

**Р.С. ТУРМАНИДЗЕ**, д-р техн. наук,

**В.И. БАЧАНАДЗЕ**,

**Г.З. ПОПХАДЗЕ**, Тбилиси, Грузия

## **ОСНОВНЫЕ ОЖИДАЕМЫЕ ПРОБЛЕМЫ В ПЕРИОД ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ РЕФОРМЫ „ИНДУСТРИЯ-4.0“ И ПУТИ ИХ ПРАКТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ**

**Abstract:** This work presents the results of an analysis of the main expected potential problems that may occur in the implementation of the INDUSTRY - 4.0 reform. It is proved that the pace and level of development of this reform will largely be determined by the effectiveness of the used mechatronic systems.

It has also been established that as a result of systematic miniaturization of the nodes of radio-electronic equipment and microelectronic equipment and microelectronic technology, the main problem of these reforms and the implementation of complex technological processes is instrumental support, especially cutting micro-tools. Therefore, the examples of these micro-tools show methods for improving their performance characteristics.

**Ключевые слова:** “Индустрия – 4.0”, мехатронные системы, микроинструменты для электротехнической промышленности, оптимизация геометрических параметров сверл.

### **Введение и постановка задачи**

На сегодняшний день уже практически каждый научный сотрудник в любой стране знает и однозначно признанно, что в начале XXI века весь мир находится на рубеже четвертой научно – технической революции, которая фундаментально должна поменять стиль и уровень мышления т.е. правила жизни каждого человека и особенно молодого поколения во всех странах мира. Это обусловлено тем, что по утверждению многих ученых и авторов широкопрофильных исследований по изучению состояния необходимых условий для обеспечения достойной встречи таких крупных реформ предстоящее изменение оценивается как самая комплексная и масштабная в истории всего человечества. Она будет проходить под сокращенным названием “Индустрия – 4.0”[1].

В период первой индустриальной революции, которая продолжалась дольше, чем два века для механизации отдельных операций промышленности были использованы вода и пар. В результате второй революции на основе применения электроэнергии были созданы массовые

производства многих изделий по разным направлениям народного хозяйства. Во время третьей революции с помощью применения электронных и информационных технологий производственные процессы стали автоматизированными. А сейчас, на основе результатов третьей революции развивается четвертая революция, которая опирается на цифровых технологиях, разработка которых была начата еще во второй половине прошлого века. Она подразумевает слияние нескольких современных технологий и исчезновение всяких границ между физических, цифровых и биологических сфер, т.е создание кибер – физических систем[2,3,4,5,6,7,8,9].

Иными словами конечной целью реформы «Индустрия 4.0» является: полная автоматизация и дистанционное управление сложных технологических процессов и административно-финансовых операции путем использования суперсовременных мехатронных систем [1,9,10,11].

Результаты первых трех революций были общие и применяемые для всех стран, для каждого предприятия и, практически, для каждого человека. Однако, процесс развития 4 – ой революции и степень последовательного использования результатов ее отдельных этапов на практике будет иметь своеобразный характер для разных отраслей промышленности. Конечно основные принципы будут общие, но поскольку каждая конкретная отрасль имеет свои специальные современные, многооперационные и многопараметрические технологии для их проектирования и управления нужны будут специальные знания и индивидуальный подход.

Для создания вышеупомянутых мехатронных систем, которые определяют уровень и темп развития реформы «Индустрия 4.0» требуется высокоточное технологическое оборудование и специальные микроинструменты разного назначения.

Нами еще в 90-ых годах прошлого столетия сделано классификация всех основных микроинструментов, применяемых на предприятиях микроэлектроники и микроэлектронной технологии, которые делятся на три основные группы: режущие, монтажные и сборочные. В каждой группе входят подгруппы с разными типоразмерами инструментов и конкретными областями их применения[12,13,14].

Для существенного повышения надежности микросхем и соответственно конечной продукции обязательно надо отметить еще одну группу микроинструментов контрольные инструменты - приспособления,

которые дают нам возможность до посадки на печатную плату проверить все эксплуатационные характеристики уже готовой и в корпусе вставленной закрытой микросхемы и на специальных стендах исследовать стабильность этих характеристик в широком диапазоне изменения электрических, механических и тепловых нагрузок. Нами запроектированы, изготовлены, испытаны и запатентованы несколько вариантов таких приспособлений для разных типоразмеров микросхем и их корпусов. Создана даже технологическая оснастка, штампы и пресформы, для их производства.

После тестирования и отборов микросхем такими методами можно практически исключить досрочных в случайных отказов сложных микросхем и дорогостоящих оборудования и приборов во время эксплуатации, что обеспечивает большой экономический эффект. Конструкции и принцип работы вышеуказанных всех типов микроинструментов будут подобно доложены при презентации.

Все эти инструменты применяются достаточно в большом количестве, так как значительная часть современной техники, начиная от бытового и заканчивая космической аппаратурой, является совокупностью механических узлов, гидро и пневмо аппаратуры и микроэлектронных блоков или целых систем управления, то есть представляет собой сложную мехатронную систему. Для их изготовления требуется осуществление многих технологических операций разного профиля.

Однако, следует отметить, что среди них многократно в большом количестве используются режущие микроинструменты, особенно спиральные сверла. Это вызвано тем, что в процессе производства узлов мехатронных систем нередко возникает необходимость обработки отверстий малых диаметров (около 1 мм и меньше), особенно на деталях гидро и пневмо аппаратуры. Что касается производства микроэлектронных узлов, в технологических процессах изготовления базовых деталей – печатных плат, значительную часть работ приходится на операциях сверления огромного количества отверстий малого диаметра.

Для получения отверстий в печатных платах применяются разные методы, однако практика показала, что самым приемлемым методом, особенно при обработке многослойных печатных плат с последующей металлизации поверхностей отверстий, до сегодняшнего дня является метод сверления.

Сверление осуществляют микросверлами из твёрдого сплава, оптимальные значения геометрических параметров которых установлены многократными экспериментами и опытами соответствующих производств. В частности: оптимальный передний угол и соответственно угол наклона спиральной канавки составляет примерно  $30^{\circ}$ , а задний угол  $18^{\circ}$ . Их перетачивают через каждое 1000 отверстие и рассчитаны на 3-4 переточку.

Производство печатных плат это массовое производство, где с целью увеличения производительности осуществляется сверление пакета, составленной из несколько пластин, то есть происходит глубокое сверление, где глубина сверления превышает к диаметру  $8 \div 10$  раз.

Простой дорогостоящего технологического оборудования, особенно в массовом производстве связаны со значительными экономическими потерями. В производстве печатных плат простой связан не только с предусмотренной заменой инструмента с целью их переточки, но и непредусмотренной, вызванной хрупкими разрушениями даже до первой переточки. Вероятность хрупкого разрушения значительно растет при глубоком сверлении пакета печатных плат. При этом зона разрушения находится в близости конца спиральной канавки.

Предусматривая массовость производственных процессов изготовления печатных плат, хотя бы незначительное повышение стойкости, в том числе хрупкой стойкости микросверл и соответственно повышение производительности процессов сверления, может дать значительный экономический эффект.

Исследовательские работы с целью повышения стойкости твердосплавных микросверл и производительности процесса глубокого сверления пакета печатных плат были проведены в лаборатории прецизионных микроинструментов департамента «Производственные технологий инженерной механики» Грузинского технического университета в тесном сотрудничестве со специалистами Магдебургского технического университета им. Отто Фон Гурике (Германия).

Исследования были начаты изучением характера изменения силовых показателей – крутящего момента и осевого усилия в зависимости от глубины и режимов сверления пакета печатных плат из стеклотекстолита.

Для измерения осевого усилия был изготовлен прибор на основе известных методов и существующих аналогов, измеряющим элементом,

которого является система тензодатчиков, смонтированная на упругом корпусе (см. рис. 1).

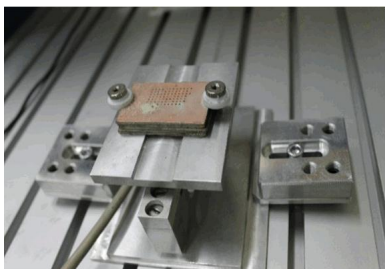


Рисунок 1 – Прибор для измерения осевого усилия.



Рисунок 2 – Прибор для измерения крутящего момента.

Что касается измерения крутящего момента, то в нашем случае существующий косвенный метод, при котором измерение осуществляют с помощью измерения мощности процесса резания непригоден, так как при сверлений микросверлами показатели мощности настолько низкие что зафиксировать его изменения практически невозможен. Поэтому нужно использовать такой метод, который даст возможность измерить непосредственно крутящий момент, при этом с высокой точностью. С этой целью нами был спроектирован и изготовлен специальный прибор (см. рис. 2), в котором стол заготовок для сверления установлен на оси, имеющий возможность углового поворота. Со своей стороны, ось стола оснащен лиской, плоскость которого проходит на оси симметрии и определенным плечом воздействует на упругий измерительный элемент. В качестве измерительного элемента здесь тоже применяется смонтированная на упругом корпусе система тензодатчиков высокой точности измерения (чувствительность 0,1 грамм).

Эксперименты проводились сверлами из твердого сплава марки ВК60М диаметром  $\varnothing 0,9\text{мм}$  длиной рабочей части  $l = 10\text{мм}$ . Передний угол и соответственно угол наклона спиральной канавки  $\omega = 30^\circ$ , задний угол составлял  $18^\circ$ .

Осуществлялось сверление пакета печатных плат из стеклотекстолита толщиной 1,6 мм составленной из 5 пластин с общей толщиной 8 мм (см. рис. 3).

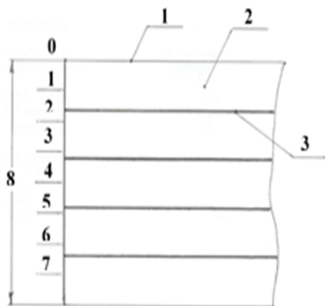


Рисунок 3 – Схема пакета печатных плат из 5 пластин.  
1-медная фольга, 2- стеклотекстолит, 3-двойной слой медной фольги.

Сверление заготовок осуществлялось на разных режимах резания и через каждый 1мм глубины фиксировались показания измерительных приборов. Результаты экспериментов показаны на рис. 4 и 5.

Из этих результатов явно видно, что, как и ожидалось, силовые нагрузки с увеличением глубины прогрессивно растут. При этом если осевое усилие растет приблизительно в 1,5 раза, то величина крутящего момента увеличивается в 3÷4 раза.

Ставится вопрос, чем вызван такой рост силовых показателей? Условия резания у режущей кромки сверла с увеличением глубины не меняется. Единственной причиной этого может быть увеличение площади контакта абразивной стружки с поверхностью обработанного отверстия и возникшего от него сил трения.

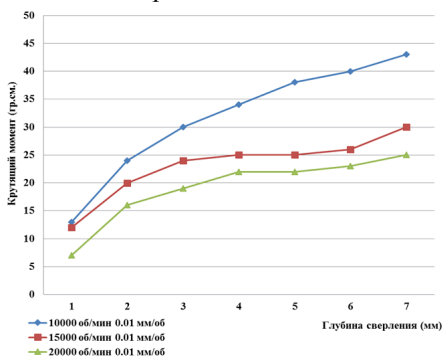


Рисунок 4 – График изменения крутящего момента для стандартных сверл  $\omega = 30^0$ .

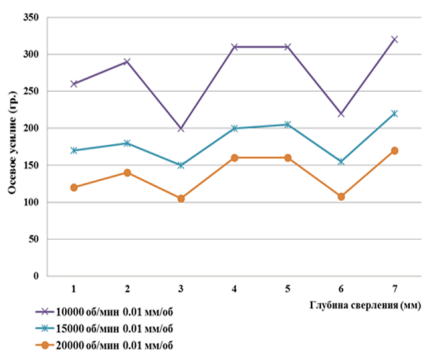


Рисунок 5 – График изменения осевого усилия для стандартных сверл  $\omega = 30^0$ .

Нужно отметить, что резкое падение осевого усилия на участках глубины 2-3 и 5-6 (см. рис. 5) обусловлено отсутствием на этих участках обрабатываемой заготовки (рис. 3) медного слоя.

Главным фактором повышения вероятности хрупкого разрушения режущего инструмента из этих двух силовых показателей может стать не рост осевого усилия, а более прогрессивное увеличение крутящего момента, так как прочностные показатели твердосплавных материалов на сжатие значительно превышают показателей на кручение.

Ускорение процесса стружкоудаления из зоны резания способствовало бы уменьшению сил трения и соответственно повышению надежности процесса сверления. Проблему удаления стружки при сверлении глубоких отверстий в разных случаях решают разными путями. Например, при сверлении сверлами крупных размеров это осуществляют методом вымывания с помощью смазочно-охлаждающей жидкости, который подается в отверстие через каналы, выполненной в самом теле сверла. В других случаях, когда размеры сверл не дают возможность подачи охлаждающей жидкости вышеуказанным методом, с целью удаления стружки применяют прерывистый метод сверления, при котором после просверления определенной глубины периодически осуществляется отвод сверла из отверстия быстрым ходом.

Применение этих методов в нашем случае неприемлем т.к. во первых дело имеем с микросверлами и при этом применение смазочно-охлаждающей жидкости в производстве печатных плат не допустимо. Нецелесообразен и метод прерывистого сверления, так как это привело-бы сильному падению производительности. При обработке глубоких отверстий микросверлами ускоряющим фактором удаления стружки может стать увеличение шага спиральной канавки, то есть уменьшение угла наклона, но это привело бы к ухудшению условий резания из-за уменьшения переднего угла сверла.

Если конструкцию сверла выполнить таким образом, что у вершины сохранить максимально эффективный для процесса резания передний угол и соответственно угол  $\omega$ , а в направлении конца спиральной канавки постепенно уменьшить его значение, то есть спиральную канавку нарезать с переменным углом наклона и постепенно увеличить его шаг, это привело бы к ускорению процесса стружкоудаления и облегчению условия сверления.

На рис. 6 показана схема сверла с переменным углом наклона спиральной канавки, где угол наклона канавки у вершины сверла  $\omega_0$ , а в конце рабочей части  $\omega_1$ . Ширина канавки в сечении перпендикулярной

канавки  $B_n$  по всей длине не меняется, но меняется в торцевом сечении и у

вершины составляет:  $B_{T_0} = \frac{B_n}{\cos \omega_0}$ , а в конце рабочей части  $B_{T_1} = \frac{B_n}{\cos \omega_1}$ .

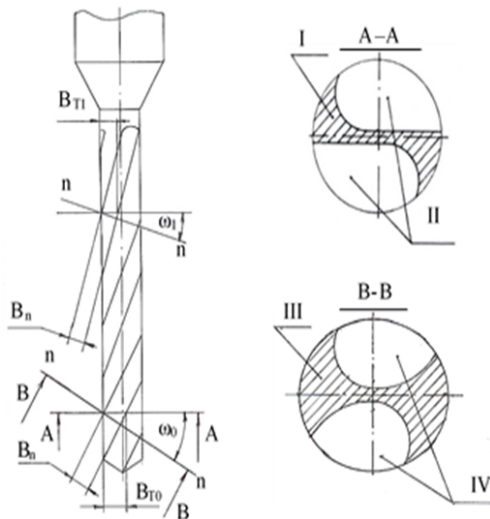


Рисунок 6 – Схема сверла с переменным углом наклона спиральной канавки, А-А – сечение сверла плоскости перпендикулярной его оси: I - Полезная площадь сверла, II – профиль канавки.

В-В – сечение сверла в плоскости перпендикулярной спиральных канавок: III - Полезная площадь сверла, IV –профиль канавки.

Меняется и полезное торцевое сечение сверла, значение которого у вершины:

$$S_o = \frac{\Pi d^2}{4} - \frac{2S_n}{\cos \omega_0} \quad (1)$$

а в конце рабочей части:

$$S_1 = \frac{\Pi d^2}{4} - \frac{2S_n}{\cos \omega_1} \quad (2)$$

где  $S_n$  – площадь канавки в перпендикулярном сечении, d–диаметр рабочей части сверла.



Если учтём, что  $\omega_0 > \omega_1$ , то получается, что в направлении конца рабочей части полезное сечение сверла усиливается. То есть такие сверла по сравнению с стандартными должны выдержать повышенные нагрузки.

Изготовление таких сверл связано с определенными сложностями. При изготовлении стандартных сверл с постоянным углом наклона спиральной канавки специальное приспособление осуществляет взаимное согласование двух движений – вращения заготовки сверла и его перемещение в осевом направлении таким образом, что на каждый оборот заготовка равномерно перемещается на один шаг спирали. В случае переменного шага осевая подача осуществляется с определенным ускорением, так, что обеспечивается равномерное уменьшение угла наклона спиральной канавки по всей длине нарезки. Из-за этого нам пришлось модернизировать оборудование и в кулачковом механизме подачи кулачок с Архимедовой спиралью сменить кулачком с профилем, изготовленный по нашим расчетам, исходящей из закона изменения угла наклона и соответственно шага спиральной канавки сверла. Кроме этого, из-за переменного угла наклона спиральной канавки, при вышлифовке таких канавок обязательно нужно в процессе обработки менять ориентацию шлифовального круга относительно к оси заготовки сверла соответственно к изменению угла наклона канавки. Это можно осуществлять двумя способами: при неподвижной оси шлифовального шпинделя поворачивать ось шпинделя заготовки вокруг точки пересечения этих осей на величину угла  $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_1$  (см. рис. 7), или неподвижным оставить ось шпинделя заготовки и поворачивать ось шлифовального шпинделя (см. рис. 8).

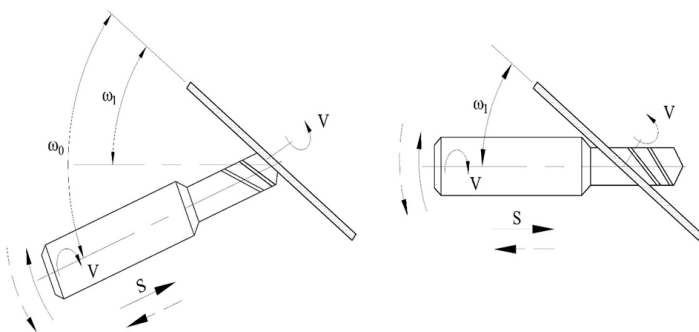


Рисунок 7 – Схема изменения ориентации осей заготовки сверла и шлифовального круга методом поворота оси шпинделя заготовки.

Исходя из конструктивных соображений нами предпочтение было отдано первому варианту (рис. 7) и в процессе модернизации оборудования был оснащён дополнительным механизмом поворота, обеспечивающим при нарезании спиральных канавок, поворот оси заготовки сверла относительно к плоскости вращения шлифовального круга на величину угла  $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_1$ . Текущая величина угла наклона определяется по формуле:  $\omega_x = \omega_0 - \ell_x \cdot K_\omega$ , где  $\omega_x$  – текущая величина угла наклона,  $\omega_0$  – угол наклона у вершины сверла,  $\ell_x$  – текущая координата длины режущей части сверла,  $K_\omega$  – величина изменения угла наклона спиральной канавки на 1мм длины режущей части сверла.

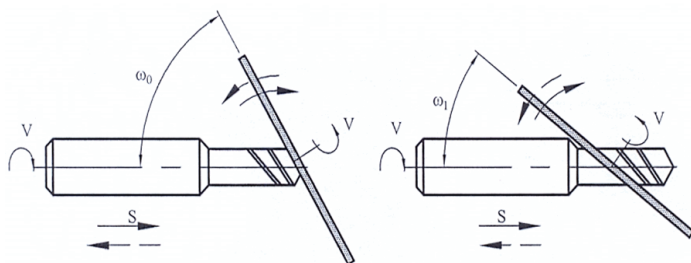


Рисунок 8 – Схема изменения ориентации осей заготовки сверла и шлифовального круга методом поворота оси шлифовального шпинделя.

Принципиальная схема такого модернизированного приспособления с рычажным механизмом поворота показана на рис. 9. Нужно отметить, что с целью достижения более высокой точности взамен рычажного механизма можно применять зубчато-реечную пару.

Приспособление для вышлифовки спиральных канавок в сторону заготовки сверла 1 установлено на оси вращения 2, смонтированной на столе заточного станка - 3Д642. При этом, ось поворота приспособления обязательно должен проходить на точку "О" пересечения оси заготовки сверла и вертикальной оси симметрии шлифовального круга 3, заправленной соответственно профилю спиральной канавки сверла. Другой конец приспособления опирается на круговое направляющее 4. Поворот осуществляется рычажным механизмом, опорный ось 5 которого неподвижно установлен на основании 6 приспособления. При осевом перемещении верхней салазки 7 и соответственно заготовки сверла, жестко связанный с ним палец 8 поворачивает правое плечо рычага 9. Левое плечо

рычага связано с пальцем 10, неподвижно смонтированным на столе станка. Таким образом, поворот рычага вызывает поворот всей конструкции приспособления. При этом, элементы рычажного механизма рассчитаны так, что при осевой подаче заготовки сверла на величину длины винтовой нарезки приспособление поворачивается на величину изменения угла наклона спиральной канавки  $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_1$ .

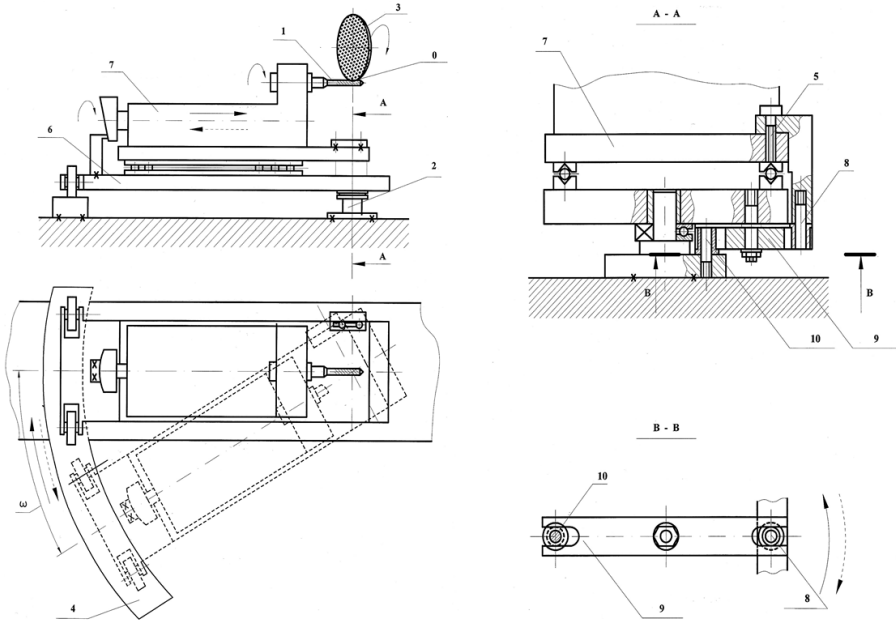


Рисунок 9 – Принципиальная схема механизма поворота оси заготовки сверла относительно к плоскости шлифовального круга при вышлифовке спиральной канавки с переменным углом наклона.

Для этого рассчитывается расстояние между левым неподвижным пальцем и осью поворота приспособления по формуле:

$$R = l \cdot \frac{L_n}{L_n} \cdot \frac{360}{2\pi\Delta\omega} \quad (3)$$

Где  $l$  - длина спиральной нарезки сверла, мм;

$L_n$  - длина левого плеча рычага;

$L_n$  - длина правого плеча рычага;

$\Delta\omega$  - величина изменения угла наклона спиральных канавок сверла.

В конструкции приспособления заложены так-же возможности регулировки величины осевой подачи заготовки и начального угла у вершины сверла  $\omega_0$  в определенном диапазоне. Благодаря этому нами были сконструированы и изготовлены опытные образцы сверл с разными диапазонами изменения угла наклона спиральной канавки:  $\omega = 30-17^\circ$ ,  $\omega = 35-20^\circ$ ,  $\omega = 40-22^\circ$ , и  $\omega = 43-23^\circ$ .

На всех этих свёрлах были проведены такие – же эксперименты, как на стандартных. Результаты экспериментов для свёрл  $\omega = 30-17^\circ$  и  $\omega = 35-20^\circ$  показаны на фиг. 10, 11, 12, 13.

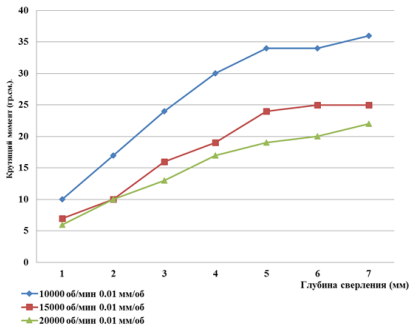


Рисунок 10 – График изменения крутящего момента для свёрл  $\omega = 30-17^\circ$ .

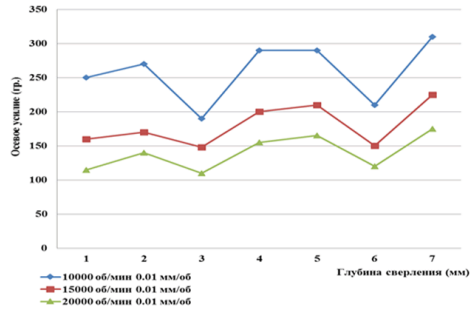


Рисунок 11 – График изменения осевого усилия для свёрл  $\omega = 30-17^\circ$ .

Анализ этих графиков показывает следующее: для свёрл  $\omega = 30-17^\circ$  показатели осевого усилия почти не отличаются от стандартного сверла  $\omega = 30^\circ$  что так, и ожидалось, так как у этих сверл одинаковый передний угол и соответственно, условия резания у режущей кромки. Что касается величин крутящего момента, они на сверле  $\omega = 30-17^\circ$  в зависимости от режимов резания занижены на 12-16%-ов.

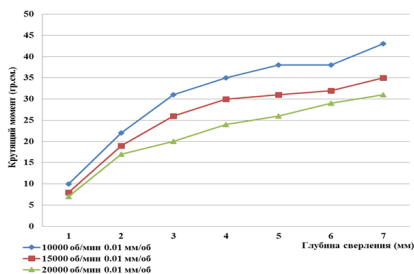


Рисунок 12 – График изменения крутящего момента для сверл  $\omega = 35 - 20^{\circ}$ .

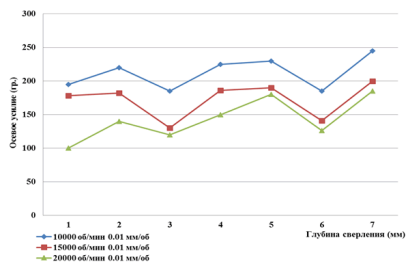


Рисунок 13 – График изменения осевого усилия для сверл  $\omega = 35 - 20^{\circ}$ .

Для сверл  $\omega = 35 - 20^{\circ}$  показатели осевого усилия сравнительно занижены, так как передний угол увеличен на 5%-ов и этим облегчен процесс резания, но величина крутящего момента с увеличением глубины сверления растут более интенсивно и превышают показателей обоих предыдущих образцов. Ясно, что занижение показателей крутящего момента на сверлах  $\omega = 30 - 17^{\circ}$  по сравнению со стандартными сверлами  $\omega = 30^{\circ}$  обусловлено постепенным увеличением шага спиральной канавки и соответственно уменьшением площади контакта образованной стружки со стенками обрабатываемого отверстия. Увеличение угла наклона и соответственно уменьшение шага спирали на сверлах  $\omega = 35 - 20^{\circ}$  опять вызывает обратный процесс – показатели крутящего момента интенсивно повышаются.

При сверлении сверлами  $\omega = 40 - 22^{\circ}$  и  $\omega = 43 - 23^{\circ}$  эти силовые показатели относительно занижены (см. рис. 14-15), что объясняется улучшением условий резания из-за значительного (5-8<sup>0</sup>-ов) увеличения переднего угла у режущей кромки. Однако уменьшение угла заострения при дальнейшей эксплуатации вызывает увеличение интенсивности износа, и они без переточки доходят лишь до 600-800 отверстий.

Очевидно, что для получения более ясной картины нужно было продолжать сравнительные эксперименты между стандартными сверлами  $\omega = 30^{\circ}$  и сверлами с переменным углом наклона спиральной канавки  $\omega = 30 - 17^{\circ}$ . Эксперименты были продолжены до поломки сверл. При этом через каждые 200 отверстий проверялись силовые показатели, которые с увеличением износа режущей кромки постепенно увеличиваются. После 1000

отверстий проверку осуществляли через каждый 100 отверстий, так как повышается вероятность поломки сверла. На протяжении всей серии экспериментов для обоих типов сверл почти одинаковыми оставались показатели износа режущей кромки и осевого усилия. Что касается крутящего момента, его значения на стандартных свёрлах  $\omega = 30^0$  всегда превышали показателей свёрл с переменным углом наклона спиральной канавки  $\omega = 30-17^0$ .

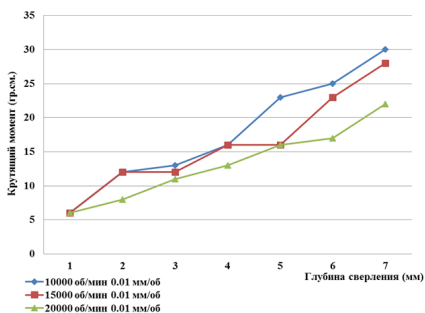


Рисунок 14 – График изменения крутящего момента для сверла  $\omega = 40-22^0$ .

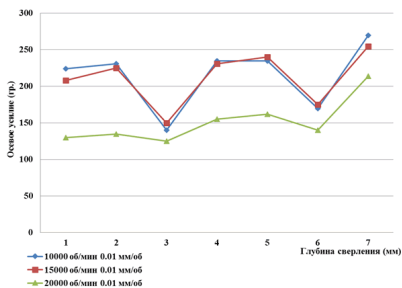


Рисунок 15 – График изменения осевого усилия для сверла  $\omega = 40-22^0$ .

Статистика показала, что поломка стандартных свёрл  $\omega = 30^0$  происходит от 1200 до 1300 отверстий, а свёрл с переменным углом  $\omega = 30-17^0$  от – 1400 до – 1500.

В настоящее время подобные эксперименты для выявления эффективности свёрл с изменяемым углом наклона спиральной канавки проводятся при обработке широко используемых в промышленности металлических материалов, как например титановые и алюминиевые сплавы и цветные металлы с разными физико – механическими свойствами.

## ВЫВОДЫ

- Установлено, что темп развития реформы “ИНДУСТРИЯ – 4.0” в сильной степени зависит от эффективности эксплуатационных характеристик использованных мехатронных систем.
- Доказано, что выходные характеристики отдельных узлов используемых мехатронных систем можно существенно улучшить оптимизацией конструктивно-геометрических параметров и

процессов их изготовления. Например стойкость твердосплавных прецизионных спиральных сверл рабочим диаметром меньше 1 мм и производительность сверления печатных плат можно увеличить минимум на 20-25%-ов.

- Путем оптимизации геометрических параметров твердосплавных микросверл можно значительно улучшить процесс стружкообразования и их свободное удаление из зоны резания при сверлении печатных плат, что положительно влияет на качество обработанной поверхности и в последствии ее металлизацию.

#### Список использованных источников:

- [1] Снова перемены. Как выглядит Индустрия 4.0? available at: <http://hi-news.ru/business-analytics/industriya-4-0-chto-takoe-chetvertaya-promyshlennaya-revolyuciya.html>
- [2] Всё началось с колеса. Двигаясь с помощью пара. available at: <http://www.bibliotekar.ru/encAuto/5.htm>
- [3] Первые эксперименты с электродвигателями. available at: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/history/>
- [4] История создания и развития электродвигателя. Available at: [http://ecoconceptcars.ru/2011/01/blog-post\\_10.html](http://ecoconceptcars.ru/2011/01/blog-post_10.html)
- [5] История создания мобильного телефона. Available at: <http://mobileleader.ru/interesnyefakty/23-istoriya-sozdaniya-mobilnogo-telefona.html>
- [6] ЧТО ТАКОЕ ИНТЕРНЕТ? ИСТОРИЯ И ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ. Available at: <http://moolk.in.ru/chto-takoe-internet-istoriya-i-etapy-razvitiya>.
- [7] Zujevs, V. Osadcuks, and P. Ahrendt, Trends in robotic Sensor Technologies for Fruit Harvesting: 2010-2015, Procedia Computer Science, Vol. 77, 2015, pp. 227-233.
- [8] A. Ivan, Research regarding optimization of industrial robots for machining applications, Doctoral Thesis, Universiti "Politehnica" of Bucharest, 2011.
- [9] A. Ivan, Research regarding optimization of industrial robots for machining applications, Doctoral Thesis, Universiti "Politehnica" of Bucharest, 2011.
- [10] B. Jang, Nanotube fiber reinforced composite materials and method of producing fiber fiber reinforced composites, 23 Dec 2003
- [11] R.TurmanidzeV.Bachanadze, G.Popkhadze International saintific journal "Inovations". Year V, Issu 3/2017, Sofia, Bulgaria,ISSN Print 1314-8907,ISSN WEB 2534-8469123-128.Basic technological processes required to create mechatronic sistems to meet today's needs and problems of their instrumental support of "Industry 4.0" challenges
- [12] Турманидзе Р.С., Бокучава Г.В., Новые процессы алмазно-абразивной обработки. Тезисы докладов Первого всесоюзного съезда техно-логов-маш. г.Москва, 13-18 ноября, 1989г. 12 стр.
- [13] Турманидзе Р.С., Амиридзе М.Н., Микроинструменты для сборки и монтажа микросхем и технологическое обеспечение их изготовления. Тезисы докладов международного семинара "Высокие технологии в машиностроении". Харьков-Алушта, 1992г. 3 стр.
- [14] Турманидзе Р.С., Некоторые особенности проектирования и изготовления твердосплавных прецизионных микро-инструментов. Труды Харьковского технического университета "Резание и инструмент", вып. 50. 1995г. 2 стр.