

Ажар А. В., Минасян Г. О., Якимович А. М.

## АНАЛИЗ НАРАБОТКИ КОМБИНИРОВАННЫХ ОСЕВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ НА БАЗЕ РЕСУРСНОЙ МОДЕЛИ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

*Рассмотрены типы крепежных отверстий и технологические приемы их обработки стандартными и комбинированными осевыми инструментами (КОИ). Представлены существующие стратегии и математические модели оптимизации операций механической обработки отверстий, рекомендации по назначению режимов резания при использовании КОИ. Предложена модель оптимизации режимов резания при работе КОИ по критериям максимального использования ресурса инструмента. Проведен анализ эффективности комбинированной механической обработки крепежных отверстий на станках с ЧПУ на базе принятых и новых стратегий управления процессом резания по критериям максимальной временной, штучной наработки на отказ, полной (ресурсной) выработки и максимальной производительности инструмента.*

**Актуальность темы и краткий анализ вопроса исследований.** При изготовлении деталей в условиях машиностроительного производства одной из ключевых поверхностей подвергаемой механической обработке является отверстие. Разнообразие форм, размеров и их взаимного расположения на деталях различной конфигурации связана с широким спектром задач, возлагаемых на данный элемент конструкции. Это база для крепежа и соединения деталей, опора для подшипников и валов, поршней и цилиндров, канал для подвода технических и рабочих жидкостей и т. д. Доля общей трудоемкости, приходящейся на механическую обработку отверстий сопоставима с долей приходящейся на обработку остальных поверхностей не только из-за количества, но и требований точности размеров и взаимного положения предъявляемых к ним. При обработке корпусных деталей на многооперационных станках и автоматических линиях отверстия составляют до 75 % от всех обрабатываемых поверхностей [1].

Комбинированная механическая обработка является эффективным средством повышения производительности и качества изготовления изделий машиностроения. Технология совмещения операций и переходов находит применение как на многошпиндельных агрегатных станках и токарных автоматах, так и экономически оправдывая себя при увеличении сложности обработки и максимальной загрузки современных станков с ЧПУ. Наиболее эффективно данную технологию реализуют комбинированные инструменты, создаваемые соединением стандартных инструментов (их частей) одного или разного функционального назначения с последовательным или чередующимся расположением вдоль оси или движения подачи.

Комбинированные в большинстве случаев относятся к специальным, реже специализированным инструментам, и имеют целевое назначение только для обработки определенных деталей. Они находят себе место главным образом в серийном и массовом производстве. Однако появление инструментов многофункционального назначения (сверлофреза, сборные инструментальные блоки, инструменты с регулируемой геометрией и

пр.), реализующих различные схемы обработки, как одноступенчатых, так и многоступенчатых отверстий на станках с ЧПУ позволяет расширить технологические возможности КОИ и сделать их применение более универсальным.

Отверстия, которые могут быть обработаны КОИ, составляют до 90 % от всех обрабатываемых поверхностей данного типа и до 35 % от всех обрабатываемых поверхностей, используемых в машиностроении [2].

Задачи оптимизации операций механической обработки отверстий с использованием КОИ следует рассматривать комплексно с учетом выбора метода формообразования, схемы и последовательности срезания припуска, конструктивного исполнения инструмента и параметров режима резания.

Предварительный анализ показал, что комплексного решения поставленной задачи оптимизации не существует, а математические модели для определения оптимальных режимов резания при обработке КОИ практически отсутствуют или недоработаны.

Режимы резания для КОИ принято выбирать по лимитирующим ступеням. Это характерно для параллельной и параллельно-последовательной схемы работы ступеней, либо при работе инструмента на заданных режимах и отсутствии регулирования частоты вращения и подачи в цикле резания. Как правило, лимитирующей ступенью при выборе подачи принимают ступень с минимальным диаметром, а при выборе скорости резания – с максимальным диаметром. Назначение режимов резания по лимитирующим ступеням ведет к неполному использованию потенциальных возможностей других ступеней КОИ, 1,1–1,5 раза по подаче и 1,5–2,5 по скорости резания в зависимости от соотношения диаметров и длин ступеней. Была предпринята попытка повышения использования ресурса не лимитирующих ступеней КОИ путем назначения подачи по средневзвешенному диаметру. Однако, повышение величины подачи требует уменьшения скорости резания, что может привести к потере производительности.

Есть предложение предварительно принимать в качестве лимитирующей ступень с максимальной длиной резания, а окончательный выбор путем сравнения выработки ресурса ступеней инструмента за период его наработки на отказ [3; 4].

В ходе выполнения поиска возможностей для повышения использования ресурса всех ступеней КОИ как по подаче, так и по скорости резания предложена математическая модель выбора наиболее выгодных режимов резания для КОИ, на основе решения минимаксной задачи с техническими ограничениями. В качестве целевых функций приняты среднеквадратическое отклонение от средней скорости резания, среднеквадратическое отклонение от средней подачи на оборот и время обработки [5]. Полученная модель позволяет находить такое сочетание параметров режима резания, которое удовлетворяет всем трем условиям: минимальным среднеквадратическим отклонениям от средней скорости резания, подачи на оборот и минимальному времени обработки при этом, обеспечивая требуемую точность отверстий.

Однако наиболее эффективными являются стоимостные критерии – себестоимость и удельные приведенные затраты, как наиболее полно описывающие материальные и овеществленные затраты на производство. Следует учитывать дополнительные ограничения, связанные с требованием максимального использования ресурса инструмента, обеспечиваемого равной или кратной стойкостью ступеней, а также требование достижения заданного уровня надежности в связи с разбросом ее характеристик из-за нестабильности свойств обрабатываемого изделия и качества инструмента [6–8].

Использование стоимостных критериев оптимизации операции механической обработки отверстий на этапе ее разработки затруднено факторами неопределенности доли затрат на инструмент и его эксплуатацию в общей себестоимости обработки детали. Проблемы с оценкой затрат на инструмент связаны с тем, что выбор метода и схемы обра-

ботки отверстия влияют на конструкцию КОИ, его габаритные размеры, способ и трудозатраты на восстановление работоспособности после отказа, путь резания и ограничения при назначении режимов резания. Минимизация затрат на операцию при выбранном методе, схеме и конструкции КОИ за счет оптимального сочетания параметров режима резания характеризуется дополнительными кинематическими и ресурсными ограничениями. Для каждой стратегии оптимизации необходима своя математическая модель, учитывающая большое количество факторов и ограничений, с дальнейшим сравнением результатов для принятия взвешенного решения. Такой подход даже при наличии средств автоматизации расчета оптимизационных функций сопряжен с большим объемом работ по технологической подготовке производства.

Более эффективным является принцип разработки типовых рекомендаций при выборе стратегии параметрической оптимизации основанный на обеспечении частных критериев: максимального ресурса (минимальной относительной наработки на отказ ступеней и максимальной наработки всего КОИ) и максимальной производительности (минимального операционного и штучного времени) в условиях привязки скорости резания инструмента к параметрам конструкции, выраженной отношением диаметров и длин ступеней КОИ. Выявление корреляционной связи между параметрами конструкции КОИ и факторами, лимитирующими назначение параметров режима резания для наиболее распространенных ступенчатых (крепежных) отверстий позволит упростить выбор стратегии оптимизации конструкции и параметров эксплуатации КОИ, а также провести экспресс-оценку результатов исходя из приоритетов производства (программы выпуска деталей, применяемого оборудования, степени автоматизации).

**Цель работы.** Повышение конкурентоспособности и эффективности использования современных комбинированных инструментов автоматизированного производства путем разработки технически обоснованных конструкторско-технологических методов повышения работоспособности.

**Задачи исследований.**

1. Провести анализ форм и видов отверстий, наиболее подходящих для комбинированной механической обработки на современном автоматизированном оборудовании с цифровым управлением.

2. Описать стратегии, методы и критерии оптимизации параметров процесса обработки отверстий КОИ.

3. Оценить возможность и эффективность использования в качестве ресурсных критериев работы КОИ показателей временной стойкости, штучной наработки на отказ, относительной наработки на отказ, выраженной относительной временной и штучной наработкой отдельных ступеней инструмента.

4. Проанализировать принятые стратегии и построенные на их основе модели оптимизации с точки зрения функциональной взаимосвязи с конструктивными параметрами КОИ для обработки крепежных отверстий и предлагаемыми схемами резания (параллельными, последовательными, параллельно-последовательными).

5. Оценить область эффективного использования принятых стратегий назначения режимов резания, схем резания и конструкций при использовании как КОИ, так и нормализованных инструментов при обработке стандартных крепежных отверстий на основе критериев обеспечения максимального ресурса (относительной и общей наработки на отказ) инструмента и производительности обработки.

6. Разработать рекомендации по конструированию и эксплуатации готовых КОИ для обработки крепежных отверстий на основе приведенных исследований.

**Типы крепежных отверстий и технологические приемы их обработки стандартными (нормализованными) и КОИ.** Значительная часть отверстий подвергаемых механической обработке в деталях механизмов и машин – это отверстия под крепеж.

Большинство из них имеет типовую форму и стандартизированный размерный ряд. При обработке нормализованных отверстий под крепеж КОИ традиционно применяются чаще. Это связано с достаточной простотой конструкции применяемого КОИ: число ступеней не более 3-х, однотипного или близкого по функционалу исполнения, невысокой точности, с некритичным вылетом и перепадом диаметров ступеней. Такие инструменты достаточно успешно реализуются на базе нормализованных инструментов путем переточки рабочей части или сборных модулей с использованием унифицированных вставок, блоков, СМП.

Для совмещения операций или переходов при обработке ступенчатых, резьбовых и гладких крепежных отверстий применяются всевозможные комбинированные инструменты наиболее распространенными из которых являются ступенчатые сверла и ступенчатые зенкеры, сверла-зенкеры, сверла-зенкеры-развертки, сверла-зенкеры-зенковки. Сюда же можно отнести сверла-метчики [9].

Типы стандартных отверстий (рис. 1), которые могут применяться для крепежа деталей машин и технологические приемы их обработки исследованы в работе [10].

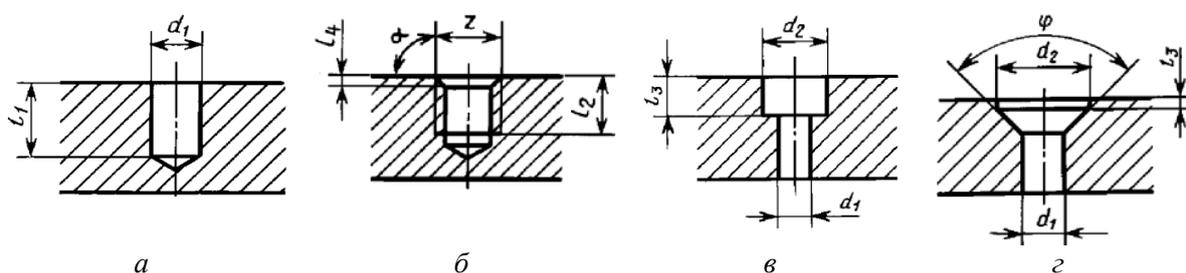


Рис. 1. Типы стандартизованных крепежных отверстий:

*a* – глухое (сквозное) гладкое отверстие; *б* – глухое (сквозное) отверстие с конической фаской или фаской под резьбу; *в* – ступенчатое сквозное отверстие с поднутрением перпендикулярным оси; *г* – сквозное отверстие с комбинированной фаской

Для данных типов крепежных отверстий допускается использовать комбинированный режущий инструмент особенно в случае большого количества типовых отверстий, приходящихся на одну деталь.

КОИ по сравнению с обычными инструментами получают, как правило, следующие преимущества [2]:

1. Сокращается основное технологическое и вспомогательное время (подвод и отвод инструмента, его смена и наладка) и соответственно повышается технологическая и цикловая производительность.

2. Уменьшается количество оборудования, сокращаются расход электроэнергии, производственные площади, количество основных и вспомогательных рабочих, повышается надежность оборудования, а значит, снижается и себестоимость продукции.

3. Повышается соосность и точность расположения отдельных ступеней обрабатываемых отверстий.

Однако, на практике при использовании КОИ можно столкнуться с проблемой неполной выработки ресурса инструмента из-за неравномерного износа, разброса нагрузок, приводящих к разрушению режущих кромок, вставок и пластин инструмента находящихся на разных его ступенях и имеющих различный диаметральный и осевой вылет. Различная скорость резания на различных участках инструмента требует более тщательного контроля и регулировки процессов работы для равномерного износа пластин, что существенно влияет на повышение эффективности при обработке отверстий с использованием КОИ. Стоимость таких инструментов, как и стоимость их эксплуатации выше,

чем у нормализованных инструментов, что требует более тщательно относиться к надежности и регламентации смены режущей части при наработке на отказ.

Как показал анализ факторов и условий оптимизации операции механической обработки отверстий КОИ существует ряд эксплуатационных проблем, связанных с выбором критерия наработки на отказ и расчетом оптимальных режимов резания, обеспечивающих максимальный ресурс и производительность инструмента [3; 4; 6; 7].

Ресурс комбинированного инструмента, выраженный в минутах резания (непрерывной работы) лимитирующей ступени при наработке на отказ часто не соответствует возможной выработке остальных ступеней, выраженной допустимым количеством обработанных отверстий из-за разности пути резания и площади сечения среза разных ступеней инструмента. Стратегия выбора лимитирующей ступени и основанная на ней модель параметрической оптимизации режимов резания при обработке отверстий КОИ существенно влияет на производительность обработки.

Произведем анализ работоспособности КОИ при обработке крепежных отверстий с целью определения влияния конструктивных параметров КОИ и условий их эксплуатации на выбор наилучшей стратегии и модели параметрической оптимизации режимов резания при механической обработке крепежных отверстий, основанной на обеспечении заданного ресурса инструмента и производительности обработки.

**Анализ размеров стандартных крепежных отверстий и их связь с параметрами КОИ.** Рассмотрим и проанализируем конструктивные параметры типовых крепежных отверстий с поднутрением перпендикулярным оси по ГОСТ 12876–67 «Поверхности опорные под крепежные детали» и ГОСТ 11284-75 «Отверстия сквозные под крепежные детали» (рис. 2). Данные отверстия могут применяться для установки крепежа в соответствии с ГОСТ 50796-95 «Болты с шестигранной головкой классов точности А и В», ГОСТ 11738-84 «Винт с внутренним шестигранником и цилиндрической головкой» и т. д.

Для каждого типа отверстий предложен размерный ряд, состоящий из 13 типоразмеров, определяемых диаметром основной (меньшей) ступени, которым поставлен в соответствие КОИ сверло-зенкер (сверло – цековка).

На графике представленном на рис. 3 наблюдается уменьшение отношения диаметров ступеней КОИ  $D_2/D_1$ , зенкером и сверлом, соответственно, с увеличением диаметра  $D_1$  основной ступени обрабатываемого крепежного отверстия с поднутрением по ГОСТ 12876–67 коэффициент  $u_D$  отношения диаметра зенкера к диаметру сверла варьируется в диапазоне от 3,13 до 2,06.

На графике представленном на рис. 4 наблюдается увеличение отношения длин обработки ступенями КОИ  $L_1/L_2$ , сверлом и зенкером соответственно, с увеличением диаметра  $D_1$  основной ступени обрабатываемого крепежного отверстия. График носит немонотонный характер, т. к. рассматривается с точки зрения усредненного значения длины обработки  $L_1$  (глубины основного отверстия). Коэффициент отношения длин  $u_L$  варьируется в диапазоне от 6,75 до 11,49.

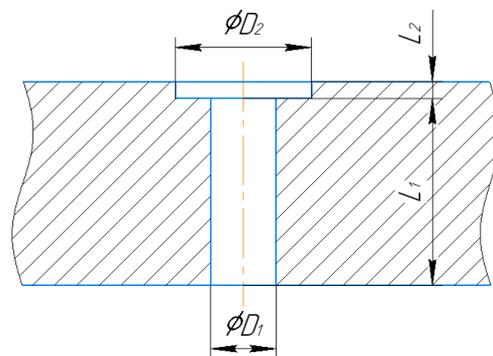


Рис. 2. Типовая схема крепежного отверстия с поднутрением

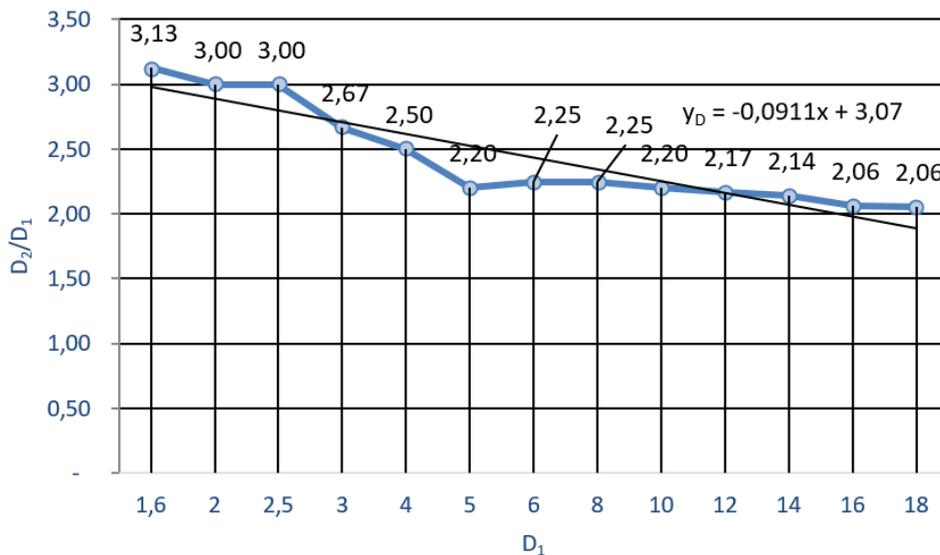


Рис. 3. Отношение диаметров ступеней КОИ от диаметра отверстия  $D_1$  с поднутрением (линия тренда на графике:  $y_D = \frac{D_2}{D_1}$ ,  $x = D_1$ )

Рост диаметра обрабатываемого отверстия сопровождается уменьшением отношения диаметров ступеней КОИ и увеличением отношения длин обработки ступенями инструмента. Интенсивность увеличения отношения длин обработки примерно в 3 раза выше интенсивности уменьшения отношения диаметров ступеней КОИ, что должно стать основным фактором при назначении режимов обработки, обеспечивающих максимальный ресурс при заданной производительности.

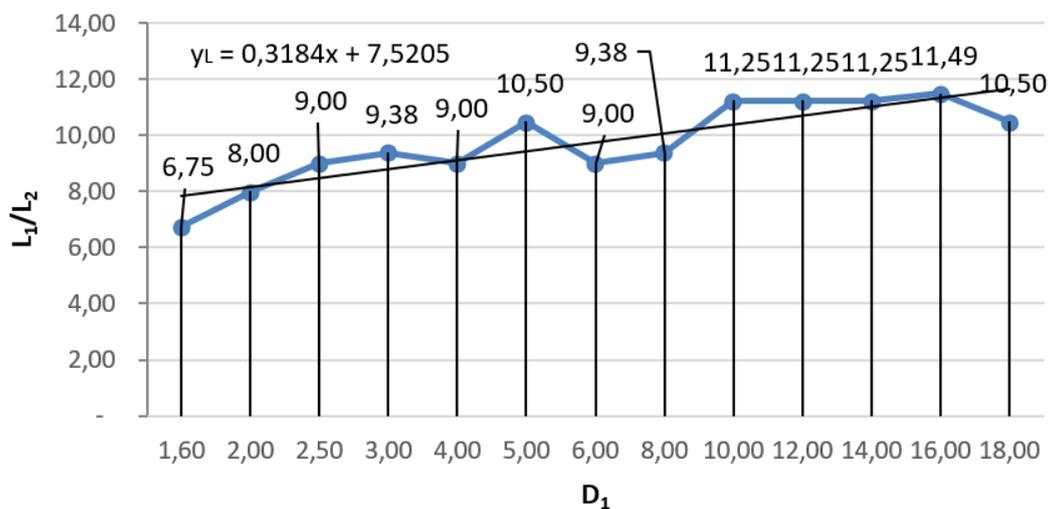


Рис. 4. Отношение длин обработки ступенями КОИ от диаметра отверстия  $D_1$  с поднутрением (линия тренда на графике:  $y_L = \frac{L_1}{L_2}$ ,  $x = D_1$ )

**Методики расчета режимов резания и параметров наработки на отказ КОИ.** Одной из особенностей обработки большинства крепежных отверстий является неизменность режимов резания таких как подача на оборот  $S_0$  и частота вращения инструмента

(детали)  $n$  в течении всего цикла обработки ступенчатого отверстия, что связано с кинематическими ограничениями станка и невозможностью изменения режимов обработки из-за частично-одновременной обработки отверстий ступенями ряда КОИ. Полное независимое управление режимами допустимо только при обработке сквозных отверстий, применении конструкций КОИ обеспечивающих полный выход текущей ступени перед входом в обработку следующей и кинематической возможности станка переключать частоту вращения и (или) подачу при рабочем ходе инструмента. Эффект от применения данного подхода неочевиден, т. к. связан с увеличением длины резания и самого инструмента, а также с ростом сложности применяемого оборудования. При этом отсутствует гарантия, что удастся добиться оптимальных режимов из-за сопутствующих ограничений на жесткость, точность, износостойкость инструмента.

Таким образом, расчет режимов резания для КОИ предлагается проводить 3-мя методами с определением частоты вращения инструмента:

1. По принятой скорости резания ступени с большим диаметром.
2. По принятой скорости резания ступени с большей длиной резания.
3. По средней скорости резания ступеней и среднему, максимальному или минимальному диаметру КОИ.

Первоначально определяется скорость резания  $v_{i \text{ лим.}}$  (м/мин) лимитирующей ступени (**1 и 2 метод**) или скорости резания обеих ступеней  $v_1$  и  $v_2$  (**3 метод**) по эмпирическим зависимостям [11] или табличным данным [12], соответствующим экономически обоснованной стойкости работы инструмента выраженной в минутах времени резания.

Частота вращения инструмента 1-м и 2-м методом определяется по формуле (1),  $\text{мин}^{-1}$ :

$$n = \frac{1000 \cdot v_{i \text{ лим.}}}{\pi \cdot D_{i \text{ лим.}}}, \quad (1)$$

где  $D_{i \text{ лим.}}$  – диаметр лимитирующей ступени КОИ, мм;

$i$  – номер лимитирующей ступени КОИ.

При определении частоты вращения инструмента **3-м методом** первоначально определяем значение средней скорости резания по формуле (2), м/мин:

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_1 + v_2}{2}. \quad (2)$$

Расчет частоты вращения инструмента  $n$  по **3-му методу** будет производиться **3-мя способами**.

1. Частота вращения инструмента определяется через среднюю скорость резания  $v_{\text{ср}}$  и средний диаметр инструмента  $D_{\text{ср}}$ :

$$n_1 = \frac{1000 \cdot v_{\text{ср}}}{\pi \cdot D_{\text{ср}}}, \quad (3)$$

где  $D_{\text{ср}} = \frac{D_1 + D_2}{2}$ , мм.

2. Частота вращения определяется через  $v_{\text{ср}}$  и меньший диаметр 1-ой ступени инструмента  $D_1$ :

$$n_2 = \frac{1000 \cdot v_{\text{ср}}}{\pi \cdot D_1}. \quad (4)$$

3. Частота вращения определяется через  $v_{cp}$  и больший диаметр 2-ой ступени инструмента  $D_2$  :

$$n_3 = \frac{1000 \cdot v_{cp}}{\pi \cdot D_2}. \quad (5)$$

Расчет фактической скорости резания не лимитирующей ступени по **1-му** и **2-му методу**, а также фактической скорости резания обеих ступеней инструмента по **3-му методу** осуществляется по формуле (6), м/мин:

$$v_i \text{ факт.} = \frac{\pi \cdot D_i \cdot n}{1000}. \quad (6)$$

Для оценки наработки на отказ КОИ и его ступеней при расчетных значениях режимов резания предложено использовать следующие критерии: стойкость, выраженная в минутах времени резания, путь резания за период стойкости, выраженный в метрах обработанной поверхности и количество обработанных отверстий до смены или переточки КОИ.

Минутную стойкость не лимитирующих ступеней КОИ (**1 и 2 метод**) и стойкость обеих ступеней инструмента (**3 метод**) по полученным скоростям резания определяем по эмпирической степенной зависимости (7), мин:

$$T_i = \left( \frac{C_V \cdot D_i^q}{v_i \text{ факт.} \cdot t_i^x \cdot S^y} \cdot K_{Mv} \cdot K_{Пv} \cdot K_{Иv} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (7)$$

где  $D_i$  – диаметр ступени инструмента, мм;  $S$  – оборотная подача инструмента, мм/об;  $t_i$  – глубина резания ступени инструмента, мм; значения коэффициентов, определяющих условия обработки  $C_V$ ,  $K_{Mv}$ ,  $K_{Пv}$ ,  $K_{Иv}$  и показателей степени  $m$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $q$ , приводятся в соответствующих таблицах [11]. Для обработки отверстия сверлом в сплошном материале значение показателя степени  $x = 0$ .

Путь резания за период стойкости ступени инструмента, мм:

$$L_i = n \cdot S_o \cdot T_i = S_m \cdot T_i, \quad (8)$$

где  $n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D}$  – частота вращения инструмента, мин<sup>-1</sup>;

$S_m = n \cdot S_o$  – минутная подача, мм/мин.

Количество обработанных отверстий (деталей) до смены или переточки режущих элементов (пластин, вставок) ступени инструмента, шт:

$$N_i = \frac{L_i}{l_i}, \quad (9)$$

где  $l_i$  – длина резания  $i$  ступенью инструмента, мм.

Для автоматизации расчета режимов резания, наработки на отказ и производительности обработки крепежных отверстий по предложенным методикам и упрощения анализа параметров работоспособности КОИ разработано программное обеспечение (ПО) реализованное в офисном приложении MS Excel, в виде электронных таблиц и формиру-

ющее массив расчетных значений с построением графиков связывающих конструктивные параметры с параметрами наработки на отказ ступеней инструмента и производительностью выполнения операции.

ПО апробировано на примере обработки ступенчатых отверстий под крепеж в широком диапазоне диаметров и длин резания в деталях из конструкционной стали с твердостью 160...240 НВ, как нормализованными (сверло, зенкер), так и КОИ типа сверло-зенкер из быстрорежущей стали. Результаты расчета в графической и аналитической интерпретации удобной для анализа приведены далее.

**Анализ параметров наработки на отказ КОИ при обработке отверстий с поднутрением при выборе стратегии назначения режимов резания по ступени с большим диаметром (метод 1).**

Расчет режимов резания для КОИ произведен по лимитирующей ступени, имеющей больший диаметр  $D_2$  и определяющей размер поднутрения (рис. 2). Подача для всех случаев обработки принята одинаковая, имеющая допустимое значение для заданных условий резания. Стойкость лимитирующей ступени  $T_2$  имеет нормативную величину в диапазоне 20–30 мин по которой рассчитана скорость резания 2-ой ступени и частота вращения всего КОИ.

На графике представленном на рис. 5 наблюдается уменьшение отношения стойкости ступеней КОИ  $T_1/T_2$ , выраженной в минутах времени резания, с увеличением диаметра обрабатываемого отверстия до  $D_1 = 5$  мм. Расчетная стойкость 1-ой ступени КОИ  $T_1$  при принятом методе назначения режимов резания уменьшается, что связано с трендом на уменьшение отношения диаметров ступеней для заданной группы КОИ, обрабатывающих крепежные отверстия с поднутрением.

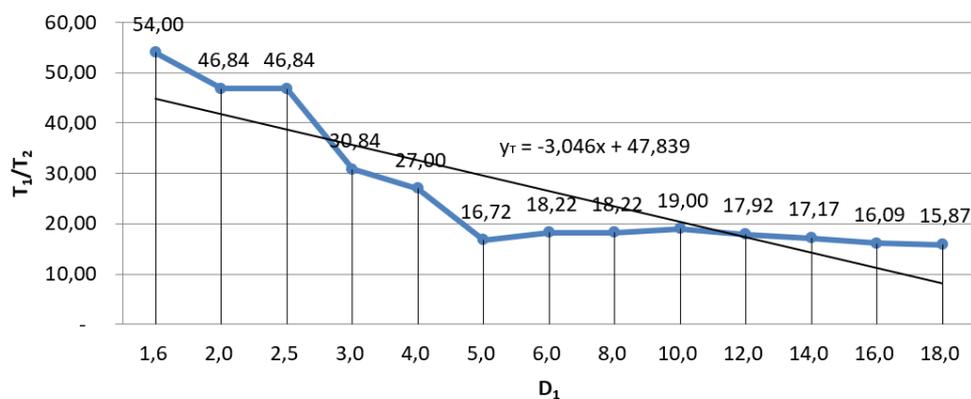


Рис. 5. График зависимости отношения временной стойкости ступеней КОИ  $T_1/T_2$  от диаметра

$$D_1 \text{ крепежного отверстия (линия тренда на графике: } y_T = \frac{T_1}{T_2}, x = D_1)$$

В диапазоне диаметров обработки  $D_1 = 6–18$  мм происходит стабилизация отношения  $T_1/T_2$  в связи с пропорциональным ростом  $T_2$  и  $T_1$  из-за выравнивания отношения  $D_2/D_1$  и  $L_1/L_2$ . Так отношение  $T_1/T_2$  варьируется в диапазоне от 54 до 15,87 в сторону увеличения диаметра обрабатываемого отверстия. Нарработка на отказ, выраженная длиной пути резания за период стойкости КОИ, имеет отношение  $L_{max}/L_{min}$ , равное отношению  $T_1/T_2$ .

Кривая относительной штучной наработки на отказ  $N_{max}/N_{min}$ , выраженная отношением количества обработанных отверстий ступенями КОИ (рис. 6), имеет форму аналогичную кривой относительной стойкости  $T_1/T_2$ . Линия тренда кривой  $N_{max}/N_{min}$  монотонно убывает в диапазоне от 8 до 1,4 при увеличении диаметра отверстия.

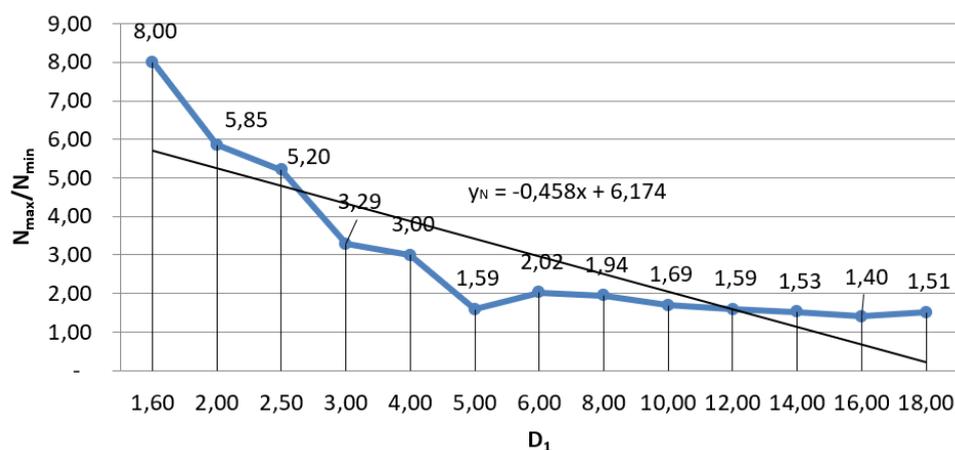


Рис. 6. График зависимости отношения количества обработанных отверстий ступенями КОИ  $N_{max}/N_{min}$  за время наработки на отказ от диаметра  $D_1$  крепежного отверстия (линия тренда на

графике:  $y_N = \frac{N_{max}}{N_{min}}$ ,  $x = D_1$ )

Рассматриваемые относительные штучные наработки на отказ варьируются, в значительно меньшем области значений, чем отношения временной стойкости ступеней. Однако диапазон значений относительной штучной наработки ступеней характеризуется 5,7 кратным уменьшением при 3,4 кратном уменьшении относительной временной стойкости, что связано не только с уменьшением отношения диаметров ступеней  $y_D$ , но и ростом отношения длин резания (длины расчетной не лимитирующей ступени)  $y_L$ .

Наиболее выгодными инструментами с точки зрения выработки максимального ресурса при назначении режимов резания по *методу 1* являются те в которых отношение  $N_{max}/N_{min}$  приближается к «единице». В нашем случае это обработка отверстия диаметром  $D_1 = 16$  мм. При этом само отношение  $N_{max}/N_{min} = 1,4$ , что соответствует 40 % потери ресурса, не лимитирующей ступени КОИ.

При анализе всего размерного ряда крепежных отверстий с поднутрением, принятым ГОСТ 12876–67 установлено, что относительная штучная наработки на отказ разных ступеней КОИ  $N_{max}/N_{min}$  уменьшается, при увеличении длины отверстия заданного диаметра. Наименьшая относительная штучная наработки  $y_N$  обеспечивающая максимальный ресурс КОИ при расчете режимов резания по *методу 1* характерна для инструментов, обрабатывающих отверстия с наибольшим диаметром  $D_1$  и длиной основной ступени  $L_1$ . Анализ размеров КОИ показал, что лучшую выработку ресурса при использовании выбранной стратегии назначения режимов резания обеспечивают инструменты с отношением  $y_L / y_D \geq 5$ .

Отношение штучной наработки на отказ  $N_{max}/N_{min}$  получилось в разы меньше отношения  $T_1/T_2$ . Временная стойкость 1-й ступени в десятки раз больше стойкости 2-й ступени, однако при анализе выработки количеством обработанных отверстий эта разница не такая существенная из-за большой роли длины обработки, приходящейся на расчетную не лимитирующую ступень резания КОИ. Данный факт необходимо учитывать при назначении регламента замены данного типа КОИ и оценки его ресурса.

**Анализ общей (по лимитирующей ступени) и относительной штучной наработки на отказ, производительности обработки отверстий с поднутрением нормализованными и КОИ при различных стратегиях назначения режимов резания.**

В ходе моделирования процесса обработки крепежных отверстий с поднутрением при использовании нормализованных инструментов (сверло, зенкер) и КОИ при назначении режимов резания различными методами получены данные позволяющие оценить минимальную штучную наработку на отказ (рис. 7), относительную (ресурсную) наработку (рис. 8) и штучное время, включающее машинное и вспомогательное время обработки отверстий на обрабатывающем центре с ЧПУ (рис. 9).

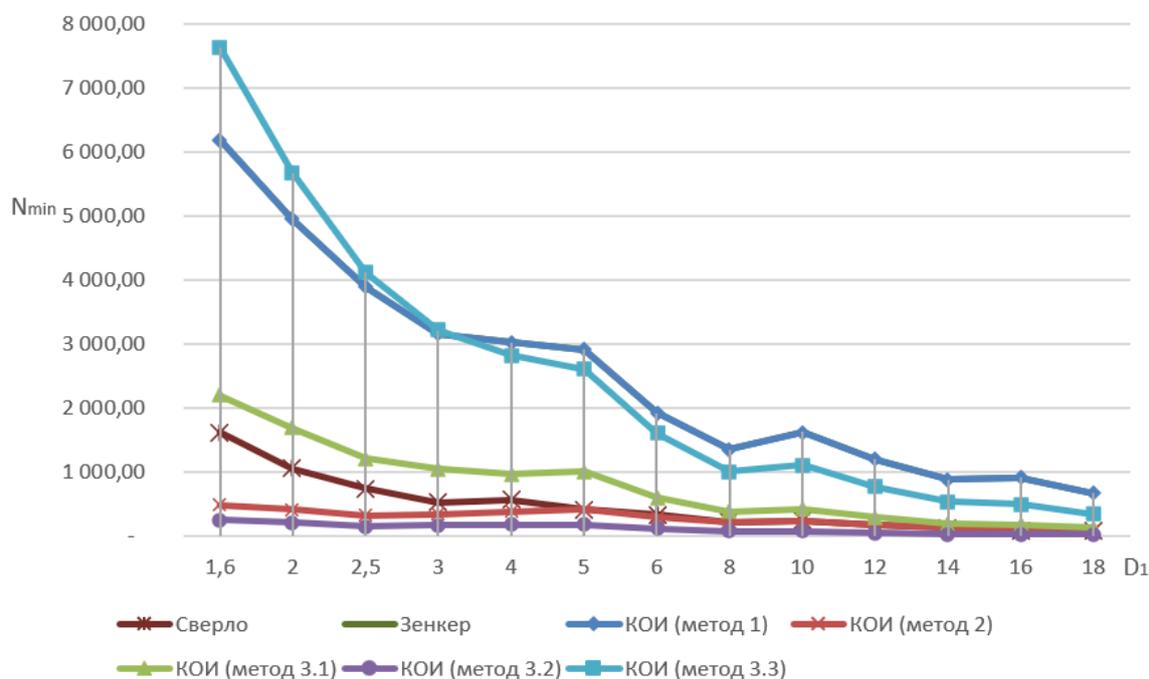


Рис. 7. Штучная наработка до отказа  $N_{min}$  нормализованными или КОИ в зависимости от диаметра  $D_1$  отверстия при разных стратегиях назначения режимов резания

Максимальную штучную наработку на отказ (по лимитирующей ступени) при обработке отверстий с  $D_1 < 3$  мм обеспечивает КОИ с режимами принятыми по **методу 3.3**, при  $D_1 > 3$  мм предпочтительнее назначать режимы **по методу 1** (рис. 7). Минимальную наработку КОИ обеспечивает расчет режимов по **методу 3.2**, немного лучше наработка получается по **методу 2**. При увеличении диаметра крепежного отверстия для большинства методов назначения режимов наработки уменьшаются сближаясь друг к другу. Почти постоянную наработку обеспечивают КОИ с режимами, назначенными по **методу 3.2 и 2**. С точки зрения относительной наработки (рис. 8) с учетом обеспечения максимальной выработки ресурса  $N_{max}/N_{min} \rightarrow 1$  при  $D_1 < 5$  мм лучше пользоваться **методом 3.2**, при  $5 < D_1 < 10$  мм **методом 2**, а при  $D_1 > 10$  мм **методом 3.1**. Худшее использование ресурса КОИ обеспечивают **методы 3.3 и 1**. **Методы 3.2 и 2** дают стабильно низкое отношение наработок на отказ во всем диапазоне диаметров обработки. При обработке отверстий с  $D_1 = 5-18$  мм все стратегии назначения режимов обеспечивают достаточно узкий диапазон относительной наработки *от 2 до 1*, что является хорошим показателем выработки ресурса КОИ.

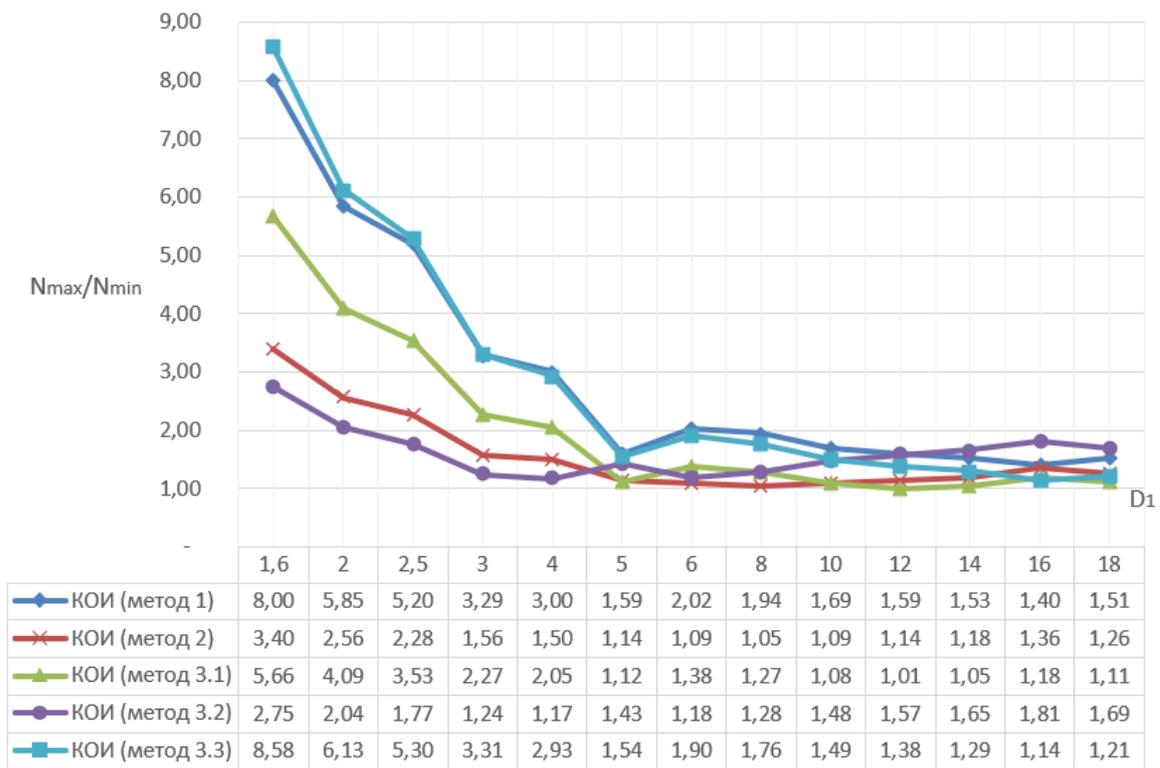


Рис. 8. Относительная штучная наработка до отказа  $N_{max}/N_{min}$  КОИ в зависимости от диаметра  $D_1$  обрабатываемого отверстия при различных стратегиях назначения режимов резания

Анализ производительности показал, что наименьшее штучное время  $T_{шт}$  при обработке всего размерного ряда крепежных отверстий обеспечивает КОИ со стратегией назначения режимов резания по  $V_{ср}$  и  $D_1$  (**метод 3.2**). Удовлетворительную производительность обеспечивает КОИ при назначении режимов по 1-ой ступени (**метод 2**). В диапазоне диаметров отверстий  $D_1 = 1,6-8$  мм предпочтение надо отдавать КОИ при любом методе назначения режимов. При  $D_1 > 8$  мм наихудшую производительность показывает КОИ с назначения режимов по 2-ой ступени (**метод 1**), а при  $D_1 > 10$  мм выбор обработки отверстий последовательно сверлом и зенкером может быть предпочтительнее КОИ с режимами назначенными еще и по **методу 3.3** (точки «А» на рис. 9) и это несмотря на потери времени на подвод, отвод и смену нормализованного инструмента. Увеличение диаметра отверстия приводит не только к увеличению  $T_{шт}$ , но и к росту разницы между  $T_{шт}$  в зависимости от метода назначения режимов резания которая достигает 1567 мин на партию 1000 отв. и кратна 2,2 раза.

Таким образом, **методы 3.2 и 2** обеспечивают наилучшие показатели производительности и максимальной выработки ресурса инструмента. При необходимости обеспечить максимальную наработку на отказ следует применять **методы 1 и 3.3**, имеющие худшие показатели производительности и относительной наработки на отказ КОИ.

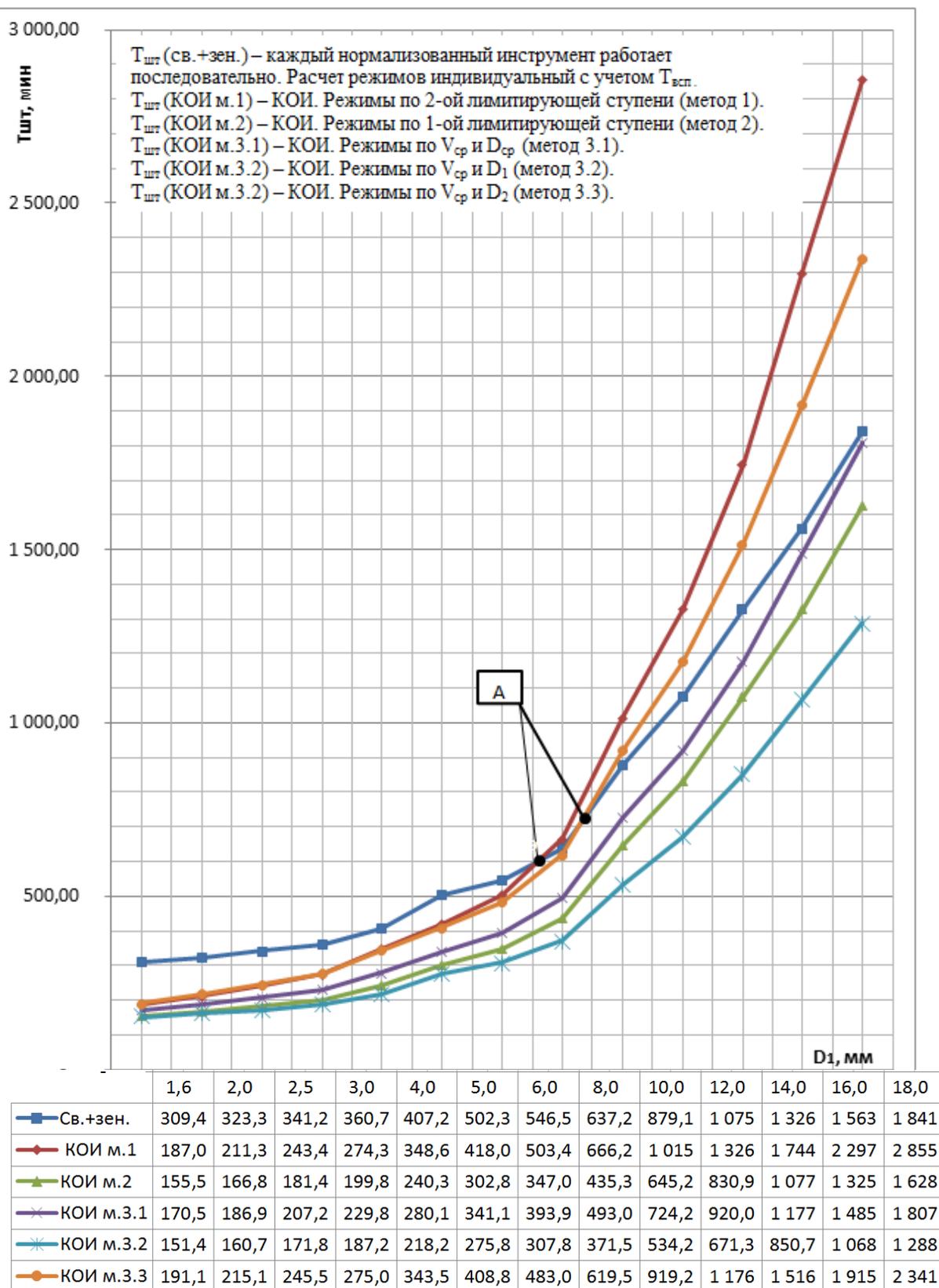


Рис. 9. Штучное время ( $T_{шт}$ ) при обработке отверстий с поднутрением при разных стратегиях управления процессом резания, на партию отверстий 1000 шт.

### **Выводы.**

1. Для **1-го метода** расчета режимов резания ступень КОИ принятая за расчетную (№ 2 большего диаметра) остается лимитирующей как по временной стойкости, так и по количеству отверстий, обработанных до отказа инструмента во всем диапазоне размеров.

2. Для **2-го метода** расчета ступень КОИ принятая за расчетную (№ 1 меньшего диаметра и большей длины) не является лимитирующей по временной стойкости, однако при увеличении диаметра и длины крепежного отверстия становится лимитирующей по количеству отверстий, обработанных до отказа инструмента.

3. Для **3-го метода** расчета ступень № 2 КОИ является лимитирующей по временной стойкости, однако при увеличении диаметра и длины отверстия ступень № 1 становится лимитирующей по количеству отверстий, обработанных до отказа инструмента.

4. При назначении режимов резания по всем **3-м методам** отношение временной стойкости и отношение наработки, выраженной в количестве обработанных отверстий до отказа, уменьшается с увеличением диаметра и длины отверстия относительно условной величины наработки на отказ равной «1», что позитивно сказывается на выработке полного ресурса инструмента. При этом интенсивность выравнивания наработки, выраженной количеством обработанных отверстий выше, чем такая же интенсивность, выраженной стойкостью в минутах времени резания ступеней.

5. Несмотря на то, что основным фактором, определяющим стойкость КОИ, является скорость резания, напрямую связанная с диаметром ступеней, при оценке ресурса числом обработанных отверстий важным показателем становится длина ступеней отношение которых растет в большей степени чем отношение диаметров.

6. Для рассматриваемого размерного ряда крепежных отверстий, обрабатываемых на автоматизированном оборудовании предпочтение, надо отдавать КОИ при условии выбора метода назначения режимов резания, обеспечивающего лучшую производительность и выработку максимального ресурса.

7. Исходя из полученных данных метод расчета режимов резания для КОИ стоит выбирать в зависимости от целей производства.

Лучшую безотказность инструмента, обеспечат режимы резания, полученные классическим **методом 1** (по ступени большего диаметра), но неполная выработка и уменьшенная скорость резания сверлильной ступени, приведут к недоиспользованию ресурса КОИ и падению производительности обработки.

Лучшую производительность и равномерную выработку ресурса обеспечивают **методы 3.2 и 2** расчета режимов, где предпочтение отдается ступени меньшего диаметра с большей длиной резания, но при этом существенно падает наработка на отказ. Минимальное значение наработки показывает **метод 3.2**.

Наиболее компромиссный по всем 3-м критериям оптимизации работоспособности КОИ является **метод 2**.

Работа осуществлялась при финансовой поддержке БРФФИ в рамках договора на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка методологии расчетов режимов резания в машиностроении (на примере обработки осевым инструментом)» № Т22УЗБ-077.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов А. Р. Современные тенденции в конструировании специального режущего и вспомогательного инструмента для автоматизированного производства. – М.: ВНИТЭМПР, 1985. – 48 с.
2. Малышко И. А. Осевые комбинированные инструменты (рекомендации по проектированию и эксплуатации). – Донецк: ПКТИ, 1996. – 135 с.
3. Ажар А. В., Колесников Л. А., Яцкевич О. К. Стратегии оптимизации технологии обработки отверстий комбинированными инструментами на станках с ЧПУ. Материалы XVI всероссийской

конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ – 2023)». Сборник докладов. – М.: ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 2023. – 308 с. (С. 20–32).

4. Ажар А. В., Дулуб А. Д., Сивак М. В. Оценка ресурса сборного комбинированного инструмента по временной стойкости и количеству обработанных отверстий. Научное издание «НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ – 2023». Сборник материалов X Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума 09–10 ноября 2023 года. – Т. 1. – Минск: БНТУ, 2023. – 176 с. (С. 50–52).

5. Степанов М. С., Иванова М. С. Разработка математической модели выбора наиболее выгоднейших режимов резания комбинированным осевым инструментом. Машиноведение и машиностроение. Технологический аудит и резервы производства. – № 4/1(24) – 2015. – С. 69–72.

6. Ажар А. В., Кочергин А. И. Использование и оптимизация условий эксплуатации комбинированных осевых инструментов. Машиностроение. – Мн., 2002. – Вып. 18 – С. 34–42.

7. Ажар А. В., Кочергин А. И., Ратько Е. Ф. Оптимизация условий обработки ступенчатых отверстий осевыми инструментами на примере комбинированных зенкеров. Машиностроение. – Мн., 2009. – Вып. 25. – С. 283–291.

8. Ажар А. В. Анализ структурно-технологической надежности комбинированных осевых инструментов / А. В. Ажар, О. К. Яцкевич, Л. А. Колесников // материалы МНТК «Машина-созликда фан, таълим ва ишлаб чиқаришнинг интеграцияси: тенденциялар, муоммолар ва ечимлар», 19.05.2022, Ташкент. – 2022. – 286 с. (С. 220–225).

9. Попов А. П., Свириденко Д. С., Комаров Ю. Ю. Прогресс в применении осевых комбинированных инструментов. Мир транспорта. 2017; 15(6):88–101. – Режим доступа: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2017-15-6-8>. – Дата обращения: 12.11.2023.

10. Жарликов Н. В. Комбинированные режущие инструменты. – М. Свердловск: Машгиз. Урало-Сибирское отд-ние, 1961. – 78 с.

11. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / под ред. Дальского А. М., Косиловой А. Г., Мещерякова Р. К., Сулова А. Г. – 5-е изд., исправл. – М.: Машиностроение, 2003. – 944 с.

12. Учебное пособие «Технология обработки металлов резанием». 2017.11. – Режим доступа: [https://xn---2100-ywvwxrka13ag0c.xn--p1ai/uploadedFiles/files/Training\\_Handbook\\_RUS\\_2-compressed.pdf.pdf](https://xn---2100-ywvwxrka13ag0c.xn--p1ai/uploadedFiles/files/Training_Handbook_RUS_2-compressed.pdf.pdf). – Дата обращения: 12.11.2023.

*Поступила 12.12.2023*

**УДК 621.923.04**

**Акулович Л. М., Сергеев Л. Е.**

**СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ**

*Белорусский государственный аграрный технический университет,  
Минск, Беларусь*

*В статье показано, что формирование топографии поверхностей пар трения, снижающей износ сопрягаемых поверхностей деталей, происходит при их изготовлении на операциях финишной абразивной обработки, среди которых одной из перспективных является магнитно-абразивная обработка эластичным инструментом. Предложен метод повышения производительности магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения, основанный на выявлении эффектов взаимодействия технологических факторов и их синергизма. Приведены результаты экспериментальных исследований многокритериальной оптимизации технологического процесса магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей тел вращения в виде многофакторных уравнений, количественно описывающих вклад каждого*