

М. Г. ФАГРАДЯН

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ РЕЗАНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ

Одной из основных причин, ограничивающих увеличение производительности обработки металлов резанием, являются вибрации. Выявлению причин возникновения вибраций и поискам путей их устранения посвящено много работ отечественных и зарубежных исследователей, однако надо отметить, что вопросы вибраций станков и инструментов, ввиду сложности процесса, исследованы недостаточно. Вопросы вибраций особенно недостаточно исследованы в процессах, когда резание осуществляется инструментами пониженной жесткости.

На основании своих исследований С. А. Тобиас и В. Фишвик разработали теорию колебаний при резании металлов, которую можно приложить как при рассмотрении процесса сверления, так и других процессов обработки металлов резанием [7]. Авторы рассматривают колебание сверла в направлении осевой силы P_x , которое изменяет условия резания, вследствие чего P_x получает приращение dP_x . Возникшие вибрации, под действием силы dP_x могут увеличиваться, затухать или оставаться без изменения. Имея приращение осевой силы как функцию от параметров резания, авторы составили дифференциальное уравнение, решением которого определяли условия устойчивости.

А. И. Лойко рассматривает реальную систему процесса зенкерования с двумя степенями свободы с колебаниями, направленными по оси зенкера и перпендикулярно к его оси [4].

Анализируя влияние колебаний зенкера по оси x на силы, действующие по оси y , и наоборот, автор рассматривает два случая. Зенкер с подачей S_z мм/зуб совершает радиальные колебания с амплитудой y мм, причем

$$1) \quad S_z \sin \varphi > y \cos \varphi,$$

$$2) \quad S_z \sin \varphi < y \cos \varphi,$$

где φ — главный угол в плане.

Анализируя каждый случай в отдельности, автор показал, что вибрации зенкера по оси y не влияют на силы, действующие по оси x , а только изменяют силы, действующие по оси y , так же как вибрации по оси x не оказывают влияния на силы, действующие по оси y .

В своей работе А. И. Астанян [1] рассматривает колебание системы с одной степенью свободы трубчатого сверла одностороннего резания

при сверлении жаропрочной стали ЭИ992. Он установил, что основными возбудителями колебаний являются изменения сечения стружки от закручивания сверла и падающий характер крутящего момента от скорости резания.

На основании этих соображений автор составил дифференциальное уравнение, анализом решения которого делает вывод, что сверление без автоколебаний можно обеспечить при скоростях резания выше критической или ее снижением путем изменения характеристики силы резания и трения, увеличением жесткости инструмента и его момента инерции, применением сверл с соответствующим коэффициентом удлинения от закручивания.

Констатируя приведенное, нетрудно заметить, что основной причиной возникновения вибрации является периодическое изменение толщины срезаемого слоя от осевой деформации инструмента. Кроме осевой силы, на толщину срезаемого слоя большее влияние оказывает крутящий момент, под действием которого спиральное сверло удлиняется. Поскольку осевая сила и крутящий момент по-разному влияют на осевую деформацию сверла, при исследовании устойчивости процесса, надо учитывать те составляющие силы резания, которые оказывают доминирующее влияние на устойчивость системы СПИД. Крутильная жесткость спиральных сверл по сравнению с осевой жесткостью очень низка и является основной причиной потери устойчивости. Исходя из этого, можно представить колебательную систему с одной степенью свободы в следующем виде:

$$I\ddot{\varphi} + h\dot{\varphi} + K\varphi = B(S + x)^q. \quad (1)$$

Правая часть уравнения представляет крутящий момент в функции от подачи S и ее приращения x (при депланации и мгновенного останова сверла при повороте его на угол φ). Коэффициент B и показатель степени q зависят от условий резания, и в реальных условиях работы $q \leq 1$.

После разложения правой части уравнений в биномиальный ряд, если ограничиться двумя первыми членами ряда, дифференциальное уравнение примет вид:

$$I\ddot{\varphi} + h\dot{\varphi} + (K - BS^{q-1}qN)\varphi - BS^q = 0, \quad (2)$$

где $N = K_0 + \frac{S}{2\pi}$ — коэффициент, учитывающий изменение подачи от депланации и мгновенного останова сверла.

Характеристическое уравнение получим, полагая, что интеграл уравнения (2) представлен в виде

$$\varphi = A + Ce^{\lambda t}. \quad (3)$$

Подставляя значение φ , его первую и вторую производные в (2), получим.

$$L\lambda^2 + h\lambda + (K - BS^{q-1}qN) = 0. \quad (4)$$

Из решения характеристического уравнения (4) можно написать условия устойчивости

$$K - BS^{q-1}qN > 0; \quad h^2 - 4J(K - BS^{q-1}qN) > 0. \quad (5)$$

Постоянная A определяется из уравнений (3) и (4).

$$A = \frac{BS^q}{K - BS^{q-1}qN}, \quad (6)$$

а C из начальных условий; когда $t=0$; $\dot{\varphi} = 0$,

$$\ddot{\varphi} = \frac{\Delta M}{I} = C\lambda^2,$$

где ΔM амплитуда крутящего момента

$$C = \frac{\Delta M}{L\lambda^2}. \quad (7)$$

Подставляя значения A , C , λ в уравнение (3), окончательно для крутильных колебаний получим

$$\varphi = \frac{BS^q}{L} + \frac{\Delta M}{L\lambda^2} e^{-n_1 t} \left(e^{n_2 t} + e^{-n_2 t} \right), \quad (8)$$

здесь

$$L = K - BS^{q-1}qN; \quad n_1 = \frac{h_2}{2I}; \quad n_2 = \frac{\sqrt{h^2 - 4IL}}{2I}.$$

При отрицательном значении подкоренного выражения ($h^2 - 4IL < 0$), колебание приобретает периодический характер

$$\varphi = A + e^{-n_1 t} (E \cos \omega t + F \sin \omega t), \quad (9)$$

где

$$\omega = \frac{\sqrt{4IL - h^2}}{2I}.$$

Если подставить значения E и F , полученные из вышеуказанных начальных условий, уравнение (9) примет вид

$$\varphi = \frac{BS^q}{L} + \frac{\Delta M}{L} e^{-n_1 t} \left(\cos \omega t + \frac{\sin \omega t}{\sqrt{4IL - h^2}} \right). \quad (10)$$

При отсутствии сил сопротивления ($n_1=0$), с учетом известных начальных условий, уравнение (10) можно написать в виде

$$\varphi = \frac{BS^q}{L} + \frac{\Delta M}{L} \cos \sqrt{\frac{L}{I}} t. \quad (11)$$

Для правильного анализа и оценки влияния режимного поля на частоту и амплитуду колебаний сил резания влияние каждого участка режущей кромки сверла на указанные величины определено методом рассверливания отверстий различных диаметров. Такая постановка вопроса важна с точки зрения оценки влияния каждого элемента режущей кромки на устойчивость упругой системы.

Эксперименты производились стандартными спиральными сверлами из быстрорежущей стали Р6М3 диаметром 26 мм в условиях вращения детали ($2\tau = 120$; $\alpha = 10^\circ$).

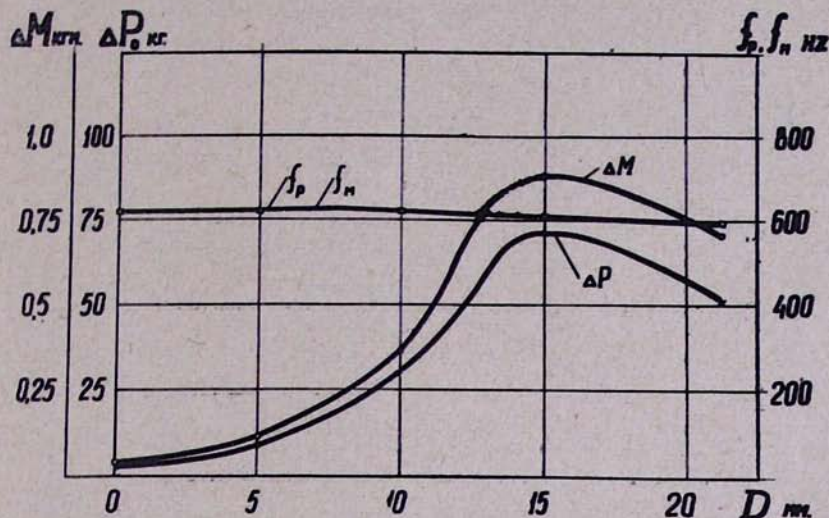


Рис. 1. Влияние диаметра рассверливаемого отверстия на частоту и амплитуду колебаний осевой силы и крутящего момента при обработке стали 45 ($S=0,1$ мм/об; $V=25,7$ м/мин).

На рис. 1 показана зависимость влияния диаметра просверливаемого отверстия на частоту и амплитуду колебаний осевой силы и крутящего момента. При сверлении сплошного отверстия амплитуда сил резания незначительна и составляет 2—3% общей осевой силы и крутящего момента. При рассверливании отверстий амплитуда увеличивается и достигает своего максимального значения при диаметре 15 мм, после чего уменьшается. Во всех случаях частота колебаний остается постоянной, причем частоты осевой силы и крутящего момента равны. Такую закономерность можно объяснить следующим образом: под влиянием крутящего момента сверло удлиняется на величину $x_1 = K_d \varphi$, под влиянием осевой силы — укорачивается на величину

$$x_2 = \frac{\sigma_0}{E},$$

где σ_0 — напряжение по оси сверла;
 E — модуль упругости.

При сверлении сплошного отверстия в углеродистых сталях стандартными спиральными сверлами деформации от скручивания и сжатия

сверла равны, а изменение толщины среза, поддерживающее колебания, происходит за счет мгновенного останова сверла — $x_3 = \frac{S\varphi}{2\pi}$.

Известно, что на долю перемычки сверла приходится больше половины от общей осевой силы [5], которая при рассверливании резко уменьшается. При этом влияние деформации сверла на толщину среза оказывается доминирующим и является причиной увеличения амплитуды сил резания. При увеличении диаметра рассверливаемого отверстия амплитуда сил резания по известной причине увеличивается, а затем несколько снижается. Это объясняется уменьшением максимальной ширины среза [4], при которой амплитуда имеет максимальное значение.

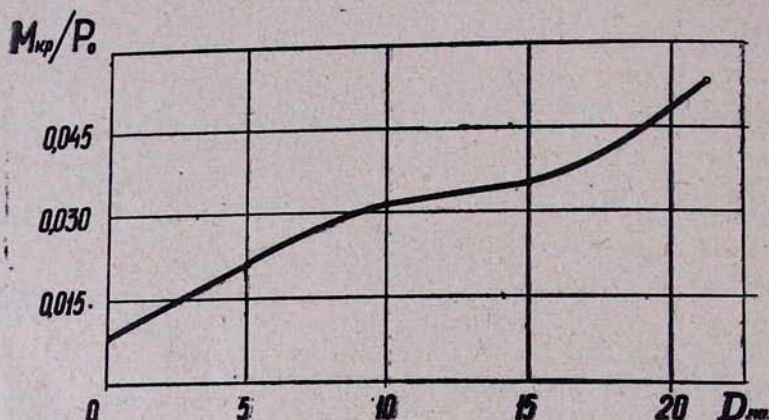


Рис. 2. Влияние диаметра рассверливаемого отверстия на отношение $M_{кр}/P_0$ при обработке стали 45 ($S=0,1$ мм/об; $V=25,7$ м/мин).

На рис. 2 представлена зависимость влияния диаметра рассверливаемого отверстия от отношения $M_{кр}/P_0$. Как видно, в пределах диаметров 12–16 мм кривая имеет перегиб, который соответствует максимальному значению амплитуд. Ниже и выше указанных диаметров процесс более устойчив, что свидетельствует о минимальной деформации сверла. Подобный характер изменения $M_{кр}/P_0$ от диаметра обусловлен сложностью распределения усилий по длине режущих кромок сверла. Наличие перегиба зависимости $M_{кр}/P_0$ от d можно объяснить также возникновением вибраций при сверлении сплошного отверстия, во время которого стружка остается в канавках сверла, пакетируется и увеличивает крутящий момент, в то время как по указанной причине осевая сила увеличивается незначительно. Нарушение отношения $M_{кр}/P_0$ приводит к увеличению амплитуды, частота которой устанавливается в зависимости от жесткости СПИД [6]. По мере углубления сверла жесткость возрастает, увеличивается частота колебаний и при большой амплитуде является причиной их частой поломки.

С целью определения влияния режимного поля на частоту и амплитуду колебаний сил резания для наглядности процесс рассматривается при рассверливании. Как видно из рис. 3, с увеличением скорости резания частота непрерывно возрастает и при $V=81,6$ м/мин достигает 600 гц, причем частоты крутильных и осевых колебаний равны, что свидетельствует о доминирующем влиянии деформации сверла. Характер изменения амплитуд осевой силы и крутящего момента одинаков и с увеличением скорости значения амплитуд доходят до своей максимальной величины при скоростях 35 ÷ 45 м/мин, т. е. при отсутствии нароста, затем снижаются.

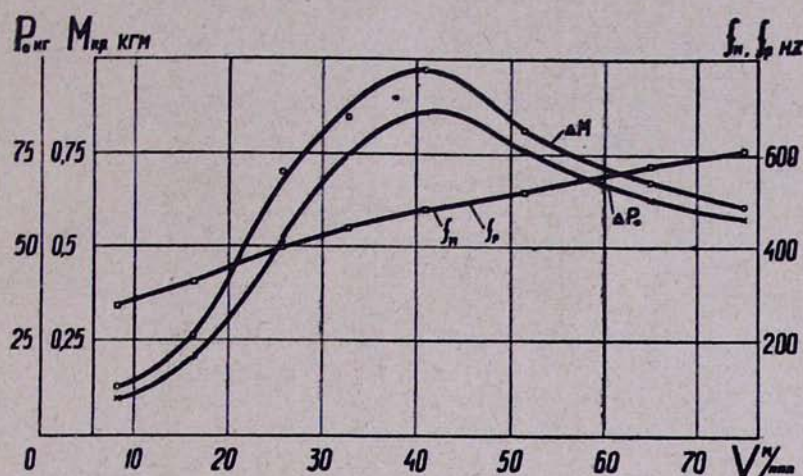


Рис. 3. Влияние скорости на частоту и амплитуду колебаний осевой силы и крутящего момента при рассверливании отверстий в стали 45 ($D/d=26/21$; $S=0,1$ мм/об).

Как известно, в исследованном диапазоне скоростей изменения сил резания имеют седлообразный характер, минимальные значения которых получаются при скоростях 35 ÷ 45 м/мин, что связано с образованием и исчезанием нароста. С увеличением сил, возбуждающих вибрации, амплитуды возрастают и их максимумы совпадают при указанных скоростях. Уменьшение амплитуды при дальнейшем возрастании скорости связано с повышением температуры, при которой усадка стружки, следовательно силы и их амплитуды, уменьшаются.

Для анализа характера изменения частоты от скорости резания рассмотрим два случая:

а) когда с изменением скорости частота остается постоянной — в этом случае она зависит только от жесткости и массы системы и определяется частотой собственных колебаний;

б) когда частота с увеличением скорости изменяется в большом диапазоне и в зависимости от параметров резания изменение может быть различным.

При сверлении сплошного отверстия изменение скорости не приводит к какому-либо изменению частоты. При переходе к рассверливанию

частота с увеличением скорости возрастает и происходит переход гармонических автоколебаний в релаксационные [2]. Из приведенного можно констатировать, что при сверлении увеличение ширины среза и уменьшение скорости резания способствуют релаксационным автоколебаниям.

Увеличение подачи не приводит к какому-либо изменению частоты, в то время как амплитуды осевой силы и крутящего момента уменьшаются и после подачи, равной 0,15 мм/об, становятся постоянными (рис. 4).

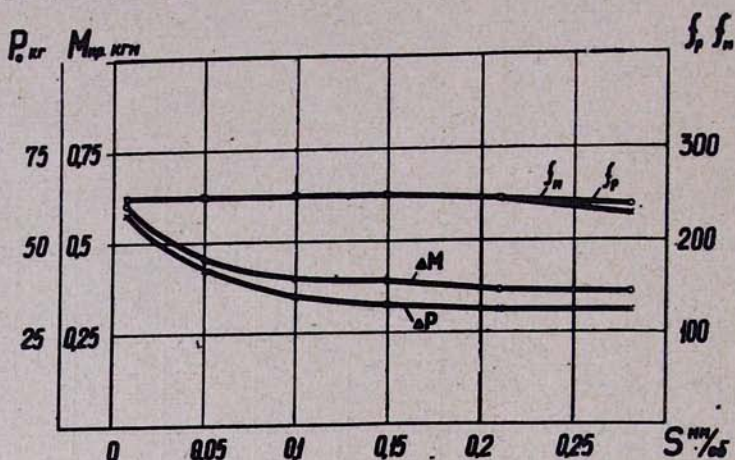


Рис. 4. Влияние подачи на частоту и амплитуду колебаний осевой силы и крутящего момента при рассверливании отверстий в стали 45 ($D/d=26/15$; $V=13,6$ м/мин).

Малые подачи приводят к большой интенсивности вибраций, поскольку причин для колебаний силы резания, действующих в направлении вызываемых ею вибраций, больше: с уменьшением подачи увеличивается влияние округления режущего лезвия сверла, которое приводит к возрастанию сил резания. Одновременно при малых подачах большое влияние на колебания оказывают следы вибраций на предыдущем обороте. По мере увеличения подачи влияние указанных неблагоприятных явлений становится незначительным. Наоборот, с увеличением подачи уменьшаются действительные задние углы сверла и затрудняется врезание режущих кромок в металл при мгновенном изменении скорости резания.

При обработке сталей с различными физико-механическими свойствами — железо Армко, СТ.3 1Х18Н9Т и Х23Н18 — характер изменения частот и амплитуд отличается по сравнению со сталью 45 (рис. 5 и 6). Частота крутильных колебаний для всех материалов с увеличением скорости резания возрастает (за исключением 1Х18Н9Т) с разной интенсивностью и при скоростях 40–50 м/мин стабилизируется. Что касается частоты осевых колебаний, то они, кроме железа Армко, возрастают до скорости 16,3 м/мин, затем падают до 800 гц при скоростях 40–50 м/мин. Причем в этом диапазоне скоростей частоты крутильных и осевых колебаний для исследуемых материалов одинаковы. Здесь нужно отметить большую разницу частот осевых и крутильных колебаний

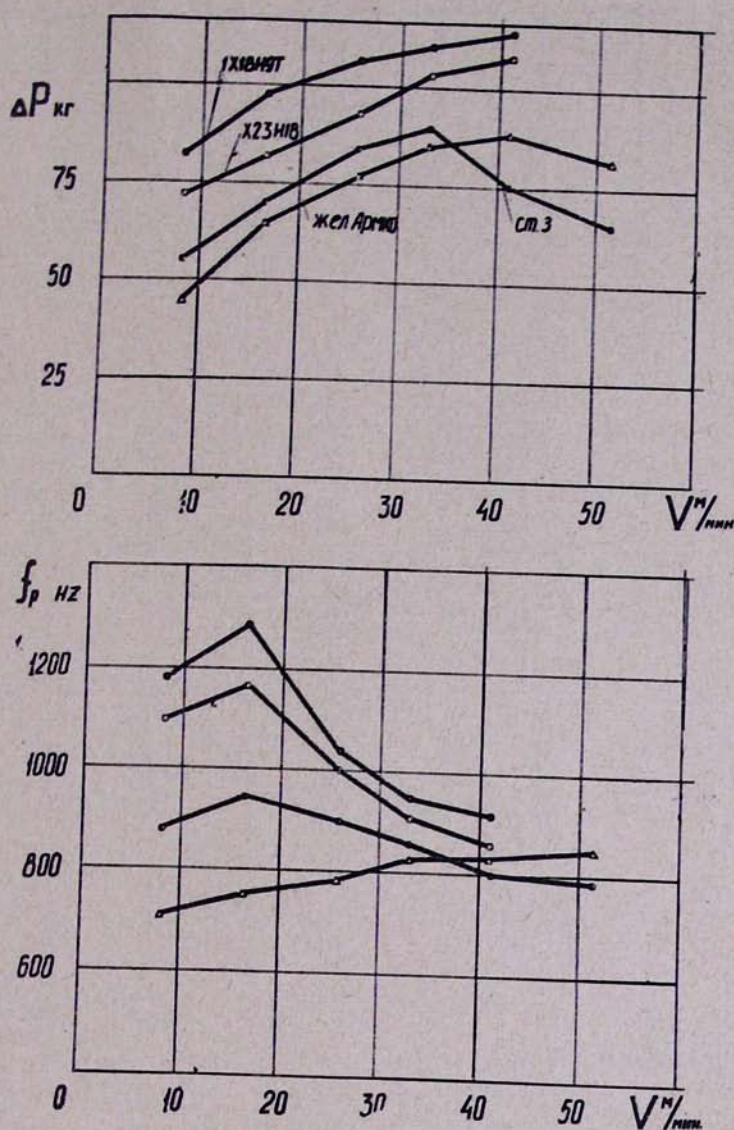


Рис. 5. Влияние скорости резания на частоту и амплитуду колебаний осевой силы при рассверливании различных материалов ($D/d=26/15$; $S=0,1$ мм/об).

при малых скоростях резания, которая с увеличением скорости уменьшается и при $V=40-50$ м/мин они становятся равными. Частота осевых колебаний при малых и средних скоростях устанавливается независимо от крутильных колебаний и можно полагать, что приведенное выше доминирующее влияние депланации сверла имеет место только при высоких скоростях. Подобную закономерность можно объяснить изменением отношения $M_{кр}/P_0$, что связано с физико-механическими свойствами обрабатываемых материалов, при сверлении которых условия способствуют переходу гармонических автоколебаний в релаксационные.

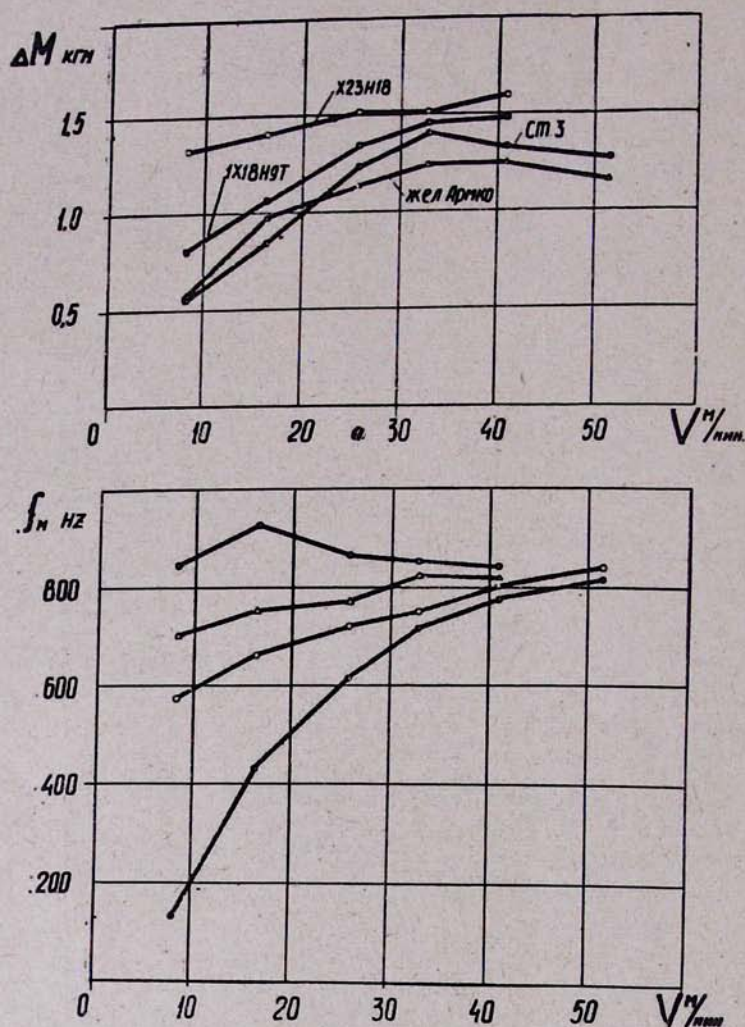


Рис. 6. Влияние скорости резания на частоту и амплитуду колебаний крутящего момента при рассверливании различных материалов ($D/d=26/15$; $S=0,1$ мм/об).

Характер изменения амплитуд осевых сил и крутящих моментов железа Армо и СТ.3 одинаков и сходен со сталью 45. Для жаропрочных сталей закономерность отличается от указанной и с увеличением скорости резания амплитуды возрастают. Непрерывный рост амплитуды объясняется большим трением по передней и задней граням сверла, которое свойственно жаропрочным материалам [3].

ВЫВОДЫ

1. При доминирующем влиянии депланации сверла частоты осевых и крутильных колебаний равны, а максимумы амплитуд совпадают. В этом случае устойчивость системы обеспечивается неравенствами (5).

При отсутствии доминирующего влияния деформации сверла частоты осевых и крутильных колебаний устанавливаются независимо и с увеличением скорости резания ($V=40 \div 50$ мм/мин) они приравняются.

2. Вибрации, возникающие при сверлении и рассверливании, имеют максимальную интенсивность при значении отношения $M_{кр}/P_0=0,032$.

3. На интенсивность вибрации большое влияние оказывают режимы резания: максимальное значение амплитуд осевых и крутильных колебаний имеется при скоростях $35 \div 45$ м/мин (сталь 45), которые уменьшаются с увеличением подачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Астахин, Динамика сверления глубоких отверстий в стали ЭИ992. «Станки и инструмент», № 11, 1963.
2. «Жесткость, точность и вибрации при механической обработке», под ред. Л. Скрагана, 1956.
3. Н. Н. Зорев, О влиянии свойств материала инструмента на процесс резания. «Вестник машиностроения», № 7, 1953.
4. А. И. Лойко, Исследование вибраций при зенкеровании стали в зависимости от условий обработки. Кандидатская диссертация, 1960.
5. М. Г. Фаградян, Распределение усилий по режущей кромке спирального сверла. «Промышленность Армении», № 8, 1968.
6. Яо-Ли-Пин, О виброустойчивости консольной борштанги с лысками. «Станки и инструмент», № 5, 1958.
7. S. H. Tobias, W. Fishwick, The vibration of radial drilling machines under test and working condition. «The chartered Mechanical Engineer». № 2, № 9, 1955 г.