

На правах рукописи

Сергеев Сергей Васильевич

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИ СВЕРЛЕНИИ
ОТВЕРСТИЙ СПИРАЛЬНЫМИ СВЕРЛАМИ ПУТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ДИНАМИЧЕСКИМИ СОСТАВЛЯЮЩИМИ ПРОЦЕССА

Специальность 05.02.08 - "Технология машиностроения"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 1995

Работа выполнена на кафедре "Технология машиностроения, станки и инструмент" Златоустовского филиала Челябинского государственного технического университета.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
С.Г.Лакирев

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и техники России,
доктор технических наук, профессор В.С.Мухин
(г. Уфа);
кандидат технических наук, доцент Ю.Г.Миков
(г. Миасс).

Ведущее предприятие - ПО машиностроительный завод "Булат",
г. Златоуст.

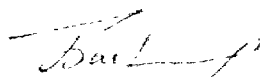
Защита состоится 19 декабря 1995 г., в 14-00 часов, на заседании диссертационного совета Д053.13.05 в Челябинском государственном техническом университете по адресу: 454030, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.

Просим Вас принять участие в заседании диссертационного совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинского государственного технического университета.

Автореферат разослан " 7 " ноября 1995 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета -
доктор экономических наук,
профессор



И.А.Баев

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В присоединительных фланцах, крышках, кронштейнах и т.п. отверстия, как правило, обрабатываются сверлением (рассверливанием). В производственных условиях заданные параметры точности размера, формы и координатного расположения осей отверстий обеспечиваются нестабильно. Указанные трудности объясняются недостаточной изученностью таких динамических факторов как продольные и поперечные вибрации инструмента, синхронизационные эффекты и т.д. Нет также обоснованных рекомендаций по устранению или управлению вибрационными процессами при выборе режимов обработки, геометрии инструмента, проектировании оснастки и т.д.

В связи с изложенным повышение точности обработки отверстий при сверлении является актуальной задачей.

Данная работа выполнена в соответствии с научным направлением ЧТУ- "Совершенствование оборудования и технологии в машиностроении" (направление 2).

Цель работы. Повышение точности обработки при сверлении отверстий спиральными сверлами на основе математического моделирования и управления динамическими составляющими процесса.

Научная новизна. Исследовано взаимодействие инструмента и заготовки, в частности, учтены динамические факторы. На основе комплексных исследований быстрых и медленных (одного порядка или меньше частоты вращения) формообразующих движений сверл установлено, что собственная устойчивость процесса отсутствует из-за переменности толщины среза каждым из режущих лезвий сверла, а его несобственная устойчивость возникает при наличии кинематической неголономной связи - центров мгновенного контакта режущих лезвий и поверхности резания. При этом, поперечные колебания симметрично заточенного сверла вызывают кинематические изменения углов резания, что в сочетании с осевыми колебаниями существенно влияют на точность расположения, размер и форму (в продольном и поперечном сечениях) обрабатываемых отверстий. Показана связь между погрешностями обработки и конструктивно-технологическими факторами и динамическими параметрами процесса сверления.

Разработана методика диагностики причин вибрационного характера, из-за которых возникают систематические погрешности при сверлении отверстий. Предложены новые методы управления точностью расположения, размера и формы обрабатываемых отверстий путем регулирования амплитудно-фазо-частотных характеристик технологических систем.

Практическая полезность. На основе вскрытых закономерностей и выявленных механизмов образования погрешностей при сверлении отверстий, разработана инженерная методика диагностики причин вибрационного характера и устранения брака по точности обработки. Разработано 6 новых способов обработки отверстий, в том числе обоснована четвертая, ранее неизвестная, схема сверления. Разработаны 16 рациональных элементов технологической системы, причем 15 из них обладают свойствами "гибкости" и могут быть использованы на станках с ЧПУ. Результаты работы могут быть использованы в смежных областях, так метод возбуждения вибрации может быть использован в различного рода вибрационных машинах.

На защиту выносятся: результаты теоретического и экспериментального исследования поперечных и осевых колебаний сверл, определяющих точность расположения оси, размера и формы отверстий; методика отладки операций сверления отверстий; новые способы и элементы технологических систем для обработки отверстий в условиях гибкого автоматизированного и массового производства.

Реализация результатов работы. Практическое применение разработок позволяет на этапах технологической подготовки и непосредственно в производственных условиях прогнозировать точность обработки систем отверстий и при необходимости корректировать условия обработки. Применение данной методики на П.О. "Булат" г. Златоуст, П.О. "УРАЛАЗ" г. Миасс и одном из предприятий г. Москвы, позволило ликвидировать брак деталей по точности размера, формы и расположения отверстий и внедрить способ стабилизации несимметричных нагрузок при многоинструментной обработке, способ управления размером отверстий, способ сверления отверстий в составных деталях с использованием "плавающего" кондуктора и ряд конструкций многоинструментных головок с малыми межосевыми расстояниями инструментов и устройств для беззазорного направления сверл. Научные разработки внедрены в учебный процесс подготовки инженеров-механиков.

Реальный годовой экономический эффект составляет более 30 тыс. рублей в ценах 1990 г. и 1500 тыс. рублей в ценах 1995 г.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на Международном научно-техническом семинаре "Новый высокоэффективный режущий инструмент и оснастка - средство интенсификации машиностроительного производства" в г. Ленинграде в 1989 году, на Межреспубликанской научно-технической конференции "Проблемы автоматизации технологических процессов в машиностроении" в г. Волгограде в 1989 году, на научно-технических конференциях Челябинско-

го политехнического института им. Ленинского комсомола в 1979...1995 годах, на объединенных заседаниях кафедр "Технология машиностроения, станки и инструмент", "Техническая механика" ЭФ ЧПИ, на областной научно-технической выставке "ЧПИ-82" в г. Челябинске в 1982 году, на объединенном заседании кафедр технологического профиля Челябинского государственного технического университета, Челябинск, 1995 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе 16 авторских свидетельств на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Объем работы 255 страниц машинописного текста, 115 рисунков и 12 таблиц. Библиография содержит 176 наименований.

Содержание работы

Большой вклад в решение проблем точности и производительности механической обработки деталей машин внесли русские ученые Корсаков В.С., Дальский А.М., Рыжов Э.В., Корчак С.Н., Матвеев В.В., Мирнов И.Я., Мухин В.С. и др. Вопросы моделирования точности при обработке отверстий концевыми мерными инструментами рассмотрены в работах Подураева В.Н., Светлицкого В.А., Мещерякова Р.К., Косиловой А.Г., Холмогорцева Ю.П., Закарян Л.Я. и др. Причем, в моделях Косиловой А.Г., Холмогорцева Ю.П., Закарян Л.Я. и др. сверло рассматривается как вибрирующий резец без учета базирования его в отверстии. Такой подход неадекватно отражает реальные процессы, происходящие при сверлении отверстий.

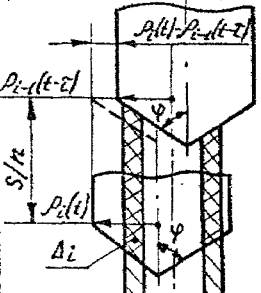
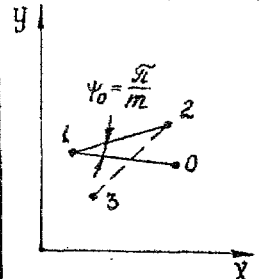
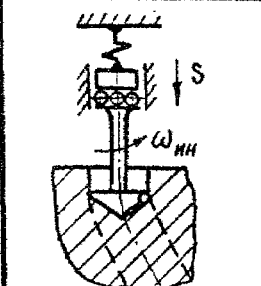
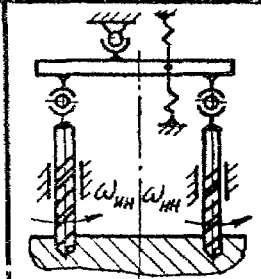
Математические модели Подураева В.Н., Светлицкого В.А., Мещерякова Р.К., Матвеева В.В., Лакирева С.Г. учитывают базирование инструмента по поверхности заготовки. Причем в работах Лакирева С.Г., Хилькевича Я.М. и Решетникова В.А., показано, что при базировании инструмента на поверхность резания и заднюю кромку детали и наличии осевых или крутильных колебаний с частотой ω_0 , равной частоте вращения $\omega_{вр}$ с ограниченной амплитудой, наблюдается ряд интересных явлений, например, неограниченный "резонансный" увод и искривление оси отверстия. Там же показано, что даже геометрически симметричная развертка с числом зубьев $Z \geq 3$ имеет кинематические нарушения симметрии из-за быстрых поперечных автоколебаний с частотой ω . Однако остались вопросы устойчивости инструментов с $Z=2$ при сверлении отверстий в сплошном материале. Не исследовано динамическое взаимодействие сверл в многошпиндельных головках. В связи с изложенным основными задачами исследования являются:

- разработать систему математических моделей, учитывающих влияние продольных и поперечных вибраций спирального сверла на параметры точности обрабатываемых отверстий;
- экспериментально проверить теоретически вскрытые условия образования систематических погрешностей при наложении продольных и поперечных вибраций с различными амплитудно-фазо-частотными характеристиками;
- разработать новые способы и элементы технологических систем для производительного сверления отверстий;
- разработать инженерную методiku отладки операций сверления для устранения погрешностей обработки отверстий. Внедрение результатов работы в производство.

Решая первую задачу, для общности понимания процессов, происходящих при обработке отверстий, была составлена система уравнений, описывающая поперечные движения многолезвийного концевго мерного инструмента (см. табл. I п. 1). Система п. 1 табл. I является исходной для получения любой математической модели механической обработки отверстий симметрично заточенным инструментом, в частности, спиральными сверлами (см. табл. I п. 2).

Рассматривая математические модели, учитывающие переменность только площадей сечений срезаемых слоев, с учетом величин углов в плане, можно показать, что тривиальные решения ($x=0$, $y=0$) таких моделей принципиально неустойчивы. Это означает возникновение релаксационных "пиллообразных" поперечных колебаний вытянутой формы у двухлезвийных инструментов. А именно, вследствие отсутствия устойчивости, мгновенно скорость его перемещения в тангенциальном направлении нарастает до тех пор, пока не сравняется со скоростью относительного вращения его периферийной точки. В это мгновение режущее лезвие будет неподвижно. А так как скорость подачи не уменьшается, оно вдавливаются в деталь с образованием кинематической неголономной связи, то есть резко возрастает коэффициенты резания и тангенциальная сила на этом лезвии становится намного больше, чем на другом. Указанное поперечное движение инструмента будет равномерно происходить до тех пор пока не произойдет резкого возрастания силы на втором лезвии. Возрастание тангенциальной силы будет сопровождаться ударом второго рода, когда в силу некоторой кривизны неголономного движения, кинематический задний угол на втором лезвии станет равен нулю. Тангенциальная скорость меняет знак и неголономная кинематическая связь образуется уже между вторым лезвием и деталью, а инструмент практически равномерно будет двигаться в противоположном направлении до нового удара первым лезвием, что приводит к

Таблица I (фрагмент)

#	Расчетная схема	Математическая модель
I		<p>Динамическая модель поперечных движений сверла</p> $\begin{cases} \ddot{X}(t) + k \cdot X(t) = K_1 \frac{\sin(2\omega_{\text{ин}} \cdot t)}{2} \cdot X(t) + \\ + K_1 \cos^2(\omega_{\text{ин}} \cdot t) \cdot Y(t); \\ \ddot{Y}(t) + k \cdot Y(t) = K_1 \frac{\sin(2\omega_{\text{ин}} \cdot t)}{2} \cdot Y(t) - \\ - K_1 \cos^2(\omega_{\text{ин}} \cdot t) \cdot X(t); \end{cases}$ <p>где $K_1 = \frac{K_{\text{т}}}{m} \cdot S$</p>
2		<p>Квазикинематическая модель поперечных движений сверла</p> $\begin{cases} X(2k) = X(2k-1) + \left[D + \frac{1}{2m} \cdot S \left(\frac{2k-1}{m} \pi \right) \right] \cdot \cos \frac{2k-1}{m} \pi; \\ Y(2k) = Y(2k-1) + \left[D + \frac{1}{2m} \cdot S \left(\frac{2k-1}{m} \pi \right) \right] \cdot \sin \frac{2k-1}{m} \pi; \\ X(2k+1) = X(2k) - \left[D + \frac{1}{2m} \cdot S \left(\frac{2k}{m} \pi \right) \right] \cdot \cos \frac{2k}{m} \pi; \\ Y(2k+1) = Y(2k) - \left[D + \frac{1}{2m} \cdot S \left(\frac{2k}{m} \pi \right) \right] \cdot \sin \frac{2k}{m} \pi; \end{cases}$
3		<p>Кинематическое уравнение поперечных движений сверла при одноинструментной обработке отверстий:</p> $\rho(\psi) = -\rho(\psi - \pi) + D + \text{tg} \varphi (\tau + Z(\psi) + Z(\psi - \pi))$ <p>Динамическое уравнение продольных его движений:</p> $m \cdot \ddot{Z}(t) + jZ \left[Z(\psi) - v_{\text{мин}} \cdot \frac{\psi}{\omega_{\text{ин}}} \right] = \rho(\psi) \left[Z(\psi) - Z(\psi - 2\pi) + \frac{\rho(\psi) - \rho(\psi - 2\pi)}{\text{tg} \varphi} \cdot K_{\text{рез}} \right]$
4		<p>Динамическая модель сверления системы отверстий многошпиндельной головкой</p> $Z_1(\psi) + Z_1(\psi) \left[\left(\frac{\omega_{\text{обор}}}{\omega_{\text{ин}}} \right)^2 - M \cdot K_{\text{рез}} \cdot D_1 \right] = -K_{\text{рез}} \cdot D_1 \cdot M \cdot Z_1(\psi - \pi)$

возникновению релаксационных – пилообразных колебаний сверла. На моделях 2-3 показано, что такие движения в совокупности с продольными вибрациями являются главной причиной ухудшения точности обработки отверстий симметрично заточенными сверлами.

Даже простейшая квазикинематическая модель 2 (Табл. I), которая наряду с учетом динамики продольных движений учитывает релаксационный характер поперечных движений инструмента на качественном уровне позволяет уяснить существо механизма искажения параметров точности при обработке отверстий одним сверлом. Алгоритмическое исследование этой модели производилось на компьютере мод. IBM PC. Численные решения показывают, что при наложении модулированных продольных колебаний вида $S=S_0+\Delta S \cdot \sin(\psi-\psi_0) \cdot \sin(m \cdot \psi-\psi_1)$ наблюдается искривление оси отверстия интенсивность которого зависит от сдвига фаз несущих колебаний ψ_1 рис. I а, б, в, а направление зависит от сдвига фаз огибающих см. рис. I в, г,

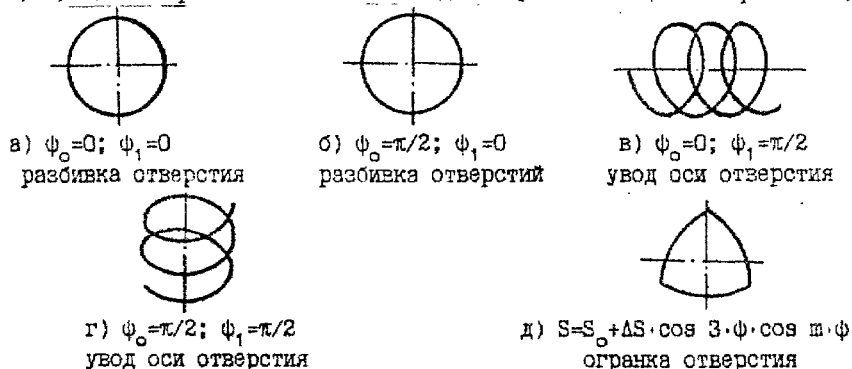


Рис. I

а если частота огибающей амплитудно-модулированных колебаний в целое число раз превосходит частоту вращения, причем это число не имеет общего делителя с числом зубьев инструмента, то увод и искривление траектории наблюдается как бы в нескольких направлениях, что приводит к нарастанию огранки отверстия до максимально возможной величины (рис. I д).

Для исследования влияния синхронизации и рассинхронизации указанных частот на погрешности одноинструментной обработки отверстий разработана модель табл. I п.3, учитывающая невысокую осевую жесткость инструмента, а при многоинструментной обработке отверстий – модель табл. I п.4, учитывающая невысокую жесткость многошпиндельной головки. Вычислительный эксперимент с этими моделями, в которых учтены динамические

явления, связанные с эффектами синхронизации и рассинхронизации позволили выполнить классификацию табл. П основных погрешностей обработки отверстий с учетом виброперемещений мерных инструментов и определить границы и условия их возникновения. Эти же погрешности (см. табл. П) будут проявляться и при обработке отверстий с помощью многошпиндельных головок с учетом дополнительного взаимовлияния инструментов в наладке.

Экспериментальная проверка теоретических положений проводилась в два этапа.

На первом этапе определялось наличие у сверл поперечных колебаний. Причем колебания сверл, возникающие вследствие динамической неустойчивости процесса обработки возникали при любых режимах обработки (табл. III п.1). Косвенным доказательством проявления поперечных колебаний сверла служат следы, остающиеся режущими кромками инструмента на поверхности резания. Эти следы - весьма глубокие риски и имеют криволинейную форму, а их количество n находится в зависимости от частоты вращения $\omega_{вр}$ и частоты поперечных колебаний данного инструмента:

$$\alpha = \frac{2\pi \cdot \omega_{вр}}{\omega} = \frac{2\pi}{m}, \text{ где } \alpha - \text{угол между рисками.}$$

Кроме указанных следов на поверхности резания могут наблюдаться еще и прямые, менее глубокие следы - отпечатки режущих лезвий. Это следствие крутильных или продольных колебаний инструмента. Их количество равно частоте соответствующих колебаний. Форма траектории поперечных колебаний сверла с $Z=2$ сильно вытянута в направлении, перпендикулярном главным режущим кромкам, а направление перемещения центра инструмента противоположно направлению его вращения при $2\varphi < 180^\circ$ и совпадает с ним при $2\varphi \geq 180^\circ$. Результаты экспериментального исследования влияния виброперемещений сверл на погрешности обработки отверстий приведены в табл. III п.2.3. В частности, увод и искривление оси отверстия при синхронизации частот осевых и поперечных колебаний (см. п.1 табл. II) был воспроизведен при помощи установки "резонатор" (см. п.2 табл. III). Также было воспроизведено экспериментально, накопления некруглости отверстия (см. п.2 табл. III), нарастающая разбивка (коническое отверстие) см. табл. III п.2 и т.д. Причем, указанные погрешности экспериментально воспроизводились как при сверлении одним сверлом, так и при одновременном сверлении несколькими сверлами с помощью многошпиндельной головки см. п.3 табл. III.

При разработке направлений совершенствования технологических систем было показано важное влияние на параметры точности обработки отверстий, возникающих перемещений режущей части инструмента и заготовки

Таблица II (фрагмент)

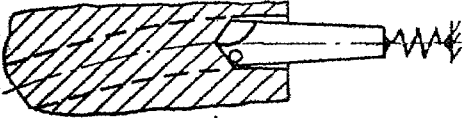



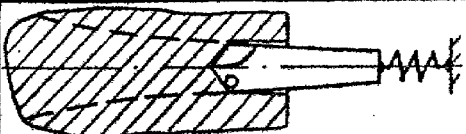
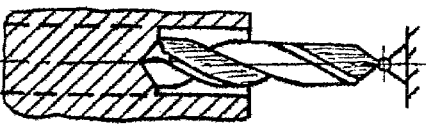
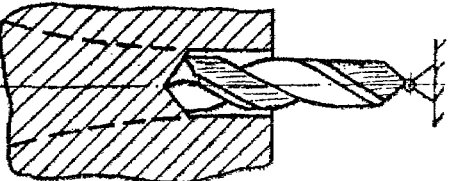
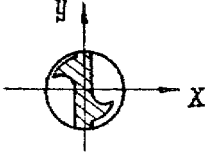
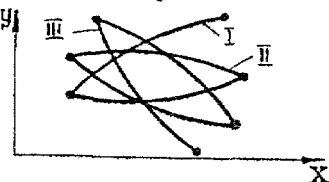
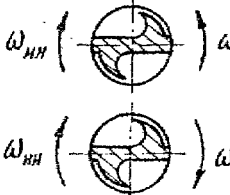

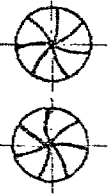
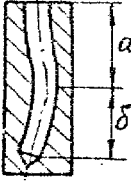
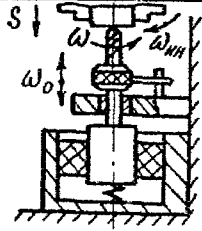
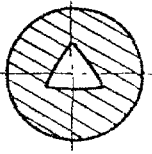

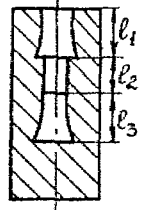
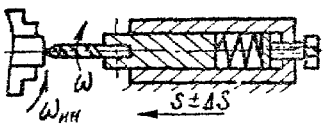

Классификация погрешностей обработки отверстий с учетом синхронизации колебаний сверла		
№	Вид и условия возникновения погрешности	Схема образования погрешности
С учетом виброперемещений геометрически диссиметричного инструмента		
I	Увод и искривление отверстия при синхронизации колебаний $K=1$ $\sqrt{\frac{J_{oc}}{m}} \approx (2k-1) \cdot \omega_{ин}$	
а)	Накопление некрутости отверстия при $K=3$	
б)	Постоянная разбивка при рассинхронизации $K \approx 1$	
а)	Спиральная канавка $K \approx 3$	
б)	Нарастающая разбивка (коническое отверстие) на границе синхронизации (возникновение частотной модуляции)	
С учетом виброперемещений кинематически диссиметричного инструмента		
I	Малая постоянная разбивка	
а)	Синхронизация-отсутствие параметрического резонанса $\omega_{oc} \approx \frac{2k_1}{k_2} \cdot \omega (\approx 2k \cdot \omega_{ин})$	
б)	Быстро нарастающая разбивка $\omega_{oc} = (2k-1) \cdot \omega_{ин} \frac{2k_1}{k_2} \cdot \omega$ $\omega = \bar{\omega}_0 + \Delta\omega \cdot \sin t$, где $\Delta\omega \gg C$ Десинхронизация-возникновение частотной модуляции быстрых поперечных вибраций (особенно при $\omega_{oc} \approx \omega$ или $\omega_{oc} \approx 3\omega$)	

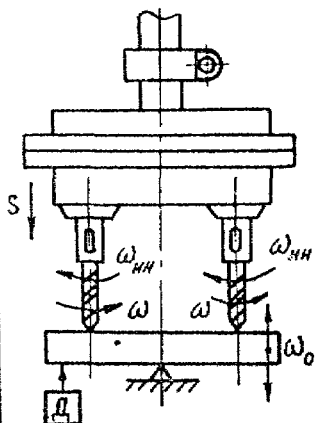
Таблица 3

Условия проведения эксперимента	Результаты и особенности проведения экспериментов	Характерные виды погрешностей и повреждений отверстий
1	2	3
I. Исследование основных параметров и характеристик поперечных колебаний инструмента		
<p>Станок мод.2Н135 тензо-усилитель "Топаз-3", приспособление для закрепления инструмента, осциллограф мод.Н-117, тензодатчики R=200 Ом; образцы $\varnothing 25 \pm 0,30$ мм, l=50 мм из стали 45, бронзы БРАЖ-4 и оргстекла, сверла спиральные $\varnothing 3 \pm 0,29$ мм с $2\varphi = 118^\circ \pm 180'$; S=0,1+0,3 мм/об; $\omega_{\text{мин}} = 3,3 \pm 18,8 \text{ с}^{-1}$</p>  <p>$2\varphi < 180'$</p> <p>$2\varphi \geq 180'$</p>	<p>Параметры ω и A поперечных колебаний сверл $\omega = 40 \pm 3120 \text{ с}^{-1}$ $A = 0,05 \pm 0,14 \text{ мм}$ Траектория движения оси сверла</p>  <p>Направление перемещения центра сверла</p> 	<p>Следы поперечных колебаний сверла на поверхности резания</p>  <p>при сверлении в сплошном материале</p> <p>Направление изогнутости рисок</p> 
2. Исследование влияния виброперемещений сверл на погрешности обработки отверстий (при одноинструментной обработке)		
<p>Тензоусилитель "Топаз-3", осциллографы мод.Н-117 и С1-48Б, частотомер ЧЗ-32, тахометр ПАТ-3М, установка I-приспособление для установки инструмента, оснащенное вибровозбудителем его продольных колебаний мод.СТ-3000 с генератором и амплитудно-частотным модулятором. Станок мод. 2Н135</p>	<p>I. Установка I сверла $\varnothing 6,5$ мм симметрично заточенное $\tau = 0$, L=90 мм, $2\varphi = 118^\circ$, S=0,1 мм/об. Задавались амплитудно-модулированные осевые колебания вида: $a \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega_{\text{ин}} \cdot t)$ а) $0,1 \cos(219,8t) \cdot \cos(31,4t)$ б) $0,1 \cos(219,8t - \pi) \cos(31,4t)$ (смена фазы)</p>	 <p>Увод и искривление оси отверстия а) вправо б) влево</p>

I	2	3
	<p>II. Установка I сверло $\phi 6,5$ мм, $\tau=0$; $L=90$ мм. Задавались амплитудно-модулированные осевые колебания вида: $a \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(3\omega_{ин} \cdot t)$ $0,1 \cos(219,8t) \cdot \cos(94,2t)$ Фиксировались поперечные колебания с нарастающей амплитудой, $S=0,1$ мм/об</p>	 <p>Накопление некруглости</p>
	<p>III. Установка I сверло $\phi 6,5$ мм $\tau=0$; $L=90$ мм, $2\varphi=180^\circ$, $S=0,1$ мм/об, $\omega_{ин}=74,63$ с⁻¹, $\omega_0=\omega=7\omega_{ин}=522,4$ с⁻¹ десинхронизация</p>	 <p>I-ый участок коническое отверстие. II-ой участок уменьшение диаметра отверстия при достижении $\phi_{отв}=2\phi_{св}$ на I-ом участке</p>
	<p>IV. Установка I сверло $\phi 6,5$ мм с $\tau=0,04$ мм, $L=90$ мм, $2\varphi=180^\circ$ $\omega_{ин}=74,63$ с⁻¹ $S=0,1$ мм/об $l_1=10$ мм $\omega_0=\omega=7\omega_{ин}=522,4$ с⁻¹ $l_2=7$ мм $\omega_0=\omega=14\omega_{ин}=1044,8$ с⁻¹ $l_3=10$ мм $\omega_0=3\omega=27\omega_{ин}=2015$ с⁻¹</p>	
<p>Установка П-"резонатор" -устройство для закрепления сверла с возможностью регулировки его осевой жесткости. Станок мод. ИК62</p> 	<p>V. Установка II сверло $\phi 6,5$ мм с $\tau=0,04$ мм, $L=90$ мм, $2\varphi=180^\circ$, $\omega_{ин}=83,7$ с⁻¹, $S=0,1$ мм/об, $\Delta S=0,08$ мм/об</p> <p>а) $\lambda = \sqrt{\frac{\cos \alpha}{\mu_{тр}}} > 1,2$ при рассинхронизации б) $0,8 < \lambda < 1,2$ при синхронизации в) $\lambda=0,8$ на границе синхронизации</p>	 <p>а) малая разбивка отверстия б) ввод оси отверстия в) конусность отверстия</p>

3. Исследование влияния виброперемещений сверл на погрешности многоинструментной обработки отверстий

Тензоусилитель "Топаз-3", осциллограф мод. Н117, станок мод. 2Н135, многоинструментная головка и зажимное приспособление, в котором заготовка установлена с возможностью качания



Сверла $\varnothing 10,2$ мм $\tau=0$ $L=150$ мм

1) $2\varphi=180^\circ$

$$\omega = 3454 \text{ с}^{-1}$$

$$\omega_{\text{мин}} = 43,5 \text{ с}^{-1}$$

$$\omega_0 = 2442 \text{ с}^{-1}$$

$$\omega_0 = \frac{(2 \cdot 3 - 1) \cdot \omega \pm \omega_{\text{мин}}}{7};$$

$$\omega_0 = -\frac{5}{7} \cdot \omega$$

2) $2\varphi=174^\circ$

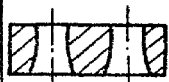
$$\omega_{\text{мин}} = 34,5 \text{ с}^{-1}$$

$$\omega = 3454 \text{ с}^{-1}$$

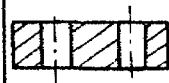
$$\omega_0 = 4710 \text{ с}^{-1}$$

$$\omega_0 \neq \frac{(2K - 1) \cdot \omega \pm \omega_{\text{мин}}}{1}$$

$$\omega_0 \neq \frac{C_1}{C_2} \cdot \omega$$



Конусность отверстий



Малая разбивка отверстий

при сверлении систем отверстий. Поскольку полностью исключить поперечные и продольные колебания невозможно, предложены способы (а.с. N1537398, N1664412, N1404194) управления величинами их параметров с целью предотвращения самопроизвольного "вхождения" технологических систем в зоны "опасных" частот за счет изменения режимов обработки и путем изменения геометрии инструмента. Управление параметрами точности возможно также и при бесшпиндельном способе сверления (а.с. N1710213) систем близкорасположенных отверстий в нетвердых материалах. При котором все инструменты размещены в специальной обойме с возможностью свободного вращения, а заготовки сообщают вынужденные поперечные круговые колебания, определенные расчетом. При этом инструменты начинают самопроизвольно вращаться и резать заготовку. Предложено также управлять параметрами точности при сверлении отверстий за счет применения компенсирующих устройств - виброгасителей, беззазорных кондукторных втулок, плавающих кондукторов и так далее. Виброгасители могут устанавливаться при этом как на многшпиндельную головку (а.с. N1404196) и компенсировать продольные колебания всей системы инстру-

ментов, так и на каждый шпиндель головок индивидуально (а.с. N1060338, N1127700), чтобы компенсировать продольные колебания каждого инструмента. Для ограничения величины поперечных колебаний инструментов разработан новый класс центрирующих устройств - безазорные кондукторные втулки (а.с. N837602, N848179, N1152719, N1177078, N1366317). При использовании этих устройств существенно увеличивают поперечную жесткость инструмента, что улучшает точностные параметры обработанных отверстий. Причем, устройства (а.с. N837602, N848179, N1366317, N1177078) обладают свойством "гибкости" и могут применяться для центрировки инструментов в широком диапазоне их диаметров. Ограничение величины поперечных колебаний инструментов достигается и при уменьшении поперечной жесткости инструментов (а.с. N1175624, N1373490). При таком способе сверления заготовке с кондуктором сообщается две степени свободы в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

На основе теоретико-экспериментальных данных и предложенных направлений усовершенствования технологических систем, разработана методика отладки операций сверления отверстий. Следует отметить, что данная методика пригодна как для обработки отверстий одним сверлом, так и при одновременной обработке их с использованием многшпиндельной головки. Методика предусматривает дифференциацию вибрационных перемещений (табл. IV) и оценку количественных показателей по числу рисок на дне отверстия, т.е. по форме рисок - прямые или криволинейные (см. стр. 13), а по их числу определяют вид колебаний - осевые или радиальные и их количественные характеристики амплитуду и частоту. Использование карты диагностики и устранения брака (табл. IV), а также предложенных направлений усовершенствования технологических систем состоит из следующих этапов:

1. Контроль обработанных отверстий и уточнение вида погрешностей обработки отверстий.
2. Выявление следов проявления динамических факторов (4 столбец табл. IV).
3. Визуальная оценка по рискам на дне отверстий возможного уровня частоты и амплитуды вибраций.
4. Идентификация вибрационных случаев и действующих механизмов образования погрешности (3 столбец табл. IV).
5. Выбор общих и частных технических решений по снижению влияния динамических факторов на точность обработки отверстий (5, 6 столбцы табл. IV).
6. Реализация выбранных решений, проведение обработки опытной партии деталей и контрольных замеров отверстий.

Таблица IV (фрагмент)

Карта диагностики и устранения брака по точности при сверлении					
N	Вид погрешности обработки	Перечень наиболее вероятных причин	Перечень сопутствующих явлений, в том числе вибрационного характера	Перечень общих рекомендаций по устранению или уменьшению погрешностей	Примеры технических решений для осуществления рекомендаций
I	2	3	4	5	6
I	Разбивка нарастающая (погрешность диаметра и продольной формы отверстий)	1. При геометрической диссимметрии сверл и частотной модуляции продольных колебаний этих инструментов.	При $\omega \approx (2k+1) \cdot \omega_{\text{синх}}$ (на границе синхронизации) наблюдается частотная модуляция продольных вибраций инструментов.	а) Изменить продольную жесткость сверл; б) изменить частоту вращения сверл; в) увеличить симметрию заточки сверл.	а) Сменить сверло или перезакрепить его; б) сменить приводные элементы или изменить частоту вращения станка; в) применить машинную заточку сверл.
		2. При кинематической диссимметрии сверл и частотной модуляции их поперечных или продольных колебаний.	При $\omega = (2k+1) \cdot \omega_{\text{синх}} \approx 2 \frac{K_1}{K_2} \omega$ наблюдается десинхронизация поперечных колебаний и возникает их частотная модуляция.	а) Изменить продольную жесткость сверл; б) изменить частоту вращения сверл; в) изменить геометрию заточки.	а) Сменить или перезакрепить сверла; б) сменить приводные элементы или изменить частоту вращения шпинделя; в) изменить углы 2ϕ .

Пример отладки операции сверления
с использованием предложенной методики

При обработке трех близкорасположенных отверстий $\varnothing 6,5^{+0,15}$ мм в дет. "Крышка правая компрессора бытового холодильника" (П.О. "Булат" г. Златоуст), диаметр отверстия на входном торце составлял $6,5 + 6,65$ мм, а на выходном - $7,6 + 7,8$ мм при глубине сверления 5 мм. То есть согласно п.1 методики выявлена нарастающая разбивка отверстий - погрешность диаметра и продольной формы отверстий.

Материал обрабатываемой заготовки - сталь 20, а обработка осуществляется спиральными сверлами $\varnothing 6,5$ мм с углом $2\varphi=180^\circ$. Такая заточка назначена технологами из-за необходимости исключения образования заусенца при выходе сверла из отверстия.

Поскольку эксперименты по выявлению и устранению погрешностей сверления проведены в широком диапазоне варьирования их причин, и вместе с тем количественная оценка этих причин и их исключение сопровождалась замерами не только экспресс методом, но и посредством приборов см.табл. III, то технологу для устранения погрешности, вызванной явлением динамического характера, достаточно приведенных в экспериментальной части данных, подтвержденных визуальными наблюдениями точностных проявлений (см. табл. II).

Согласно п.2 методики по карте диагностики и устранения брака (4 столбец табл. IV) проверялось наличие сопутствующих явлений. При отсутствии наростообразований и пакетирования стружки в канавках сверл, были обнаружены на дне отверстий риски - следы поперечных колебаний. Их оценка (п. 3 методики) показала, что ориентировочно значения частоты и амплитуды поперечных колебаний при $m=29$ шт. и $\omega_{ин} = 85 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{поп} \sim 2440 \text{ с}^{-1}$, $A=0,05$ мм.

Затем проводилась идентификация вибрационных случаев и действующих механизмов образования погрешности (по п. 4 методики). Согласно перечня (см. 3 столбец, табл. IV) возможно два случая, образования нарастающей разбивки отверстий:

1. При геометрической диссимметрии инструмента и частотой модуляции его продольных колебаний.
2. При кинематической диссимметрии инструмента и частотой модуляции его поперечных колебаний.

В связи с наличием поперечных колебаний инструментов на погрешность обработки влияет второй механизм. Отсутствие влияния первого механизма на образование погрешности обработки доказывается так же и тем, что

увеличение симметрии заточки инструментов положительных результатов не дало.

Далее, согласно п. 5 методики, из трех технических решений (см. 5, 6 столбцы, табл. IV) было выбрано последнее, т.е. изменено значение двойного угла в плане до $2\phi=174^\circ$. При этом заусенцы на выходе сверла из отверстия не образуются, а возникновение конусности не наблюдается. Точность обработки отверстий обеспечивалась в пределах $6,5 + 6,6$ мм. Для контрольной проверки правильности использования методики, в лабораторных условиях было проведено измерение фазочастотных характеристик поперечных и продольных колебаний инструментов $\omega_{\text{ин}}=85 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{\text{поп}}=2400 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{\text{о}}=5000 \text{ с}^{-1}$. Также была зафиксирована частотная модуляция поперечных вибраций и спектр их близок к сплошному, то есть механизм образования обратной конусности, связанный с десинхронизацией и частотной модуляцией поперечных колебаний был выявлен правильно.

Отметим, что аналогичные погрешности наблюдаются и на других заводах, например на Орском машиностроительном заводе, поскольку такие компрессоры выпускаются еще на ряде заводов, а технология их изготовления типовая.

Внедрение рекомендаций только на П.О. "Булат" позволило получить эффект 1500 тыс.руб.

Выводы

1. Разработана математическая модель процесса сверления отверстий, учитывающая кинематику поперечных и динамику продольных колебаний спирального сверла, при этом вскрыты закономерности и объяснен механизм перемещений сверла в детали. Полученная математическая модель применима и для обработки отверстий с использованием многошпиндельных головок.

2. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что из-за переменности толщины срезаемого слоя динамическая устойчивость процесса сверления отверстий отсутствует, а величины частот и амплитуд поперечных колебаний сверла зависят от геометрии его заточки и режимов обработки, при этом показано, что траектория колебания сверла вытянута в направлении, перпендикулярном его лезвиям, а частота в 10 и более раз превосходит частоту вращения.

3. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что увод и огранка отверстий возникают при продольных амплитудно-модулированных колебаниях сверла, если их несущая частота совпадает с частотой попе-

речных колебаний, частота огибающей кратна частоте вращения, а конические отверстия образуются при частотно-модулированных продольных колебаниях сверла.

4. На основе теоретико-экспериментальных исследований и установленных закономерностей процесса сверления разработано 6 новых способов управления параметрами точности сверления и 16 новых элементов технологических систем.

5. Разработана инженерная методика отладки операций сверления, предусматривающая измерение параметров поперечных колебаний сверл или визуальную оценку их частоты и амплитуды по рискам на дне отверстий; изменение вибрационных характеристик, например, изменяя геометрию заточки и режимы обработки, обеспечивают заданную точность отверстий. Данная методика позволяет в 2-3 раза сократить время производственных испытаний и на 35-50% - технологическую подготовку производства сложных корпусных деталей в целом.

6. Результаты работы внедрены на трех машиностроительных предприятиях П.О. УРАЛАЗ г. Миасс, П.О. "Булаг" г. Златоуст, и г. Москвы, реальный годовой экономический эффект составил более 30 тыс.рублей в ценах 1990 г. и 1500 тыс. рублей в ценах 1995 г. Научные разработки внедрены в учебный процесс подготовки инженеров-механиков по специальности 1201 на Златоустовском филиале ЧТУ.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М., Сергеев С.В. Вибрационная механика процессов сверления-бурения и новые динамические эффекты. Челябин.гос.техн.ун-т.- Челябинск, 1993.- 286 с.: ил. 104, 10 табл. - Библиогр. 153 назв.- Рус.-Деп. в ВИНИТИ 02.06.93, N 1470-В93.

2. Лакирев С.Г., Хилькевич Я.М., Сергеев С.В. Математическое моделирование динамики процессов обработки отверстий мерными инструментами и вибрационная диагностика многоинструментных наладок.- В кн.: Совершенствование машиностроительных материалов, конструкций машин и методов обработки деталей: Тем.сбор.науч.трудов. Челябинск: ЧТУ, 1995.

3. Сергеев С.В. и др. Автоматизированные средства оснащения операции обработки отверстий//Проблемы автоматизации технологических процессов в машиностроении:Тез.докл. Межреспубликанской конференции.- Волгоград: ВПИ.-1989.-С. 15-16.

4. Сергеев и др. А.с. 1175624 (СССР). Способ обработки отверстий.- Спубл. в Б.И., 1985, N 32.

5. Сергеев С.В. и др. А.с. 1404194 (СССР). Способ обработки от-

верстий и многошпиндельная головка для его осуществления. - Оpubл. в Б.И., 1983, N 23.

6. Сергеев С.В. и др. А.с. 1537398 (СССР). Способ обработки отверстий с криволинейной осью. - Оpubл. в Б.И., 1990, N 3.

7. Сергеев С.В. и др. А.с. 1710213 (СССР). Способ обработки отверстий мерным многолозовым инструментом. - Оpubл. в Б.И., 1992, N 5.

8. Сергеев С.В. и др. А.с. 1664412 (СССР). Способ возбуждения круговых колебаний и устройство для его осуществления. - Оpubл. в Б.И., 1991, N 27.

Новизна технических решений в работе защищена авторскими свидетельствами и патентами на изобретения № 337602, 848179, 876326, 1060338, 1094673, 1127700, 1152719, 1177078, 1366317, 1373490, 1404195.

Издательство Челябинского
государственного технического университета

ДР № 020364 от 20.01.92. Подписано в печать 09.11.95. Формат
60x84 1/16. Печать офсетная. Усл.печ.л. 0,93. Уч.-изд.л. 1.
Тираж 100 экз. Заказ 316/496.

УОП издательства. 454080, г. Челябинск, пр.им. В.И.Ленина, 76.