемлемой частью современного промышленного производства и научных исследований. Поэтому важно обеспечить цифровую трансформацию образовательного процесса, в особенности для студентов по направлению конструкторской подготовки машиностроительного производства. С этой целью на кафедре «Технологическое оборудование» БНТУ на постоянной основе реализуется проект по созданию цифровой лаборатории станочного оборудования и его технологического оснащения. Основными исполнителями являются студенты, осуществляющие как разработку собственных проектов, так и реинжиниринг существующего оборудования. Данная работа проводится в рамках лабораторных и практических занятий цикла дисциплин инструментально-станочной специализации, курсового проектирования, при выполнении кибернетической части дипломных проектов, а также в качестве НИРС.

Главная задача такой работы – создать цифровую модель станка и оснастки, которая обеспечивает все движения подвижных узлов несущей системы от электромеханических и гидравлических приводов до исполнительных органов с учетом пространственно-кинематических взаимосвязей передач. На этой основе обеспечить базирования и работу приспособлений и оснастки для реализации движений, в том числе, наладки станка (деления, позиционирования, зажима–разжима детали и инструмента).

Методику создания цифровых моделей такого уровня рассмотрим на примере построения кинематической 3D-модели универсального горизонтального консольно-фрезерного станка **6М82** лаборатории кафедры «Технологическое оборудование» БНТУ, а также его станочных приспособлений и инструментальной

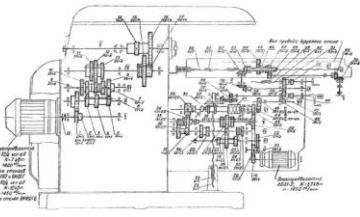
оснастки. Виртуальный станок должен обеспечивать моделирование наладки и осуществление фрезерной обработки межзубых впадин и стружечных канавок различных режущих инструментов (сверл, зенкеров, метчиков, протяжек, фрез зуборезных и общего назначения, резцов).

Исходные данные включают собственно сам универсальный горизонтально-фрезерный станок модели 6М82 (рисунок 1, а), техническую документацию (паспорта, руководства по эксплуатации и т.д.), содержащие спецификацию деталей (рисунок 1, б), кинематическую схему (рисунок 1, в), иные сведения о конструкциях и технических характеристиках станка и его узлов. Во внимание также принималась техническая и учебная литература по конструированию, техническому обслуживанию, наладке и эксплуатации рассматриваемого станка и его аналогов.



а) натурный образец станка

СПЕЦИФИКАЦИЯ ДЕТАЛЕЙ И ЧЕРТЕЖНЫЙ КОМПЛЕКТ ЧЕРТЕЖИКИ, РИСУНОК И КАРТА СР. ДИ.									
Узел	№ детали	Наименование детали	Материал	Количество	Примечание	Рисунки	Технические характеристики	Технические характеристики	Технические характеристики
Корпуса и опоры	1	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	2	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	3	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	4	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	5	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	6	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	7	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	8	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	9	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	10	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
Корпуса и опоры	11	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	12	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	13	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	14	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	15	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	16	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	17	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	18	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	19	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1
	20	Блок	Ч. Д.	1		1:1	1:1	1:1	1:1



б) спецификация деталей

в) кинематическая схема станка

Рисунок 1 – Пример исходных данных для моделирования горизонтально-фрезерного станка 6М82

Рассмотрим порядок создания цифровой модели станка в CAD SolidWorks. На первом этапе была построена модель несущей системы станка, включающая основание, станина, консоль, салазки, поворотная плита, стол, хобот (рисунок 2). В процессе построения задано взаимное положение базовых деталей относительно друг друга, реализовано их перемещение в привязке к выбранной системе координат станка с ограничениями по длине хода и углу поворота

На основе анализа кинематической схемы и спецификации деталей и комплектующих, а также путем непосредственного измерения и дополнительного проектного расчета проведено построение 3D-моделей деталей и комплектующих приводов станка. Быстрое создание точных 3D-моделей многочисленных зубчатых колес осуществлялось в приложении Компас-3D (рисунок 3, а) и экспортировалось в SolidWorks. Также были использованы библиотеки «Toolbox» стандартных компонентов (подшипники, болты, шпонки и т.д.) SolidWorks (рисунок 3, б).

Далее создаются виртуальные модели приводов станка с заданием кинематических связей в зубчатых зацеплениях (рисунок 4). На этой основе создаются узлы, передающих и преобразующих скорость, направление, усилие и момент при движении от электродвигателя до исполнительного звена: шпинделя, консоли, салазок, стола. Например, на рисунке 5 представлен процесс создания и встраивания в модель станка кинематической 3D-модели привода главного движения (ПГД) станка.

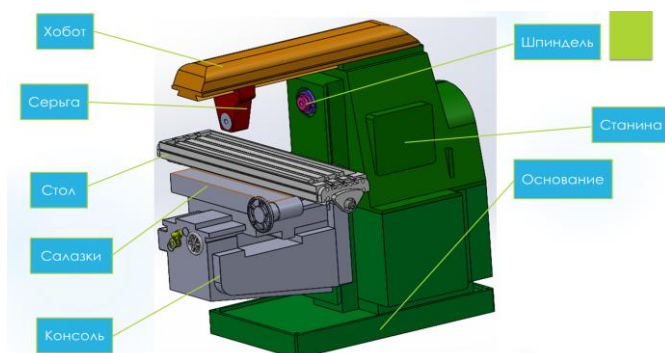
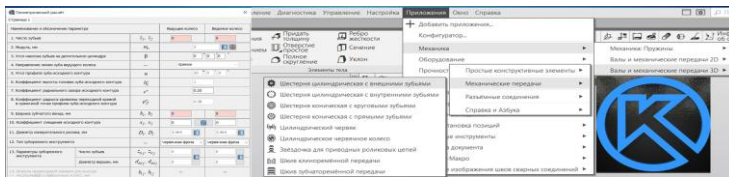
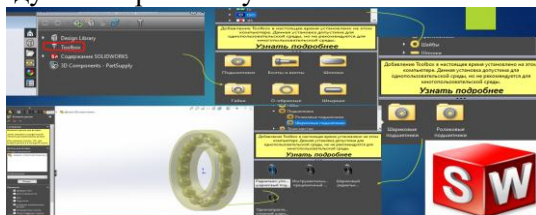


Рисунок 2 – 3D-модель несущей системы станка 6М82

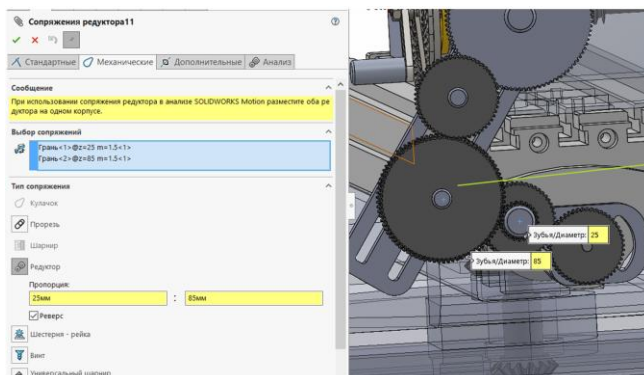


а) модуль построения зубчатых колес в Компас-3D



б) библиотека стандартных компонентов SolidWorks

Рисунок 3 – Построение стандартных компонентов

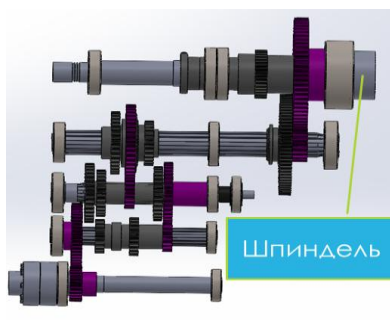


Гитара сменных
колес цепи
настройки
винтонарезания

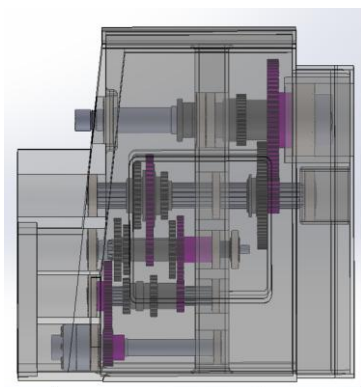
Рисунок 4 – Пример создания кинематической модели зубчатого зацепления



коробка скоростей ПГД
станка (натурный образец)



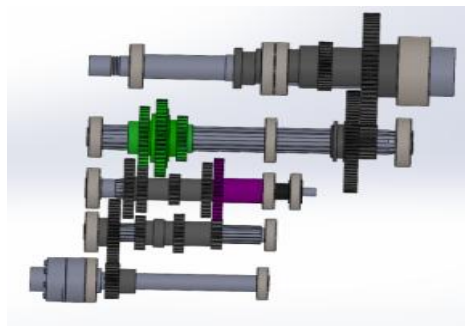
3D-модель коробки скоростей
ПГД



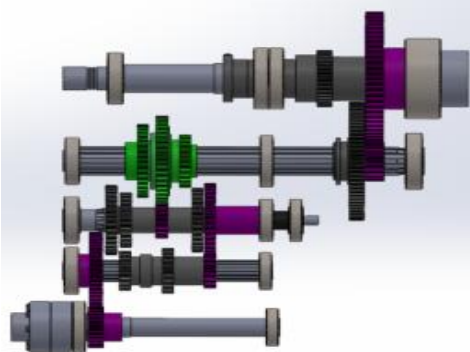
3D-модель ПГД в станине

Рисунок 5 – Кинематическая 3D-модель привода главного движения
(ПГД) станка 6М82

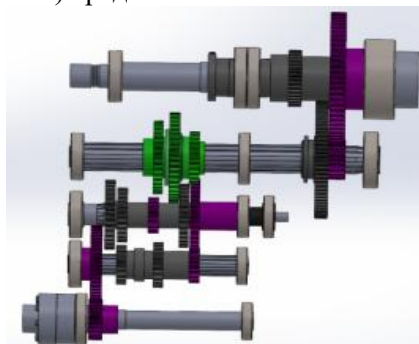
Исследование работы приводов станка возможно путем задания и анализа механических сопряжений и физических взаимодействий. Так, виртуализация процесса перемещения блоков зубчатых колес по валам коробки скоростей позволяет оценить порядок, направление, величину передачи и преобразования движения от двигателя через все промежуточные звенья (валы) к конечному звену (шпинделю). Пример анализа работы ПГД, имеющего множительную структуру типа $Z=3 \times 3 \times 2=18$ с двумя двойными передвигными блоками, расположенными на 3-ом валу и одним тройным расположенным на 4-ом валу, показан на рисунке 6.



а) левое положение блока колес на 4-ом валу



б) среднее положение блока



в) правое положение блока

Рисунок 6 – Схема настройки передаточного отношения коробки скоростей

Привода подач интегрируются в цифровую оболочку несущей системы (рисунки 7–8). Реализуется кинематическая привязка конечных звеньев приводов (зубчатое колесо, винт, гайка ходовая) к подвижным частям несущей системы станка (шпиндель, стол, салазки, консоль). В результате созданы точные цифровые модели станка 6М82 (рисунок 9, а) и технологической оснастки (рисунок 9, б), поддерживающие механику движений в виртуальной среде программирования (рисунок 10).

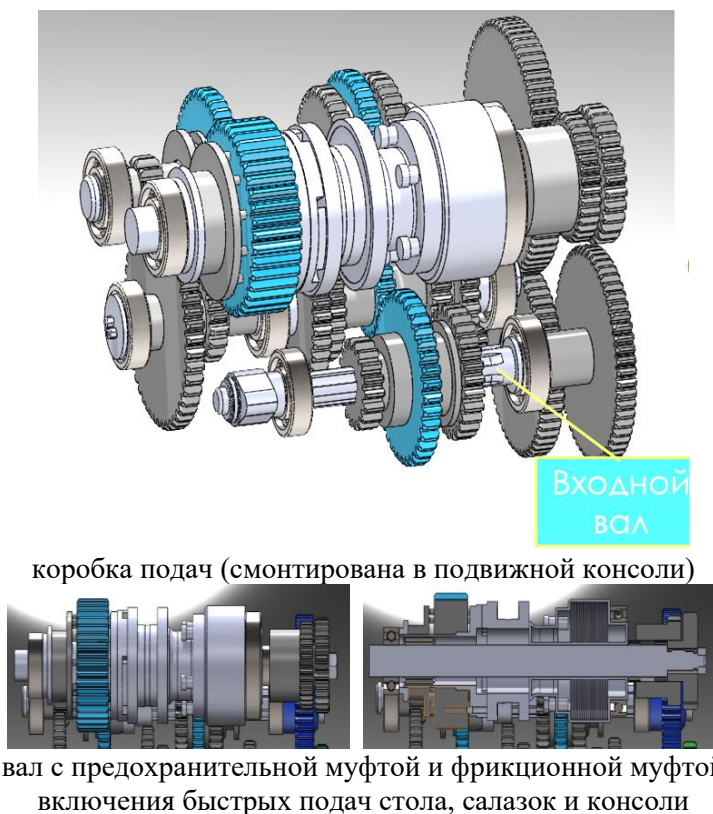
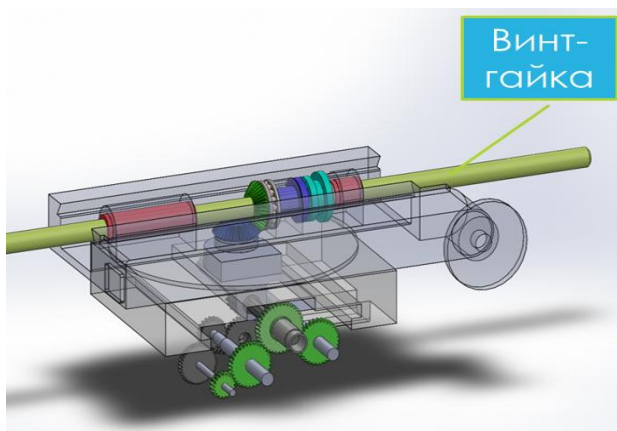
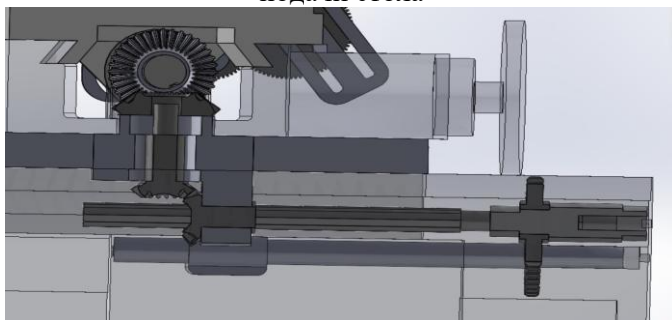


Рисунок 7 – Кинематическая 3D-модель привода подач станка 6М82



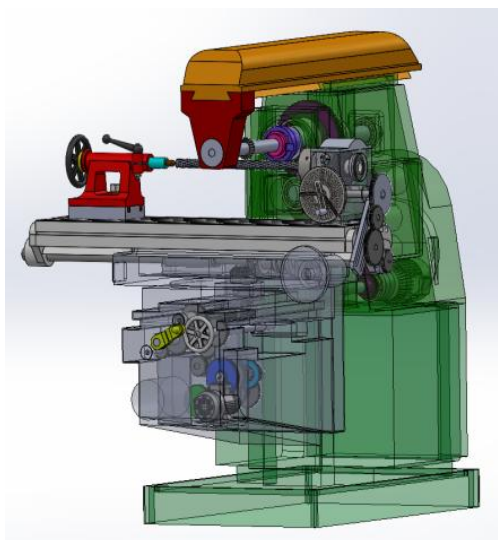
винт-гайка скольжения (ВГС) привода продольной подачи стола



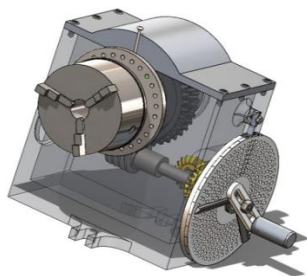
винт-гайка скольжения привода поперечной подачи салазок

Рисунок 8 – Кинематическая 3D-модель тяговых механизмов приводов подач станка 6М82

Кроме ручного режима управления кинематикой работы станка, можно использовать анимационный, позволяющий создавать видеоряд и на его основе продуктовые или инструкционные проморолики. Такой подход существенно облегчает изучение конструкции, порядок сборки, наладки и работы станка. Примеры использования возможностей кинематической 3D-модели станка и созданные на ее основе виртуальные сценарии управления работой оборудования представлены на рисунках 10–13.



а



б

Рисунок 9 – Цифровые модели станка и оснастки, реализующий виртуальную механику движений:

а) кинематическая 3D-модель станка в целом с полным техническим оснащением (универсальная делительная головка, задняя бабка с центром, оправка с угловой фрезой); б) универсальная делительная головка (УДГ) с трехкулачковым патроном

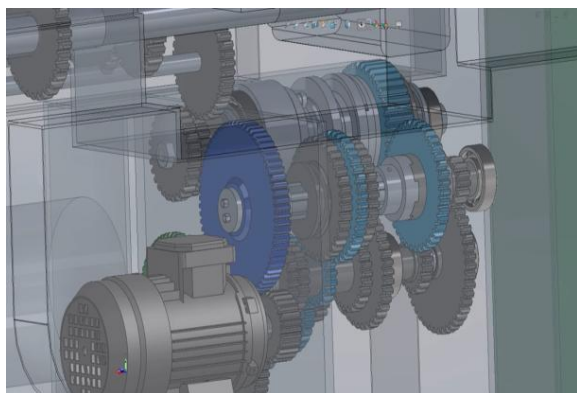


Рисунок 10 – Работа коробки подач (фрагмент анимации)

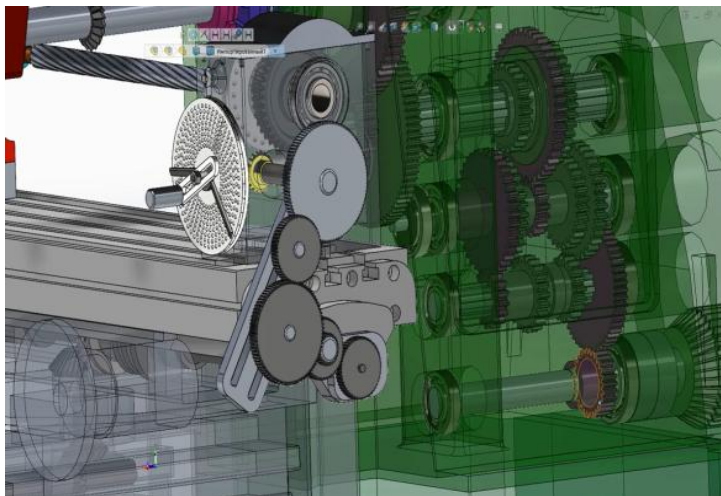


Рисунок 11 – Работа коробки скоростей и станка в целом при нарезании винтовой канавки на валу дисковой фрезой при помощи УДГ (фрагмент анимации)

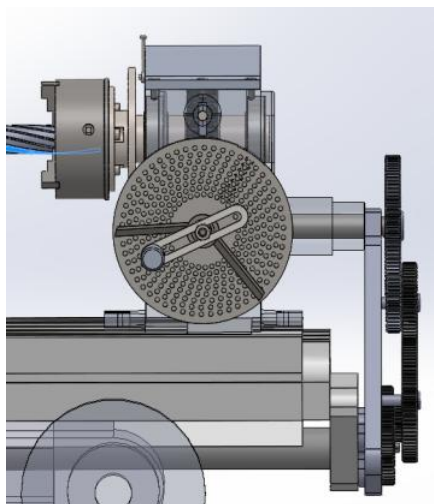
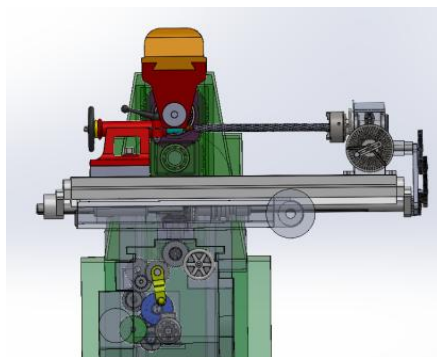
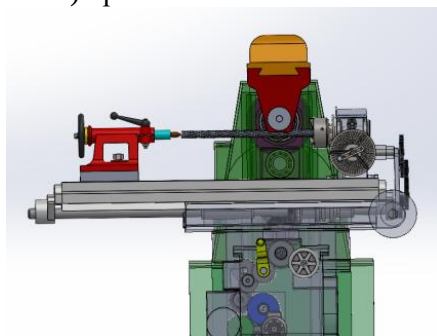


Рисунок 12 – Виртуальная настройка УДГ на процесс деления заготовки (фрагмент анимации)



а) правое положение стола



б) левое положение стола

Рисунок 13 – Виртуальная настройка станка с УДГ на нарезание винтовой канавки

Выводы. Разработана и апробирована методика создания кинематических 3D-моделей сложного технологического оборудования. Такие модели могут быть использованы при создании сложных сценариев виртуального обучения специалистов и студентов приемам эксплуатации, ремонта, конструирования станков, в том числе используя среды виртуальной (VR) или дополненной (AR) реальности.

Предложенный путь трансформации обучения конструкторов и технологов для станко-инструментальной отрасли за счет вовлечение в процесс студентов-энтузиастов и «инди» разработчиков может стать основой новых стартап-проектов в области цифровизации машиностроения.

УЧЕБНАЯ 3D-МОДЕЛЬ ЗАТОЧНОГО СТАНКА

Студенты гр. 10305221 Деревяго Д.Д., Тарасевич А.А.
Научный руководитель – ст. преподаватель Ажар А.В.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Накопленный опыт, методический материал и использование навыков традиционного проектирования деталей машин, механизмов, станков, инструментов и приспособлений вместе с натурными образцами позволяют получить достаточно точные статические цифровые модели деталей, несущих и кинематических структур в их пространственной взаимосвязи.

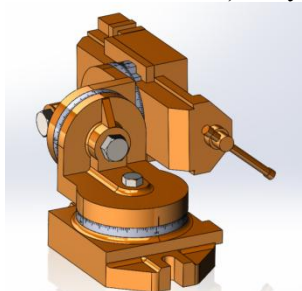
Однако такой подход к моделированию хоть и обеспечивает пространственную наглядность сложных технических объектов и повышает уровень цифровой и конструкторской подготовки будущих специалистов, не позволяет детально исследовать объект техники, целостно понять принцип его работы, проанализировать технические характеристики и их влияние на параметры обработки, выявить недостатки конструкции и эргономики управления, изучить приемы и особенности наладки и эксплуатации через виртуальный образ. Поэтому на кафедре «Технологическое оборудование» БНТУ проводится систематическая работа по созданию точных цифровых моделей сложного технологического оборудования. Такие модели позволяют подробно изучить конструкцию оборудования в динамике, виртуально настроить его на тот или иной вид работы. Иными словами, обеспечить цифровую трансформацию образовательного процесса в соответствие с требованиями современности.

В рамках реализации этой концепции, по методике, описанной ранее [1], создана кинематическая 3D-модель универсально-заточного станка модели 3Д642Е (рисунок 1, а) и к нему технологическая оснастка – инструментальные тиски (рисунок 1, б), подвижные центра (рисунок 1, в). Такой набор точных кинематических 3D-моделей позволяет реализовать разнообразные сценарии виртуальной настройки и работы станка при заточке различных типов режущих инструментов.

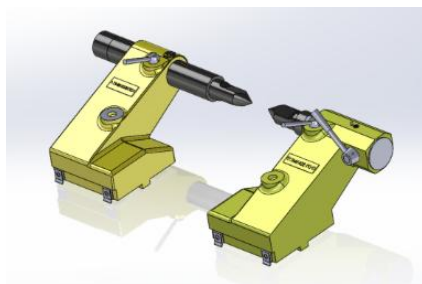
Например, на рисунке 2 представлен один из этапов виртуальной наладки универсально-заточного станка на заточку цилиндрической фрезы по задней поверхности. Рисунок 3 иллюстрирует процесс наладки станка на заточку плоской протяжки по задней поверхности. На рисунке 4 показана выставка углов трехповоротных тисков при заточке расточного резца на заданный угол по главной задней поверхности. Следует подчеркнуть, что угловые шкалы на тисках строго соответствуют фактическим углам поворота их виртуальных элементов.



а) несущая система станка



б) тиски трехповоротные



в) центра

Рисунок 1 – 3D-модель станка 3Д642Е и оснастки для имитации процесса заточки инструмента

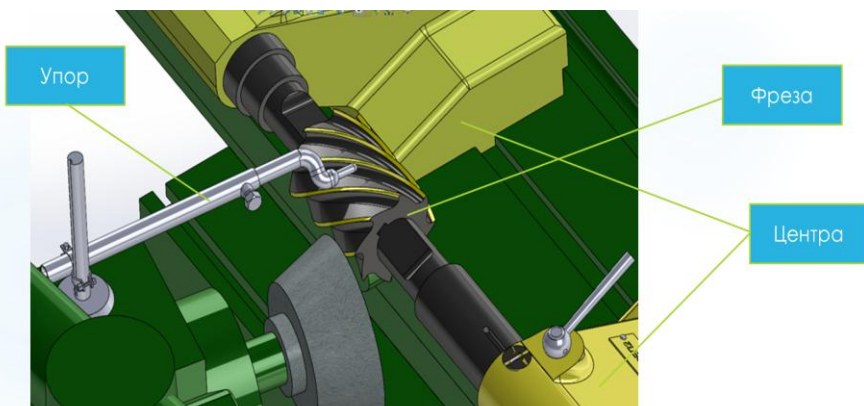


Рисунок 2 – Наладка станка на заточку цилиндрической фрезы по винтовой задней поверхности

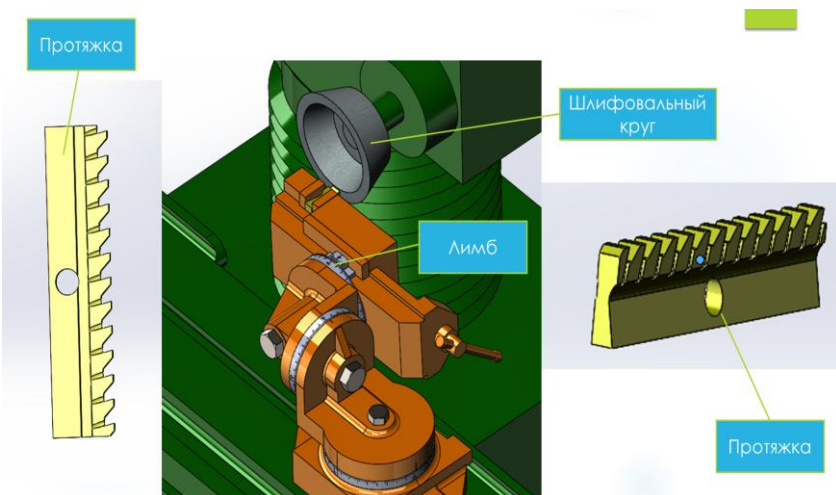


Рисунок 3 – Наладка станка на заточку плоской протяжки по задней поверхности

Наличие средств реализации взаимного движения узлов и деталей позволяет создавать реалистичные анимации работы станка. Как показал первый опыт использования таких моделей, это заметно повышает вовлеченность студентов в процесс обучения.

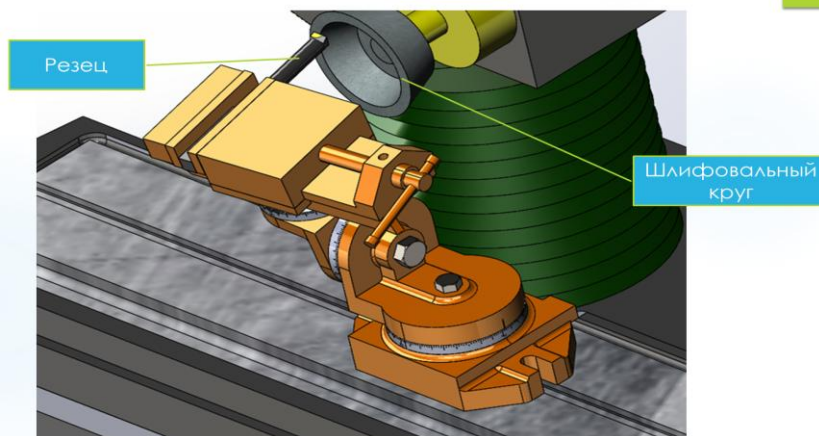


Рисунок 4 – Наладка станка на заточку расточного резца по главной задней поверхности

Литература

1. Ажар, А.В. Разработка кинематической 3D-модели станка в рамках цифровой трансформации обучения / А.В. Ажар, Д.Д. Деревяго, А.А. Тарасевич // Электронное издание. НИРС МСФ-2025. Сборник материалов 81-й студенческой научно-технической конференции. Секция «Металлорежущие станки и инструменты». Мн.: БНТУ, 2025. – С. 4–13.

СВЁРЛА С МЕХАНИЧЕСКИМ КРЕПЛЕНИЕМ НЕПЕРЕТАЧИВАЕМЫХ СМЕННЫХ ПЛАСТИН

Студенты группы 10301422 Блёскин А.Д., Булгаков В.Б.

Научный руководитель – ассистент Гордиенко А.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Свёрла с механическим креплением рабочей части к присоединительной можно разделить на свёрла с механическим креплением сменных неперетачиваемых пластин, в том числе многогранных (СМП) и свёрла с механическим креплением сменных головок. На рисунке 1 показано сборное перовое сверло для глубоких отверстий с внутренним подводом СОЖ [1], которое является примером сверла с механическим креплением неперетачиваемых сменных пластин. Такими свёрлами обрабатываются отверстия диаметрами 10...130 мм, глубиной от 10 до 120 диаметров. Режущие пластины изготавливаются из быстрорежущих сталей, а также из твёрдых сплавов, в том числе с покрытиями.

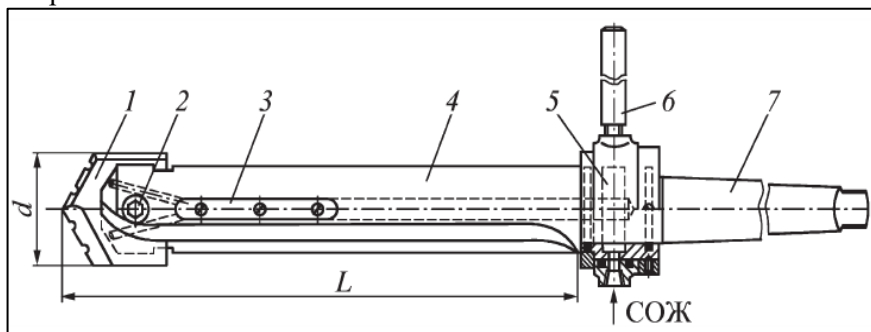


Рисунок 1 – Сборное перовое сверло для глубоких отверстий:

1 – сменная режущая пластина; 2 – винт; 3 – направляющая пластина; 4 – корпус; 5 – патрон для подвода СОЖ; 6 – упорная планка; 7 – хвостовик (оправка)

Изготавливают перовые свёрла и бóльших диаметров. Так, предприятие «Houdaille industries» (США) выпускало перовые

свёрла диаметрами 25...375 мм. Известны случаи применения перовых свёрл диаметром 450 мм. Формы пластин и способы их базирования разнообразны (рисунок 2).

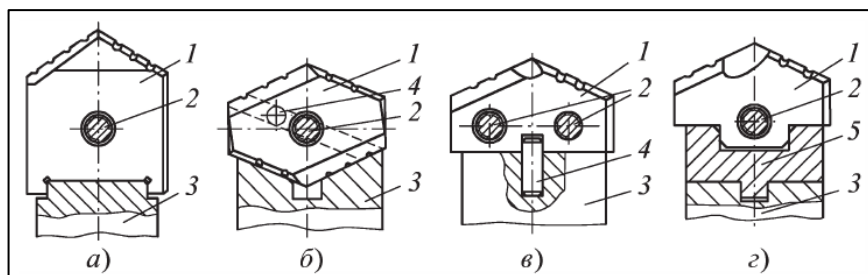


Рисунок 2 – Некоторые способы базирования сменных режущих пластин перовых свёрл [1]: а – ОАО «ВНИИинструмент» (Россия); б – предприятия «Sandvik Coromant» (Швеция); в – предприятия «Hartner» (Германия); г – предприятия «Krupp Widia» (Германия) (1 – сменная пластина; 2 – зажимной винт; 3 – корпус; 4 – штифт; 5 – переходник)

Для современного машиностроения характерно применения СМП из твёрдых сплавов, механически закрепляемых на корпусах режущих инструментов, в том числе свёрл. Это обусловлено следующими причинами:

- 1) не требуется заточка, так как геометрические параметры сверла обеспечиваются положением пластин, имеющих определённые геометрические параметры; после затупления пластин их поворачивают или заменяют на новые. Отсутствие переточки уменьшает время на замену инструмента и устраняет возможность появления трещин и прижогов;
- 2) появляется возможность многократного использования державки, объединяющей в себе крепёжную и присоединительные части сверла;
- 3) при отсутствии паяных соединений режущих пластин с державкой не возникают обусловленные пайкой напряжения и микротрещины, что благоприятно сказывается на надёжности сверла;

- 4) за счёт переработки затупленных СМП сокращаются потери инструментальных материалов, которые возможно использовать повторно;
- 5) появляется возможность эффективного использования безвольфрамовых твёрдых сплавов, которые плохо поддаются пайке [2].

Свёрла с неперетачиваемыми пластинами используются для сверления отверстий диаметрами 20...60 мм глубиной три–четыре диаметра (в каталогах некоторых предприятий – до шести диаметров [4]). Для повышения надёжности в их корпусах выполнены отверстия для подвода СОЖ. Стружечные канавки у них, как правило, прямые, как более технологичные. У свёрл небольших диаметров стружечные канавки могут быть и винтовыми с углом наклона 20° [3].

Применяемые в свёрлах СМП – в форме параллелограмма, ромба, прямоугольника или «неправильного треугольника» с шестью режущими кромками и центральным отверстием тороидально-цилиндрической формы для крепления винтом с конической головкой. Вдоль режущих кромок выполнены уступы или лунки для дробления стружки. СМП расположены в корпусе сверла так, что делают припуск по ширине с перекрытием в средней части. Перемычки, которая является недостатком винтового сверла, у таких свёрл нет.

На рисунке 3 показано сверло с двумя СМП. Одна из пластин обрабатывает центральную часть сверла, а другая – периферийную. В свёрлах большого диаметра используются не две, а, например, четыре СМП, которые могут крепиться как поодиночке (рисунок 4), так и будучи установленными в картриджи (рисунок 5). Применение картриджей является проявлением модульного принципа в конструировании, даёт возможность регулируемой настройки на нужный диаметр в некотором диапазоне.

На рисунке 6 показано модульное сверло, предназначенное для обработки отверстий больших диаметров, а также глубоких (за счёт оправок разной длины). В корпусе сверла установлено твёрдосплавное центровочное сверло. На периферии расположены картриджи, в которых закрепляются СМП. Сверло оснащено отверстиями для внутренней подачи СОЖ [5].



Рисунок 3 – Сверло диаметром 48 мм с механическим креплением двух СМП



Рисунок 4 – Сверло диаметром 60 мм с механическим креплением четырёх СМП



Рисунок 5 – Сверло с двумя сменными картриджами



Рисунок 6 – Модульное сверло

Недостатком свёрл с неперетачиваемыми пластинами является различие сил резания на двух зубьях, которое вызывает увод сверла от его геометрической оси. Чтобы уравнять силы, можно использовать СМП, имеющие различные передние углы или различные длины режущей кромки.

Литература

1. Обработка глубоких отверстий в машиностроении: справочник / Под общ. ред. С. В. Кирсанова. – М.: Машиностроение, 2010. – 344 с.
2. Режущий инструмент: учебное пособие / А. А. Рыжкин [и др.]. – Ростов н/Д: Феникс, 2009. – 405 с.
3. Режущий инструмент: учебник для вузов / Под редакцией С. В. Кирсанова. – М.: Машиностроение, 2005. – 528 с.
4. Корпусные свёрла с СМП. – URL: <https://rbh-tools.ru/novosti/korpusnye-sverla-s-smp/> (дата обращения 08.05.2025).
5. Корпусные свёрла со сменными пластинами ведущих мировых производителей (Kennametal, Sandvik, AHNO, Kyocera, ACCcee): виды, сравнение, где купить. – URL: <https://www.ahno-tool.ru/blogs/blog/korpusnye-svyorla-so-smennymi-plastinami-veduschih-mirovyh-proizvoditeley-vidy-sravnenie-gde-kupit?lang=en> (дата обращения 08.05.2025).

УДК 621.9

СВЁРЛА С МЕХАНИЧЕСКИМ КРЕПЛЕНИЕМ СМЕННЫХ ГОЛОВОК

Студенты группы 10301422 Блёскин А.Д., Булгаков В.Б.
Научный руководитель – Гордиенко А.В., ассистент
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Современные конструкции свёрл включают в себя свёрла со сменными головками. Например, «Sumitomo» (Япония) выпускает такие сверла, предназначенные для получения отверстий в стальных и чугунных заготовках [1]. Такими свёрлами можно обрабатывать отверстия диаметрами 12...30,5 мм, глубиной до восьми диаметров. Для охлаждения зоны резания в свёрлах имеются отверстия, по которым подводится СОЖ. Некоторые особенности свёрл отражены на рисунке 2. Определённость положения сменной головки обеспечивается зубчатым торцевым соединением с корпусом сверла, а закрепление – двумя винтами.



Рисунок 1 – Свёрла со сменными головками «Sumitomo»



Рисунок 2 – Конструктивные особенности свёрл со сменными головками «Sumitomo»

Такие свёрла обладают стойкостью в три раза большей, чем свёрла с припаянной коронкой из твёрдого сплава (рисунок 3).

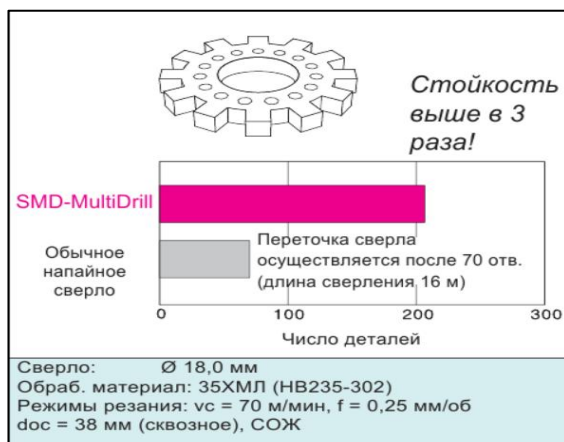


Рисунок 3 – Данные о стойкости свёрл со сменными головками «Sumitomo»

На рисунке 4 показано сверла с механическим креплением сменных головок, выпускаемые предприятием «Weila» (Германия) [2]. Сменная головка базируется по отверстию и плоскостям в

корпусе сверла, крепится винтом. Выпускаются свёрла для обработки отверстий диаметрами 10...31 мм. В таблице 1 проведено сравнение возможностей двух типов сверл: с СМП и сменными головками.



Рисунок 4 – Свёрла со сменными головками предприятия «Weila»

Таблица 1 – Результаты сравнения возможностей свёрл с СМП и со сменными головками

Параметр	Значение параметра для сверла	
	со сменной головкой	с СМП
Подача при обработке отверстия глубиной в пять диаметров, мм/об	0,15...0,2	0,06...0,1
Параметр Ra шероховатости обработанной поверхности, мкм	1,6	3,2
Точность диаметра обработанной поверхности, мм	$\pm(0,02...0,1)$	$\pm(0,05...0,3)$

Уже два десятилетия известна система *BTA (Boring and Trepanning Association)* для обработки глубоких отверстий, разработанная международной группой производителей режущих инструментов [3]. Свёрла этой системы применяются для обработки отверстий диаметром 6...180 мм и более, глубиной более 100

диаметром с точностью диаметральных размеров по IT9...IT7, уводом осей отверстий до 0,01...0,03 мм на 100 мм длины и параметром шероховатости $Ra = 2,5$ мкм.

Сверло ВТА состоит из сверлильной головки 1 и стебля 2 кольцевого сечения, к которому крепится головка (рисунок 5). Центрирование головки в стебле осуществляется по двум посадочным пояскам, выполненным в стебле и на хвостовике сверлильной головки. При сверлении в зону резания подаётся СОЖ под давлением через маслоприёмник 3 в кольцевой зазор между стеблем и обработанным отверстием, а стружка отводится внутри стебля [4, 5].

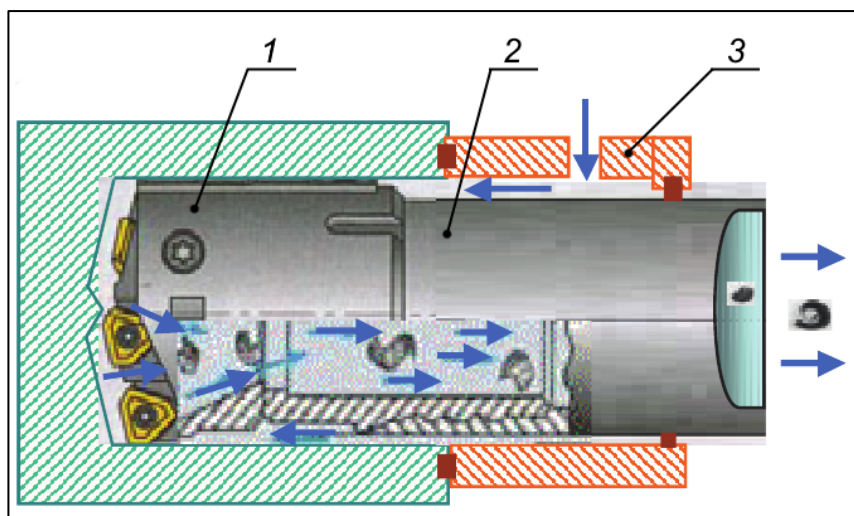


Рисунок 5 – Схема обработки глубокого отверстия сверлом ВТА

Конструкции свёрл ВТА весьма разнообразны. Например, в конструкции свёрл диаметром 8,51...9,25 мм твёрдосплавная рабочая часть Т-образной формы припаивается к стеблю кольцевого сечения. Одним из недостатков такой конструкции является большой расход стеблей. Поэтому свёрла диаметром 8 мм и более изготавливаются чаще сборными. В них рабочая часть выполнена в виде головок, прикрепляемых посредством наружной или внутренней одно- или четырёхзаходной резьбы прямоугольного

профиля к стеблю. Такие головки бывают одно- и многолезвийными, перетачиваемыми и неперетачиваемыми, то есть с напаянными или сменными режущими пластинами [4]. На рисунке 6 показано сверло ВТА со сменной режущей пластиной (СМП). Подобные конструкции становятся преобладающими.



Рисунок 6 – Сверло ВТА диаметром 30 мм со СМП

Технология обработки отверстий развивается, конструкции свёрл совершенствуются и становятся ещё более разнообразными. В связи с этим представляют интерес сведения об области применения и точности размеров получаемых отверстий для свёрл различных типов, которые приведены в статье [6] (рисунки 7, 8).

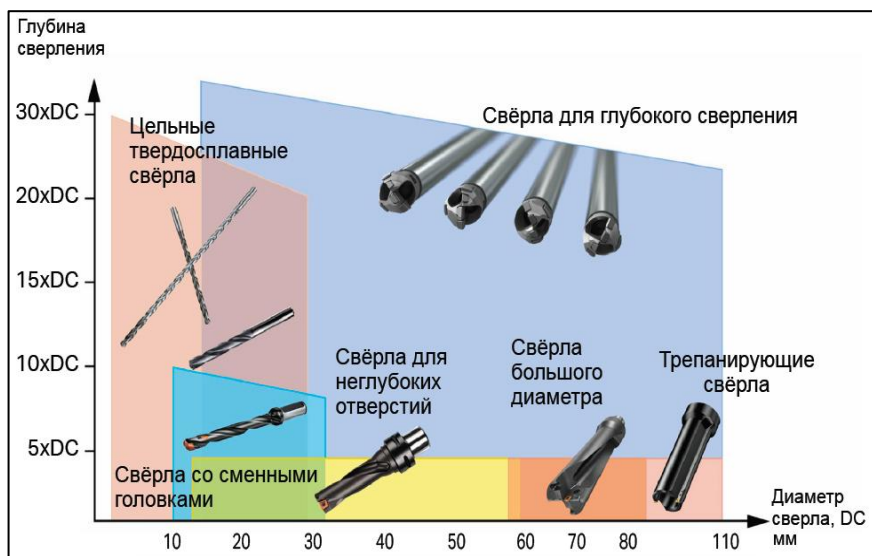


Рисунок 7 – Области применения свёрл различных типов

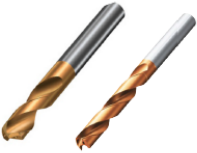
	Цельные твердосплавные сверла	Свёрла со сменной головкой	Свёрла со сменными пластинами
Допуск			
IT6			
IT7			
IT8			
IT9			
IT10			
IT11			
IT12			
IT13			

Рисунок 8 – Точность отверстий, получаемых свёрлами различных типов

Литература

1. Sumitomo. Металлорежущий инструмент. Каталог – 2012. – URL: <https://www.met-instrument.ru/cat/Sumitomo%20K%20Korpysnye%20sverla%202012%20RUS.pdf> (дата обращения 09.05.2025).
2. Корпусные свёрла Weila: виды, применение, сравнение. – URL: <https://www.rinscom.com/articles/korpusnye-sverla-weila-vidy-primeneniye-sravneniye/?erid=2SDnjeDK21q#p3-1> (дата обращения 09.02.2025).
3. Система ВТА – это система глубокого сверления для специальных станков. – URL: [https://shop.tekhnotools.ru/Boring_Trepanning_Association#:~:text=Система%20ВТА%20\(Boring%20%26%20Trepanning,охлаждающ ей%20жидкостью%20под%20высоким%20давлением](https://shop.tekhnotools.ru/Boring_Trepanning_Association#:~:text=Система%20ВТА%20(Boring%20%26%20Trepanning,охлаждающ ей%20жидкостью%20под%20высоким%20давлением)
4. Обработка глубоких отверстий в машиностроении: справочник / Под общ. ред. С. В. Кирсанова. – М.: Машиностроение, 2010. – 344 с.
5. TPCtools engineering. ВТА Tools. Полный спектр инструмента для глубоких отверстий. – URL: https://инженерныйконсалтинг.com/wp-content/uploads/2022/01/TPCtools_ВТА-web.pdf (дата обращения 14.05.2025).
6. Свёрла со сменными пластинами. – URL: https://enex.market/library/recommendations/sverla_so_smennymi_plastinami/ (дата обращения 09.05.2025).

УДК 621.9

СВЁРЛА МОНОЛИТНЫЕ И С НЕРАЗЪЁМНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ РАБОЧЕЙ И ПРИСОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ЧАСТЕЙ

Студенты группы 10301422 Булгаков М.Б., Блёскин А.Д.

Научный руководитель: Гордиенко А.В., ассистент

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Согласно [1, 2], обычно монолитными изготавливаются свёрла из быстрорежущих сталей при диаметрах до 6 мм и свёрла из твёрдых сплавов при диаметрах до 12 мм. Выпускаются и монолитные свёрла с диаметрами, которые больше указанных. В монолитных свёрлах рабочая и присоединительная части получают при формообразовании однородных по материалу заготовок. Поверхностей стыка частей у таких свёрл нет (рисунки 1, 2).



Рисунок 1 – Свёрло диаметром 16 мм из быстрорежущей стали



Рисунок 2 – Свёрло диаметром 0,9 мм из твёрдого сплава с
утолщённым хвостовиком

Для получения отверстий небольших диаметров в очень твёрдых материалах (например, закалённых сталях) рекомендуются [3, 4] твёрдосплавные сверла с прямыми канавками (рисунок 3).



Рисунок 3 – Сверло диаметром 6 мм из твёрдого сплава, с прямыми канавками

В свёрлах, которые состоят из разнородных материалов, крепление рабочей части к присоединительной осуществляется посредством неразъёмных и разъёмных соединений. По мере совершенствования уровней конструирования и технологии изготовления такие свёрла могут оказаться экономически целесообразными и при небольших диаметрах [5, 6].

Если рабочая часть сверла выполнена из быстрорежущей стали и присоединительная часть сверла тоже стальная, то их неразъёмное соединение образуется сваркой встык.

Если рабочая часть сверла твёрдосплавная, а присоединительная часть стальная, то их неразъёмное соединение образуется запрессовкой (рисунок 4) или пайкой. У таких свёрл направляющих ленточек обычно нет, так как при высоких скоростях резания они быстро изнашиваются и не могут быть направляющими. При соединении пайкой твёрдосплавная рабочая

часть сверла с коротким конусом, имеющим угол 60° , припаивается к стальной присоединительной части сверла – хвостовику. Пайка выполняется латунным или серебряным припоем. Надёжность такого соединения низкая, оно может выдерживать только малые нагрузки. Обязательно производится подточка перемычки с целью уменьшения её длины и снижения осевого усилия.

Недостатком свёрла с припаянной пластиной твёрдого сплава (рисунок 5) является снижение прочности пазом под пластину. Кроме того, область спая расположена близко к зоне резания, поэтому при высоких температурах паяное соединение может стать неработоспособным.

Этих недостатков лишены свёрла, у которых рабочая часть из твёрдого сплава выполнена в виде коронки (головки) и припаяна встык к присоединительной части (хвостовику), рисунок 6. Область спая удалена от зоны резания, поэтому влияние высоких температур снижается. Коронка соединяется с корпусом сверла ступенчатым замком, который и воспринимает крутящий момент. Касательные напряжения в припое уменьшаются, что обеспечивает надёжность таких свёрл. Свёрла имеют высокую прочность и жёсткость, позволяют изменять геометрические параметры при переточках [1].



Рисунок 4 – Сверло диаметром 5,3 мм, с рабочей частью из твёрдого сплава, запрессованной в стальной цилиндрический хвостовик



Рисунок 5 – Сверло диаметром 50 мм с припаянной пластиной из твёрдого сплава



Рисунок 6 – Сверло диаметром 6 мм с припаянной коронкой из твёрдого сплава

Свёрла, у которых рабочая часть выполнена из твёрдого сплава, применяются для получения отверстий в заготовках из чугунов, сплавов цветных металлов, неметаллических материалов (мрамора, бетона, кирпича, стекла, керамики, пластмасс). Это связано с тем, что при высокой стоимости эти свёрла не обеспечивают значительного увеличения производительности. Кроме того, они склонны к выкрашиванию, частым поломкам, которые вызваны недостаточной изгибной прочностью и жёсткостью. Для получения отверстий в конструкционных сталях такие свёрла применяются на станках повышенной жёсткости, в частности, станках с ЧПУ [2, 6].

Литература

1. Формообразующие материалы в машиностроении: учебное пособие / А. Г. Схиртладзе [и др.]. – М.: Новое знание, 2006. – 557 с.
2. Резание металлов и режущие инструменты: учебное пособие / В. Г. Солоненко, А. А. Рыжкин. – М.: ИНФРА-М, 2023. – 415 с.
3. Вульф А. М. Резание металлов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
4. Degree Machine Tool High Surface Finish Cutter 3F Hole Chamfer Mill. – URL: <https://imall.com/product/30-45-60-Degree-Machine-Tool-High-Surface-Finish-Cutter-3F-Hole-Chamfer-Mill/Tools-Machinery-Accessories/aliexpress.ru/4001094738437/1381-37964573/ru> (дата обращения 14.05.2025).
5. Режущий инструмент: Проектирование. Производство. Эксплуатация: учебное пособие / В. И. Шагун. – Минск: НПООО «ПИОН», 2001. – 496 с.
6. Режущий инструмент: учебник для вузов / Под редакцией С. В. Кирсанова. – М.: Машиностроение, 2005. – 528 с.

УДК 621.9

СТАНДАРТНЫЕ ТВЁРДОСПЛАВНЫЕ ЗЕНКЕРЫ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОТВЕРСТИЙ

Студент группы 10301422 Щербин П.Р.

Научный руководитель: Гордиенко А.В., ассистент
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Как известно, осевым называется лезвийный инструмент для обработки с вращательным главным движением резания и движением подачи вдоль оси главного движения резания. Зенкер – это осевой режущий инструмент для повышения точности формы отверстия в сплошном материале и уменьшения шероховатости поверхности [1].

Зенкеры применяются в массовом и крупносерийном производствах для промежуточной или окончательной обработки отверстий, полученных предварительно сверлением, литьём, ковкой или штамповкой, обеспечивая точность отверстий IT11 – IT10 и параметр шероховатости $R_z = 40 \dots 10$ мкм.

По сравнению со свёрлами зенкеры снимают меньшие припуски (до 4 мм), имеют большее число режущих кромок и направляющих ленточек. Из-за меньшей глубины стружечных канавок они имеют большую, чем свёрла, жёсткость, а отсутствие перемычки позволяет вести обработку с большими подачами.

Зенкеры классифицируются, в частности, по следующим признакам [2, 3]:

- по назначению: цилиндрические, ступенчатые, головочные, зенковки (конические зенкеры), цековки (торцовые зенкеры);
- по способу крепления: хвостовые, насадные;
- по конструкции рабочей части: цельные, с напаянными зубьями, с напаянными на зубьях пластинами, сборные со вставными ножами, сборные со съёмной режущей частью (головкой);
- по материалу рабочей части: быстрорежущие твёрдосплавные.

Основным направлением совершенствования конструкций зенкеров, согласно изданным недавно учебникам по резанию металлов и режущим инструментам, например, [4], является более широкое применение твёрдосплавного режущего инструмента с одновременным повышением его точности по радиальному биению, направляющей его части (ленточек), заборного конуса относительно оси посадочного места, обязательная доводка и так далее. Правда, об этом говорилось ещё в 1972 году на VI Всесоюзной научно-технической конференции «Перспективы развития режущего инструмента и повышение его производительности в машиностроении» [5].

На сегодняшний день действующими являются следующие государственные стандарты (ГОСТ), которые распространяются на конструкции и размеры твёрдосплавных зенкеров для цилиндрических отверстий [6]:

- ГОСТ 3231-71 Зенкеры, оснащённые твёрдосплавными пластинами. Конструкция и размеры, рисунки 1, 2 (введён взамен МН 706-60, МН 707-60, МН 708-60, МН 715-60);

- ГОСТ 21540-76 Зенкеры, оснащённые твёрдосплавными пластинами, для обработки деталей из нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов. Конструкция и размеры;
- ГОСТ 21541-76 Зенкеры со вставными ножами, оснащённые твёрдосплавными пластинами, для обработки деталей из нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов. Конструкция и размеры;
- ГОСТ 21543-76 Зенкеры цельные твёрдосплавные с цилиндрическим хвостовиком для обработки деталей из нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов. Конструкция и размеры;
- ГОСТ 21544-76 Зенкеры цельные твёрдосплавные с коническим хвостовиком для обработки деталей из нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов. Конструкция и размеры;
- ГОСТ 21583-76 Зенкеры с коническим хвостовиком, оснащённые твёрдосплавными пластинами, для обработки деталей из лёгких сплавов. Конструкция и размеры (введён взамен МН 329-60);
- ГОСТ 21585-76 Зенкеры насадные, оснащённые твёрдосплавными пластинами, для обработки деталей из лёгких сплавов. Конструкция и размеры (введён взамен МН 332-60);

Зенкеры по ГОСТ 3231-71 должны изготавливаться двух типов: 1 – с коническим хвостовиком, диаметром от 11,75 до 50,0 мм (рисунок .1); 2 – насадные диаметром от 31,6 до 80 мм (рисунок 2). У зенкеров типа 1 имеются три лезвия, у зенкеров типа 2 – четыре [7].



Рисунок 1 – Зенкер диаметром 24,7 мм типа 1 по ГОСТ 3231-71



Рисунок 2 – Зенкер диаметром 41,6 мм типа 2 по ГОСТ 3231-71

Зенкеры по ГОСТ 21540-76 должны изготавливаться тех же двух типов, причём типа 1 – диаметром от 12 до 50 мм, типа 2 – диаметром от 32 до 80 мм. У зенкеров типа 1 имеются три лезвия, у зенкеров типа 2 – четыре [8].

Зенкеры по ГОСТ 21541-76 типа 1 должны изготавливаться диаметром от 30 до 50 мм, с тремя (при диаметре до 40 мм) или четырьмя (при диаметре от 42 мм) ножами (рисунок 3). Зенкеры типа 2 должны изготавливаться диаметром от 50 до 80 мм, с четырьмя (при диаметре до 55 мм) или шестью (при диаметре от 58 мм) ножами (рисунок 4) [9]. У этих зенкеров нож 2 постоянной толщины посредством рифлений на спинке соединяется с клином 2. Клин имеет два уклона: вдоль и поперёк оси зенкера. Затяжка ножей осуществляется заколачиванием клиньев. Эта конструкция допускает двойную регулировку ножей: по диаметру – на нужный размер – и в осевом направлении – на величину нужного вылета ножей.

Зенкеры по ГОСТ 21543-76 выпускаются диаметром от 3,0 до 10,0 мм, имеют три лезвия (рисунок 5) [10].

Зенкеры по ГОСТ 21544-76 выпускаются диаметром от 7,80 до 12 мм, имеют три лезвия (рисунок 6) [11].

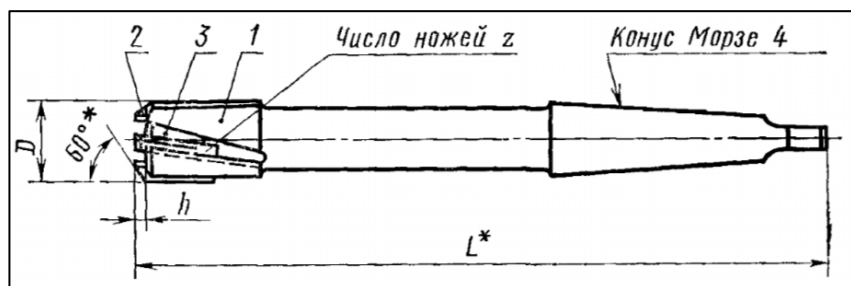


Рисунок 3 – Зенкер типа 1 по ГОСТ 21541-76:

1 – корпус, 2 – нож, 3 – клин

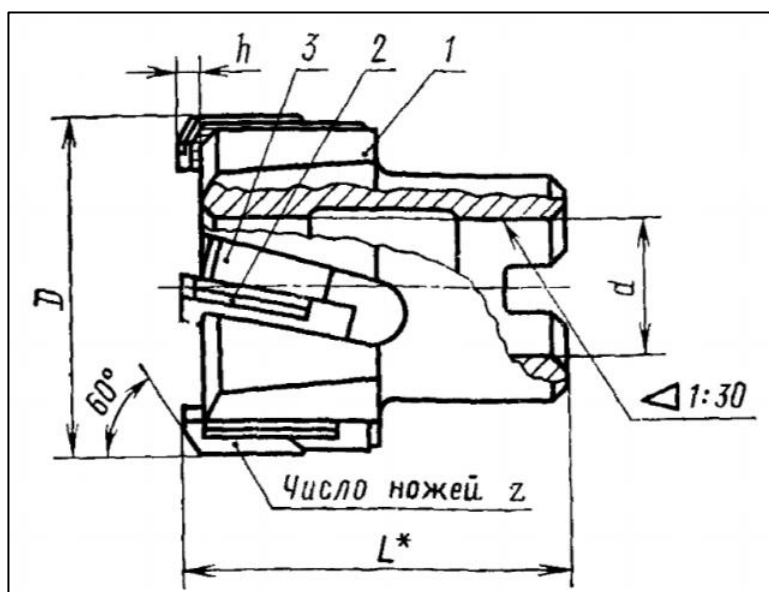


Рисунок 4 – Зенкер типа 2 по ГОСТ 21541-76:

1 – корпус, 2 – нож, 3 – клин

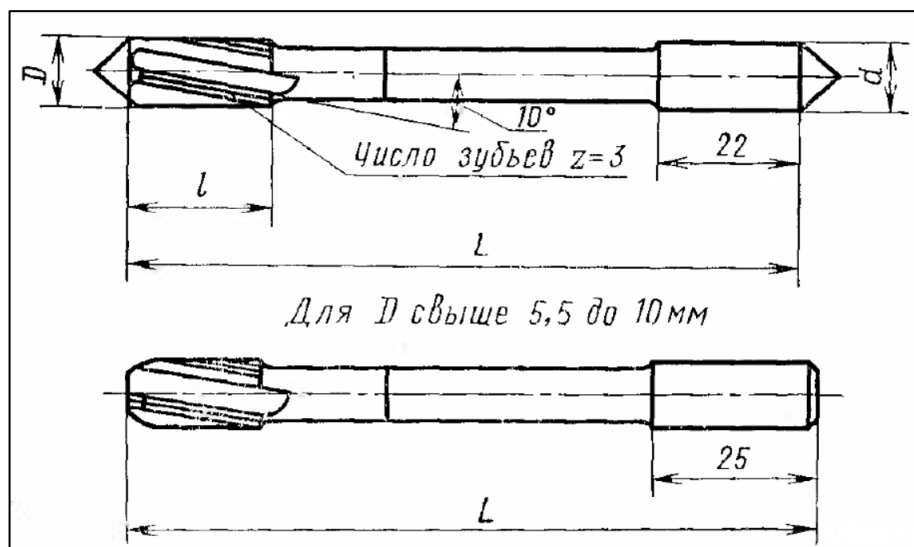


Рисунок 5 – Зенкеры по ГОСТ 21543-76

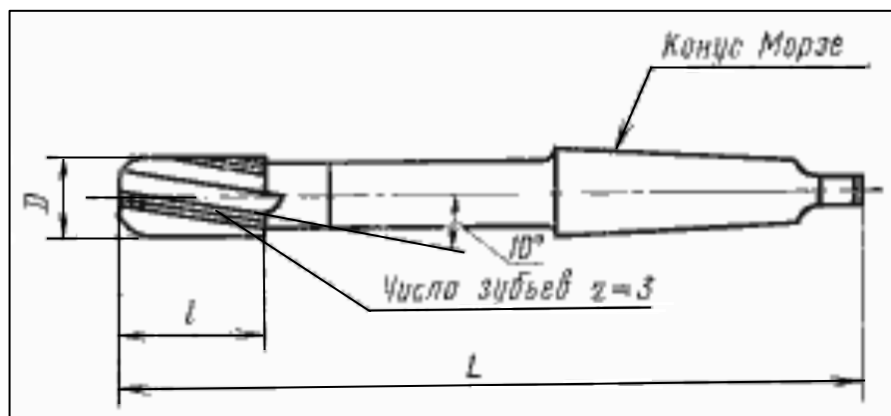


Рисунок 6 – Зенкер по ГОСТ 21544-76

Зенкеры по ГОСТ 21583-76 выпускаются диаметром от 18 до 35 мм, имеют три лезвия. Предусмотрены зенкеры для предварительной (зенкер №1) и окончательной обработки отверстий по Н11 (зенкер №2) (рисунок 7) [12].

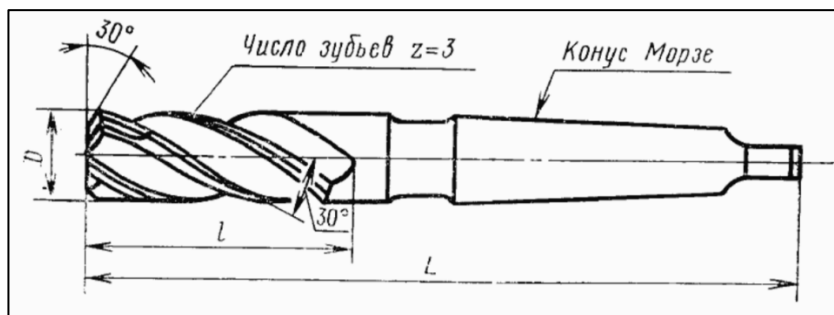


Рисунок 7 – Зенкер по ГОСТ 21583-76

Зенкеры по ГОСТ 21585-76 выпускаются диаметром от 36 до 80 мм, имеют три лезвия при диаметре до 47 мм, четыре лезвия при диаметре от 48 до 70 мм, пять лезвий при диаметре от 72 мм (рисунок 8) [13].

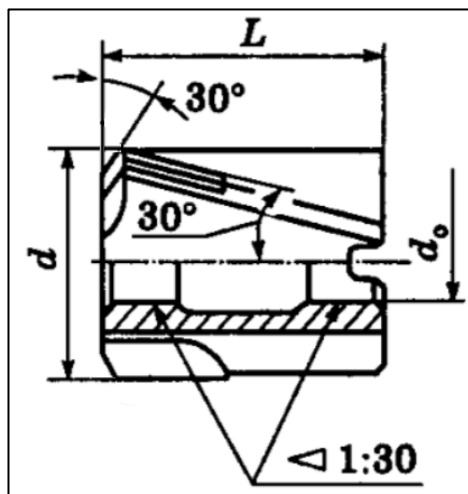


Рисунок 8 – Зенкер по ГОСТ 21585-76

Судя по тому, что ГОСТ 21540-76, ГОСТ 24541-76, ГОСТ 21543-76, ГОСТ 21544-76 были введены в действие с 1 января 1977 года, не взамен межведомственных нормалей (МН) и не в связи с пересмотром ранее действовавших стандартов, можно предположить, что их разработка была реализацией решения

упомянутой выше Всесоюзной конференции 1972 года. Так были стандартизированы твёрдосплавные зенкеры для обработки деталей из нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов.

Известны также зенкеры со вставными ножами, оснащёнными пластинами твёрдого сплава, по ОСТ 2-И23-3-87 [14], введённого после отмены ГОСТ 12510-71. По своей конструкции эти зенкеры сходны с зенкерами по ГОСТ 21541-76 (рисунки 3 и 4).

К зенкерам, конструкции которых отражены в стандартах предприятий, относится двузубый зенкер, оснащённый сменными многогранными пластинами (СМП) твёрдого сплава (рисунок 9). Он состоит из хвостовика 1, пластинчатого корпуса 2, винта 3, крепящего корпус к хвостовику, двух СМП 4 и винтов 5 для их закрепления в корпусе. Две СМП размещены диаметрально противоположно в закрытых гнездах корпуса и закрепляются специальным винтом через своё центральное отверстие, то есть так же, как в свёрлах с СМП. Главный угол в плане у зенкеров с СМП «неправильной трёхгранной» формы равен 90° , а у зенкеров с четырёхгранными пластинами – 88° . Такие зенкеры рекомендуются для черновой обработки. Они изготавливались Сестрорецким инструментальным заводом имени С.И. Воскова диаметром от 40 до 120 мм по заказам [15].

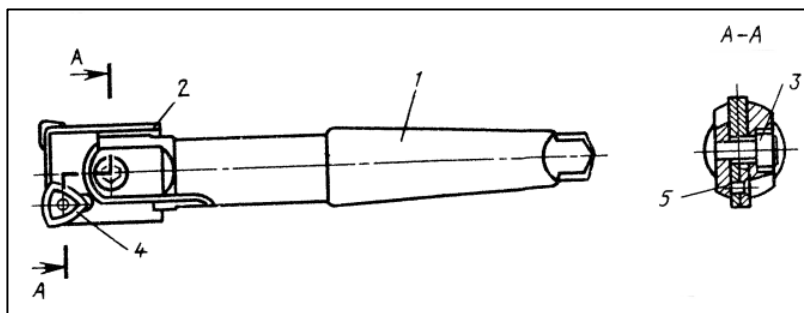


Рисунок 9 – Двузубый зенкер с механическим креплением твёрдосплавных СМП

Направлением совершенствования зенкеров является создание конструкций с внутренним подводом смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в зону резания. В рабочей части

такого инструмента под некоторым углом к оси от спинки каждого зуба проведены отверстия, соединяющиеся с центральным каналом, а хвостовик в виде конуса Морзе закрепляется в нормализованном патроне. СОЖ через отверстие в хвостовике, центральное и наклонные отверстия подводится к режущей части инструмента. Испытания зенкеров с каналом для подвода СОЖ при обработке отверстий длиной четыре диаметра в ряде труднообрабатываемых материалов подтвердили значительное (до восьми раз) повышение стойкости зенкеров, повышение производительности труда. Область применения таких зенкеров – автоматизированное производство, оснащённое системой подготовки и подвода СОЖ в зону резания с расходом 15...30 л/мин [16].

Зенкеры с отверстиями для подвода СОЖ выпускаются зарубежными предприятиями (рисунок 10).



Рисунок 10 – Зенкеры с отверстиями для подвода СОЖ [17]

Литература

1. ГОСТ 25751-83 – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/13264/> (дата обращения 04.05.2025).

2. Металлорежущие инструменты: справочник конструктора / Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – Минск: Новое знание, 2009. – 1039 с.
3. Режущий инструмент: Учебник для вузов / Под редакцией С. В. Кирсанова. – М.: Машиностроение, 2005. – 528 с.
4. Резание металлов и режущие инструменты: учебное пособие / В.Г. Солоненко, А.А. Рыжкин. – М.: ИНФРА-М, 2023. – 415 с.
5. Решение VI Всесоюзной научно-технической конференции «Перспективы развития режущего инструмента и повышение его производительности в машиностроении». – М.: ВДНХ СССР – 11 с.
6. Результаты поиска по слову «зенкеры» на сайте www.internet-law.ru. – URL: <https://internet-law.ru/gosts?f1=%C7%E5%ED%EA%E5%F0%FB&f2=0&f3=0&f4=0&where=1> (дата обращения 15.05.2025).
7. ГОСТ 3231-71. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/17830/> (дата обращения 16.05.2025).
8. ГОСТ 21540-76. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/33879/> (дата обращения 16.05.2025).
9. ГОСТ 21541-76. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/34452/> (дата обращения 16.05.2025).
10. ГОСТ 21543-76. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/16162/> (дата обращения 16.05.2025).
11. ГОСТ 21544-76. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/15891/> (дата обращения 16.05.2025).
12. ГОСТ 21583-76. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/33805/> (дата обращения 16.05.2025).
13. ГОСТ 21585-76. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/34322/> (дата обращения 16.05.2025).
14. ОСТ 2-И23-3-87. – URL: <http://www.1bm.ru/techdocs/kgs/ost/160/info/27835/> (дата обращения 17.05.2025).
15. Кузнецов Ю.И., Маслов А.Р., Байков А.Н. Оснастка для станков с ЧПУ: Справочник. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
16. Филиппов Г.В. Режущий инструмент. – Л.: Машиностроение, 1981. – 392 с.
17. URL: https://ru.made-in-china.com/co_heshetrading/product_Carbide-Spiral-Carbide-Reamer-Bit-for-Metal-Cutting-Machine-Carbide-Spiral-Reamer-for-Metal-Machine-Cutting-Reamer-Tool-Range_ysyhsgyogy.html (дата обращения 16.05.2025).

КЕРАМИКА В УЗЛАХ ТРЕНИЯ: ВИДЫ И ПРИМЕНЕНИЕ

Студентка группы 10301222 Захарова А.М.

Научный руководитель: Данилович В.С., ассистент

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь, E-mail: mstools@bntu.by

Современные требования к надежности и долговечности машин обуславливают активное внедрение технической керамики в узлы трения. Уникальные свойства керамических материалов - исключительная твердость (до 3000 HV), термостойкость (до 1500°C), химическая инертность и низкий коэффициент трения – делают их незаменимыми для работы в экстремальных условиях.

Монолитная керамика на основе оксидов (Al_2O_3 , ZrO_2) и неоксидных соединений (Si_3N_4 , SiC) активно используется в высоконагруженных узлах трения, таких как подшипники качения и скольжения, торцевые уплотнения, направляющие клапанов и детали топливной аппаратуры. Например, подшипники из нитрида кремния (Si_3N_4) демонстрируют в 5–10 раз больший ресурс по сравнению с традиционными стальными подшипниками в высокоскоростных шпинделях станков и газотурбинных установках [1]. Это связано с их исключительной усталостной прочностью (до 1000 МПа), низким термическим расширением и способностью работать без смазки при температурах до 800°C.

Однако хрупкость керамики ограничивает её применение в условиях ударных нагрузок. Для решения этой проблемы разрабатываются композиционные материалы, например, ZrO_2 -стабилизированная Al_2O_3 , которая сочетает высокую твердость с повышенной трещиностойкостью (K_{Ic} до 8 МПа·м^{1/2}) [2]. Такие материалы успешно применяются в клапанных группах двигателей внутреннего сгорания, где обеспечивают снижение износа на 30–40% по сравнению с металлическими аналогами.

Альтернативой объемной керамике являются керамические покрытия, которые позволяют улучшить трибологические характеристики традиционных металлических деталей. Наибольшую эффективность показали твердые покрытия на основе нитридов (TiN , CrN), увеличивающие поверхностную твердость до

3000 HV, термобарьерные покрытия для защиты от термической усталости и самосмазывающиеся составы для работы в агрессивных средах. Технологии нанесения, такие как PVD/CVD и плазменное напыление, обеспечивают высокую адгезию и стабильность свойств покрытий [3].

Выбор между объёмной керамикой и покрытиями зависит от условий эксплуатации (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ

Параметр	Объёмная керамика	Покрyтия
Нагрузка	До 2 ГПа	До 1 ГПа
Температура	До 1500°C	До 800°C
Стоимость	Высокая	Умеренная

Монолитные керамические детали незаменимы при сверхвысоких нагрузках и температурах, в то время как покрытия представляют собой экономически эффективное решение для модернизации существующих узлов. Особую перспективу имеют гибридные решения, сочетающие преимущества металлической основы с керамическими поверхностными слоями, что открывает новые возможности для создания высоконадежных узлов трения следующего поколения.

Литература

1. Wang, Y., et al. (2018). "Tribological performance of Si₃N₄-based ceramics in rolling contacts". *Wear*, 408–409, 22–31.
2. Bocanegra-Bernal, M.H. (2019). "Zirconia- and alumina-based composites for orthopedic applications". *Journal of Materials Science*, 54(1), 1–24.
3. Holmberg, K., Matthews, A. (2009). "Coatings Tribology: Properties, Mechanisms and Applications". *Elsevier*.

УДК 621.9.011

БИОНИЧЕСКАЯ ГРИБОВИДНАЯ САМОДЕЙСТВУЮЩАЯ ОПРЕСНИТЕЛЬНАЯ БАШНЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ СОЛНЦЕ-ПАРО-ВЕТРОВОГО ОПРЕСНЕНИЯ СОЛЕНОЙ ВОДЫ

Довнар С.С., Пехота А.Н., аспирантка Лапука А.Д., студент группы
10305224 Абраменко А.Д.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Термины и аббревиатуры:

ЕТ (*chimney draft*) – естественная тяга (теплого воздуха или пара в вертикальной атмосферной трубе)

ВВТ (башня или *tower*)– вертикальная вытяжная труба (труба с ЕТ)

Пар (*steam*) – горячий насыщенный влагой воздух

ТИ (*greenhouse*)– теплица-испаритель

ВВК – ветровая высотная конденсация (воды из пара) в верхней части ВВТ

СПВ-опреснение – солнце-паро-ветровое опреснение

СВОП-башня – солнце-ветровая опреснительная башня [1, 2]
(вариант ВВТ)

СОБ – солнце-вытяжная башня (*sun updraft tower*) [3]

ГОВ (*MULD-tower*) – бионическая Грибовидная Опреснительная Башня (грибовидный вариант СВОП-башни) или MUshroom-Like Desalination tower

Данная работа является продолжением работ [1, 2], в которых развивается концепция солнце-паро-ветрового опреснения воды и предлагается солнце-ветровая опреснительная (СВОП) башня. Концепция СВОП-башни, в свою очередь, отталкивается от идеи относительно простой солнце-вытяжной башни СОБ [3].

СВОП-башня (рис. 1) должна подниматься над уровнем жаркого ландшафта 1 до высоты, на которой уже дуют прохладные верховые ветра. Башня является теоретически самодействующей. С помощью энергии солнца соленая вода из резервуара 2 выпаривается в теплицах-испарителях 3. Далее горячий влажный воздух (пар) поступает в основание башни 4. Затем за счет

естественной тяги ЕТ [3] пар внутри башни поднимается до секции 5, где происходит теплообмен.

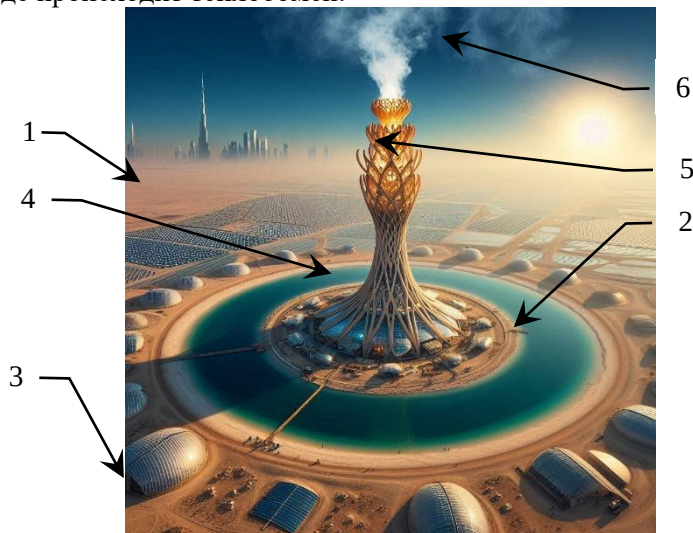


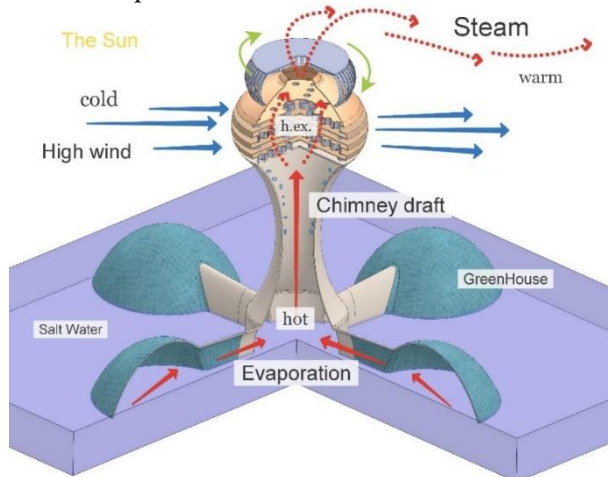
Рисунок 1 – Солнце-ветровая опреснительная башня (СВОП-башня) (оригинальный ИИ-рисунок по идее [1, 2]): 1 – ландшафт с мощной инсоляцией; 2 – соленая вода; 3 – теплицы-испарители; 4 – вертикальная вытяжная труба ВВТ (башня); 5 – место ветровой высотной конденсации; 6 – пар (теплый влажный воздух)

Тепло отдается паром прохладному верховому воздуху. В охлаждающемся паре происходит конденсация капель пресной воды. Вода стекает в низ башни. В данной работе предлагается, в сущности, только одна новая идея – сделать СВОП-башню грибовидной и связать «шляпку» гриба с функцией теплообмена (рис. 2). Описываемая башня является бионической несущей системой. Далее она обозначается как ГОБ.

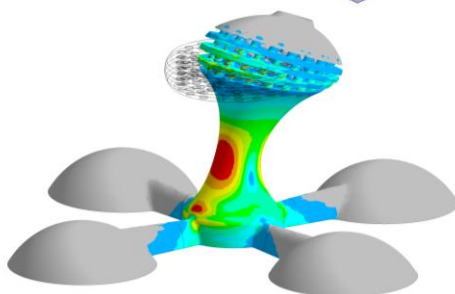
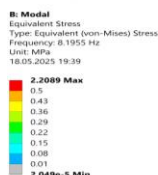
Шляпка грибовидной башни имеет существенные размеры. Поэтому должны найтись конструктивные варианты, обеспечивающие эффективный теплообмен (*h.ex.* на рис. 2, а). Теплообмен можно попытаться устроить как внутри шляпки, так и на её верхней или нижней поверхности.

Естественная тяга (*chimney draft*) горячего пара (*hot steam*) происходит внутри ножки гриба ГОБ. Ножка нужна, чтобы поднять

шляпку на высоту прохладных ветров (*cold high wind*). Часть пара и влаги теряется в атмосфере (*warm steam*). Для создания горячего пара (*evaporation*) в ГОБ нужна наземная инфраструктура, включающая бассейн с соленой водой (*salt water*), теплицы-испарители (*greenhouse*), паропроводы и свет солнца (*The Sun*). На рис. 2, а присутствует также ветровая турбина для улучшения тяги и выработки электричества. Это опциональный объект.



а



б

Рисунок 2 – Схема работы (а) и резонансная раскочка (б) грибовидной СВОП-башни, где шляпка «гриба» выполняет функцию теплообмена (h.ex.) между возгоняемым горячим паром (hot steam) и горизонтальным холодным ветром (cold high wind): salt water – соленая вода; greenhouse – теплица-испаритель ТИ; evaporation – процесс испарения; chimney draft – естественная тяга ЕТ; warm steam – уходящий в атмосферу теплый пар

Предварительное МКЭ-моделирование (рис. 2, б) показывает главную резонансную моду башни, выполненной из бетона. Ожидается, что она связана с четвертьволновым изгибным резонансом (8,19 Гц для эскизного проекта башни). Рисунок 3 иллюстрирует возможный внешний вид грибовидной опреснительной башни ГОБ. Грибовидная башня допускает множество конструктивных вариаций. Так, на рис. 3 паропроводы 4 превращаются в наружные силовые элементы ножки 5.

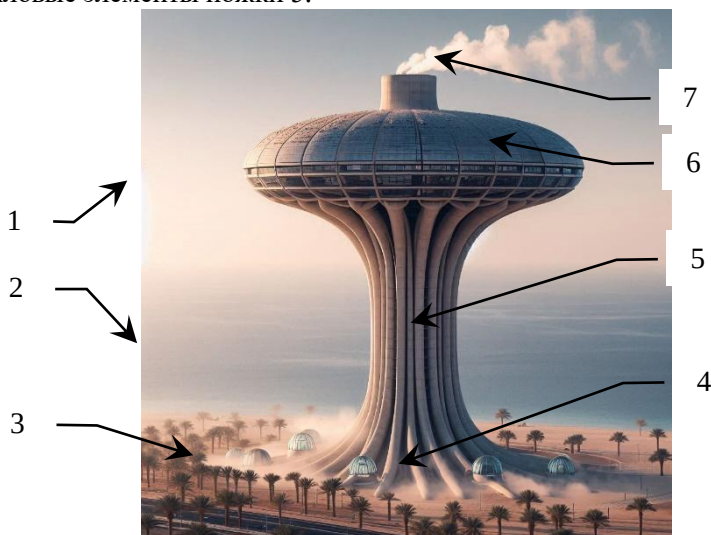


Рисунок 3 – Внешний вид грибовидной СВОП-башни (ГОБ):
 1 – солнечное освещение; 2 – море; 3 – теплицы-испарители;
 4 – паропроводы в основании ГОБ; 5 – «ножка гриба» в ГОБ;
 6 – «шляпка гриба» в ГОБ; 7 – уходящий поток пара

Идеи использования башни по прямому назначению представлены на рис. 4. На рис. 4, а сделан акцент на создание потока питьевой воды. Разумеется, воду не обязательно выливать на песок. Опресненная вода может собираться в резервуаре, устроенном, например, в фундаменте «гриба». На рис. 4, б демонстрируется, что башня ГОБ благодаря большой шляпке является источником не только воды, но и тени. Под башней может возникнуть микроклимат, удобный для укрытия и, даже, обитания людей и животных.

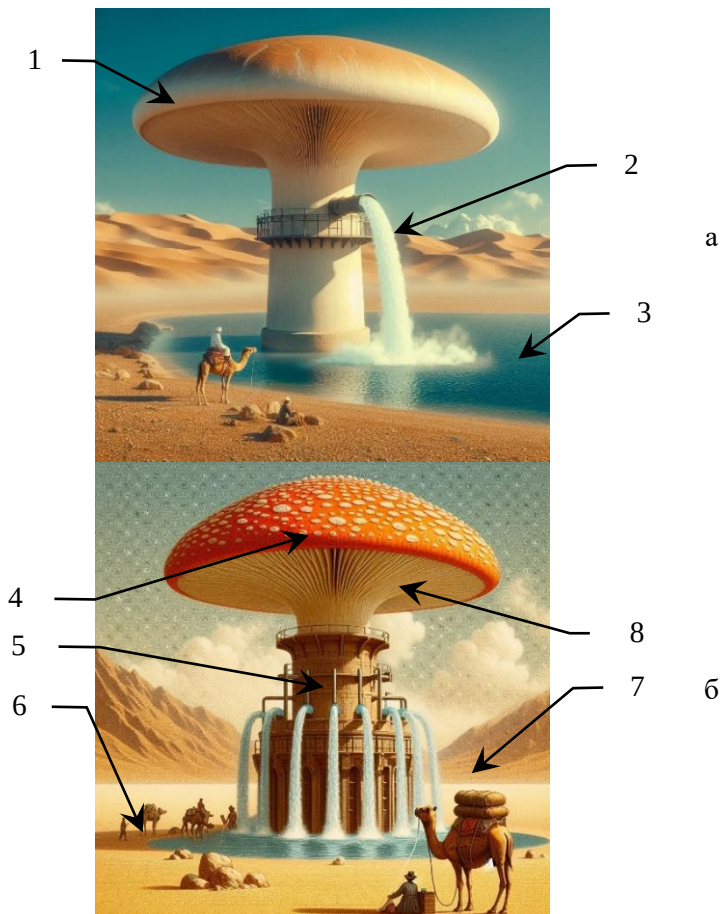


Рисунок 4 – Работа грибовидной СВОП-башни (ГОб) как источника воды и укрытия:

а – башня 1 наполняет сконденсированной водой 2 пресноводное озеро 3;

б – башня, состоящая из шляпки 4 и ножки 5, дает воду и тень каравану 6 в пустыне 7; 8 – теплообменные пластины

Рис. 5 иллюстрирует бионический характер башни ГОБ. Виртуально настоящий гриб-боровик растет (рис. 5, а) на фоне узнаваемого силуэта жилой башни Бурж-аль-Калифа (B1). Потом

гриб воображаемо «вырастает» (рис. 5, б) в бионическую рукотворную башню ГОБ, сопоставимую по высоте с уже упомянутой Бурж-аль-Калифа (B2).

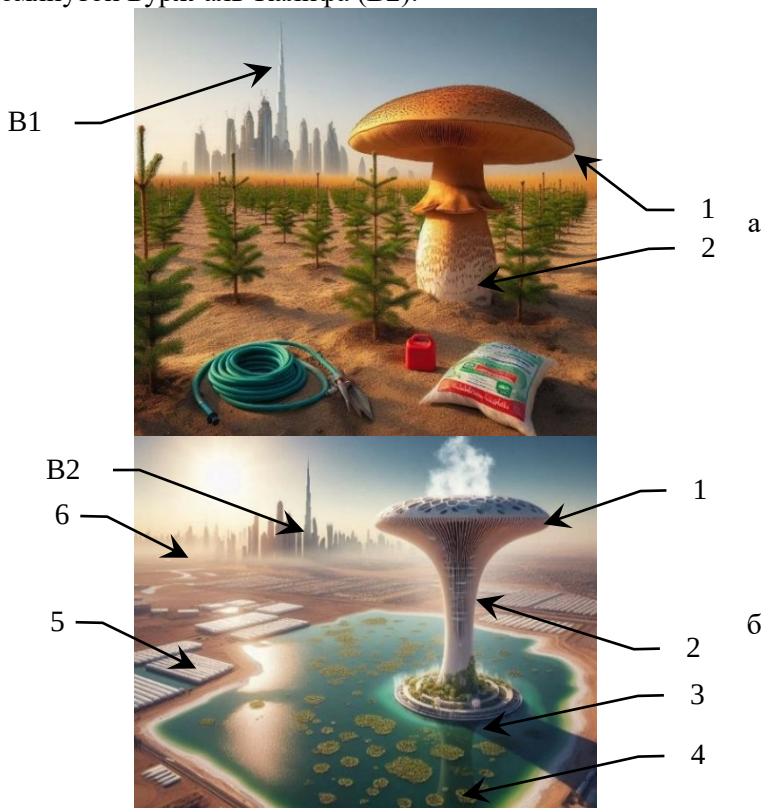


Рисунок 5 – Бионический прототип (а) и возможная компоновка инфраструктуры ГОБ (б): 1 – шляпка ГОБ; 2 – ножка ГОБ; 3 – основание ГОБ; 4 – опресняемая вода; 5 – теплицы-испарители; 6 – город-потребитель; B1, B2 – Бурж-аль-Калифа

Отметим, что башня ГОБ может воплощать формы самых разных грибов – боровиков, опят, лисичек и т.д. Это увеличивает разнообразие потенциально применимых технических решений. Например, на рис. 2 для башни, похожей на опёнок, показано прохождение прохладного воздуха (*cold high wind*) сквозь шляпку. На рис. 5, б для башни-«лисички» визуально предлагаются

теплообменные ребра и канавки на нижней стороне шляпки (между 1 и 4).

Бионическая форма гриба и массивность шляпки не являются препятствием для обеспечения прочности башни ГОБ. Самыми серьезными нагрузками для неё должны быть штормовые ветра и сейсмические воздействия.

Рекомендуется утолщение ножки «гриба» (1 на рис. 6, а) к низу и придание ей ребристо-сетчатой структуры (4 на рис. 6, б). Шляпка гриба может быть выполнена как система обдуваемых, легких лепестков (2) или же, как ячеистая, структура (3). В результате ножка приближается по форме к равнопрочной балке, а шляпка становится легковесным диском с ограниченным аэродинамическим сопротивлением.



Рисунок 6 – Варианты высокопрочных облегченных башен ГОБ с установкой кластеров (триад) башен на полуострове в море (а) и среди солончаков (б)

На рис. 6 представлены варианты кластеров башен, стоящих рядом. Можно пойти дальше в сплочении башен и предложить их взаимное опирание (рис. 7). Интересны как вариант соприкосновения «шляпка – шляпка» (1 на рис. 7, а), так и вариант «шляпка – ножка» (2 на рис. 7, а, б).

Система взаимного опирания ГОБ обеспечивает всем башням кластера ветро- и сейсмоустойчивость при умеренных затратах на несущие системы.

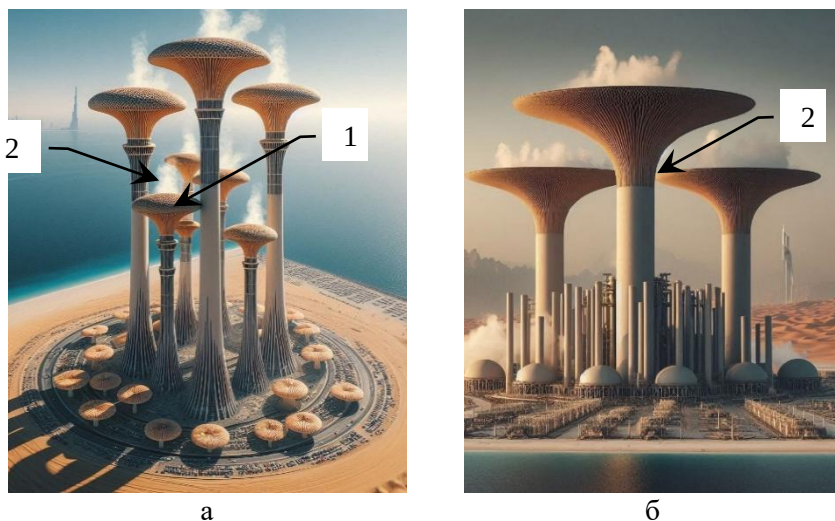


Рисунок 7 – Многобашенная (кластерная) компоновка опреснительной станции (со взаимным опиранием ГОБ) повышенной ветро- и сейсмоустойчивости в стилях «Опята» (а) и «Лисички» (б): 1 – контакт «шляпка – ножка»; 2 – контакт «шляпка – шляпка»

На рис. 8, а, б представлена двухуровневая 3D-модель кластера ГОБ на видах сверху и снизу. Три нижние башни (одна из них – с резервуаром воды 1) упираются друг в друга по равностороннему треугольнику (прилегания 5). Верхняя башня 2 поддерживается за свою ножку шляпками нижних башен (прилегания 4).

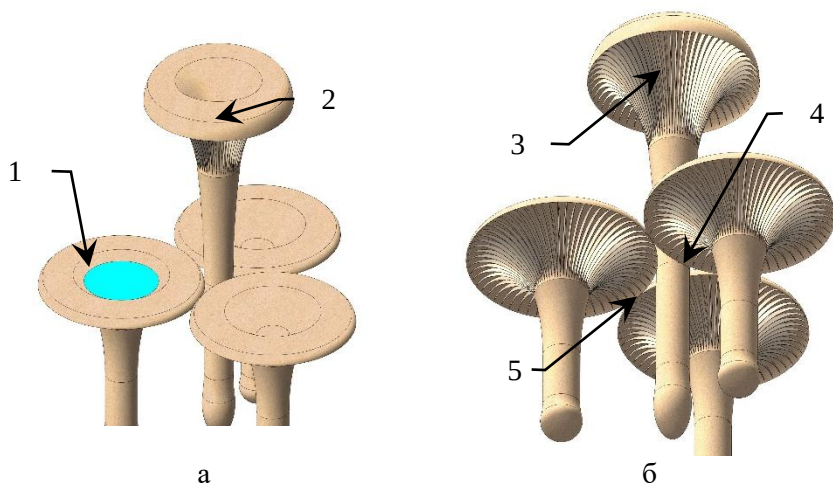


Рисунок 8 – 3D-модель двухуровневого кластера прилегающих друг к другу башен ГОБ на видах сверху (а) и снизу (б): 1 – башня нижнего уровня с бассейном; 2 – башня верхнего уровня; 3 – теплообменное ребро (и канавка для стекания воды); 4 – прилегание «шляпка-ножка»; 5 – прилегание «шляпка-шляпка»

На рис. 9 показан простой вариант строения ГОБ «Лисичка». В соленом резервуаре 1 стоит оболочечная система (рис. 9, а), ножка 2 которой работает вытяжной трубой. Шляпка показана в разрезе на рис. 9, б. Поток пара должен изнутри касаться теплообменных ребер 3, сбрасывать конденсирующуюся воду по канавкам между ними, а потом выходить через отверстия 4 в верхней поверхности шляпки.

Присутствует рекреационный аспект (рис. 10). Шляпка ГОБ оказывается объектом, высоко расположенным над пустыней и обдуваемым прохладным воздухом. Это создает комфортные условия для обитания. На башне может быть расположен бассейн для оздоровления. В результате ГОБ превращается в ценную недвижимость.

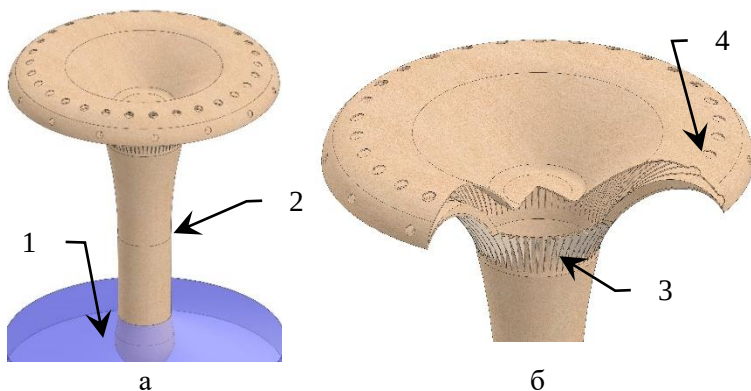


Рисунок 9 – 3D-модель строения ГОБ-башни типа «Лисичка» (а) и её шляпка в разрезе (б): 1 – соленая вода; 2 – ножка ГОБ; 3 – теплообменное ребро (и канавка); 4 – отверстие для выхода пара



Рисунок 10 – Грибовидная опреснительная башня ГОБ как возвышенный бассейн и рекреационная зона с комфортным микроклиматом

ГОВ является эффективным местом для обсерваций разного рода. Шляпка гриба интересна как позиция для расположения круговых электронных систем. Также ГОВ может служить депо для воздушных мобильных объектов. В итоге расходы на возведения ГОВ могут быть сокращены при возведении сразу кластера ГОВ, а также оправданы за счет многофункциональности этих объектов. Поэтому дальнейшая разработка концепции ГОВ представляется перспективным научно-инженерным направлением.

Выводы:

1. Предлагаемая бионическая грибовидная самодействующая башня ГОВ дает воду, а также тень и микроклимат, обеспечивая укрытие и обитание. Это касается ножки башни, пространства шляпки и затененного участка под башней.
2. Такая башня может стать ценной недвижимостью.
3. Башня ГОВ может входить в состав разного рода обсервационно-информационных систем и быть базой для мобильных аппаратов.
4. Рекомендуются создание кластеров легковесных башен со взаимным опиранием. Это сократит расходы на обеспечение устойчивости башен ГОВ к ветровым и сейсмическим нагрузкам.

Литература

1. Довнар, С.С. Бионическая башенная несущая система для базирования и обеспечения вертикальной экосистемы. Часть А: Графическое представление концепции с помощью ИИ / С.С. Довнар, М.А. Цибульский, А.Д. Мануш, А.А. Тарасевич // НИРС МСФ-2024 [Электронный ресурс] : сборник материалов 80-й студенческой научно-технической конференции. Секция «Металлорежущие станки и инструменты» / редкол.: А. В. Ажар [и др.] ; сост. Л. А. Колесников. – Минск : БНТУ, 2024. – Деп. в БНТУ 04.10.2024, № ДЕРВНТУ-2024-216. С. 87-95. <https://rep.bntu.by/handle/data/150021>
2. Довнар, С.С. Вертикальная бионическая башня как самодействующая тепло-механическая экологическая система (экспертно-авторское изложение инновационной студенческо-преподавательской концепции) / С.С. Довнар, А.М. Якимович, А.Д. Лапука // НИРС МСФ-2024 [Электронный ресурс] : сборник

материалов 80-й студенческой научно-технической конференции. Секция «Металлорежущие станки и инструменты» / редкол.: А. В. Ажар [и др.] ; сост. Л. А. Колесников. – Минск : БНТУ, 2024. – Деп. в БНТУ 04.10.2024, № DEPBNTU-2024-216. С. 95–106. <https://rep.bntu.by/handle/data/150021>

3. https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_updraft_tower

УДК 621.9.011

КОНЦЕПЦИЯ ПОЛОЙ ТОРФЯНОЙ СФЕРЫ КАК СТРУКТУРНО-ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ АРКТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

Студентка группы 10305222 Жаврид Ю.Ю., студент группы
10305224 Шушунов В.А., аспирантка Лапука А.Д.

Научные руководители: Довнар С.С., доцент; Касач Ю.И., ст. преп.,
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Термины и аббревиатуры:

Торф – порошок с торфяных месторождений, возможно, с добавкой связующих компонент, а также модифицирующих веществ, например, бактерицидных

ТБ (торфобрикет) – прессованный в параллелепипед торфяной порошок. Широко используется для отопления

ТорфоСфера (ТОС) – полая сфера, торфяные стенки которой обладают прочностью и непроницаемостью

ЦГ (ценный груз) – груз (например, продовольствие), который можно доставлять и хранить внутри контейнера ТОС

СТЭЛ (структурно-топливный элемент) – объект, который работает как несущая система или её часть, а потом предназначен быть использован как топливо (возможно, после дробления).

Примеры *СТЭЛ* – *ТорфоСфера*, деревянные столбики ограждений и т.д.
ТорфОрех (ТОР) – вариант *ТорфоСферы*, контейнер в форме двух торфяных полусфер (*ПолОрехов*), соединенных друг с другом и заключающий в себе ценный груз.

ПолОрех (Пол) – бионическая оболочка из компактированного торфа, близкая к полусфере и подобная половинке скорлупы ореха (например, грецкого)

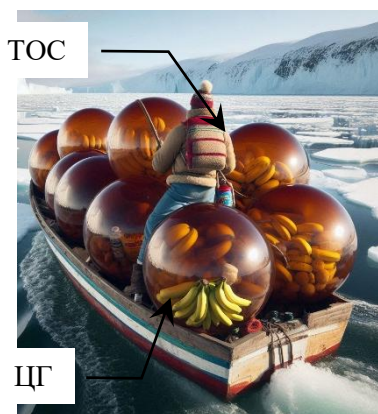
Торфоскорлупки (ТСК) – дробленые стенки ТорфоСферы

Строение – полярный объект преимущественно типа иглу (igloo), служащий жилищем, складом и т.д.

Торф с торфяных месторождений Республики Беларусь поставляется на экспорт в основном в виде прессованных торфобрикетов. Создание из торфа более развитых геометрических форм и наделение их дополнительным функционалом весьма интересно. Это позволило бы более глубоко перерабатывать торф как полезное ископаемое, получить дополнительный экономический эффект и повысить технологический суверенитет национальной экономики.

Предлагается использовать торф для создания структурно-топливных элементов (СТЭЛ). На первом этапе своей службы СТЭЛ несут какую-либо механическую нагрузку, а на втором этапе – превращаются в топливо. Представляется, что такой комплексный подход может стать востребованным для интенсивно разворачивающихся арктических проектов.

Простым решением могла бы стать ТорфоСфера (ТОС). Это полый шар со стенками из торфа (рис. 1).



а



б

Рисунок 1 – Доставка ТорфоСфер (ТОС) как контейнеров с ценными грузами (ЦГ) на полярный остров (а) и использование ТОС как частей несущей системы «Иглу» (б)

Шар годится для использования по ходу его службы, например, на следующих этапах:

- контейнер для доставки в полярный регион ценных грузов, например, продовольствия (рис. 1, а);
- сфера или полусфера (после извлечения груза) для складывания стен каких-либо временных полярных сооружений (например, жилища иглу на рис. 1, б);
- Обломки торфяных стенок ТОС (торфоскорлупки, ТСК) для топки полярных печей.

Конкретным технологичным воплощением ТорфоСферы ТОС мог бы стать ТорфоРех (ТОР), рис. 2. Торфорех – это несущая система (контейнер) сложенный из двух половинок. Каждая половинка (полорех, ПОЛ) близка к полусфере, но отличается системой усиливающих ребер. Возможно присутствие как внутреннего, так и наружного оребрения.



Рисунок 2 – Идея ТорфоРеха (ТОР) как совокупности прочных ребристых искусственных полусфер (полорехов) П1, П2, образующих контейнер: ЦГ – ценный груз в контейнере (съедобные ядра ореха); ТСК – торфоскорлупка

ПолОреши могут быть получены из торфа прессованием. Затем их соединяют (склеивают) друг с другом, поместив внутрь ценный груз ЦГ. Так возникает ТОР. Рисунок 2 подчеркивает

стойкость торфореха к внешней сжимающей нагрузке. Это обеспечивается как шаровидной формой, так и развитым оребрением.

Упрощенная МКЭ-модель ТорфОреха представлена на рис. 3. Картина эквивалентных напряжений при сосредоточенном нагружении сглаженной оболочки дана на рис. 3, а. Вектора главных напряжений на рис. 3,б соответствуют нагружению ПолОреха равномерным внешним давлением. Неравномерность напряженно-деформированного состояния в разных частях скорлупы косвенно указывает на необходимость оребрения обсуждаемого объекта.

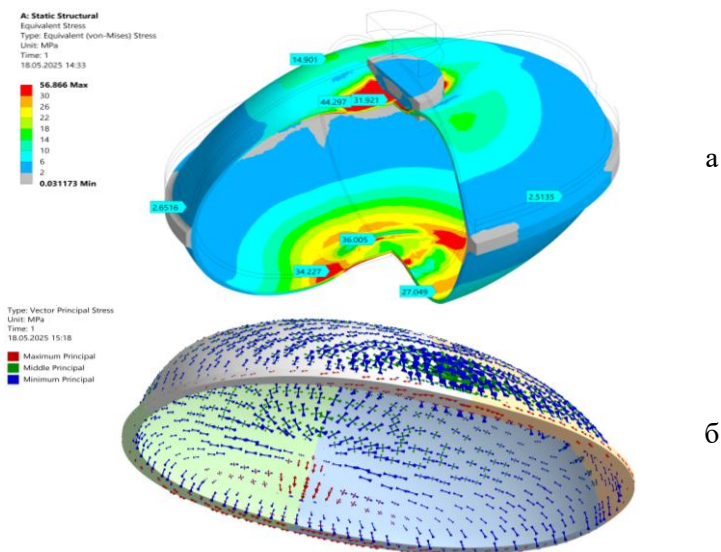


Рисунок 3 – Картина эквивалентных напряжений σ_e (а; МПа) при нагружении натуральной сглаженной модели ТорфОреха ТОР сосредоточенной силой 50 Н (по схеме рис. 2) и вектора главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ при давлении на ПолОрех гидростатическим давлением в 1 бар снаружи ($\times 40$)

Предлагаемый торфорех является бионическим объектом (рис. 4). Его оребрение также может быть бионическим. В экспериментальных целях полорехи могут быть напечатаны на 3D-

принтере. Ребра торфореха (рис. 4, а) должны демпфировать внешние и внутренние удары. Демпфирование допустимо даже ценой смятия ребер. Еще одним приёмом для поглощения энергии ударов может быть заполнение внутреннего пространства между ТОР и ЦГ порошковым торфом Т (рис. 4, б).



Рисунок 4 – Торфорех как ребристая (Р) несущая система (а) и половинка ореха (б), демпфирующая порошковым торфом Т колебания ценного груза ЦГ

Можно рассчитывать на бактерицидное действие торфа в стенках торфореха. Также торфяные стенки способны регулировать газо- и влагопроницаемость контейнера (в том числе с помощью модифицирующих добавок).

На рис. 5 показана процедура вскрытия ТОР. Здесь воздействия являются brutальными. От сферической несущей системы остаются только торфоскорлупки (топливо).

Желательно вскрывать ТОР с сохранением полорехов. Тогда появляется материал для строительства в полярных условиях разных временных жилищ и укрытий, прежде всего иглу-подобных. Это показано на рис. 6.

Здесь просматривается два варианта. Во-первых, можно создавать строение из цельных ТОР. Тогда строение является и складом ЦГ. Она разбирается по мере возникновения потребности в ЦГ. Во-вторых, на неопределенно долгий срок можно сооружать строения из полорехов, снега и льда. Торф из отслуживших свой

срок сооружений можно использовать как топливо или удобрять ими почву в полярных оранжереях.



Рисунок 5 – ТорфоРех в момент взламывания (а), а также составляющие полорехи П1, П2 и скорлупки ТСК (б)



Рисунок 6 – Полярные снеговые строения иглу арочного (а) и стрельчатого (б) типов, армированные ТорфоРехами

Процесс обитания в обсуждаемых строениях показан на рис. 7. Рисунок 7, а иллюстрирует процесс потребления ценных грузов ЦГ и растапливания огня торфоскорлупками ТСК. Иглу является здесь стандартным снеговым строением. На рис. 7, б показан

предполагаемый склад ТОР, сложенный из этих же ТОР. Склад купольной формы допускает обитание в нем. Купол из ТОР придется разбирать по мере надобности в ЦГ и в топливе.

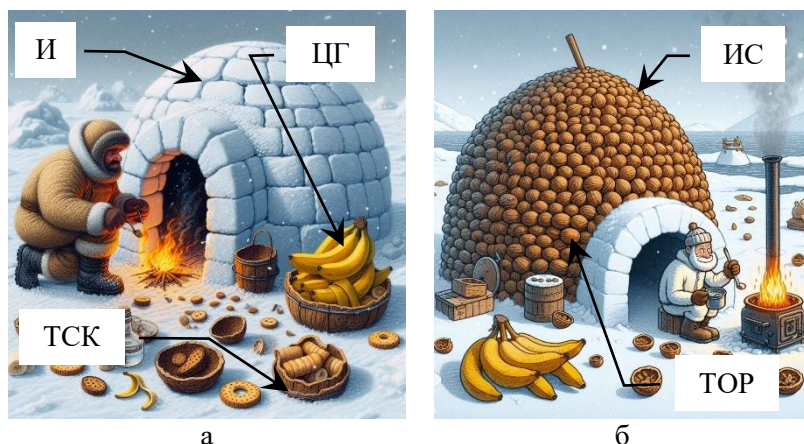


Рисунок 7 – Обитание в снеговом иглу И (а), снабжаемом из иглу-склада ИС, сложенного из ТорфоРехов ТОР (б)

Производство ТорфоРехов может быть организовано путем изготовления вблизи белорусских торфяных месторождений ПолОрехов. Для прессования «орехов» должно подойти существующее оборудование, например, кривошипно-шатунные прессы ОАО «МЗОР» (рис. 8) с усилием прессования до 1600 кН. Исходно такие прессы предназначены для изготовления торфобрикетов ТБ. Эти машины присутствуют практически во всех районах республики. Редизайн прессовых головок и штемпелей позволит организовать на части прессов массовое производство торфяных, в том числе для производства ТорфоРехов.

Затем полусферы могут вкладываться друг в друга в виде компактных штабелей. Далее следует доставка штабелей ПОЛ к месту их снабжения ЦГ и сборки в ТОР.

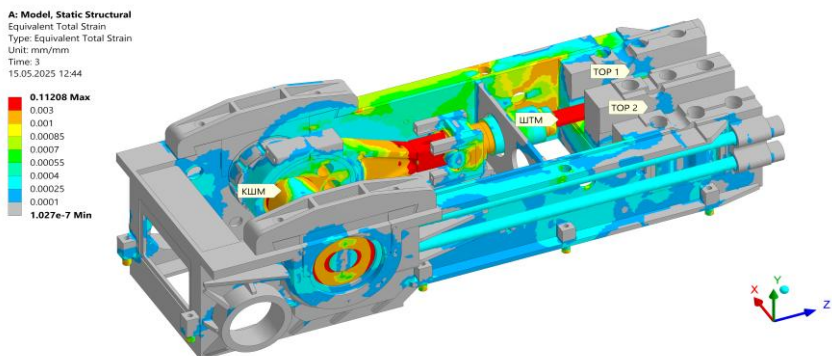


Рисунок 8 – Торфяной пресс ОАО «МЗОР» с кривошипно-шатунным механизмом (КШМ) для прессования штампами ШТМ половинок торфоорехов в каналах ТОР1 и ТОР2

В заключение на рис. 9 представлены куполообразные полярные строения, сложенные из цельного торфобрикета ТБ (рис. 9, а) и полых торфоорехов ТОР (рис. 9, б). При внешнем подобии сооружений, стенки из пустотелых орехов могут быть сделаны гораздо менее теплопроницаемыми. Это критически важно в арктических условиях.



Рисунок 9 – Арктические строения купольного типа, возведенные с использованием торфобрикетов ТБ (а) и торфоорехов ТОР (б)

УДК 621.914.02

КОНЦЕВАЯ ФРЕЗА С ОПТИМИЗИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ

Студент группы 10305221 Алейников И.А.

Научный руководитель: Касач Ю.И., ст. преп.

e-mail: ulakasach@gmail.com

Белорусский национальный технический университет

В современном машиностроении растут требования к инструментам. Требуется увеличение скорости обработки, снижение износа, повышение универсальности применения. Поэтому конструктивные особенности концевых фрез, особенно при необходимости совмещения сверления и бокового фрезерования, требуют инженерных оптимизаций для повышения прочности и снижения нагрузки на режущие элементы.

В этой связи актуальным становится поиск инновационных подходов к проектированию режущих частей, позволяющих сохранить функциональность инструмента при одновременном повышении его прочности и долговечности. Рассматриваемый в статье режущий инструмент представляет собой концевую фрезу с оптимизированной геометрией режущих элементов и ломателями стружки, что открывает возможность для решения указанных проблем без ущерба для производительности.

В классических концевых фрезах с твердосплавными пластинами первый режущий элемент, отвечающий за врезание, находится на одном уровне с корпусом инструмента. Следствием является уменьшение жесткости конструкции, что приводит к вибрациям, склонности к поломкам при высоких нагрузках и ограниченному сроку службы инструмента.

В рамках дипломного проекта была рассмотрена конструкция концевой фрезы диаметром 32 мм (рисунок 1) для обработки детали «Корпус». Деталь предназначена для крепления агрегатов или узлов в составе сборочной единицы транспортного средства (например, крепление двигателя, трансмиссии, элементов ходовой части или кузова).

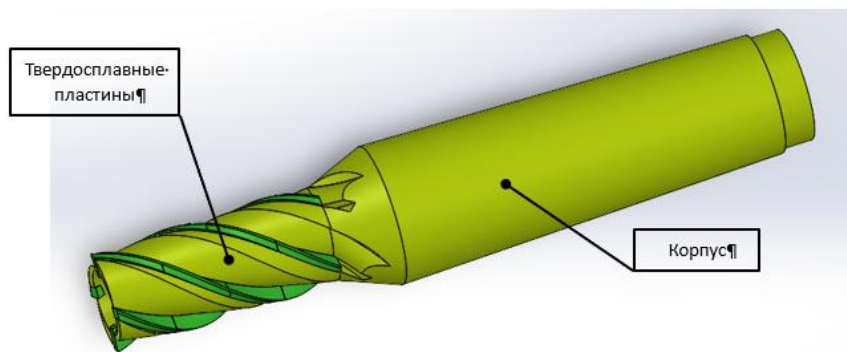


Рисунок 1 – Исходная конструкция фрезы с напайными режущими элементами.

Выбор оптимальной конструкции режущего инструмента напрямую влияет на эффективность производственного процесса. Правильная конструкция обеспечивает высокую производительность, стабильное качество обработанной поверхности и длительный срок службы инструмента. При выборе оптимального варианта учитываются параметры обработки (скорость резания, подача, глубина), тип обрабатываемого материала, особенности станочного оборудования и экономическая целесообразность. Это позволяет создать баланс между надежностью, стоимостью и функциональностью инструмента.

Комплексный подход к анализу и проектированию режущего инструмента способствует созданию не просто функционального, но и конкурентоспособного продукта на рынке металлообработки. Современные технологии, такие как компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния, тепловые и динамические расчеты, позволяют предвидеть поведение инструмента до его изготовления. В результате повышается уровень качества выпускаемой продукции, снижаются производственные риски и достигается экономическая выгода как на этапе разработки, так и в процессе эксплуатации. В качестве прототипов для оптимизации конструкции концевой фрезы были рассмотрены несколько патентов: RU 125502 U1 [1], KR102316725B1 [2], JP5961646B2 [3].

Отличие конструкции первой концевой фрезы с напайными твердосплавными пластинками от второй конструкции фрезы в том, что вторая фреза, разработанная с применением патента KR 102316725 B1, отличается тем, что нагрузка резания главной режущей кромки, снабженная многогранными неперетачиваемыми пластинками из поликристаллического алмаза, уменьшена за счет формирования стружколома, имеющего множество вогнутых канавок, расположенных на боковой поверхности кромки первой режущей кромки. Дополнительно сформирован стружколом, имеющий множество вогнутых канавок, расположенных на боковой поверхности кромки второй режущей кромки, которая следует за кромкой первой режущей кромки, причем вогнутая канавка второй режущей кромки образована первой режущей кромкой, концевой фрезой, отличающейся тем, что она расположена в плоскости вращения, отличной от вогнутой канавки.

В проектируемую конструкцию внесены следующие изменения: режущая часть – с чередующимися режущими элементами и стружечными канавками; вылет первых пластин на несколько миллиметров; оптимизация углов распределения. Для снижения нагрузки на первый режущий элемент предложено уменьшить центральный угол первого межзубного пространства. Например, при четырех режущих элементах, где $\theta_1 = 90^\circ$ уменьшить до $80\text{--}85^\circ$ (рисунок 2). Можно предположить, что это снизит силу резания (P_z) на первый элемент, распределяя нагрузку на последующие режущие элементы.

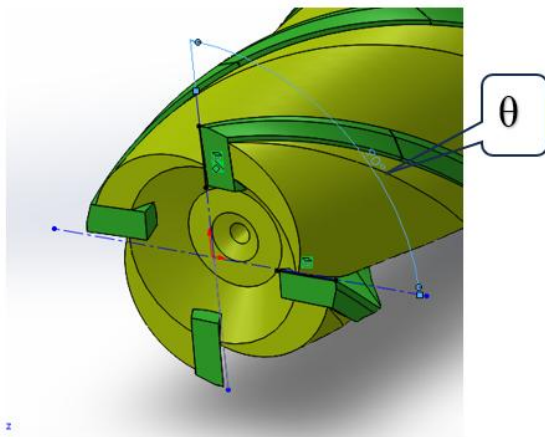


Рисунок 2 – Расположение угла распределения

Особенностью также является то, что первые режущие элементы выступают за передний конец корпуса на длину не менее 1 мм. Это позволяет выполнять сверление, пазовую и боковую обработку одним инструментом (рисунок 3).

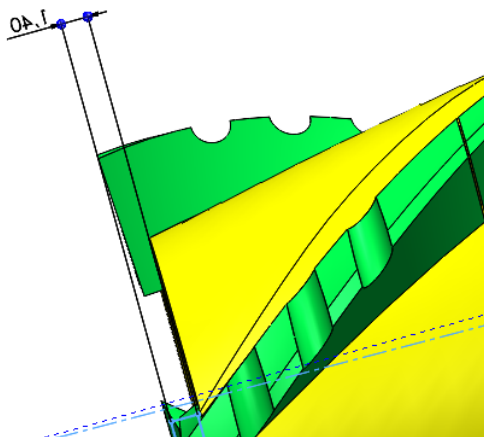


Рисунок 3 – Расположение вылета пластины

Для дальнейшего снижения нагрузки на первый режущий элемент на его боковой поверхности выполнены вогнутые канавки (стружколомы). На втором режущем элементе также могут быть канавки, но в другой плоскости, чтобы обрабатывать участки, не задетые первым элементом (рисунок 4).

Внесение в конструкцию режущего инструмента изменений оптимизировать условия обработки за счет снижения сил резания при фрезеровании. Так же улучшить отвод стружки, что будет способствовать бесперебойной работе фрезы и продлению срока службы инструмента.

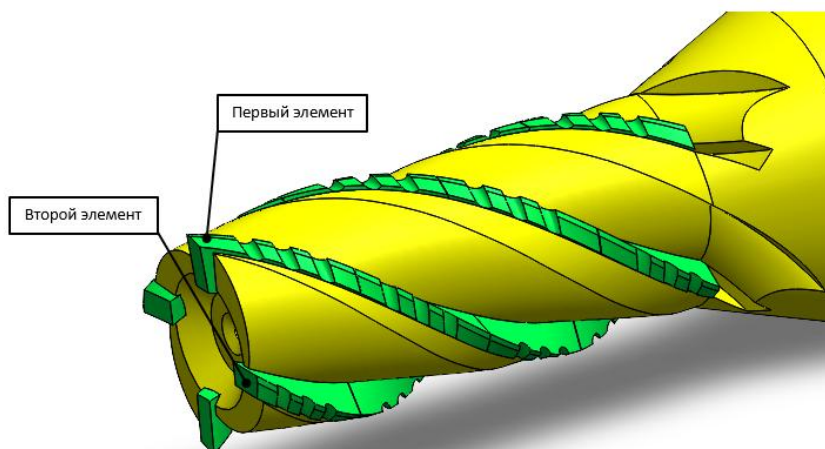


Рисунок 4 – Расположение стружколома на первом и втором режущих элементах

Литература

1. [RU125502U1 - Концевая фреза повышенной стойкости - Google Patents](#)
2. [KR102316725B1 - End mill Having Cutting Tooth Made of Polycrystalline Diamond - Google Patents](#)
3. [JP5961646B2 - End mill cutter - Google Patents](#)

УДК 004.946

ПРОТОТИПИРОВАНИЕ СТАНКА В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Студенты группы 10305123 Брайчук Ю.В., 10305124 Буршко Д.А.

Научный руководитель: Касач Ю.И., ст. преп.

e-mail: ulakasach@gmail.com

Белорусский национальный технический университет

Одним из перспективных направлений для прототипирования и симуляции производственных процессов в машиностроении является применение виртуальной реальности (VR). Поскольку сборка узлов и оборудования – это сложный и трудоемкий этап, разработка симуляций для обучения позволит студентам визуально понимать и осваивать последовательность установки компонентов и узлов.

Основными этапами технологии разработки программных приложений для 3D виртуальных сред являются [1]: сбор и анализ данных об объектах и процессах комплекса; разработка проекта системы; разработка математических моделей и алгоритмов; создание трехмерных моделей и выполнение процедуры текстурирования; разработка, реализация и тестирование программного обеспечения. Одним из важных этапов в создании тренажера для виртуальной реальности – понять, в чем заключается сам процесс. Для создания сцены были использованы два станка, 5-ти осевой фрезерно-гравировальный станок (рисунок 1, а) и вертикально-фрезерный. Задачей создания сцены было показать основные движения станка, движения по осям, компоновки станков и возможность произвести разборку и сборку отдельных узлов станка.

Моделирование элементов станка (рисунок 1, а) и его сборка (рисунок 1, б) производилась в программе КОМПАС-3D V23. Сборка включает 13 элементов: основание со стойками, направляющие, стол со столом поворотным, трехкулачковый патрон, шпиндель с кронштейном. Все элементы сохранялись в формате .STL для их дальнейшего использования в программе Blender, позволяющей создавать полигональные объекты. Для дальнейшего создания симуляции выбрана кроссплатформенная

среда разработки компьютерных игр Unity3D, в которой можно использовать файлы с расширением .Blend.

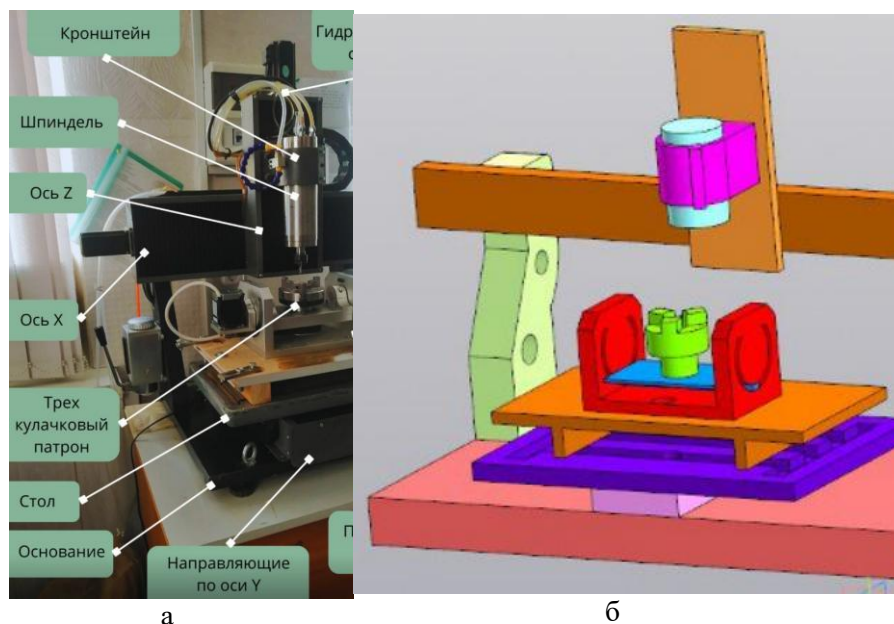


Рисунок 1 – а) прототип виртуальной модели станка; б) модель сборки станка

Для создания сцены была использована среда VR Concept, это платформа для виртуального прототипирования, которая позволяет организовывать удаленную коллективную работу с 3D моделями в CAD и BIM форматах. Сцена представлена в виде учебной лаборатории. Движения исполнительных органов 5-ти координатного настольного станка задается с кнопки управления (рисунок 2). У вертикально-фрезерного станка (рисунок 3) не запрограммированы движения, но есть возможность снять отдельные детали оборудования, т.е. воспроизвести процесс сборки-разборки.

Задачей прототипирования в среде виртуальной реальности состоит в программировании последовательности сборки отдельных узлов оборудования. Технологический процесс сборки –

это совокупность операций по соединению деталей в определенной технической последовательности. Такого рода задания позволят обучающимся знакомиться с конструкциями различного рода узлов и деталей, технологией сборки станка и в целом понимать конструктивные особенности оборудования.



Рисунок 2 – Анимационная модель станка для виртуальной среды



Рисунок 3 – Разборная модель вертикально-фрезерного станка

Сценарий сборки станка должен включать четкую последовательность действий. Для этого необходимо учесть основные этапы сборки, используемый монтажный и измерительный инструмент, крепежные элементы. Далее приведены ключевые этапы сборки элементов на примере 5-ти координатного фрезерно-гравировального станка:

1. Сборка основания и стоек: монтируется основание станка со стойками, в нашем случае это единая сварная конструкция.
2. Установка направляющих и шариковинтовых передач (ШВП): на стойках и основании устанавливаются линейные направляющие, которые обеспечивают движение стола и салазок. Шариковинтовые передачи используются для преобразования вращательного движения двигателей подачи в линейное перемещение с высокой точностью.
3. Монтаж стола и салазок: рабочий стол устанавливается на направляющие и крепится, салазки для движения вдоль осей X, Y, Z также монтируются на направляющих и оснащаются ШВП.
4. Монтаж фрезерного шпинделя и системы охлаждения: шпиндель устанавливается в соответствующее гнездо и крепится, система охлаждения подключается к шпинделю и рабочей зоне станка.

Литература

1. Мочалов, П.С. Технология и результаты создания интерактивных тренажеров в 3d виртуальных средах [Электронный ресурс] / П.С. Мочалов, И.В. Титов // Новые образовательные технологии в вузе: материалы XI международной научно-методической конференции. – Екатеринбург, 2014. — Режим доступа: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/24658>.

СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МИРОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

Магистрант Чернушевич А.А.

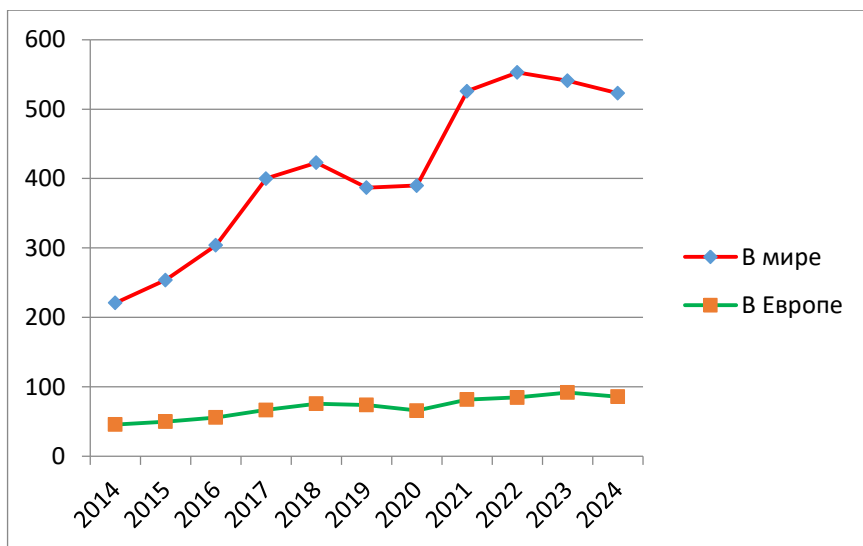
Научный руководитель – доцент Колесников Л.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

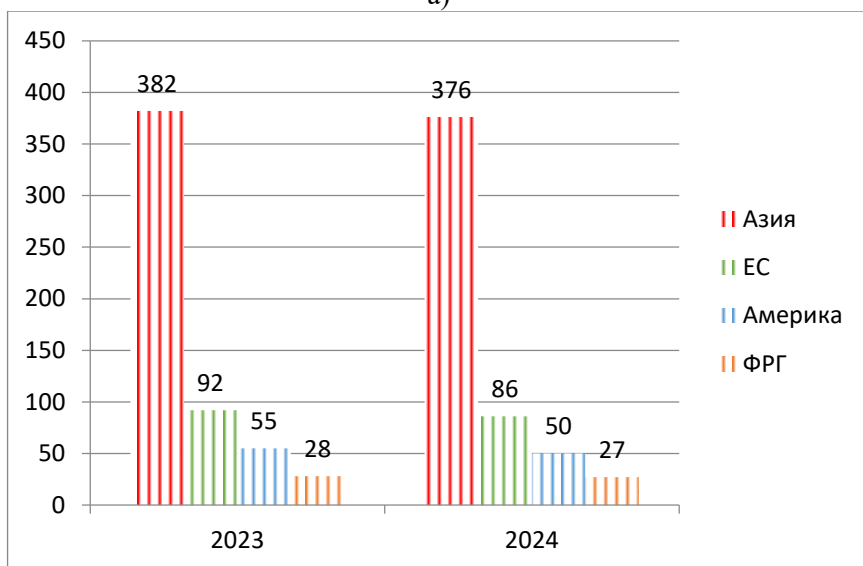
Робототизация производства считается одним важнейших характеристик технологического уровня страны, ее стремления перейти к т.н. «Индустрии 4.0». Изменение по годам количества устанавливаемых промышленных роботов в мире и в Европе [1] представлено на рисунке 1, а. Главный покупатель (и, одновременно, производитель) роботов – Китай (рисунок 1, б). С 2022 года более половины (52%) всех роботов мира устанавливается именно в Китае.

Более объективным критерием глубины внедрения роботов в производство может служить плотность роботов – количество роботов на 10.000 работающих в отрасли, рисунок 2. Плотность роботов является показателем не только технологического прогресса страны, но и ее способности использовать инновации для повышения эффективности и конкурентоспособности производства.

Согласно докладу *IFR (International Federation of Robotics, Международная федерация робототехники)* «Всемирная робототехника 2024» [1], внедрение роботов на заводах по всему миру продолжается с высокой скоростью. В 2023 году средняя мировая плотность достигла 162 единиц на 10000 сотрудников. Это более чем в два раза больше (74), чем в 2016 году. В 2023 году больше всего промышленных роботов было установлено в автомобильной промышленности (135.461 шт.), электротехнической/электронной промышленности (125.804 шт.) и в области металлургии и машиностроения (76.831 шт.). По оценкам IFR, рост роботизации ускорится в 2025 году и продолжится в 2026 и 2027 годах. Нет никаких признаков того, что общая мировая тенденция роста закончится в ближайшем будущем.



а)



б)

Рисунок 1 – Динамика числа установок промышленных роботов по годам, $\times 1000$ шт.

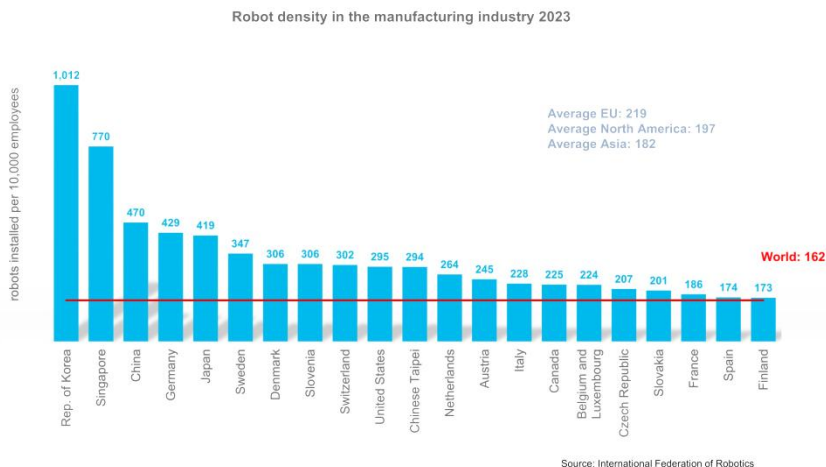


Рисунок 2 – Плотность робототизации по странам

ФРГ (как и Япония) – пионер разработки и внедрения роботов в промышленность. Поэтому именно на ее примере интересно оценить перспективы и особенности использования роботов в машиностроении. Анализ использования роботов на ~16000 заводов ФРГ [2, 3] показал:

- 1) в 2018 году роботы использовались только на 8% заводов. Как правило, это крупные заводы, ориентированные на экспорт и внедрение новых технологий (не только роботов);
- 2) практически нет связи между уровнем заработной платы и производительностью труда и последующим внедрением роботов на заводе;
- 3) главная причина внедрения роботов – острый дефицит низко- и среднеквалифицированного персонала. Заводы с высококвалифицированным персоналом и соответствующей сложной и/или уникальной продукцией, реже внедряют роботов.
- 4) внедрение роботов приводит к увеличению общей занятости на предприятии в среднем на 5%. Кроме того, на заводах в течение года после внедрения роботов, примерно на 24% возрастает число новых инженеров и менеджеров, обеспечивающих выполнение сложных, плохо формализуемых задач.

При этом следует отметить, что с точки зрения *IFR*, главными тенденциями развития роботов являются [4]:

- 1) Внедрение физического искусственного интеллекта (ИИ), в том числе, для обучения роботов на основе аналитического и генеративного ИИ. Например, предполагается, что роботы смогут анализировать свои действия и на этой основе автоматически совершенствовать их прямо в процессе работы. Более быстрый и безопасный подход – робот «учится» не на реальном, а на виртуальном производстве. В таком виртуальном мире робот многократно выполняет ту или иную работу, постоянно совершенствуя свои движения, например, по критерию точности и скорости. Иначе говоря, набирается опыта и программирует сам себя. Такие подходы продвигаются как в традиционных промышленных производствах, так и в области сервиса.
- 2) Создание и внедрение гуманоидных роботов, в первую очередь, в автомобильной промышленности, а также на складах. Пока неясно, будет ли такой подход экономически обоснованным по сравнению с существующими решениями.
- 3) Обеспечение устойчивого развития – повышение энергоэффективности роботов, участие в масштабировании экономически эффективного производства «зеленого» оборудования.
- 4) Использование работы робота как услуги (*RaaS*) от стороннего партнера, или оплаты за единицу работы (*pay-per-pick*). Такой подход позволяет избежать высоких первоначальных финансовых вложений, снижает совокупную стоимость владения, а, главное, снижает риски внедрения для малых и средних предприятий.
- 5) Автоматизация грязных, скучных или опасных работ с целью снижения нехватки низко- и среднеквалифицированного персонала.

Одна неочевидная особенность характера внедрения роботов в ФРГ и в Европе в целом – насыщение (или стабилизация) роботизации. Если в 2010 году в ФРГ было установлено ~20.000 роботов, то в 2024 – только ~27.000. Рост есть, в среднем 3.5%/год, но в сравнении со странами Юго-Восточной Азии (в первую очередь, Китаем) это практически стагнация (рисунок 1). Исходя из

этих наблюдений, можно предположить, что существует естественный предел насыщения производства роботами, обусловленный достигнутым уровнем автоматизации основного производства и характером выпускаемой продукции.

В связи с этим было бы интересно оценить влияние характера производства на плотность роботизации (число роботов на 10000 персонала). Эта величина рассчитывается, исходя из общего числа персонала, работающего в отрасли. В развитых странах это, в первую очередь, сервис-инженеры, исследователи, менеджеры по продажам и обслуживанию. Только малая доля (по некоторым обрывочным данным, не более 10%) персонала относится собственно к производству (механообработка, сборка, etc.). Именно их деятельность и обеспечивают роботы.

Например, на заводе Unipres работают 356 человек и 500 роботов Fanuc. Эти роботы собирают случайные части из бункеров, доставляемых в их ячейки (используя 3D-системы зрения), а затем передают их следующему роботу, который устанавливает их на место для сварки роботами. Расчетная плотность роботизации именно на производстве – 13.700 роботов/10.000 человек!

В развивающихся странах, с низким уровнем автоматизации, относительно слабым НИОКР, доля инженеров и исследователей мала. Зато большое поле для замены роботами низкоквалифицированного персонала. Возможно, анализ именно этой разницы – между производственным и сервисным персоналом – позволит оценить уровень разумной роботизации, к которому надо стремиться на текущем этапе развития, в том числе и в отечественной промышленности.

Литература

1. Global Robotics Market: How can Europe step up its game? / IFR Executive Roundtable Munich on 25 June 2025 (дата обращения 26.06.2025).
2. Deng, Liuchun Robots, occupations, and worker age: A production-unit analysis of employment / Liuchun Deng, Steffen Müller, Verena Plümpe, Jens Stegmaier // European Economic Review 170 (2024): 104881.

3. Deng, Liuchun Robot Adoption at German Plants / Liuchun Deng, Verena Plümpe, Jens Stegmaier // Journal of Economics and Statistics 244.3 (2024): 201-235.
4. Top 5 Global Robotics Trends 2025 / International Federation of Robotics reports, Frankfurt, Jan 22, 2025.
5. Лизан, И. Догоняющая роботизация / И. Лизан // СОНАР-2050 – <https://www.sonar2050.org/publications/promyshlennaya-revoluciya>

УДК 621.9

РОБОТЫ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Магистрант Чернушевич А.А.

Научный руководитель – доцент Колесников Л.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Роботизация промышленности Республики Беларусь (РБ) – достаточно непубличная тема. Простейший вопрос – сколько промышленных роботов работает на наших заводах – не имеет официального ответа. В настоящее время только прорабатывается предложения по дополнению государственной статистической отчетности в сфере цифрового развития показателями, характеризующими внедрение технологий «Индустрии 4.0» в сфере материального производства, в том числе и роботов, в отраслях реального сектора [1]. С другой стороны, действует т.н. Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года (НУРС-2040) [2], в которой в качестве целевого индикатора развития принято условие: не менее чем 150 роботов на 10.000 среднесписочных работников в промышленности в 2040 году. Для справки: среднемировая плотность роботизации в 2023 году равна 162; в Китае – 470 [3].

Поэтому начнем с того, что попытаемся оценить текущее состояние роботизации отечественной промышленности. Для этого просто перечислим мнения экспертов и немногочисленные примеры использования роботов в РБ. Например, по подсчетам НИЭИ Минэкономики [4], в 2022 году плотность роботизации в РБ

составила 3 робота на 10.000 человек (в это время в РФ – порядка 5). Заместитель директора по научной работе НИЭИ Министерства экономики Александра Курлыпо считает, что на роботизацию по НУРС-2040 «потребуется \$2 млрд. за 15 лет» [5].

С другой стороны, заместитель министра промышленности РБ А. Кузнецов заявил, что многие белорусские промышленные холдинги используют роботизированные комплексы и автоматизированные линии в производственном процессе. Самые активные – «Белавтомаз», «Автокомпоненты», МТЗ, БЕЛАЗ, «Могилевлифтмаш», «Гомсельмаш», «Атлант». При этом доля автоматизированного оборудования в организациях Минпрома в настоящий момент составляет всего 1,37% или 1700 единиц (из 123 тысяч). Из них роботов – 315 единиц. Наибольшее количество автоматизированного оборудования сосредоточено в металлообрабатывающей промышленности, а также в машиностроении, строительстве, пищевой промышленности [6].

Например, «БЕЛДЖИ» в августе 2025 г. увеличила парк роботов на производстве с 38 до 78 единиц. Помимо роботов для точечной сварки, установили еще 10 немецких роботов для лазерной сварки. Если до внедрения этих роботов в цеху сваривали до 15 кузовов в час, то сейчас – около 20. В цеху окраски также установили 27 японские роботизированные установки для окраски по технологии «мокрый по мокрому». Предполагается, что эти 40 новых роботов окупятся за 2 года [7].

Роботы применяются также на фабрике «Белвест» в Витебске и Гатове (раскладка деталей обуви, маркировка, раскрой, выемка и укладка). В 2024 г. с использование роботов было выпущено 23.000 пар обуви (из 1.500.000 общего объема, ~1.5%). При этом расчетный срок окупаемости – не менее 7 лет, а цель внедрения – высвобождение работников для создания новых производств [8].

Попытка быстро оценить востребованность роботов путем анализа централизованных закупок с ключевым словом «робот» оказалась неудачной. Например, за первую половину 2025 года всего две заявки: «Автоматический паллетайзер с промышленным роботом» и «Станок для отрезки и закатки кромок с шарнирно-сочлененным роботом для автоматической загрузки и выгрузки заготовок». Безусловно, предприятия закупают намного больше

роботов, но, вероятно, в составе комплексного оборудования, где в названии закупки отсутствует слово «робот».

Отдельный, а может быть, и главный вопрос – срок окупаемости роботов в машиностроительном производстве. Пример оценки срока окупаемости, правда, для РФ, дал достаточно авторитетный эксперт – М. Иванов, замглавы Минпромторга России [9]. «Так, в прошлом году мы взяли среднестатистическое с точки зрения объемов выпуска и количества сотрудников предприятие металлообработки и посчитали, за сколько окупятся инвестиции в установку десяти промышленных роботов. Исходили из задачи повышения эффективности производства. Получили в итоге 1.9 года ...; в автопроме внедрение роботов на конкретном производстве окупилось за 9 месяцев.».

Еще адаптированные примеры «успешных практик» (из того же источника). За счет средств льготного займа ФРП одна компания установила 14 роботов-манипуляторов и увеличила объемы штамповочного производства на 32%, а количество брака с 2% снизила до 0,5%. Небольшое предприятие в одном из регионов РФ производит кронштейны для больших зданий, и в процессе использует типовые операции сварки. Средняя зарплата сварщика в регионе – 150.000 РР (российских рублей), что соответствует 5.515 белорусских рублей (БРБ) или 1860 долларов США (\$). Стоимость роботизированного решения в лизинг – 100.000 РР (3.677 БРБ, 1240 \$) в месяц ... сварщик работает в одну смену, а робот может и в три – это уже 450.000 РР (16.545 БРБ, 5575 \$) против 100.000 РР (5.515 БРБ, 1860 \$). Другие примеры расчета срока окупаемости роботизированного оборудования в условиях РФ можно найти, например, в [10, 11].

При этом процесс роботизации идет в РФ со скоростью 20–25% годового прироста и достигает, по экспертным оценкам, емкости в 2100 роботизированных комплексов в 2023 году. Большая часть установленных роботов – 1475 шт. – импорт из западных стран и Китая [12].

Общий посыл – для роботизации нужны дефицит рабочей силы в промышленности, из года в год дорожающая рабочая сила, а также невозможность восполнить дефицит рабочих как из внутренних резервов (миграции из села в город), так и из внешних (за счёт эмиграции).

Литература

1. Работа Министерства экономики. Главные события, проекты, итоги недели [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://economy.gov.by/ru/news-ru/view/rabota-minekonomiki-glavnye-sobytiya-proekty-itogi-za-nedelju-46510-2022> (дата обращения 26.06.2025)
2. Национальная стратегия устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2040 года [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR/natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-razvitija-respubliki-belarus-na-period-do-2040-goda.pdf> (дата обращения 26.06.2025)
3. Global Robotics Market: How can Europe step up its game? / IFR Executive Roundtable Munich on 25 June 2025.
4. Коржевич, К. Белорусские эксперты подсчитали, за сколько лет окупаются роботы на производстве [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://officelife.media/news/60729-belorusskie-eksperty-podschitali-za-skolko-let-okupayutsya-roboty-na-proizvodstve> (дата обращения 26.06.2025)
5. Курлыпо, А. Роботы и «цифра». Какой должна стать белорусская промышленность к 2040 году [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://belta.by/comments/view/roboty-i-tsifra-kakoj-dolzha-stat-belorusskaja-promyshlennost-k-2040-godu-9372> (дата обращения 26.06.2025)
6. Минпром: уровень роботизации в Беларуси – три робота на 10 тысяч человек [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://sputnik.by/20250626/minprom-uroven-robotizatsii-v-belarusi-tri-robota-na-10-tysyach-chelovek-1097635018.html?Ysclid=mhw1hwa7p284715721> (дата обращения 26.06.2025)
7. Мануилова, А. Стальные руки «БЕЛДЖИ» / А. Мануилова // Веснік сувязі. №4. – 2025. – С. 31-33.
8. За сколько лет белорусские заводы смогут окупить роботов? [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://www.bing.com/search?q=ibmedia.by%2Fnews%2Fza-skolko-let-belorusskie-zavody-smogut-okupit-robotov%2F&form=IPRV10> (дата обращения 26.06.2025)
9. Замглавы Минпромторга в интервью CNews: Внедрение роботов в автопроме окупается за 9 месяцев, на предприятии

- металлообработки — за 2 года [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: https://www.cnews.ru/articles/2024-02-26_zamglavy_minpromtorga_rf_v_intervyu (дата обращения 26.06.2025)
- 10.Мудрова, О. Робототехнический комплекс: окупаемость и преимущества / О. Мудрова // «РИТМ машиностроения». – 2024. – №3. – С. 32-36.
- 11.Промышленные роботы в России [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%BC%D1%8B%D1%88%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D1%8B_%D0%B2_%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8 (дата обращения 26.09.2025)
- 12.Безуглова, В. Робот с революционным запалом / В. Безуглова // Монокль №50 (1369). – 2024. – С. 22-26.

Электронное издание

НИРС МСФ-2025

**Сборник материалов
81-й студенческой научно-технической конференции**

Секция «Металлорежущие станки и инструменты»

Машиностроительный факультет

Белорусский национальный технический университет

Компьютерная верстка Л.А.Колесников

E-mail: mstools@bntu.by
<http://www.bntu.by/mstools.html>