

Сравнительное исследование точности отверстий в деталях из силумина при вибростерильной обработке**77-48211/514258****# 10, октябрь 2012****Соловьев А. И., Джафарова Ш. И.****УДК 621.952.2**

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

k_mt3@org.bmstu.ru

Теоретические исследования величин погрешностей и интенсивности их изменения по длине глубокого отверстия, обрабатываемого инструментом одностороннего резания, показали, что значительное влияние на них оказывают наличие явления копирования погрешностей, режимы резания, податливость технологической системы, длина инструмента. При этом отклонения расположения и формы поверхностей глубокого отверстия на выходном торце определяются погрешностью на входном торце и ее копированием по длине обработки [1].

Статическая расчетная схема (рис.1, а) без учета смещения формообразующей вершины относительно оси корпуса инструмента и деформации детали позволила провести анализ упругих деформаций технологической системы и установить уравнение изменения погрешностей отверстия при перемещении инструмента одностороннего резания в осевом направлении на величину “а” (рис 1, а)

$$\Delta r_S(l+a) = -P \times \Delta r_0(l) + P \times V_1 + (1-P) \times V_0 + P_q \times q_{00} + P_M \times V_M,$$

где P – коэффициент переноса (чувствительности) начальной погрешности; P_q и P_M – коэффициенты чувствительности к угловой погрешности и силовому воздействию соответственно; $\Delta r_0(l)$ – погрешность заходного участка; V_1 – отклонение расположения точки контакта опоры относительно оси инструмента; V_0 и q_{00} – линейная и угловая погрешности расположения опоры инструмента; l – расстояние от заделки до точки контакта направляющей инструмента с отверстием; a – расстояние от точки контакта направляющей инструмента с отверстием до сечения, в котором располагается формообразующая вершина инструмента; $V_M = l^2 \times (R_{\hat{N}} \times e - R_Y \times a) / E \times J_X$ – силовое воздействие, приведенное к размерности длины; R_{OC} и R_Y – равнодействующие осевой и радиальной составляющих сил резания; e – величина смещения осевой силы относительно оси корпуса инструмента; E и J_X – модуль упругости и момент инерции поперечного сечения корпуса инструмента.

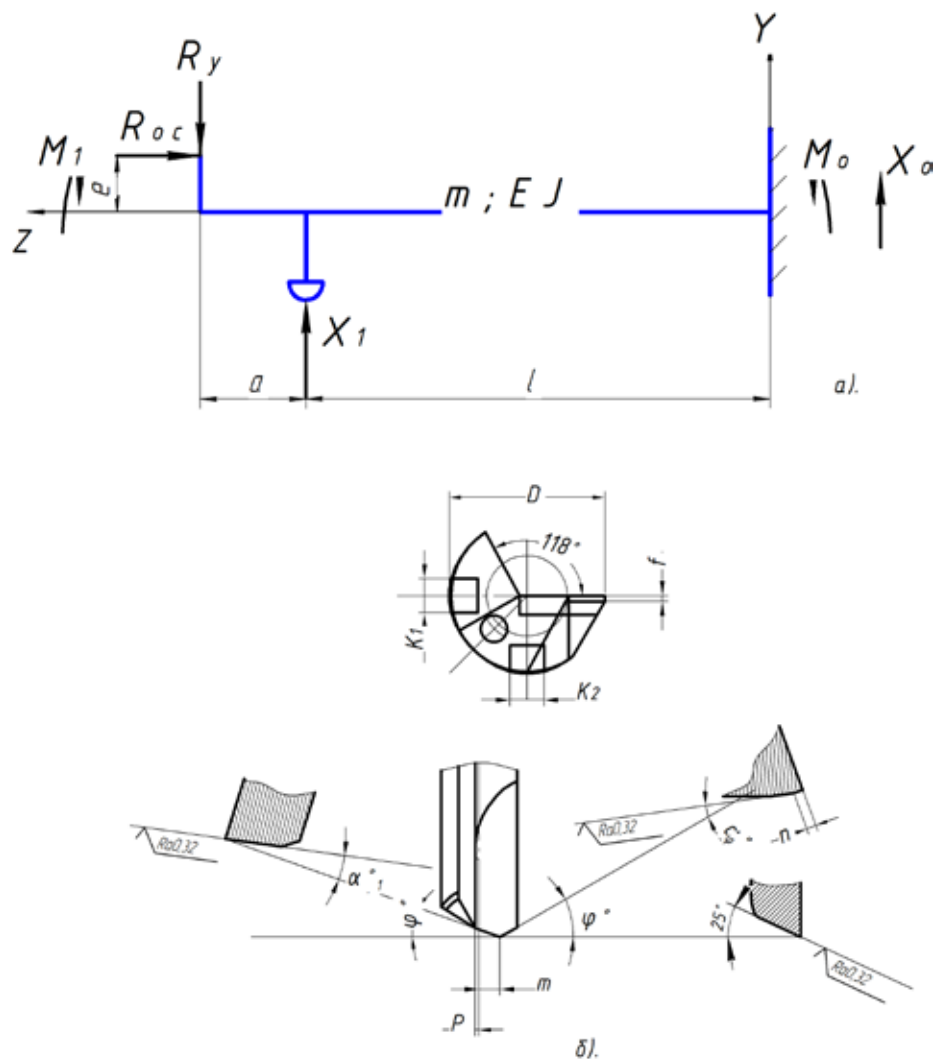


Рис. 1 Схемы: а - расчета смещений инструмента при сверлении; б - режущей части сверла, одностороннего резания

Для случая сверления без наложения вибраций на инструмент оператор системы, обозначающий способ, с помощью которого при известных воздействиях определяют элементарные смещения технологической системы на заходном участке обрабатываемого отверстия, определяют следующий образом:

$$A_{0(K=1)} = P^t = \left(1 + \frac{3a}{2l}\right)^{l_{i\alpha\delta}/a}.$$

При этом учитываем $\Delta r_{0(K=1)}$ – погрешность обработанного заходного участка поверхности отверстия, а также оператор системы, обозначающий задание способа, с помощью которого при известных силовых воздействиях определяют элементарные смещения технологической системы на последующих участках обрабатываемого отверстия

$$A_{q(K=1)} = \prod_{m=1}^t P^m \times P_M = \frac{1}{6} \left[\left(1 + \frac{3a}{2l}\right)^{l_{i\alpha\delta}/a} - 1 \right],$$

Для определения четных гармонических составляющих погрешности, например отклонения размера ($K=0$), воспользуемся зависимостью

$$A_{q(K=0)} = \frac{1}{8} \left[1 \pm \left(1 + \frac{3a}{2l} \right)^{l_{\text{об}}/a} \right] \frac{a}{l},$$

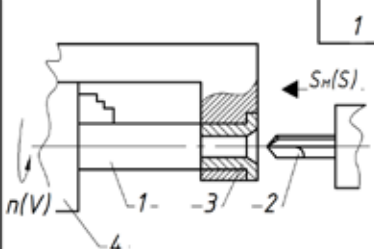
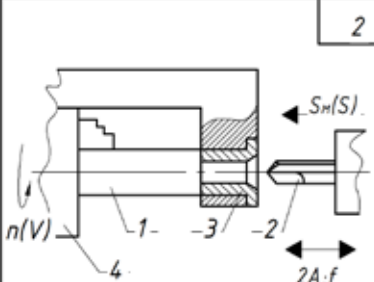
откуда при четном $l_{\text{об}}/a$ берем знак “+” и знак “-” при нечетном $l_{\text{об}}/a$, то есть ряд, указанный в скобках, знакопеременный и величина $A_{q(K=0)}$ зависит от значения a/l . Тогда оператор силового воздействия для четных гармоник ($K=1$ – отклонение расположения) значительно больше оператора силового воздействия для четных гармоник ($K=0$ – отклонение размера, $K=2$ – отклонение формы). Исходя из этого можно прогнозировать, что отклонение расположения поверхностей отверстия (по его длине) от номинального положения больше по величине и сильнее зависит от условий обработки, чем отклонение размера. И амплитуды гармонических составляющих с нечетными номерами увеличиваются непрерывно по длине, а значения отклонений на всех участках отверстия будут иметь одинаковый знак. Отклонения гармонических составляющих с четными номерами копируются с обратным знаком.

Рассмотренные закономерности качественно справедливы и для случая сверления при наложении вибраций на инструмент, однако в этом случае направляющая инструмента многократно проходит по ранее обработанному участку отверстия, что вероятнее всего приведет к увеличению погрешностей окончательно обработанных участков по длине отверстия. Многократное прохождение направляющей инструмента по ранее обработанному участку отверстия сопровождается восстановлением упругих отжатый технологической системы, повторяющимися процессами микрорезания калибрующей кромкой и выравнивания поверхности отверстия направляющей опорой инструмента.

Все это указывает на гораздо более сложные процессы, проходящие в момент формообразования поверхности глубокого отверстия при вибрационном, чем при обычном сверлении.

Для уточнения теоретических предположений был проведен ряд сравнительных экспериментальных исследований для обычного (схема 1) и вибрационного сверления (схема 2) по единой методике (таблица 1). Обработке подвергали вращающуюся заготовку 1, невращающимся инструментом 2, подаваемым через кондукторную втулку 3, заготовка закреплена в патроне 4.

Таблица 1 Исследуемые схемы глубокого сверления

Схема обработки	Модель станка	Обрабатываемые материалы	Режимы обработки	Исследуемые факторы
	BC-5	Силумин АЛ9	$n=1510; 2100; 2680 \text{ об/мин}$ $V=38; 53; 67,3 \text{ м/мин}$ $S_n=34,5; 53; 74,5 \text{ мм/мин}$ $S=0,013...0,049 \text{ мм/об}$	$\Delta p;$ $\Delta p_{\text{б}};$ $\Delta \phi^{\text{поп}} (C_k);$
	BC-5	Силумин АЛ9	$n=1510; 2100; 2680 \text{ об/мин}$ $V=38; 53; 67,3 \text{ м/мин}$ $S_n=34,5; 53; 74,5 \text{ мм/мин}$ $S=0,013...0,049 \text{ мм/об}$ $2A=0,13; 0,33 \text{ мм}$ $f=33,5; 105 \text{ Гц}$	

Обозначения: 1 – заготовка; 2 – сверло одностороннего резания;
 3 – кондукторная втулка; 4 – зажимное приспособление

Определены следующие параметры геометрической точности отверстия: Δp – отклонение размера; $\Delta p_{\text{б}}$ – радиальное биение обработанной поверхности (непосредственно после обработки на станке); $\Delta \phi^{\text{поп}} (C_k)$ – отклонение формы в поперечном сечении.

Экспериментальные образцы из силумина марки АЛ9 протачивали предварительно по торцу до $Rz 20 \text{ мкм}$ и наружной поверхности до $Ra 2,5 \text{ мкм}$. Образцы сверлили сначала с одной стороны на половину длины, а затем с другой стороны на ту же длину. Суммарная длина сверления с каждой стороны равна 55 мм. В каждом конкретном случае параметры точности обработки фиксировали в различных сочетаниях по шести сечениям (0, 1, 2, 3, 4, 5) с шагом 10 мм по длине заготовки (рис. 2).

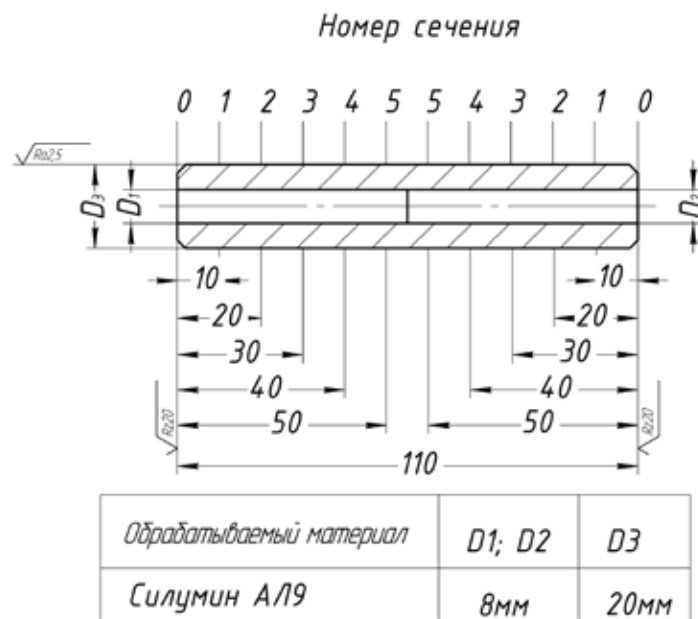


Рис. 2. Экспериментальные образцы

При обработке по схемам 1 и 2 на станке модели ВС-5 заготовки закрепляли в сырых кулачках 3-х кулачкового самоцентрирующего патрона. Перед использованием кулачки были расточены в размер диаметра экспериментальных образцов 20 мм, узел направления инструмента отбалансирован статически совместно с патроном и установлен на станке относительно посадочного места с радиальным биением не более 0,01 мм.

Сверление проводили сверлами одностороннего резания с плоскостной заточкой и геометрическими параметрами режущей части: $D=8_{-0,005}^{+0}$ мм; $\alpha_{\phi}=12^{\circ}$; $\alpha_{1\phi1}=12^{\circ}$; $\phi=30^{\circ}$; $\phi_1=20^{\circ}$; $m=2,2$ мм; $P=0,4$ мм; $p=0,5$ мм; $f=0,03$ мм; (рис. 1,б). Режущая и направляющая части изготовлены из твердого сплава марки ВК8, общая длина сверла 180 мм, длина V-образного паза 85 мм, длина вылета сверла из цанги 120 мм. Зазор между калибрующей частью инструмента и направляющей поверхностью кондукторной втулки поддерживали в пределах 0,005-0,008 мм.

Обработку заготовок (по схемам 1 и 2) проводили со следующими режимами: частота вращения шпинделя с закрепленной в патроне деталью $n=1510$; 2100 и 2680 об/мин при диаметре сверла 8 мм скорость резания составила соответственно $V=38,53$ и 67 м/мин; при минутной подаче $S_M=34,5$; 53; 74,5 мм/мин. Дополнительно по схеме 2 двойная амплитуда осевых колебаний и их частота фиксировались на уровнях $2A=0,13$; 0,33 мм; $f=33,5$; 105 Гц.

Давление смазочно-охлаждающей среды (СОС), масло марки МР-1 (ТУ 3821-01039-70), поддерживали постоянным $P=50$ кгс/см² ($4,9 \cdot 10^6$ Па) при расходе масла $Q=6,5$ л/мин. Используя полученные зависимости, проанализируем влияние отдельных технологических факторов на параметры точности (средние экспериментальные значения отклонений показаны на ряде графиков точками).

Измерение геометрических параметров обработанной поверхности проводили следующим образом. После обработки, не снимая детали со станка, фиксировали радиальное биение отверстия (Δ_{pb}) в трех сечениях по длине отверстия. Первое сечение

находилось у входного торца детали, второе – на расстоянии 30 мм от торца, третье – 50 мм. С помощью того же рычажного измерительного устройства в тех же сечениях по длине отверстия в двенадцати точках через 30° фиксировали положение точек профиля обработанной поверхности. По этим данным в дальнейшем проведен гармонический анализ. Нутромером повышенной точности модели 104 завода «Калибр» с ценой деления 0,002 мм в этих же сечениях измеряли значения максимального и минимального диаметров отверстия. Это позволяло определить погрешность размера (Δ_p) (как отклонение от фактического размера инструмента) и формы в продольном сечении ($\Delta_{\phi}^{\text{прод}}$). Помимо указанных выше геометрических параметров обработанной поверхности при сверлении по схемам 1 и 2 измеряли мощность резания с помощью измерительного комплекта K50.

При исследовании реализован полный факторный эксперимент. Каждый опыт повторен трижды. Результаты экспериментальных исследований, обработанные с помощью регрессионного анализа, позволили получить уравнения связи между исходным технологическими факторам и параметрами геометрической точности отверстия для схемы 1.

Выявлено, что отклонение размера Δ_p на участке врезания (сечение 0) определяется для силумина взаимодействием скорости резания V и подачи S_M :

$$D_p(0) = -59,18 + 1,234V + 1,234S_M - 0,0233V \times S_M, \text{ мкм.}$$

При обработке с $V = 67$ м/мин и $S_M = 34,5$ мм/мин, $\Delta_p = 32$ мкм; для $S_M = 74,5$ мм/мин, $\Delta_p = 10$ мкм; соответственно при $V = 38$ м/мин и $S_M = 34,5$ мм/мин, $\Delta_p = 8$ мкм, для других значений подач погрешность размера будет увеличиваться. Отклонение размера (разбивка) по длине отверстия не велико и имеет, как правило, наибольшее значение на участке врезания с последующим уменьшением по длине. Разница Δ_p на участках от 0 до 5 не более 8 мкм (рис. 3, а), что характеризует отклонение формы в продольном сечении $\Delta_{\phi}^{\text{прод}}$. В сечении 5 величина Δ_p определяется величиной скорости резания:

$$D_p(5) = 7,3477 + 1,1422V - 1,4195S_M - 0,021552VS_M + 0,02417V \times S_M^2, \text{ мкм.}$$

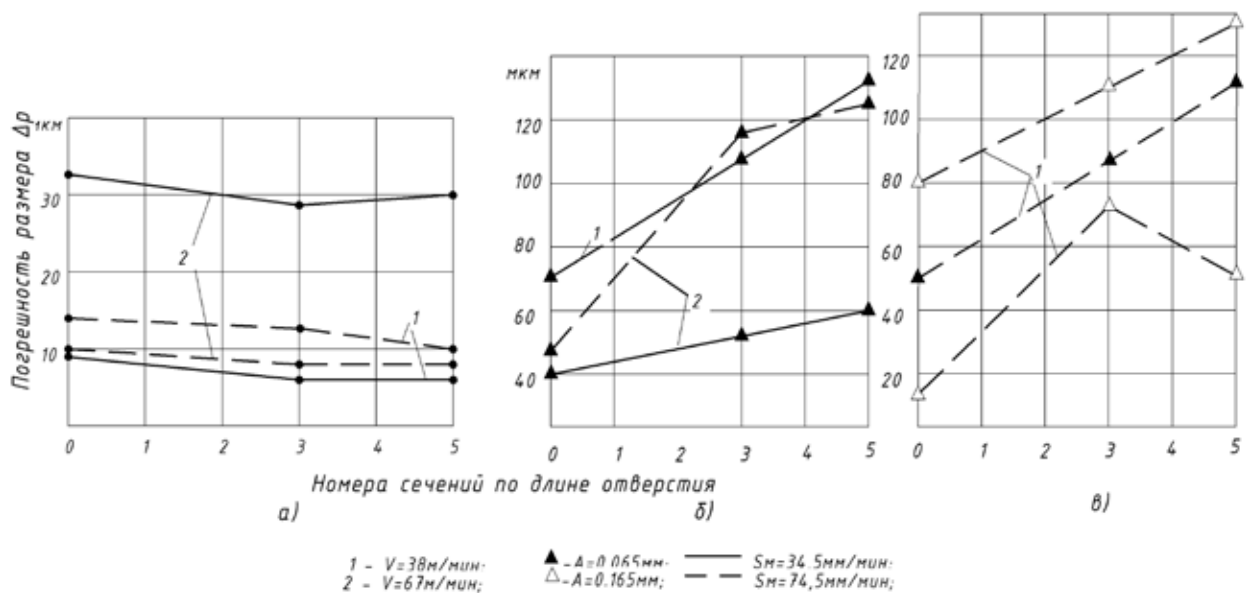


Рис. 3. Изменение погрешности размера Δp по длине отверстия при:
 а - обычном сверлении; б - вибрационном сверлении при постоянной $f=33.5$ Гц;
 в - вибрационном сверлении при различных амплитудах колебаний инструмента;

При обработке наблюдается только «разбивка». Сверление силумина следует вести с $V = 38$ м/мин и $S_M = 34,5$ мм/мин на заходном участке с последующим уменьшением подачи по длине отверстия. Эти режимы можно считать оптимальными с точки зрения получения минимальных значений погрешности размера.

Величина $\Delta_{p\delta}$ может быть подсчитана по формулам учитывающим биение кондукторной втулки $\Delta_{p\delta}^{em}$. Так при $\Delta_{p\delta}^{em} = 0,02$ мм использованы зависимости:
 - для силумина:

$$D_{p\delta}(l_{обp}) = 0,066 D_{p\delta}^{em} \left(1 + \frac{3}{2} \times \frac{a}{l}\right)^{l_{обp}/a} \times (V - 25,8) - 3(V + 0,803 S_M - 0,03047 V S_M - 58,5) \times l_{обp} / 50, \text{ мкм};$$

Как показали исследования при данной схеме обработки, величина радиального биения зависит сильно от скорости резания. При сверлении силумина также наблюдается заметное влияния подачи по мере увеличения глубины сверления (рис. 4).

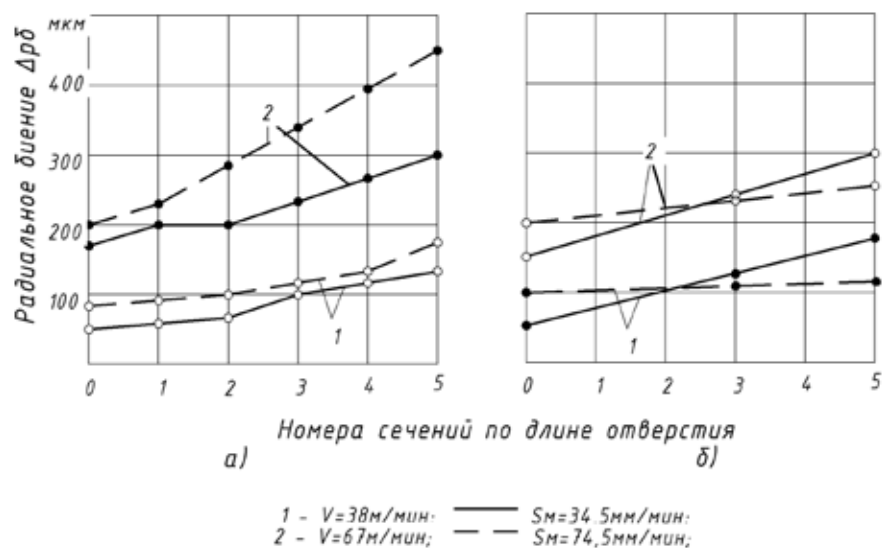


Рис. 4. Изменение радиального биения Δr_b по длине отверстия при:
а - обычном сверлении; б - вибрационном сверлении для постоянных $f=33.5$ Гц;
 $A=0.065$ мм;

Отметим значительное изменение величины радиального биения по длине отверстия (рис. 4,а). Увеличение Δr_b обусловлено наличием явления переноса (копирования) погрешности заходного участка вследствие кинематического возбуждения инструмента в процессе обработки, что подтверждает результаты теоретического анализа [1]. Степень переноса погрешности заходного участка $\Delta r_b(0)$ по длине отверстия, также зависит от уровня скорости резания. Если при $S_M = 53$ мм/мин и $V = 67$ м/мин величина радиального биения изменяется по сечениям в пределах от $\Delta r_b(0) = 140$ мкм до $\Delta r_b(5) = 350$ мкм, то при $V = 53$ м/мин – от $\Delta r_b(0) = 115$ мкм до $\Delta r_b(5) = 260$ мкм и при $V = 38$ м/мин – от $\Delta r_b(0) = 85$ мкм до $\Delta r_b(5) = 155$ мкм.

Отсюда можно заключить, что для достижения минимальных значений Δr_b обработку нужно вести при скоростях резания не более $V = 38$ м/мин, подача назначается наибольшей $S_M = 53...74,5$ мм/мин.

Аналізу влияния режимов резания на спектр амплитуд C_K гармонических составляющих погрешности формы отверстия в поперечном сечении $\Delta \phi^{non}$ подвергались первые шесть гармонических составляющих, так как профиль отверстия измерялся в двенадцати точках, и величина амплитуды C_6 чаще всего не превышает 4 мкм. Приведем зависимости величин амплитуд гармонических составляющих от режимов резания, полученные при обработке силумина для сечения 5:

$$C_1 = -39,5291 + 1,029449 \times V + 1,58836 \times S_M + 0,0538625 \times V \times S_M - 0,035925 \times S_M^2, \text{ мкм}$$

$$C_2 = 98,2125 - 2,40265 \times V - 1,42484 \times S_M + 0,0144829 \times V \times S_M + 0,0190248 \times V^2 + 0,007875 \times S_M^2, \text{ мкм}$$

$$C_3 = 6,8756 + 0,11952 \times V, \text{ мкм}$$

$$C_4 = 35,19493 - 1,16357 \times V - 0,17052 \times S_M + 0,0043966 \times V \times S_M + 0,0100689 \times V^2, \text{ мкм}$$

$$C_5 = 3,324 + 0,044828 \times V, \text{ мкм}$$

$$C_6 = 14,3806 - 0,37548 \times V - 0,32533 \times S_M + 0,0081037 \times V \times S_M, \text{ мкм.}$$

Как правило, с увеличением скорости резания V наблюдается рост амплитуд гармонических составляющих $C_1 \dots C_6$ (рис. 5,а и 6,а). Так при $S_M = 74,5$ мм/мин и $V = 38$ м/мин $C_1 = 82$ мкм, $C_2 = 6$ мкм, $C_3 = 9$ мкм, $C_4 = 5$ мкм, $C_5 = 4$ мкм, $C_6 = 3$ мкм, а при $V = 67$ м/мин и $S_M = 74,5$ мм/мин $C_1 = 240$ мкм, $C_2 = 22$ мкм, $C_3 = 15$ мкм, $C_4 = 12$ мкм, $C_5 = 6$ мкм, $C_6 = 10$ мкм. Для амплитуд C_2 и C_4 минимальные величины достигаются при $V = 53$ м/мин, $S_M = 34,5$ мм/мин. Заметим, что на высоких скоростях резания увеличение подачи приводит к резкому росту величин амплитуд C_1, C_2, C_4, C_6 .

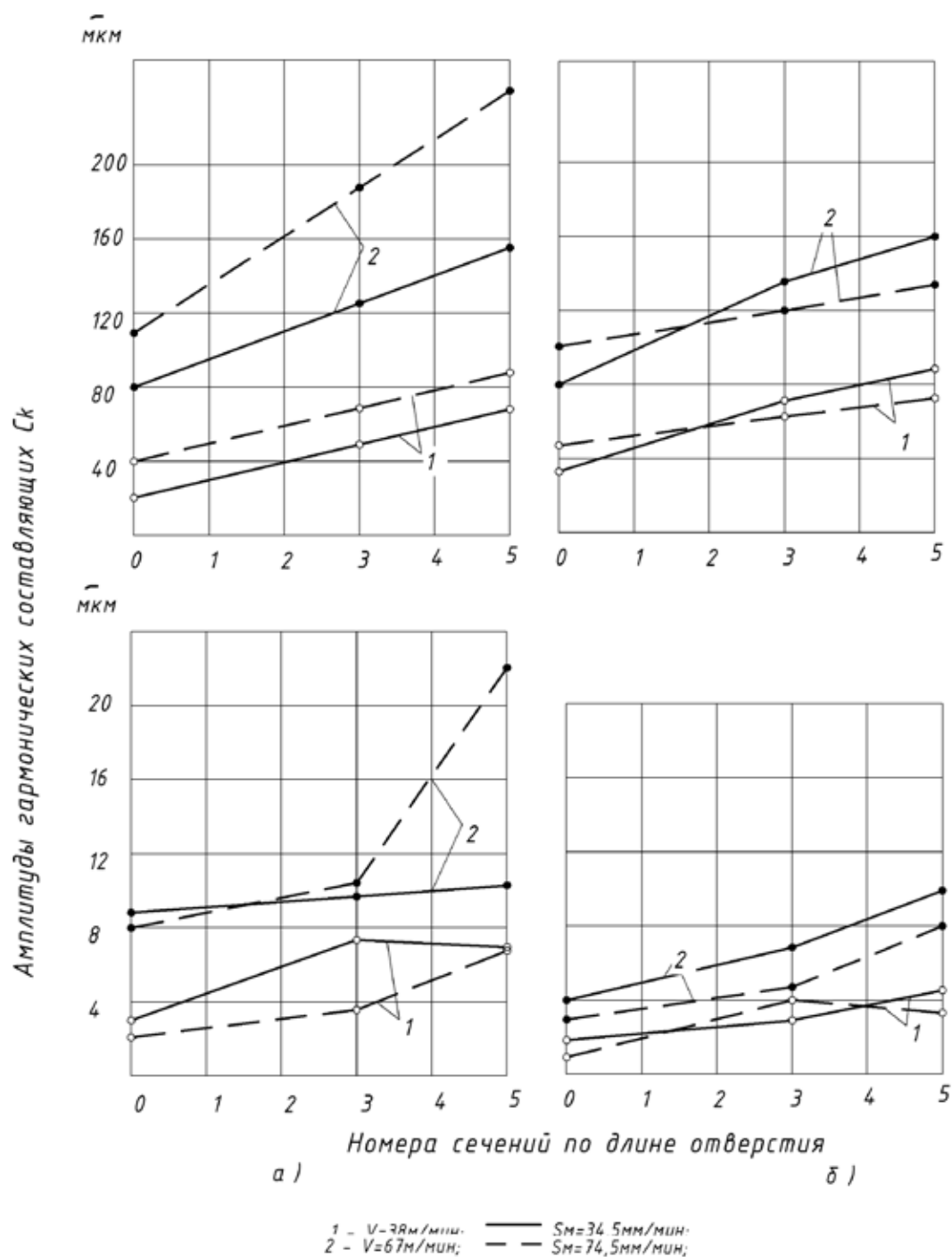


Рис. 5. Изменение амплитуды гармонических составляющих C_1 и C_2 по длине отверстия при: а - обычном сверлении; б - вибрационном сверлении при постоянных $f=33,5$ Гц; $2A=0,13$ мм;

Таким образом, для обеспечения минимальных значений амплитуд $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ гармонических составляющих при сверлении силумина следует назначать $V = 38$ м/мин, $S_M = 74,5$ мм/мин.

Анализ величин амплитуд гармонических составляющих C_k для отверстий, просверленных по схеме 1, показал, что наибольшую величину имеет составляющая C_1 на

заходном участке $C_1 = 23...111$ мкм, в сечении 5 соответственно $C_1 = 74...239$ мкм, таким образом наблюдается рост амплитуды C_1 по длине отверстия приблизительно в 2 раза.

В целях выявления показателей точности обработки глубокого отверстия при вибрационном сверлении (таблица 1) были проведены специальные эксперименты (по схеме 2). На выходе технологической системы измеряли и анализировали: Δ_p , $\Delta_{pб}$, $\Delta_{\phi}^{non}(C_K)$.

При сверлении отверстий в заготовках из силумина Δ_p возросла в 2...5 и более раз, по сравнению с обработкой без вибраций. Так при обработке силумина увеличилось влияние подачи и скорости резания. Одновременное их увеличение или уменьшение влечет рост погрешности размера (рис. 3,б) до $\Delta_p = 18...80$ мкм на участке врезания (сечение 0) и $\Delta_p = 53...130$ мкм на участке 5. Увеличение амплитуды A осевых колебаний инструмента приводит к резкому росту Δ_p во всем диапазоне режимов обработки (рис. 3,в): $\Delta_p = 46$ мкм при $V = 38$ м/мин; $S_M = 74,5$ мм/мин; $f = 33,5$ Гц; $A = 0,065$ мм – сечение 0 и $\Delta_p = 78$ мкм при $A = 0,165$ мм. Одновременно при увеличении A резко возрастает и погрешность формы отверстия в продольном сечении Δ_{ϕ}^{prod} . Так при названных режимах обработки в сечении 5 имеем: $\Delta_p = 112$ мкм при $A = 0,065$ мм и $\Delta_p = 128$ мкм при $A = 0,165$ мм. Соответственно в этих случаях имеем $\Delta_{\phi}^{prod} = 62$ мкм при $A = 0,065$ мм и $\Delta_{\phi}^{prod} = 48$ мкм при $A = 0,165$ мм. В диапазоне исследуемых режимов резания величина амплитуды колебаний инструмента является одним из наиболее доминирующих факторов, влияющих на погрешность размера при сверлении силумина.

Погрешность размера по длине сверления силумина имеет существенную тенденцию к росту (рис. 3,б и 3,в), чего не наблюдалось при сверлении без наложения осевых вибраций на инструмент (рис. 3,а). В результате многократно возрастает погрешность формы в продольном сечении отверстия.

Доминирующее влияние скорости резания на величину радиального биения при обработке по схеме 1 сохраняется и при обработке по схеме 2 (табл. 1). При этом для одноименных режимов обработки величина $\Delta_{pб}$ во всем диапазоне скоростей резания $V = 38...67$ м/мин для силумина уменьшается на 10...100 мкм (рис. 4,б). Эти соотношения справедливы для участка начала (сечение 0) и окончания обработки (сечение 5). Влияние S_M на величину $\Delta_{pб}$ незначительно (рис. 4,б) во всех случаях вибрационного сверления.

Влияние амплитуды колебаний инструмента таково, что при обработке сплава АЛ-9 с $V = 38$ мм/мин; $S_M = 74,5$ мм/мин; $f = 33,5$ Гц и $A = 0,065$ мм – $\Delta_{pб}$ возрастает до величины $\Delta_{pб} = 123$ мкм, но при $A = 0,165$ мм – уменьшается до $\Delta_{pб} = 120$ мкм (сечение 5). Такая тенденция наблюдается при изменении частоты колебаний до $f = 105$ Гц. Вибрационное сверление силумина с частотой колебаний инструмента $f = 33,5$ Гц приводит к уменьшению $\Delta_{pб}$ с 450 мкм до 253 мкм (сечение 5), а при $f = 105$ Гц – до $\Delta_{pб} = 310$ мкм, по сравнению с обычным сверлением.

Характер и интенсивность роста радиального биения по длине отверстия для испытуемого материала во всем диапазоне V и S_M идентичны полученным при сверлении без осевых вибраций инструмента (рис. 4). Такая картина подтверждает предположение, сделанное в отношении процесса сверления по схеме 1 о наличии механизма (копирования) переноса погрешности $\Delta_{pб}$ заходного участка ввиду особого кинематического воздействия на инструмент в процессе глубокого сверления. Наличие или отсутствие осевых вибраций инструмента большого значения здесь не имеет.

Для получения наименьших значений $\Delta_{рб}$ рекомендуется вести сверление с $V = 38$ м/мин и $S_M = 53...74,5$ мм/мин, т.е. с теми же значениями V и S_M , что и для схемы 1. Так же следует назначать величину амплитуды $A = 0,165$ мм и частоту колебаний инструмента $f = 33,5$ Гц.

Влияние уровня скорости резания как доминирующего фактора на спектр амплитуд C_K гармонических составляющих погрешности формы отверстия в поперечном сечении сохраняется идентичным схеме 1. Вибрационное сверление сплава АЛ-9 позволяет уменьшить величины амплитуд всех шести гармонических составляющих. Особенно это заметно при больших скоростях резания, например, $C_1 = 133$ мкм при $V = 67$ м/мин, $S_M = 74,5$ мм/мин, $f = 33,5$ Гц, $A = 0,165$ мм. Для тех же условий обработки по схеме 1 $C_1 = 238$ мкм (рис. 5,а и 6,а) или $C_4 = 6$ мкм на тех же режимах по схеме 2 и $C_4 = 12$ мкм – по схеме 1 (рис. 5,б и 6,б). Влияние подачи на величины C_K незначительно. Увеличение амплитуды осевых колебаний инструмента при наименьшем уровне подачи $S_M = 34,5$ мм/мин; $V = 38$ мм/мин; $f = 33,5$ Гц приводит к увеличению $C_1... C_6$ для силумина как в начале обработки, так и далее в любом сечении отверстия по длине. Так $C_2 = 4$ мкм при $A = 0,065$ мм и $C_2 = 19$ мкм при $A = 0,165$ мм – в сечении 5. Увеличение частоты колебаний инструмента в большинстве случаев не дает существенного снижения величин C_K . Обработку АЛ-9 следует вести при $f = 33,5$ Гц. В этом случае удастся уменьшить амплитуды всех гармонических составляющих в 1,5 – 3 раза. В худшем случае значения амплитуд оставались близки к результатам схемы 1.

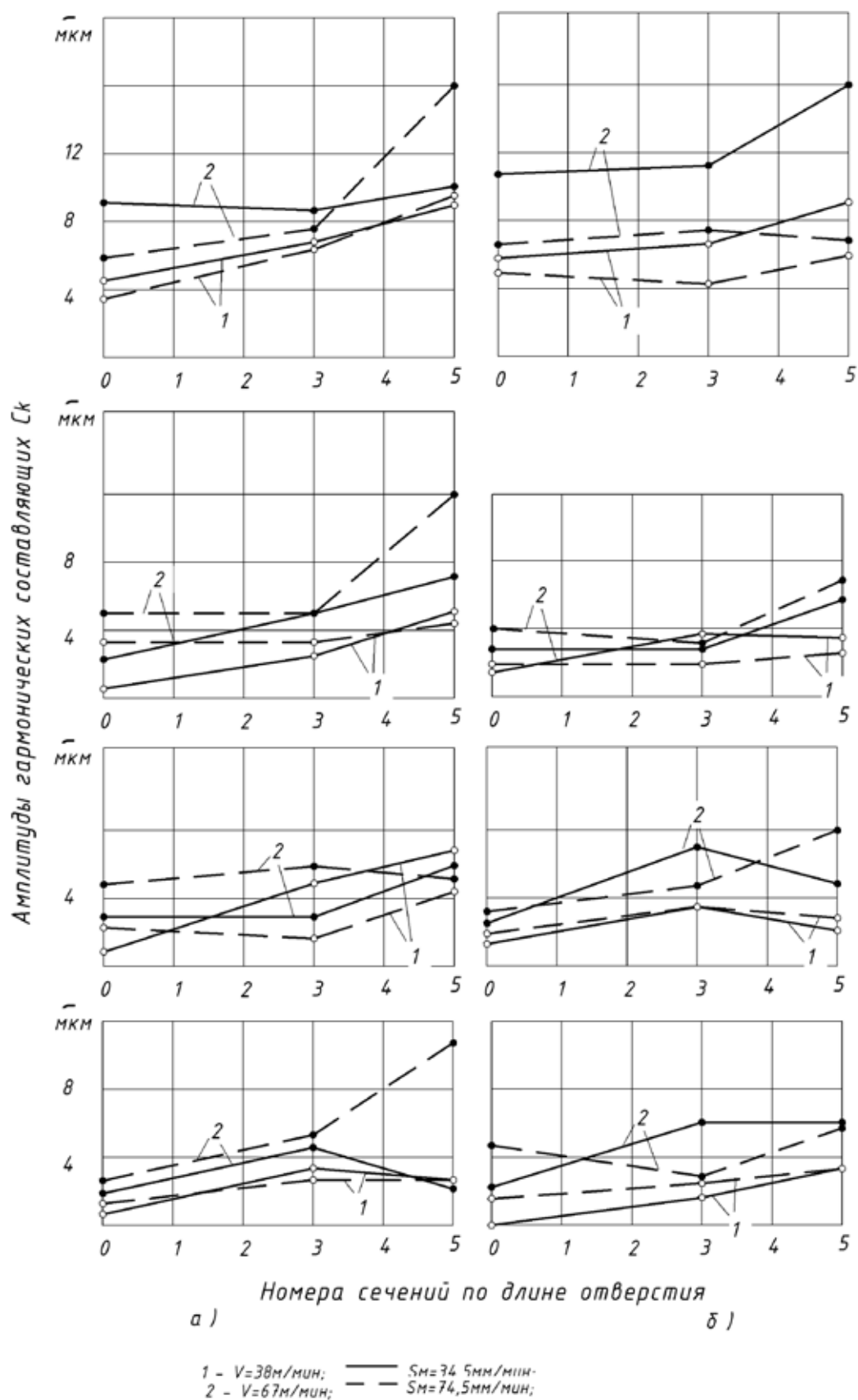


Рис. 6. Изменение амплитуды гармонических составляющих S_3 , S_4 , S_5 , S_6 , по длине отверстия при: а - обычном сверлении; б - вибрационном сверлении при постоянных $f=33.5$ Гц; $2A=0.13$ мм;

Как указывалось ранее, амплитуды гармонических составляющих возрастают с увеличением скорости резания, поэтому обработку силумина следует вести с $V = 38$ мм/мин; $S_M = 74,5$ мм/мин; $A = 0,165$ мм и $f = 33,5$ Гц. Эти режимы совпадают с рекомендациями по получению наименьших величин радиального биения Δ_{pb} при обработке по данной схеме.

Из графиков (рис. 5,б и 6,б) можно установить, что удельный вес амплитуд первых трех гармонических составляющих C_1, C_2, C_3 остается наибольшим в сравнении с C_4, C_5, C_6 . Это характерно для любого поперечного сечения отверстия и свидетельствует о наличии явления переноса (копирования) величин C_K и $\Delta_{\phi}^{ноп}$ от заходного участка отверстия (сечения 0) к его последующим участкам (сечения 1, 2, 3, 4, 5).

Важным преимуществом процесса вибрационного сверления является меньшая, чем в случае обычного сверления, величина необходимой мощности привода главного движения, затрачиваемая на процесс резания. При наложении осевых вибраций на инструмент отделение стружки происходит не только за счет силовых воздействий, но и самой кинематики процесса резания. Это облегчает отделение стружки, способствует её измельчению и делает удобной для транспортирования из зоны резания. Для обеих схем обработки наибольшее влияние на величину мощности оказывает уровень подачи инструмента. Так при обработке по схеме 1 силумина во всех случаях величина необходимой мощности на 30...50 % меньше. Использование вибрационного сверления следует учитывать при разработке новых энергосберегающих технологических процессов.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации.

1. Установлено, что для всех исследуемых схем обработки на величины погрешностей $\Delta_r, \Delta_{pb}, \Delta_{\phi}^{ноп}$ (C_K) и интенсивность их изменения по длине обработки оказывают значительное влияние уровень режимов резания и наличие явления копирования, характерное для обработки инструментом одностороннего резания (рис. 1,а).

2. Для исследуемых схем обработки величина Δ_r определяется величиной скорости резания (рис. 3) на всех участках сверления (от заходного до конечного).

Для получения минимальных величин Δ_r и $\Delta_{\phi}^{прод}$ рекомендуется устанавливать минимальное значение режимов резания $V = 38$ м/мин; $S_M = 34,5$ мм/мин. В этом случае для заготовок из силумина возможна «разбивка» отверстия, которая получается минимальной при вибрационном сверлении с $f = 33,5$ Гц и $A = 0,065$ мм и теми же V и S_M . При этом величина разбивки в 2 и более раз выше, чем при сверлении без осевых вибраций инструмента.

3. Выявлено, что характер роста радиального биения по длине отверстия во всем диапазоне V и S_M идентичны как при обычном, так и при вибрационном сверлении, однако интенсивность роста Δ_{pb} при вибросверлении ниже.

4. Показано, что во всех исследуемых случаях наибольшее значение имеют амплитуды первых трех гармонических составляющих C_1, C_2, C_3 . Все последующие величины амплитуд тем меньше, чем выше номер гармонической составляющей (рис. 5 и 6). Наибольший удельный вес в погрешности формы отверстия в поперечном сечении $\Delta_{\phi}^{ноп}$ составляют, C_2, C_3 .

Доминирующим фактором, оказывающим наиболее влияние на величины и интенсивность роста $C_1 \dots C_6$, является скорость резания.

Амплитуда первой гармонической составляющей C_1 , характеризующая отклонение расположения оси отверстия от номинального положения, на 1...2 порядка превосходит все остальные. При вибросверлении силумина удастся уменьшить величину C_1 в 1,1...1,5 раза.

5. Определено, что минимальные значения Δ_{pb} и амплитуд C_k (схема 1 и 2) рекомендуется получать при $V = 38$ м/мин; $S_m = 74,5$ мм/мин., а для вибросверления при $A = 0,165$ мм, частоте осевых колебаний инструмента $f = 33,5$ Гц.

Л и т е р а т у р а

1. Образование погрешностей при обработке глубоких отверстий /А.И.Соловьёв.// Прогрессивная технология механосборочного производства: Труды МГТУ № 535. Изд-во МГТУ.-М.: 1989. С. 92-104.