

УДК 621.91.01/02

**МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
ФРЕЗЕРНЫХ И ОСЕВЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ  
НА ОСНОВЕ 3D-ПРОТОТИПИРОВАНИЯ****д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК, С.А. ПОРТЯНКО  
(Полоцкий государственный университет)**

*Рассмотрены особенности методологии исследования сборных режущих инструментов с использованием 3D-прототипирования, сформулированы цели и задачи исследования. Приведены физические и математические модели формообразования основных конструктивных элементов режущих инструментов с учетом аэрогидродинамического воздействия охлаждающих и смазывающих сред. Даны формулы для расчета геометрических параметров стружко- и теплоотводящих каналов, описаны стенды для изучения аэрогидродинамических процессов при обработке сборными режущими инструментами, влияния теплового воздействия на макеты, усадки и структуры пластикового материала на точность выполняемых размеров режущих инструментов. Представлены рекомендации по совершенствованию конструкций режущих инструментов с использованием гибридных технологий.*

**Ключевые слова:** методология, машиностроение, моделирование, металлорежущий инструмент, 3D-прототипирование, 3D-печать.

**Введение.** В связи с быстроменяющимися условиями обработки материалов резанием, такими как увеличение скорости резания и введение программного управления процессом резания, требуется корректировка и уточнение методологии исследования кинематических и физических характеристик процесса резания [1]. Эти изменения в исследованиях должны касаться всех аспектов и объектов процесса резания, но наибольшее внимание следует уделить режущим инструментам, составляющим хотя и небольшую долю в себестоимости обработки (порядка 3–5%), но без совершенствования которых невозможно повышение эффективности процесса резания. Как известно, наибольшее применение в производстве находят сборные конструкции режущих инструментов и прежде всего фрезерные, осевые (сверла, зенкеры, развертки) и расточные головки [2].

Широкое использование сборных конструкций режущих инструментов при высокоскоростной обработке сдерживается их сравнительно большими габаритами, аэро- и гидравлическим сопротивлением, инерционностью масс конструктивных элементов и, как следствие, падением мощности и производительности резания.

Анализ разработок и результатов исследований сборных режущих инструментов, выполненных ведущими инструментальными фирмами: Sandvik Coromant (Швеция), Iskar (Израиль), Hermle (Германия), Korloy (Южная Корея), Mitsubishi (Япония), и известными учеными В.А. Гречишниковым, В.Ф. Бобровым, Г.И. Грановским, М.И. Михайловым и другими, показывает, что многие вопросы в области оптимизации и автоматизации проектирования и изготовления сборных модульных конструкций режущих инструментов решены. Однако недостаточно внимания уделяется оптимизации формы и геометрических параметров модульных инструментов, технологий их изготовления с учетом условий обтекания воздушными и гидравлическими потоками и обеспечения стружко- и теплоотведения, статической и динамической балансировки в процессе высокоскоростного резания. Хотя в смежных областях техники, например, самолето- и кораблестроении, эти вопросы исследованы достаточно полно с представлением физических и математических моделей [3].

При изготовлении сборных режущих инструментов используются различные методы, в частности обработка давлением и резанием, методы порошковой металлургии и 3D-печати. Для каждого из этих методов требуется проектирование такой конструкции режущего инструмента, которая бы учитывала функциональное назначение режущего инструмента, например, для высокоскоростного фрезерования или растачивания, и особенности технологий его изготовления (обработки и сборки).

Не в полной мере используются возможности «гибридных» технологий, предусматривающих 3D-печать модульных деталей и узлов и их сборку традиционными методами, применение высокопрочных композиционных полимерных материалов, алюминиевых и титановых сплавов для уменьшения веса корпусных деталей и традиционных металлических (легирующих сталей, твердых сплавов) для режущих вставок (блоков).

Требуются современные конструкторско-технологические решения по улучшению аэро- и гидродинамических свойств режущих инструментов за счет применения рациональной формы корпусов и расположения составляющих конструктивных элементов (режущих лезвий, стружко- и теплоотводящих каналов) и использования балансировочных механизмов.

Решение этой технически сложной задачи возможно при комплексном подходе к проектированию, предусматривающем математическое моделирование 3D-конструкции, макетирование (изготовление) экспериментального образца с использованием трехмерных технологий, физическое моделирование условий резания материала макетом режущего инструмента и оптимизацию параметров режущего инструмента, выработку рекомендаций по рациональной технологии изготовления сборного режущего инструмента, что в конечном итоге обеспечит сокращение временных и финансовых затрат на подготовку производства сборных режущих инструментов.

**Основная часть.** Целью данной работы является совершенствование конструкций сборных режущих инструментов и сокращение времени на подготовку их производства за счет 3D-макетирования и моделирования аэрогидродинамических и тепловых условий эксплуатации.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

- на основе анализа сборных режущих инструментов и условий их эксплуатации при высокоскоростном резании установить основные пути совершенствования их конструкций за счет улучшения аэрогидродинамической формы корпусов и стружко- и теплоотводящих канавок;
- разработать математические и физические 3D-модели, описывающие параметры форм конструктивных элементов режущих инструментов с учетом условий обтекаемости и рационального стружкоотвода и балансирования;
- разработать методику экспериментального исследования 3D-макетов режущих инструментов, в т.ч. параметров их аэрогидродинамики и балансирования;
- установить зависимости параметров конструктивных элементов режущих инструментов от аэрогидродинамической и тепловой нагрузок при различных скоростях и мощности резания;
- пронормировать подготовку производства сборных режущих инструментов при их проектировании и изготовлении с использованием традиционных технологий, 3D-макетирования и «гибридного» метода;
- выработать рекомендации по совершенствованию сборных режущих инструментов и сокращению времени на конструкторскую и технологическую подготовку производства.

В основу современной методологии исследований процесса резания и режущих инструментов положено математическое и физическое моделирование изменений их основных характеристик и параметров в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации [1].

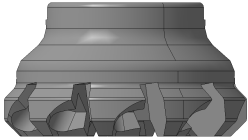
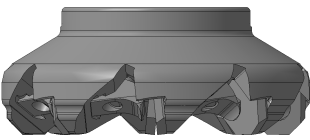
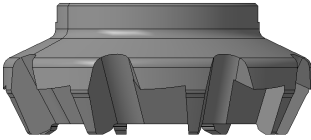
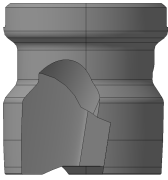
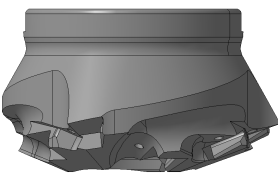
*Математическое моделирование* включает описание известными формулами наиболее распространенных форм корпусов режущих инструментов в виде дисков, цилиндров, конусов, торов и т.п., некоторые из которых представлены в таблице 1.

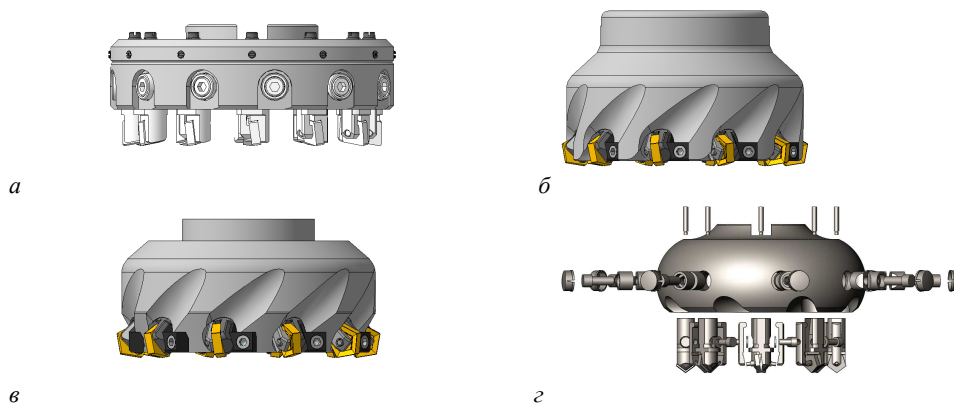
По аналогии предложены макеты конструкций в виде сочетания цилиндров (рисунок 1, *а*), дисков (рисунок 1, *б*), усеченных конусов (рисунок 1, *в*) и двух сопрягаемых торов (рисунок 1, *з*).

В настоящее время исследования в области аэрогидродинамических характеристик режущих инструментов в вязкожидкостной среде при высокоскоростной обработке исследованы недостаточно. Поэтому наряду с результатами исследований резания для изучения особенностей обтекания корпусов режущих инструментов можно воспользоваться моделированием летающих объектов, имеющих вращение [3]. Прежде всего на аэродинамические характеристики тел вращения влияют такие факторы, как шероховатость, геометрическая форма, площадь миделя, материал, положение обтекаемого тела относительно набегающего потока.

В зависимости от формы тела возможны различные случаи их обтекания воздушными потоками и влияния потоков на аэродинамические характеристики тел (рисунок 2).

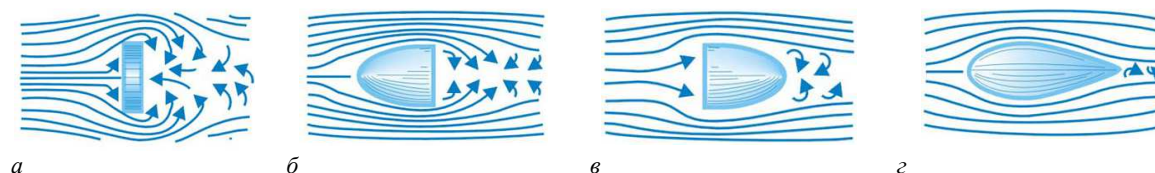
Таблица 1. – Конструктивные формы торцовых фрез

		
<i>F45WG D080-10-27-FX-R08</i>	<i>SOF45WG D125-08-40-R26</i>	<i>T465 FLN D125-08-40R-22ST</i>
		
<i>HM90 F90A D 40-3-16</i>	<i>T425 SM-D050-13-3-32-13</i>	



**а – в виде сочетаний цилиндров; б – дисков; в – усеченных конусов; г – сопрягаемых торов**

**Рисунок 1. – Макеты конструкций**

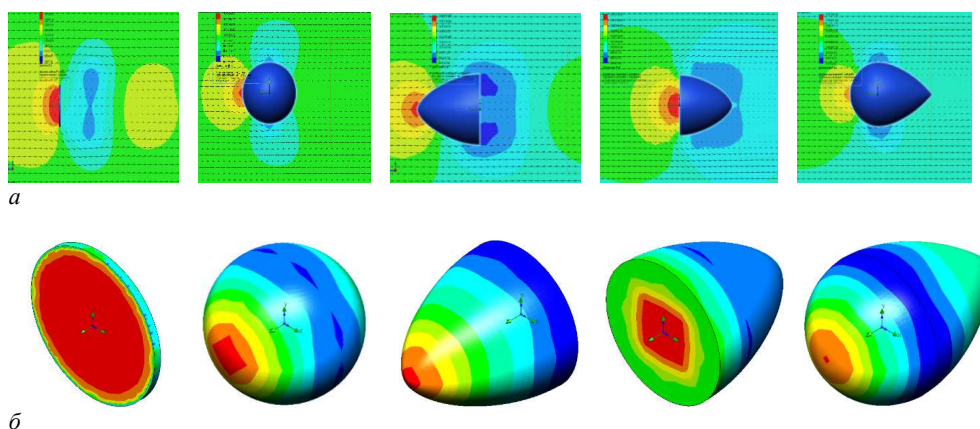


**а – круглая пластина; б – пластина с носовым обтекателем;  
в – пластина с хвостовым обтекателем; г – каплевидное тело**

**Рисунок 2. – Влияние формы тела на аэродинамические характеристики**

Предложены трехмерные твердотельные модели пяти разных по форме тел вращения, но с одинаковой площадью миделевого сечения в Solid Works Simulation, обдуваемых воздушными потоками. Результаты моделирования представлены на рисунке 3. Миделевое сечение у всех тел – это круг диаметром 100 мм.

Зона распределения воздушных потоков для круглой пластины формируется и концентрируется по всей площади, перпендикулярной лобовому сопротивлению (рисунок 3, а). Красная зона полностью отражает граничные условия распределения потоков для плоского тела вращения. Сферическое тело вращения, пластина с носовым обтекателем, а также каплевидное тело имеют воздействие на поверхностях в зонах контакта, однако за счет параметров, близких к идеальной геометрической форме «сфера», зоны концентрации распределяются по наружному контуру и сопротивление воздушным потокам сглаживается (рисунок 3, б).



**а – изображение в сечениях для правой плоскости;  
б – изображение на поверхности, показывающие распределение давления**

**Рисунок 3. – Результаты моделирования**

Сила лобового сопротивления, действующая на тело, сравнивается с теоретическими данными. При этом сила сопротивления круглой пластины принимается за единицу. Следует отметить, что программное приложение Solid Works Simulation демонстрирует свой функционал и возможности моделирования различного рода симуляций процессов на примере несложных тел вращения. В дальнейшем возможно его применение при моделировании форм блочно-модульного режущего инструмента. Например, обтекание тороидального корпуса фрезы жидкостными или воздушными потоками может быть представлено аналогично рисунку 2, б, г в виде схемы на рисунке 4, а, а лобовое сопротивление режущей пластины в резовом блоке по аналогии с рисунком 2, а и в – в виде рисунка 4, б. В разработанных конструкциях режущих инструментов учитываются ранее предложенные рекомендации по аэрогидродинамическим характеристикам обтекаемости тел.

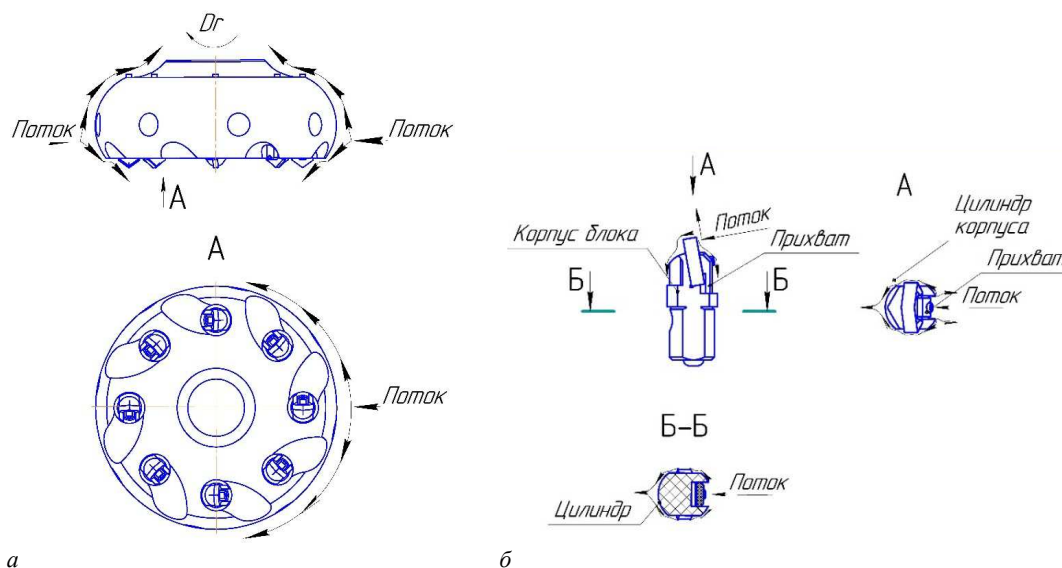


Рисунок 4. – Схемы обтекания воздушными и жидкими потоками корпусов (а) и конструктивных элементов резовых блоков (б)

Одним из важнейших конструктивных элементов режущих инструментов является стружкоотводящая канавка. В случае высокоскоростной обработки ее можно назвать и теплоотводящей, т.к. 75–95% образующейся теплоты отводится из зоны резания стружкой. Здесь важно максимально учесть однонаправленность стружки и потока жидкости или воздуха, способствующих теплоотведению. Имеются аналогичные резанию физические модели обтекания вращающихся тел, например, ротационный вертушки (рисунок 5, а), завихрения воздушных потоков в закрытых полостях (рисунок 5, б), которые могут быть применимы и для наших случаев [4].

Для определения формы и расположения стружкоотводящих канавок можно воспользоваться рекомендациями исследований процесса резания.

Как известно, тангенс угла схода стружки рассчитывается по формуле [5]

$$\operatorname{tg} \eta_{ci} = \operatorname{tg} \lambda_i \cdot \cos \gamma_i, \quad (1)$$

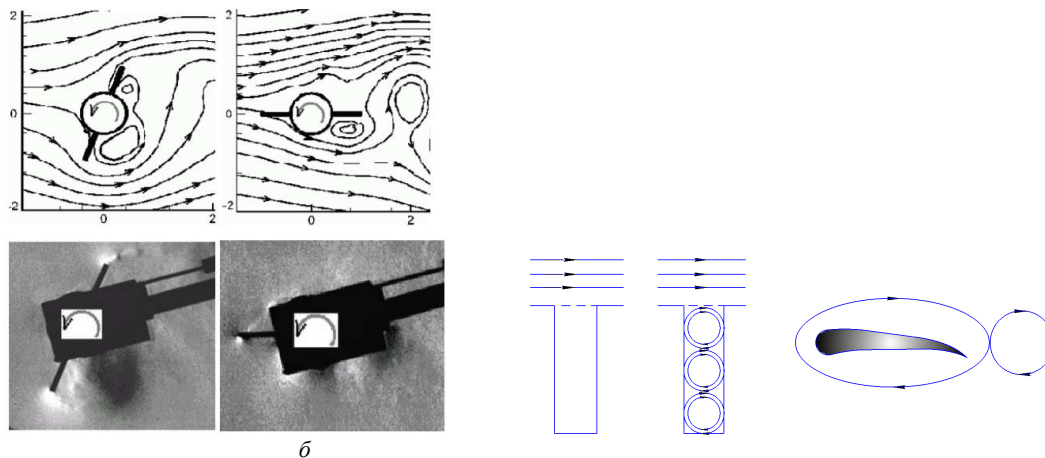
где  $\lambda_i$  и  $\gamma_i$  – угол наклона режущей кромки и передний угол лезвия, и с учетом радиуса при вершине режущей пластины по формуле [5]

$$\eta_c = \eta'_c + \eta_{ck} = \eta - \left( \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\vartheta_{1c}}{\vartheta_{1c}} \right) + \eta_{ck}, \quad (2)$$

где  $\eta_c$  – угол схода стружки;

$\vartheta_{1c}(x)$  и  $\vartheta_{2c}$  – проекции вектора скорости схода стружки на координатные оси  $x$  и  $y$ ;

$\eta_{ck}$  – угол, учитывающий изменение направления движения стружки под действием сил на передней поверхности лезвия инструмента.



*a* – ротационная вертушка; *б* – завихрения воздушных потоков в закрытых полостях

Рисунок 5. – Физические модели обтекания вращающихся тел

С другой стороны, из гидродинамики известна формула Ньютона, связывающая размеры препятствия и усилие, создаваемое обтекающей жидкостью или газом [3]:

$$\partial Y = \frac{\mu \cdot \partial W \cdot S}{F}, \tag{3}$$

- где  $Y$  – координата по нормали к линейной скорости вращающегося объекта;
- $\mu$  – коэффициент динамической вязкости среды;
- $W$  – скорость среды;
- $S$  – площадь препятствия;
- $F$  – сила взаимодействия.

Схемы для определения угла схода стружки и координаты  $Y$  представлены на рисунке 6.

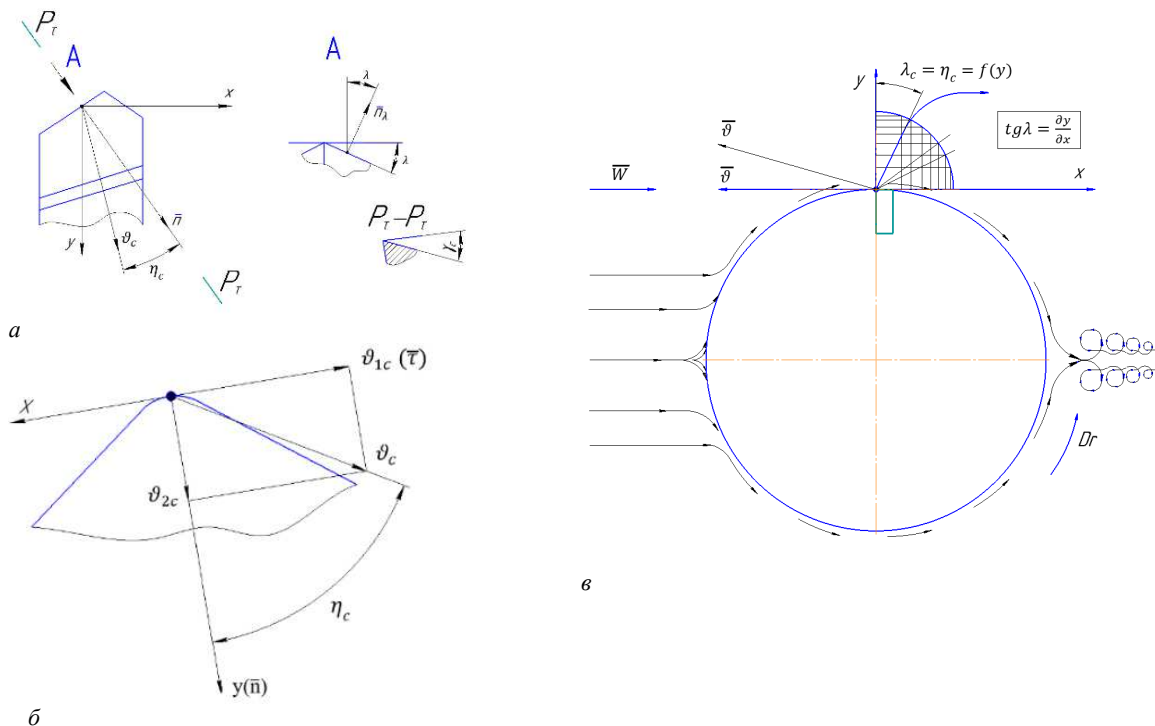


Рисунок 6. – Схемы для определения угла схода стружки (*a*), с учетом скорости схода стружки (*б*) и обтекания воздушно-жидким потоком (*в*)

Совместное решение уравнений (1)–(3) позволяет определить значение угла схода стружкоотводящей канавки, учитывающей условия резания и обтекания режущей пластины потоком жидкости или газа.

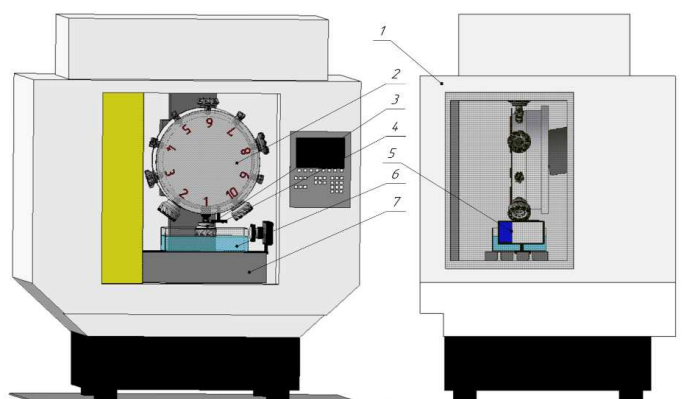
Физическое моделирование блочно-модульных режущих инструментов (БМРИ) и их работоспособности заключалось в 3D-печати макетов и их исследовании на экспериментальных стендах [7].

Проектирование и усовершенствование конструкций блочно-модульного режущего инструмента как сложного изделия машиностроения осуществляется путем формирования трехмерной модели инструмента, т.к. именно создание трехмерных моделей, идентичных проектируемым конструкциям БМРИ, позволяет быстро перенастраивать инструмента для реализации целей исследования. Использование 3D-параметрических моделей типовых деталей конструкции дает возможность существенно повысить эффективность конструирования в среде САД-систем [4]. Однако на этапах подготовки трехмерных моделей к печати следует оценивать технические характеристики используемых 3D-принтеров и материалов с последующей корректировкой геометрических размеров, оказывающих влияние на точность печати трехмерных экспериментальных макетов БМРИ. Были напечатаны макеты, представленные на рисунке 7.



**Рисунок 7. – Макеты конструкций блочно-модульных торцовых фрез, расточного патрона и основных элементов, выполненных с применением технологии трехмерной печати**

Физическое моделирование работоспособности БМРИ реализовывалось на фрезерном станке с ЧПУ модели «Robodrill» (фирма «Fanuc», Япония). Использовались макеты сборных режущих инструментов, отпечатанных на 3D-принтерах из различных пластиковых материалов. Макеты устанавливались в инструментальном магазине станка и погружались в емкость с подкрашенной жидкостью (рисунок 8).

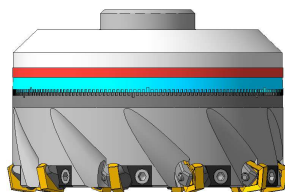


**1** – вертикально-обрабатывающий центр с ЧПУ Robodrill a-D21LiB; **2** – магазин станка;  
**3** – блочно-модульная торцовая фреза; **4** – камера Huawei P20 Pro; **5** – зеркальный фотоаппарат Canon 1200D;  
**6** – емкость с жидкостью; **7** – стол станка

**Рисунок 8. – Физическая модель для исследования работоспособности конструкции БМРИ**

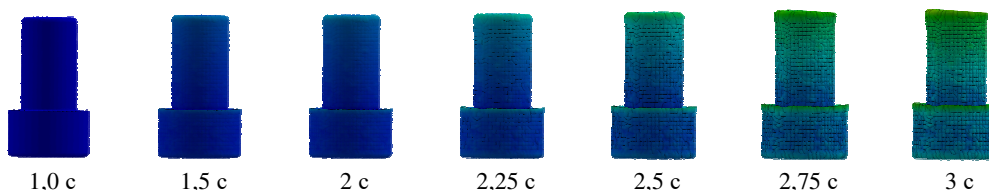
При моделировании регулировалась частота вращения инструмента и велась видеосъемка потоков жидкости, обтекающих конструктивные элементы режущих инструментов.

*Моделирование балансирования.* Разработана модель балансировочного механизма в виде двух колец со спиральными пазами. Особенностью конструкции двух балансировочных колец является возможность изменения корректирующей массы в противофазе дисбалансу БМРИ, добавленной за счет перемещения груза (шарика) определенной массы в пазу по спирали Архимеда [9]. Макет БМРИ с устройством балансирования представлен на рисунке 9.



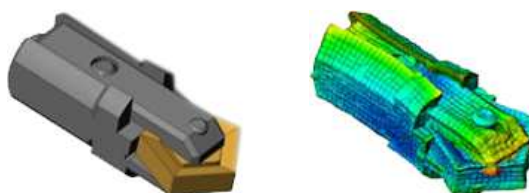
**Рисунок 9. – Макет блочно-модульного режущего инструмента с устройством балансирования**

*Модель теплового воздействия.* Целью моделирования процесса нагрева макета блочно-модульного режущего инструмента являлась качественная оценка тепловых деформаций основных конструктивных элементов (в пределах текучести пластика) и выработка рекомендаций по корректировке (совершенствованию) рабочих чертежей. Наглядное представление об изменениях винта в процессе нагрева представлено на рисунке 10. Время температурного воздействия на винт занимает 3 с.



**Рисунок 10. – Схема наглядного представления изменений винта в процесс нагрева**

Изменения в процессе нагрева модуля блока резцового наглядно представлены на рисунке 11.



**Рисунок 11. – Схема изменений в процессе нагрева блока резцового**

Время температурного воздействия на корпус блока резцового и корпуса фрезы занимает 5 с, наглядное изменение корпуса блока резцового в процессе нагрева представлено на рисунке 12, корпуса фрезы – на рисунке 13.

В результате моделирования тепловых деформаций можно отметить следующее:

1. При нагреве крепежного винта он удлиняется, что необходимо учитывать при проектировании резьбового соединения.
2. Режущая пластина увеличивается в «диаметральном» размере, что необходимо учитывать при определении размера паза для ее размещения.
3. Корпус блока резцового увеличивается в размерах, наибольшей тепловой деформации подвергаются боковые стенки продольного паза для размещения прихвата, что необходимо учитывать при назначении допусков на ширину паза и прихвата.
4. Тепловые деформации отдельных конструктивных элементов блока резцового сказываются на общей деформации блока резцового в сборе – режущая пластина «врастает» в корпус и прихват, размеры прихвата изменяются по высоте, ширине и длине, деформируется форма отверстия под штифт, увеличивается диаметр штифта и диаметр винта зажимного. Эти тепловые деформации должны быть учтены при размерном анализе сборки резцового блока.

5. Качественные изменения тепловых деформаций торцевой фрезы свидетельствуют о максимальных их значениях в режущей пластине и блоке резцовом, однако ими нельзя пренебрегать и при проектировании корпуса фрезы, особенно в части торцевой шпонки, с помощью которой фреза закрепляется в хвостовике.

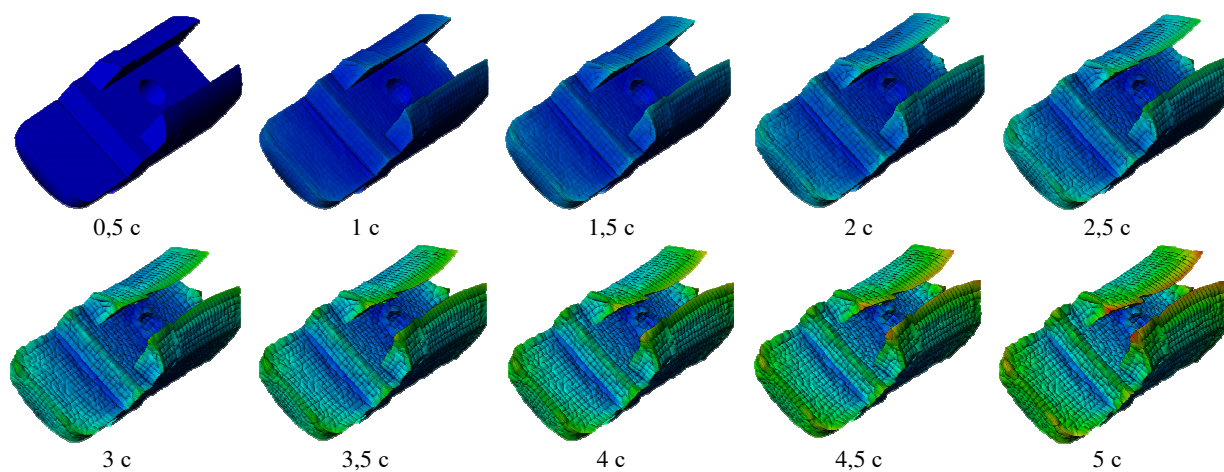


Рисунок 12. – Схема наглядного представления изменений в процессе нагрева корпуса блока резцового

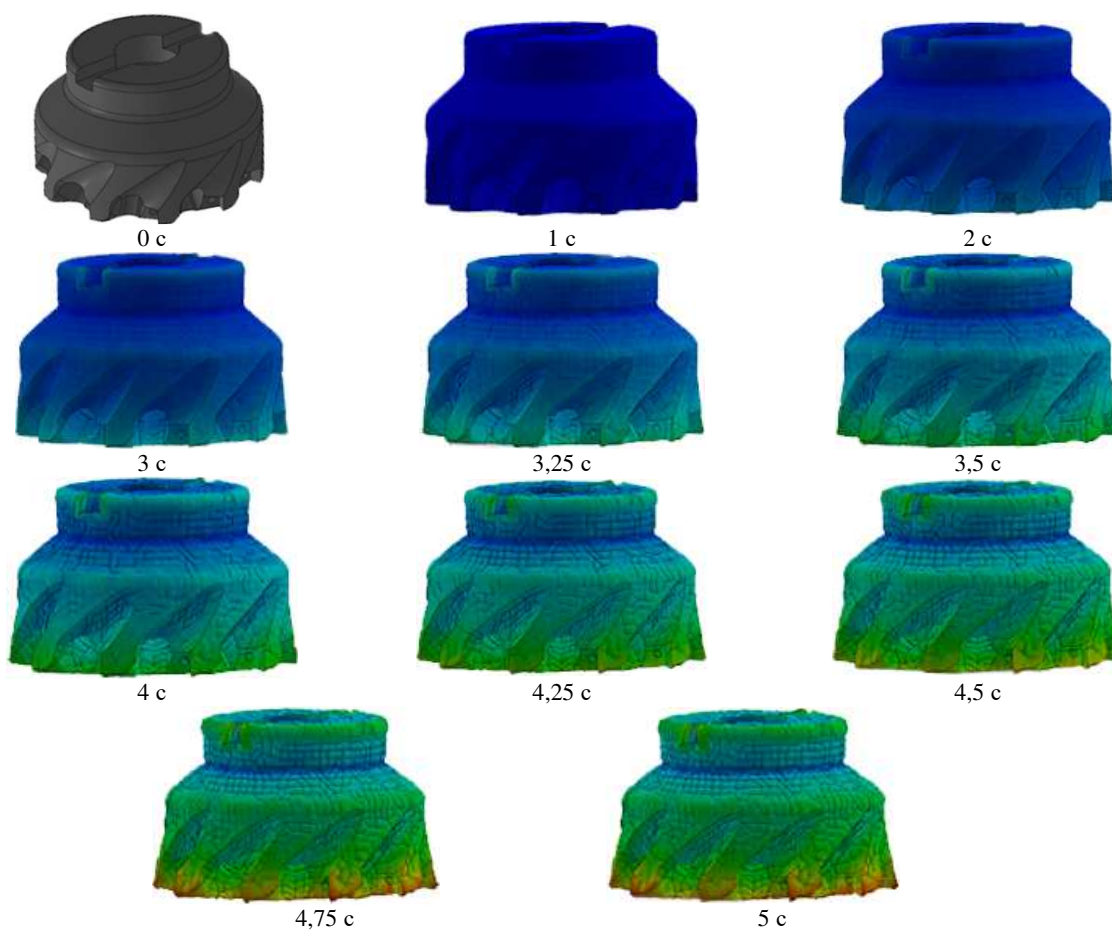


Рисунок 13. – Схема наглядного представления изменений в процесс нагрева корпуса фрезы



Моделирование изменений точностных параметров БМПИ за счет усадки материалов. При изготовлении макетов режущих инструментов с использованием 3D-технологий оценивалось соответствие получаемых размеров и шероховатости поверхностей заданным на чертеже. Естественно предположить, что точность и шероховатость поверхностей деталей будет зависеть от особенностей трехмерной технологии и свойств используемых материалов [9].

На рисунке 14 представлена схема измерения геометрических параметров формообразующего геометрического профиля режущего инструмента и структура наружной поверхности на примере блочно-модульных торцовых фрез, где указанные позиции 1–9 отображают последовательность измерений с периодичностью в 10 точек с вычислением среднего значения размера в каждой из них с использованием видеоизмерительного микроскопа модели NVM-4030D фирмы NORG AU.

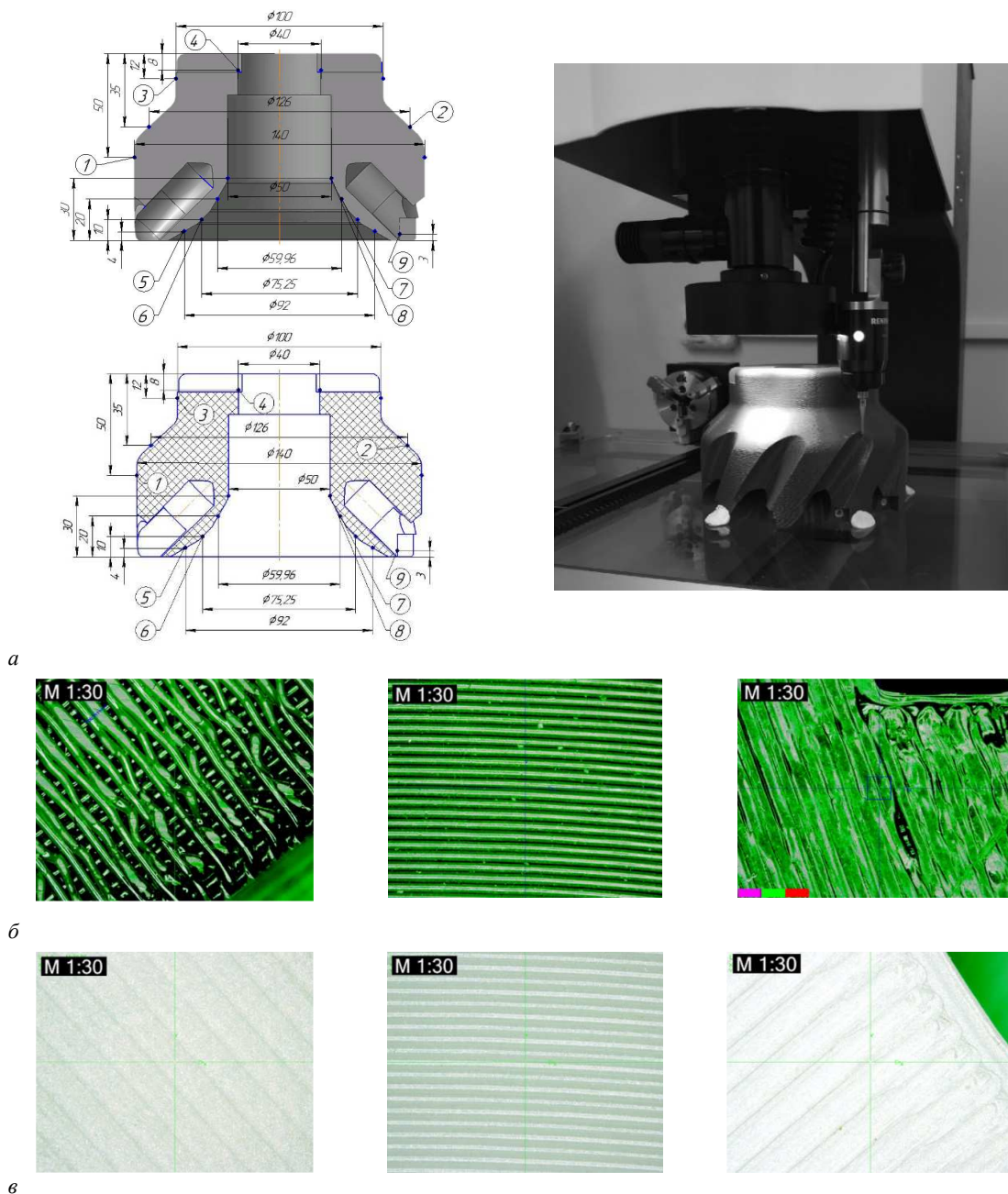


Рисунок 14. – Эскиз БМПИ и экспериментальная установка измерения его геометрических параметров (а) и структура наружных поверхностей, напечатанных: б – из пластика ABSplus-P430 на 3D принтере Stratasys Mojo; в – из PLA-пластика Wanhao на 3D принтере Mass Portal Pharaoh XD 30

Изучение структуры и шероховатости поверхностного слоя деталей показывает, что плоское наложение слоев материала и их пересечение различно для рассматриваемых способов и степени заливки материалов: для 100% – 6,3 мкм, для 50% – 6,8 мкм.

Анализ результатов оценки параметров точности и шероховатости поверхностей деталей показывает, что для свободных или нерабочих размеров поверхности и конструктивных элементов степень точности, обеспечиваемая 3D-принтерами, достаточна, а для сопрягаемых поверхностей пазов торцевой шпонки, отверстий для установки блоков резовых и других требуется дополнительный подбор материала, учитывающий толщину и свойства нити, обработка технологии 3D-печати.

*Оценка затрат при использовании различных технологий производств БМРИ.* Как показали эксперименты и расчеты, затраты на изготовление макетов традиционным, аддитивным и гибридным методами значительно отличаются, что отражает экономический эффект (таблица 2).

Таблица 2. – Оценка затрат на изготовление БМРИ различными методами

Метод изготовления	Традиционный	Аддитивный	Гибридный
Стоимость, руб.	≈ 1000	≈ 350	≈ 720

Применение «гибридного» метода изготовления макета блочно-модульного режущего инструмента из полимерного материала позволяет сэкономить средства, а также сократить время на конструкторскую и технологическую подготовку производства по сравнению с традиционным методом. Однако этот метод уступает аддитивному методу, для которого нет необходимости в дорогостоящей технологической оснастке, инструментах, большом количестве металлообрабатывающего оборудования, и который, кроме того, позволяет отработать каждый элемент конструкции БМРИ на стадии проектирования [11; 12].

**Заключение.** Разработанные методики и модели дают возможность проводить комплексные исследования работоспособности сборных режущих инструментов, в частности оценивать целесообразность принимаемых технических решений по совершенствованию конструкций фрезерных и осевых инструментов, таких как:

- использование обтекаемых корпусов в виде двух сопрягаемых торцов;
- выполнение стружкоотводящих канавок, учитывающих направления схода стружки и потока охлаждающей жидкости или воздуха;
- введение в конструкцию балансирующих механизмов в виде уравновешивающих грузов и дисков с кольцевыми и спиральными канавками;
- повышение точности и качества получаемых конструктивных элементов и поверхностей с учетом теплового расширения и усадки полимерного материала;
- применение «гибридных» конструкций сборных режущих инструментов и технологий их изготовления, включающих пластиковые корпуса из высокопрочных полимеров и металлические резовые вставки с механизмами зажима;
- оценки экономической эффективности традиционных, аддитивных и гибридных конструкций и технологий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Попок, Н.Н. Методология и исследования процесса резания материалов в современных условиях развития машиностроения / Н.Н. Попок // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2019. – № 3. – С. 21–30.
2. Попок, Н.Н. Анализ тенденций проектирования инструментальных систем. Ч. 3. Инструментальные системы для многоцелевой обработки / Н.Н. Попок // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 3. – С. 19–37.
3. Трехмерное отрывное обтекание тел произвольной формы / С.М. Белоцерковский [и др.]. – М.: Центр. аэродинам. ин-т им. Н.Е. Жуковского, 2000. – 260 с.
4. Андронов, П.Р. Вихревые методы расчета нестационарных гидродинамических нагрузок / П.Р. Андронов, С.В. Гувернюк, Г.Я. Дынникова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. – 184 с.
5. Бобров, В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машгиз, 1962. – 152 с.
6. Грубый, С.В. Расчетные параметры стружкообразования при несвободном косоугольном резании пластичных материалов / С.В. Грубый // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. – 2017. – С. 4–15.
7. Портянко, С.А. Технологии FDM печати конструкции блочно-модульной торцевой фрезы / С.А. Портянко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 24–25 окт. 2019 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: М.Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 38.
8. Попок, Н.Н. 3D-моделирование конструкций блочно-модульных торцевых фрез [Электронный ресурс] / Н.Н. Попок, С.А. Портянко // Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, иннова-

- ции (ИКТ-2018) : электрон. сб. ст. I Междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 14–15 июня 2018 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2018. – С. 190–192.
9. Попок, Н.Н. 3D-макетирование сборных режущих инструментов для высокоскоростной обработки / Н.Н. Попок, С.А. Портянко // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки : материалы 34-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 марта 2019 г. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 97–98.
10. Оценка параметров точности и шероховатости поверхностей деталей блочно-модульного режущего инструмента, полученных 3D-печатью / Н.Н. Попок [и др.] // Технология – Оборудование – Инструмент – Качество : материалы 35-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 12–13.
11. Попок, Н.Н. Подготовка машиностроительного производства на основе 3D-прототипирования технологической оснастки [Электронный ресурс] / Н.Н. Попок, С.А. Портянко // Инновационные технологии в машиностроении (ИнТехМаш-2020) : электрон. сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 21–22 апр. 2020 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2020. – С. 40–41.
12. Попок, Н.Н. Автоматизация подготовки производства на основе 3D-макетирования технологической оснастки / Н.Н. Попок, С.А. Портянко // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : материалы VIII междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19 марта 2020 г. / Бел. нац. техн. ун-т ; ЗАО «МинскЭкспо». – Минск : БНТУ, 2020. – С. 100.

Поступила 10.06.2020

### METHODOLOGY FOR STUDYING THE PERFORMANCE OF AXIAL MILLING AND CUTTING TOOLS BASED ON 3D-PROTOTYPING

*N. POPOK, S. PORTSIANKO*

*The features of the research methodology for precast cutting tools using 3D prototyping are considered, and the goals and objectives of the research are formulated. Physical and mathematical models of forming the main structural elements of cutting tools are given, taking into account the aero-hydrodynamic effect of cooling and lubricating media. Formulas for calculating the geometric parameters of chip and heat-removing grooves are given, stands for studying aero-hydrodynamic processes during processing with precast cutting tools are described, the influence of heat on layouts, shrinkage and structure of plastic material on the accuracy of the sizes of cutting tools are given, recommendations for improving the design of cutting tools using hybrid technologies are given.*

**Keywords:** *methodology, mechanical engineering, modeling, metal-cutting tools, 3D-prototyping, 3D-printing.*