

УДК 621.923.91

Р.С. ТУРМАНИДЗЕ, д-р техн. наук,
В.И. БАЧАНАДЗЕ,
Г.З. ПОПХАДЗЕ, Тбилиси, Грузия

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЕ СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ИХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ФОНЕ ПРИЗЫВОВ “ИНДУСТРИЯ 4.0”

In the presented work investigated the changes of power characteristics of deep drilling package of printed circuit board's hard metal micro drills depending on the drilling depth, cutting data and geometry of the drill. In particular studied the nature of changes in axial efforts and torque depending on the drilling depth drill with different inclinations of the spiral grooves using specially designed highly sensitive devices, enabling direct measurement method. Based on the analysis of the results of the study, changes in the geometry of existing standard drills. Proposed new construction of micro drills vary-angle spiral grooves in such a way that the angle is the maximum value at the top of the drill and uniformly decreases towards the end of the working parts. The drills are manufactured with different inclinations of the spiral grooves. Based on the experiments of them chosen more for its near standing power rates to the standard drill bit and its comparative test with a standard drill bit, bringing them up to the breakage, thanks to which the proven advantages of drills new design. Taking into account the results of the experiments proposed drill elongated structures to improve performance by increasing the processing drilling depth and accordingly the number of plates in the package of printed circuit boards.

Keywords: PCB, deep drilling, spiral drill, vary-angle spiral grooves, drill strength, drill wear, brittle fracture, cutting conditions, drill resistance

Введение и постановка задачи

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.

Решение основных задач “Индустрия – 4.0” основано повышению надежности и работоспособности именно мехатронных систем, т.к. оный определяют уровень и степень автоматизации сложных технологических и управленческих операций.

В процессе производства таких 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

приходит 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° , а задний угол 18° . 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 имеет место 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.

Основная часть

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 усиления 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.

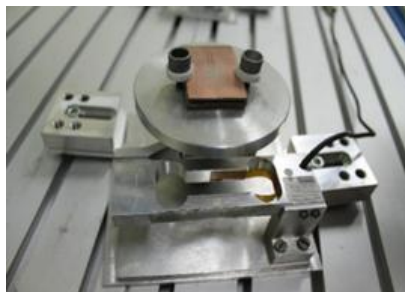


Рисунок 2 – Прибор для измерения крутящего момента.

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 невозможно. 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° .

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

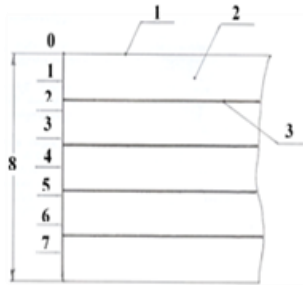


Рисунок 3 – Схема пакета печатных плат из 5 пластин.
1-медная фольга, 2- стеклотекстолит, 3-двойной слой медной фольги.

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.

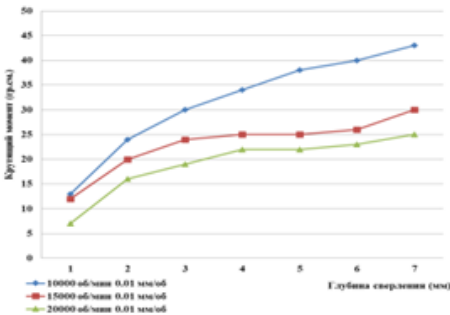


Рисунок 4 – График изменения крутящего момента для стандартных сверл $\omega = 30^0$.

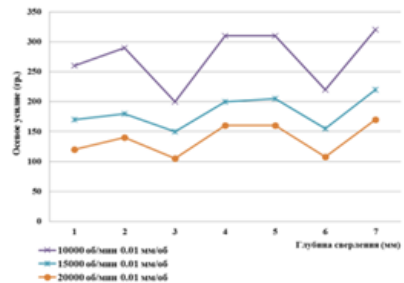


Рисунок 5 – График изменения осевого усилия для стандартных сверл $\omega = 30^0$.

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 ω , 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 условий сверления.

На рис. 6 показана схема сверла с переменным углом наклона спиральной канавки, где угол наклона канавки у вершины сверла ω_0 , а в конце рабочей части ω_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 $B_{T_1} = \frac{B_n}{\cos \omega_1}$.

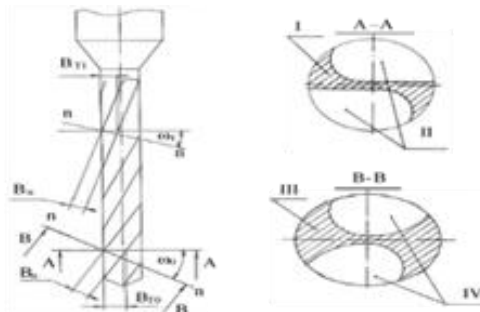


Рисунок 6 – Схема сверла с переменным углом наклона спиральной канавки,

А-А – сечение сверла плоскости перпендикулярной его оси:

I - Полезная площадь сверла, II – профиль конавки.

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

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

$$S_o = \frac{\Pi d^2}{4} - \frac{2S_n}{\cos \alpha_0} \quad (1)$$

а в конце рабочей части:

$$S_1 = \frac{\Pi d^2}{4} - \frac{2S_n}{\cos \alpha_1} \quad (2)$$

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

Если учтём, что $\alpha_0 > \alpha_1$, 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 профилю, 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).

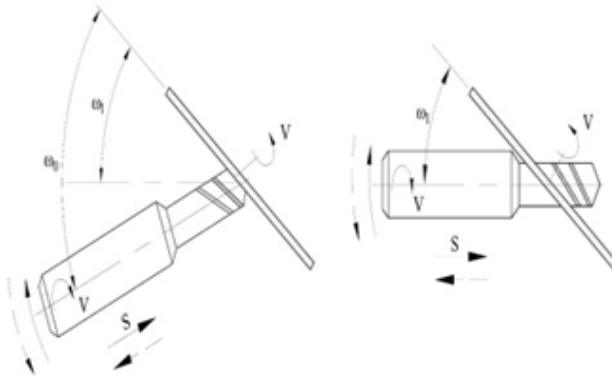


Рисунок 7 – Схема изменения ориентации осей заготовки сверла и шлифовального круга методом поворота оси шпинделя заготовки.

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 ω_x – текущая величина угла наклона, ω_0 – угол наклона у вершины сверла, ℓ_x – текущая координата длины режущей части сверла, K_ω – величина изменения угла наклона спиральной канавки на 1мм длины режущей части сверла.

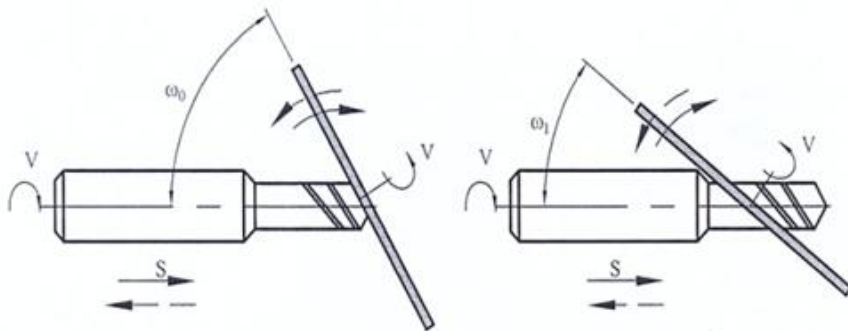


Рисунок 8 – Схема изменения ориентации осей заготовки сверла и шлифовального круга методом поворота оси шлифовального шпинделя.

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 вишлифовки 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 $\Delta_{\omega} = \omega_0 - \omega_1$.

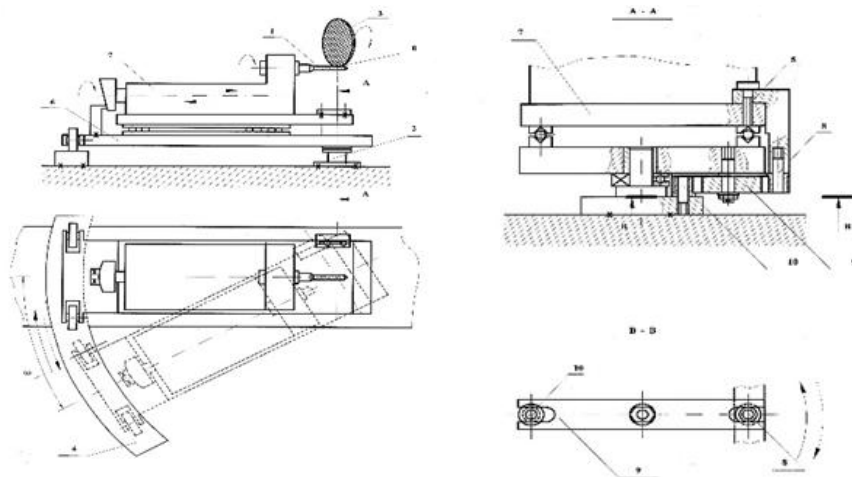


Рисунок 9 – Принципиальная схема механизма поворота оси заготовки сверла относительно к плоскости шлифовального круга при вышлифовке спиральной канавки с переменным углом наклона

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

$$R = l \cdot \frac{L_{\text{л}}}{L_{\text{п}}} \cdot \frac{360}{2\pi\Delta\omega} \quad (3)$$

где l - длина спиральной нарезки сверла, мм;

$L_{\text{л}}$ - длина левого плеча рычага;

$L_{\text{п}}$ - 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 ω_0 в определенном диапазоне. Благодаря этому нами были сконструированы и изготовлены опытные образцы сверл с разными диапазонами изменения угла наклона спиральной канавки: $\omega = 30 - 17^0$, $\omega = 35 - 20^0$, $\omega = 40 - 22^0$, и $\omega = 43 - 23^0$.

На всех этих свёрлах были проведены такие – же эксперименты, как на стандартных. Результаты экспериментов для свёрл $\omega = 30-17^0$ и $\omega = 35-20^0$ показаны на рис. 10-13.

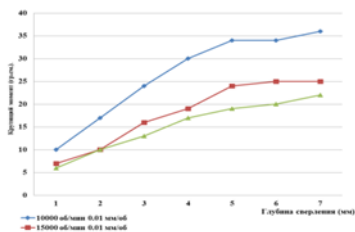


Рисунок 10 – График изменения крутящего момента для свёрл

$$\omega = 30-17^0$$

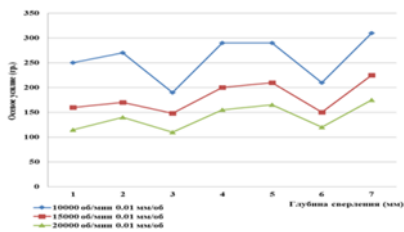


Рисунок 11 – График изменения осевого усилия для свёрл

$$\omega = 30-17^0$$

Анализ этих графиков показывает следующее: для свёрл $\omega = 30-17^0$ показатели осевого усилия почти не отличаются от стандартного сверла $\omega = 30$ 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 $\omega = 30-17^0$ в зависимости от режимов резания занижены на 12-16%-ов.

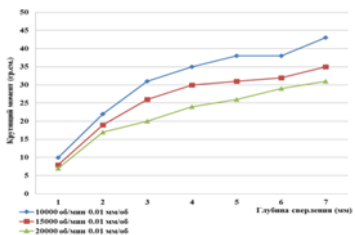


Рисунок 12 – График изменения крутящего момента для свёрл

$$\omega = 35-20^0$$

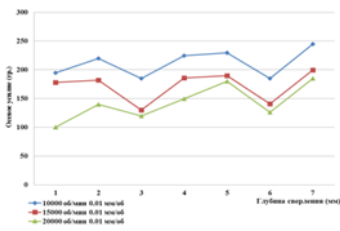


Рисунок 13 – График изменения осевого усилия для свёрл

$$\omega = 35-20^0$$

Для свёрл $\omega = 35-20^0$ 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 показатели обоих предыдущих

образцов. Ясно, что занижение показателей крутящего момента на свёрлах $\omega = 30-17^0$ по сравнению со стандартными свёрлами $\omega = 30^0$ 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 свёрлах $\omega = 35-20^0$ опять вызывает обратный процесс – показатели крутящего момента интенсивно повышаются.

При сверлении свёрлами $\omega = 40-22^0$ и $\omega = 43-23^0$ эти силовые показатели относительно занижены (см. рис. 14-17), что объясняется улучшением условий резания из-за значительного ($5-8^0$ -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 свёрлами $\omega = 30^0$ и свёрлами с переменным углом наклона спиральной канавки $\omega = 30-17^0$. Эксперименты были продолжены до поломки сверл. При этом через каждый 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 $\omega = 30-17^0$.

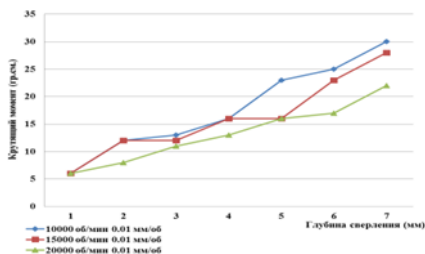


Рисунок 14 – График изменения крутящего момента для сверла $\omega = 40-22^0$

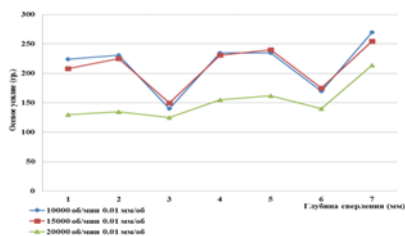


Рисунок 15 – График изменения осевого усилия для сверла $\omega = 40-22^0$

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

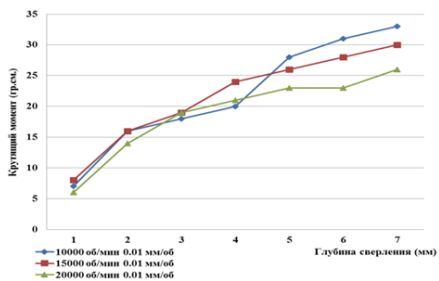


Рисунок 16 – График изменения крутящего момента для сверла $\omega = 43 - 23^{\circ}$

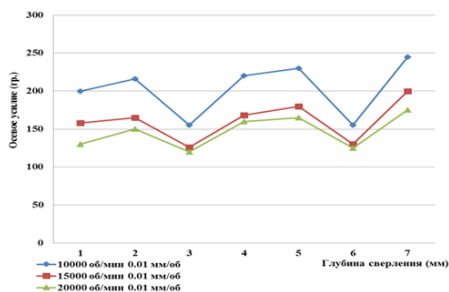


Рисунок 17 – График изменения осевого усилия для сверла $\omega = 43 - 23^{\circ}$

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.

В ближайшее время будут опубликованы результаты этих работ.

Выводы:

1. Твердосплавные микросверла с переменным углом наклона спиральной канавки при глубоком сверлении пакета печатных плат обеспечивают улучшение условий резания и интенсивности процесса стружкоудаления из обработанного отверстия, способствуя этим занижению сил трения и соответственно крутящего момента на оси сверла.
2. Выполнение спиральных канавок с постепенным занижением угла наклона ω – от вершины сверла в сторону конца рабочей части, обеспечивает усиление полезного сечения сверла, повышая этим надёжность на хрупкое разрушение.
3. Исходя из вышесказанного, появляется возможность изготовить сверла с удлинённой рабочей частью на 2–2,5 мм и в обрабатываемом пакете печатных плат добавить еще одну пластину, что даст возможность увеличить количество одновременно обрабатываемых плат и соответственно производительность процесса примерно на 20%.

Список использованных источников: 1. *R.Turmanidze, D.Adamia, M.Amiridze.* Influence of the Gradient Angle of the Screw Groove on Wear-Resistant of Fine-Sized Spiral Drills. Transactions of the Academy of Sciences of Georgia «Science and Technologies». Tbilisi, №10-12, 2002, 2 pages. 2. *Турманидзе Р.С., Адамия Д.Р., Амиридзе М.Н.* Исследование влияния угла наклона ω на величину износов режущих элементов мелкоразмерных сверл при обработке печатных плат. Международный научно-технический сборник «Резание и инструмент в технологических системах» Харьков, Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков, 2004 г. Выпуск №66. Стр. 3. *Б.Карпушевски, Л.Дюбнер, Р.С.Турманидзе и др.* Спиральные сверла малых размеров с переменным углом наклона стружечных канавок. Резание и инструмент в технологических системах международный научно-технический сборник. НТУ «ХПИ», Харьков, 2008г. 4. *Б.Карпушевски, Л.Дюбнер, Р.С.Турманидзе и др.* Erhöhung der standzeit und prozesssicherheit von mikrobohrern durch die entwicklung neuer werkzeuggeometrien. Сборник научных трудов «Современные технологии в машиностроении». Харьковский национ. техн. университет "Харьковский Политехнический Институт", Харьков, Украина. Выпуск 2. 2008г. стр.27-32. 5. *D.Adamia, V.Bachanadze, Z.Gviniashvili.* Peculiarities of formation of shavings grooves of spiral drill of alloy with variable inclination. Transport and Machinebuilding. Tbilisi, #3(15), 2009г. 6. *Р.С.Турманидзе, Д.Р.Адамия, З.М.Гвиниашвили.* Особенности изготовления и испытания мелкоразмерных твердосплавных спиральных сверл с переменным углом наклона стружечных канавок. Сборник трудов XVII международной научно-технической конференции «Машиностроение и Техносфера XXI века». Донецкий Национальный Технический Университет. Том 3. 13-18 сентября 2010г. с.181-184.

Bibliography (transliterated): 1. *R.Turmanidze, D.Adamia, M.Amiridze.* Influence of the Gradient Angle of the Screw Groove on Wear-Resistant of Fine-Sized Spiral Drills. Transactions of the Academy of Sciences of Georgia «Science and Technologies». Tbilisi, №10-12, 2002, 2 pages. 2. *Turmanidze R.S., Adamija D.R., Amiridze M.N.* Issledovanie vlijaniya ugla naklona ω na velichinu iznosov rezhushhih jelementov melkorazmernyh sverl pri obrabotke pechatnyh plat. Mezhdunarodnij nauchno-tehnicheskij sbornik «Rezanie i instrument v tehnologicheskix sistemah» Har'kov, Nacional'nyj tehniceskij universitet «HPi». g. Har'kov, 2004g. Vypusk №66. Str. 3. *B.Karpushevski, L.Djubner, R.S.Turmanidze i dr.* Spiral'nye sverla malyh razmerov s peremennym uglom naklona struzhechnyh kanavok. Rezanie i instrument v tehnologicheskix sistemah mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij sbornik. NTU «HPi», Har'kov, 2008g. 4. *B.Karpushevski, L.Djubner, R.S.Turmanidze i dr.* Erhöhung der standzeit und prozesssicherheit von mikrobohrern durch die entwicklung neuer werkzeuggeometrien. Sbornik nauchnyh trudov «Sovremennye tehnologii v mashinostroenii». Har'kovskij nacion. tehn. universitet "Har'kovskij Politehni-cheskij Institut", Har'kov, Ukraina. Vypusk 2. 2008g. str.27-32. 5. *D.Adamia, V.Bachanadze, Z.Gviniashvili.* Peculiarities of formation of shavings grooves of spiral drill of alloy with variable inclination. Transport and Machinebuilding. Tbilisi, #3(15), 2009g. 6. *R.S.Turmanidze, D.R.Adamija, Z.M.Gviniashvili.* Osobennosti izgotovlenija i ispytaniya melkorazmernyh tverdosplavnnyh spiral'nyh sverl s peremennym uglom naklona struzhechnyh kanavok. Sbornik trudov XVII mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Mashinostroenie i Tehnosfera XXI veka». Doneckij Nacional'nyj Tehniceskij Universitet. Tom 3. 13-18 sentjabrja 2010g. str.181-184.