

УДК 621.91.02/621.88.082.1

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫХ РАСТОЧНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК;  
А.А. ГЕРАСИМОВ; Е.М. ТИХОН  
(Полоцкий государственный университет)*

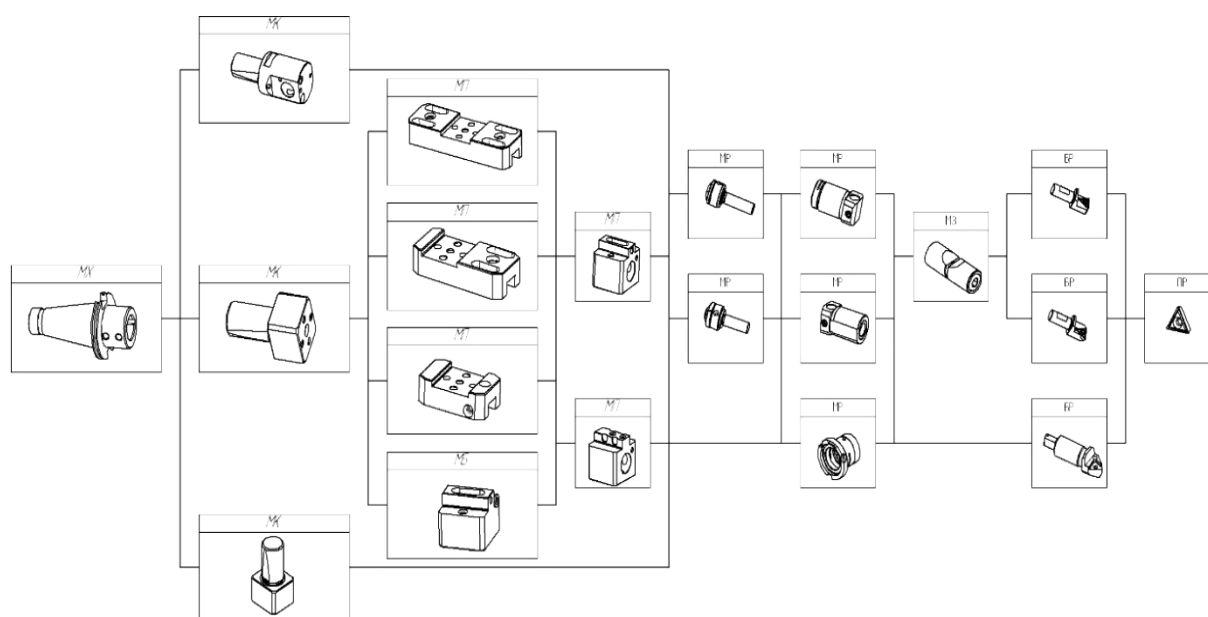
*Рассмотрена система блочно-модульных расточных режущих инструментов с микрометрической настройкой лезвий. Предложена и проанализирована модель напряжений и перемещений в резьбовом механизме настройки. Приведены результаты экспериментальных исследований точности и жесткости инструментов. Даны рекомендации по проектированию высокоточных расточных головок, патронов и резцовых вставок.*

**Ключевые слова:** *расточные режущие инструменты, точность, резцовые вставки, моделирование.*

**Введение.** В машиностроении широкое распространение получили детали с высокоточными отверстиями, поверхности которых обрабатываются расточными режущими инструментами. Потребность в расточных режущих инструментах постоянно возрастает. Более 60% этой потребности удовлетворяется за счет закупки импортного инструмента, так как отечественные производители не обеспечивают требуемой точности и жесткости расточных режущих инструментов. Анализ конструкций расточных режущих инструментов свидетельствует о том [1; 2], что предлагаются различные модульные инструментальные системы, включающие расточные резцы, расточные головки, патроны, резцовые вставки (микроборы) и отличающиеся размерами модулей, механизмами закрепления и перемещения, что исключает взаимозаменяемость модулей и резцовых вставок, снижает их жесткость, а следовательно, не обеспечивает требуемую точность обрабатываемых поверхностей отверстий.

Для удовлетворения отечественного машиностроения в расточных режущих инструментах необходимо *повысить* точность позиционирования режущих лезвий и жесткость инструмента, *обеспечить* технологичность изготовления и сборки инструмента, *унифицировать* конструктивные элементы деталей и узлов. В совокупности эти технические решения позволят снизить себестоимость расточного инструмента и обеспечат импортозамещение. Повышению точности и жесткости расточного режущего инструмента будут способствовать более технологичные в изготовлении и сборке поверхности сопряжений модулей, резьбовые соединения и компенсаторы резьбовых зазоров в механизме микрометрической настройки режущих лезвий, пазы (гнезда) для установки режущих пластин.

**Моделирование напряжений и перемещений в механизме микрометрической настройки режущих лезвий.** Разработана система блочно-модульных расточных режущих инструментов (БМРРИ) с микрометрической настройкой лезвий (рисунок 1).



**Рисунок 1. – Система блочно-модульных расточных режущих инструментов**

Разработанная система блочно-модульных расточных режущих инструментов применяется на станках с ЧПУ, координатно-расточных станках при обработке поверхностей отверстий в диапазоне диаметров 10...360 мм с точностью по 6...7 квалитетам [3].

Система включает расточные головки в диапазоне растачиваемых отверстий с диаметрами от 63 до 360 мм; расточные патроны – от 10 до 63 мм; резцовые блоки, или резцовые вставки, в том числе с микрометрической настройкой лезвий, позволяющие обрабатывать отверстия диаметром менее 10 мм.

Отличительными особенностями и преимуществами БМРПИ являются:

- обеспечение взаимозаменяемости и ремонтпригодности за счет унифицированных модулей:
  - МХ – модуль хвостовой;
  - МК1...МК3 – модуль корпусный;
  - МП1...МП3 – модуль переходной (между МК и МБ);
  - МБ – модуль балансировочный;
  - МП4...МП5 – модуль переходной (между МБ и МР);
  - МР1...МР5 – модуль регулировочный; МЗ – модуль зажимной;
  - БР1...БР3 – блок резцовый;
  - ПР – пластина режущая;
- технологичность изготовления и сборки за счет применения открытых плоских и цилиндрических поверхностей сопрягаемых деталей модулей;
- возможность использования модулей и резцовых блоков в других типах режущих инструментов;
- повышение точности и качества обработки за счет возможности регулировки унифицированных модулей.

Точность расточных режущих инструментов с регулируемыми резцовыми вставками (блоками) зависит от точности исполнения резьбового соединения «винт-гайка». Для повышения точности этого резьбового соединения в большинстве случаев используется разрезная гайка (втулка), которая позволяет регулировать зазоры в резьбе и тем самым повышать точность перемещения резцовых вставок. Как правило, соединение винта с разрезной втулкой делается в сжатом или разжатом состоянии втулки.

Приведение резьбового соединения в рабочее положение производится путем снятия напряжения сжатия или разжатия, в результате которого происходит компенсация зазоров в резьбовом соединении. При этом ставится задача по выбору материала втулки и винта, их термообработке, допусков на резьбу винта и втулки, размеров нарезаемых пазов во втулке – глубины, ширины, шага пазов и других параметров, обеспечивающих требуемую точность перемещений при сохранении работоспособности режущего инструмента в пределах заданного стандартом периода стойкости.

Для решения указанной выше задачи произведено моделирование резьбового соединения «винт-втулка» в программной среде «ANSYS» (рисунок 2).

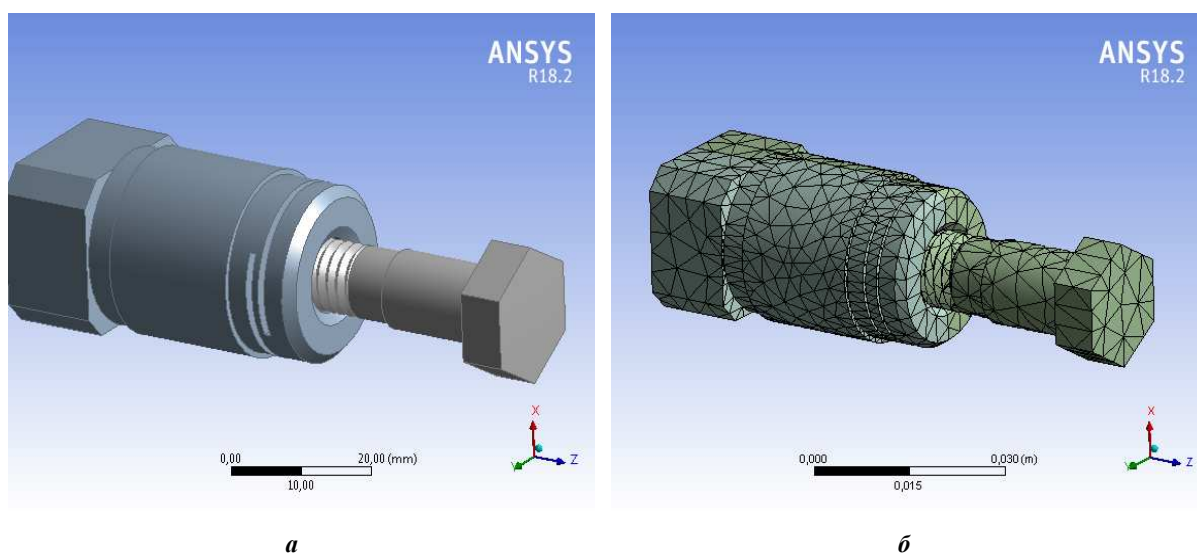


Рисунок 2. – Трехмерная модель втулки и винта (а) с разбивкой на элементы (б)

Моделируется резьба М12 с шагом 0,5 и 1 мм, выполненная с точностью 6г. Глубина прорезаемого паза составляет 18 и 21 мм; ширина – 1 и 1,5 мм; шаг паза – 1 и 1,5 мм.

Составляется план полного факторного эксперимента (моделирования), включающий три фактора: глубину, ширину, шаг паза во втулке.

Все три указанных выше фактора варьируются на двух уровнях их значений – максимальном и минимальном (таблица 1).

Таблица 1. – План полного факторного эксперимента (моделирования)

Образец	Ширина паза (b), мм	Шаг паза (t), мм	Глубина паза (B), мм
Образец 1	1	1	18
Образец 2	1	1	21
Образец 3	1	1,5	18
Образец 4	1	1,5	21
Образец 5	1,5	1	18
Образец 6	1,5	1	21
Образец 7	1,5	1,5	18
Образец 8	1,5	1,5	21

При изменении осевой нагрузки на резьбу от 50 до 200 Н рассматриваются напряжения в резьбовом соединении и перемещения винта (рисунок 3).

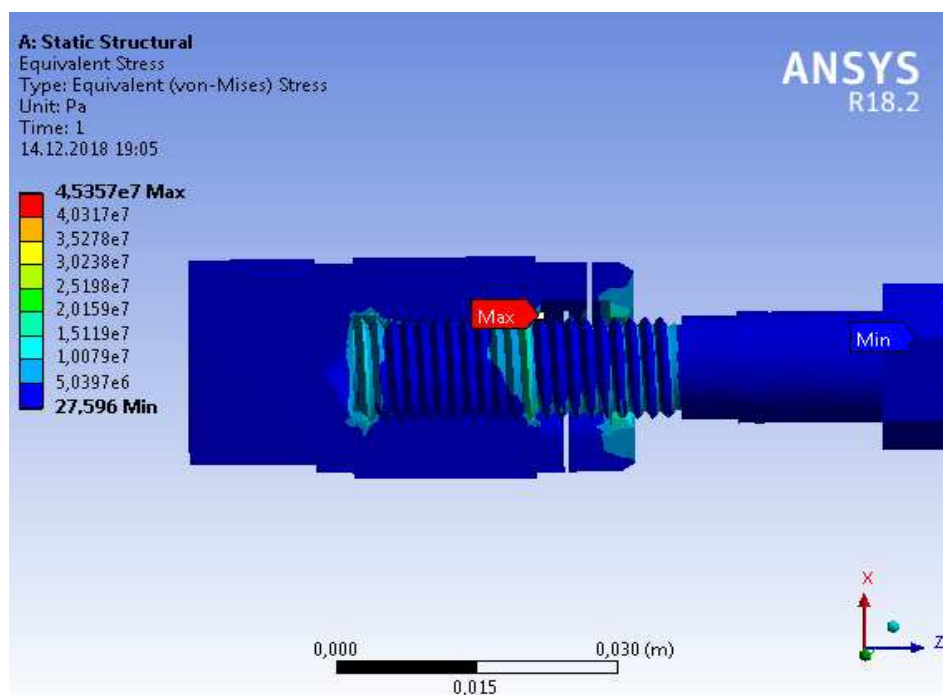


Рисунок 3 – Карта распределения напряжений, полученная в программе Ansys

Цель эксперимента (моделирования) – определение предельной осевой нагрузки, при которой напряжение не превосходит предела прочности заданного материала.

При этом гарантируется минимальный зазор в резьбовом соединении и требуемая точность перемещений резцовой вставки.

Анализ результатов моделирования показывает (рисунок 4):

- с увеличением нагрузки величины перемещения и напряжения растут;
- наиболее приемлемыми для последующих исследований являются образцы под номерами 1, 4, 5 и 8, так как в них не возникает слишком больших и слишком малых нагрузок.

Из этих вариантов выбирается наиболее рациональный – образец под номером 1, так как он имеет наибольшие перемещения и обеспечивает минимальные зазоры в резьбовом соединении при любом значении нагрузки.

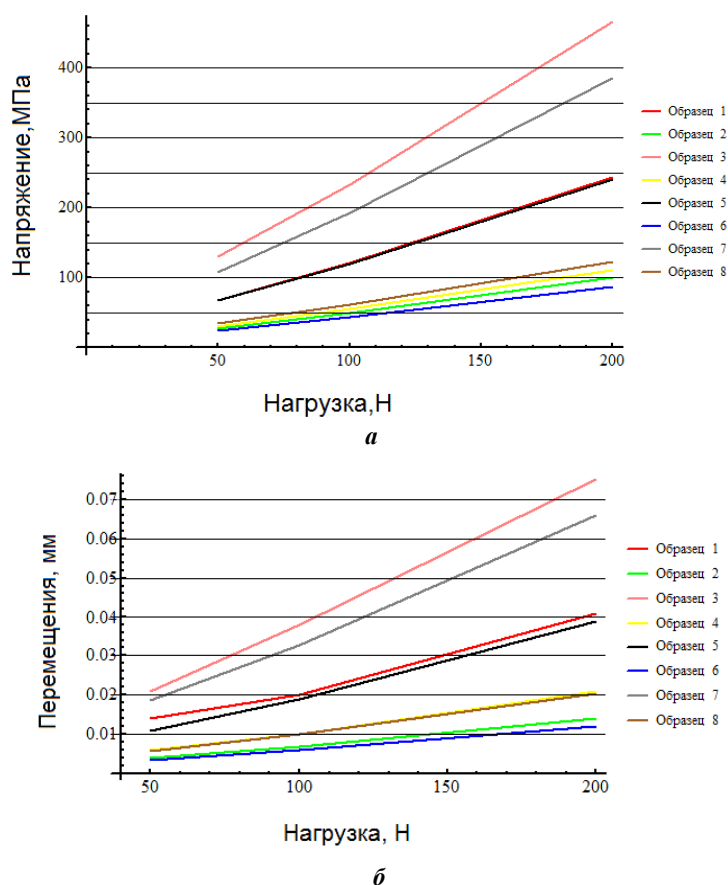


Рисунок 4. – Зависимости напряжений (а) и перемещений (б) в резьбовом соединении от нагрузки при различных размерах глубины, ширины и шага пазов втулки

**Экспериментальные исследования резьбовых соединений механизма настройки.** При проведении экспериментальных исследований точности и жесткости резьбовых соединений «винт-втулка» использовались стандартные методики, сертифицированные материалы образцов, оборудование и измерительная аппаратура.

Образцы втулок и винта (рисунок 5) изготовлены из стали 45 ГОСТ 1050, наружный диаметр втулки – 24 мм, длина – 47 мм, винты М12 6g и М12 6h с шагом резьбы 0,5; 0,75; 1; 1,5 мм. Твердость втулки 42...54 HRC, винта – 20...30 HRC. Образцы изготовлены в количестве 8 штук – по количеству опытов полного факторного эксперимента, предусматривающего изменение трех факторов (размеров пазов) на минимальном и максимальном уровнях: ширина  $b = 1; 1,5$  мм; шаг  $t = 1; 1,5$  мм; глубина  $B = 18; 21$  мм.

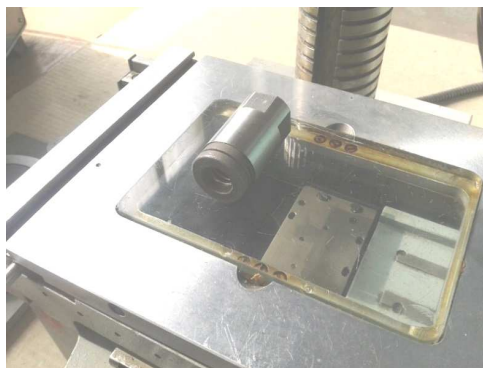


Рисунок 5. – Образец втулки

Методикой эксперимента предусматривается ввинчивание винта в разрезную резьбовую втулку, которая предварительно разжимается или сжимается. После снятия усилий разжатия или сжатия втулки

винт последовательно и многократно ввинчивается и вывинчивается, при этом фиксируется отклонение  $\Delta$  (перемещение винта) и крутящий момент  $M_{кр}$  на винте (рисунок 6).

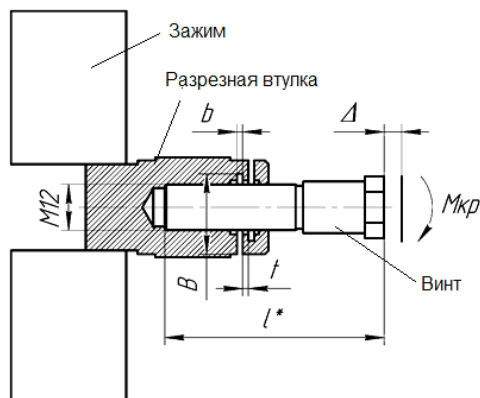


Рисунок 6. – Схема физической модели перемещений и крутящих моментов

Для разжатия образцов используются мерные пластины, вставляемые в пазы втулки. Выбор размера пластин определяется заданным шагом резьбы. Для сжатия образцов используется специальный съемник. Отклонение перемещений винта фиксируется на измерительном микроскопе модели Norgau NVM-4030D. На данном микроскопе также измеряются размеры пазов во втулке и шаг резьбы. Для измерения крутящего момента используется динамометрический ключ.

Жесткость резьбового соединения определяется с помощью динамометра модели ЗИП 05-82.

В результате экспериментальных исследований установлено (таблица 2), что отклонения длины втулки до и после разжатия близки к размерам ширины пазов и кратны шагу резьбы.

Таблица 2. – Разница размеров втулок до и после разжатия

№ втулки	Ширина паза (b), мм	Шаг паза (t), мм	Глубина паза (B), мм	Значения выполненных измерений			Среднее
				измерение 1	измерение 2	измерение 3	
1	1	1	18	1,06	1,01	1,08	1,05
2	1	1	21	1,07	1,01	0,98	1,02
3	1	1,5	18	1,02	1,12	1,06	1,07
4	1	1,5	21	0,94	0,96	1,02	0,98
5	1,5	1	18	1,51	1,43	1,51	1,49
6	1,5	1	21	1,57	1,6	1,44	1,54
7	1,5	1,5	18	1,48	1,55	1,5	1,51
8	1,5	1,5	21	1,46	1,44	2,5	1,47

Измерение крутящих моментов показывает (таблицы 3, 4), что уменьшение зазора в резьбовом соединении (резьба M12 6h) приводит к росту значений крутящих моментов примерно в 1,3...1,5 раза.

Таблица 3. – Моменты от винта 6h при разжатии втулки

№ образца	Ширина паза (b), мм	Шаг паза (t), мм	Глубина паза (B), мм	Момент, Н·м (расклинено)	Момент, Н·м (вставки убраны)	Плечо, м
1	1	1	18	1	1,5	0,1
2	1	1	21	0	0,5	0,1
3	1	1,5	18	0,5	1	0,1
4	1	1,5	21	0	0,5	0,1
5	1,5	1	18	0	0	0,1
6	1,5	1	21	0	0	0,1
7	1,5	1,5	18	2,5	8	0,1
8	1,5	1,5	21	1,5	4	0,1

Таблица 4. – Моменты от винта 6g при разжатии втулки

№ образца	Ширина паза (b), мм	Шаг паза (t), мм	Глубина паза (B), мм	Момент, Н·м (расклинено)	Момент, Н·м (вставки убраны)	Плечо, м
1	1	1	18	0,5	1	0,1
2	1	1	21	0	0,5	0,1
3	1	1,5	18	0	0,5	0,1
4	1	1,5	21	0	0,5	0,1
5	1,5	1	18	0	0	0,1
6	1,5	1	21	0	0	0,1
7	1,5	1,5	18	1	5	0,1
8	1,5	1,5	21	0	2,5	0,1

Значения крутящих моментов также возрастают при уменьшении глубины паза с 21 до 18 мм.

Установлено, что винт перемещается без люфтов и резьба не деформируется при равной ширине и шаге пазов и их значениях, равных от одного до двух шагов резьбы.

Аналогичные зависимости отклонений длины втулки и крутящих моментов установлены при исследовании резьбовых соединений в предварительно сжатом состоянии (таблицы 5, 6): при уменьшении зазора в резьбе (винт М12 6h) крутящий момент возрастает примерно в 1,5 раза; моменты в резьбовом соединении при ввинчивании винта в сжатую втулку не возникают из-за отсутствия отклонения осей двух частей втулки; винт перемещается без люфтов, резьба не деформируется при равной ширине и шаге пазов в пределах от одного до двух шагов резьбы.

Таблица 5. – Моменты от винта 6h при сжатии втулки

№ образца	Ширина паза (b), мм	Шаг паза (t), мм	Глубина паза (B), мм	Момент, Н·м (сжато)	Момент, Н·м (напряжение снято)	Плечо, м
1	1	1	18	0	1,5	0,1
2	1	1	21	0	1	0,1
3	1	1,5	18	0	1	0,1
4	1	1,5	21	0	0,5	0,1
5	1,5	1	18	0	0	0,1
6	1,5	1	21	0	0	0,1
7	1,5	1,5	18	0	4,5	0,1
8	1,5	1,5	21	0	2	0,1

Таблица 6. – Моменты от винта 6g при сжатии втулки

№ образца	Ширина паза (b), мм	Шаг паза (t), мм	Глубина паза (B), мм	Момент, Н·м (сжато)	Момент, Н·м (напряжение снято)	Плечо, м
1	1	1	18	0	1	0,1
2	1	1	21	0	0,5	0,1
3	1	1,5	18	0	0	0,1
4	1	1,5	21	0	0,5	0,1
5	1,5	1	18	0	0	0,1
6	1,5	1	21	0	0	0,1
7	1,5	1,5	18	0	4	0,1
8	1,5	1,5	21	0	2	0,1

Значения крутящих моментов при предварительном сжатии втулок ниже на 25...50% по сравнению с разжатым, что позволяет изготавливать втулки с большими значениями размеров паза при больших значениях шага резьбы. Измерение жесткости разрезных втулок показывает, что увеличение глубины паза с 18 до 21 мм приводит к уменьшению жесткости втулки в 1,5...1,7 раза.

Результаты проведенного моделирования и экспериментальных исследований позволили предложить расточной инструмент [4], в котором глубина пазов определяется по формуле:

$$B = D - t,$$

где  $D$  – внешний диаметр резцедержателя;  $t$  – шаг пазов.

Разработан широкий спектр расточных головок, патронов и резцовых вставок, реализующих инструментальную систему БМРРИ [3]. Отличительная особенность этого ряда инструментов – наличие унифицированной разрезной резьбовой втулки, позволяющей компенсировать зазоры в резьбе. Например, разработанная резцовая вставка (рисунок 7) включает: сборочный узел «резьбовая вставка» 1; стакан 2; втулку 3; шарик 4; пробку 5.

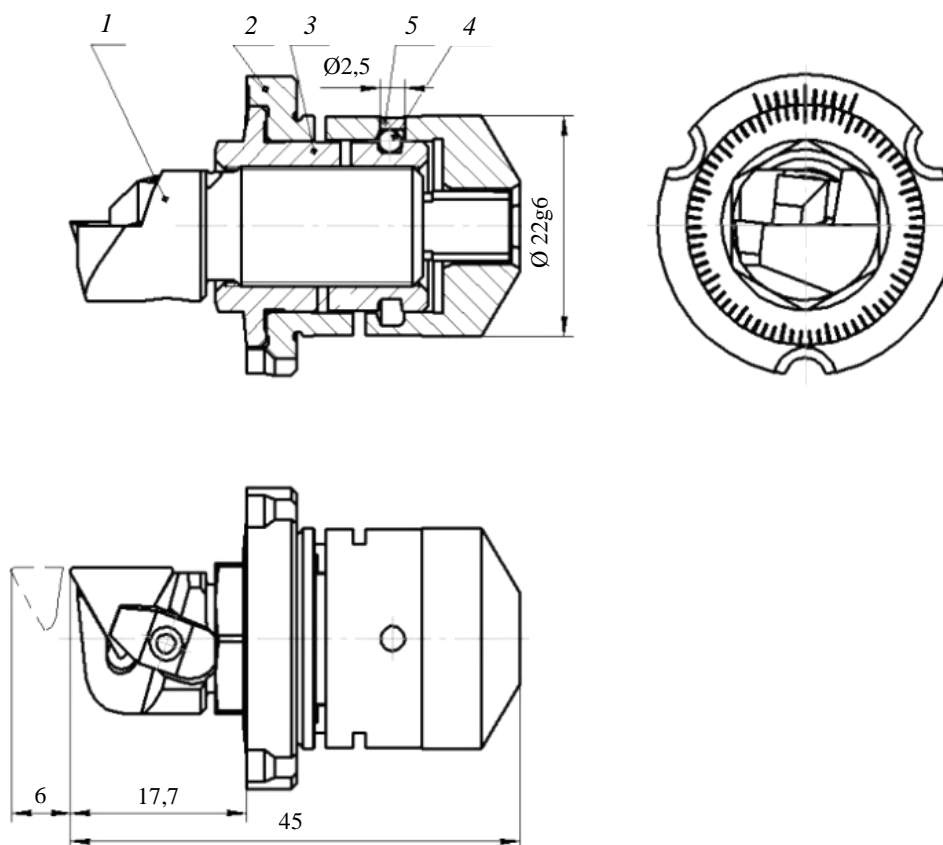


Рисунок 7. – Резцовая вставка с креплением режущей пластины прихватом

В «резьбовой вставке» 1 державка-винт служит для установки режущей пластины и ее перемещения за счет резьбового соединения с втулкой 3, выполненного со степенью точности 4g...6g.

Для компенсации возможных зазоров в резьбовом соединении во втулке выполнены радиальные пазы, размеры которых определяются на основе рассмотренных выше результатов моделирования и эксперимента. На внешней поверхности втулки 3 и внутренней поверхности стакана 2 выполнена канавка, в которую при сжатии разрезной втулки устанавливаются закаленные шарики 4 через отверстие в стакане, закрываемое пробкой 5. Шарики перекатываются в канавках втулки и стакана, передают упругую силу от стакана к втулке, минимизируя тем самым зазор в резьбовом соединении. Шарики также способствуют уменьшению трения в резьбе при значительных усилиях предварительного натяга.

Лабораторные и производственные испытания экспериментальных образцов резцовых вставок показали их работоспособность.

Точностные параметры резцовых вставок не уступают зарубежным аналогам.

**Заключение.** Конечным итогом проведенного исследования стали следующие научные результаты:

- получена математическая модель расчета напряжений и перемещений в БМРРИ, позволяющая оптимизировать геометрические параметры винта и разрезной втулки в механизмах настройки режущих лезвий;

- *установлены зависимости* напряжений и перемещений модулей от нагрузок на механизм настройки, позволяющие научно обосновать уменьшение зазоров в резьбовом соединении для повышения точности и жесткости инструмента;

- *даны рекомендации* для создания требуемого натяга в резьбовом соединении, в котором предварительное сжатие резьбовой втулки со следующими размерами пазов: глубина – 4/5 от диаметра втулки, ширина и шаг равны и изменяются в диапазоне их размеров от одного до двух шагов резьбы;

- *разработана инструментальная система и новые конструкции* блочно-модульных расточных головок, патронов и резцовых вставок, отличающихся повышенной точностью и жесткостью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Попок, Н.Н. Анализ тенденций проектирования инструментальных систем // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 3. – Ч. 1 : Термины и системы обозначений режущих пластин, державок и модулей. – С. 71–81.
2. Herasimau, A. Cartridge toolholders and boring heads for high-precision holes treatment / N. Popok // Materials of VI junior researchers' conference, 2012. – P. 91–94.
3. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 316 с. – (Технологические комплексы: проектирование, производство, применение).
4. Расточной инструмент : пат. на полез. модель ВУ 9108 / Н.Н. Попок, Терентьев В.А., А.А. Герасимов. – Оpubл. 01.03.2013.

*Поступила 11.02.2019*

#### IMPROVING THE ACCURACY OF BLOCK-MODULAR BORING CUTTING TOOLS

*N. POPOK, A. GERASIMOV, E. TIKHON*

*The system of block-modular boring cutting tools with micrometric blade setting is considered, model of stresses and displacements in a threaded adjustment mechanism is proposed and analyzed, the results of experimental researches of the accuracy and rigidity of tools are given, recommendations on the design of high-precision boring heads, cartridges and tool inserts are given.*

**Keywords:** *boring cutting tools, accuracy, tool inserts, modeling.*