

М 432339

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного знамени высшее техническое
училище имени Н.С. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

УДК 621.91:62-189.2

ОЛОЕВ Александр Трофимович

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ С ЭЛЕМЕНТАМИ ПОНИЖЕННОЙ
ЖЕСТКОСТИ

Специальность 05.02.08 - Технология машиностроения
(промышленность)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э. Баумана.

- Научный руководитель - Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Дальский А.М.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук, старший научный сотрудник Фрагин И.Е.
- кандидат технических наук, старший научный сотрудник Пустырев В.Л.
- Ведущее предприятие - Московский станкостроительный завод им. Серго Орджоникидзе

Защита состоится "18" ноября 1985 г. в 14³⁰ час на заседании специализированного Совета К053.15.15 Московского высшего технического училища им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва Б-5, 2-я Бауманская, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Баумана Н.Э.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенном печатью, просим

Автор:

УЧЕНЫ
кандид

ЯКОВ Р.К.

М 432339

Л № 97719

Тираж 100 экз

Объем I п.д.

иская, 5

Актуальность проблемы. Решение проблемы повышения качества и надёжности продукции машиностроения самым тесным образом связано с усовершенствованием технологических методов и средств чистовой обработки деталей, обоснованным назначением режимов резания, то есть с технологическим обеспечением высокой точности их размеров и геометрической формы, правильного взаимного расположения и оптимальной шероховатости поверхностей. Это относится, в частности, к многочисленным деталям, имеющим высокоточные цилиндрические отверстия.

Известно, что обработка точных отверстий представляет собой в целом более трудную задачу, чем обработка точных наружных поверхностей деталей. Возрастающие требования к компактности изделий приводят к большой концентрации различных конструктивных элементов, таких как отверстия, пазы, лыски и прочие, и являются причиной переменной жесткости деталей, что накладывает дополнительные трудности на технологический процесс их изготовления. Местные утоньшения стенок деталей названы элементами пониженной жесткости — ЭПЖ.

Рядом исследователей установлено, что в ходе технологических процессов обработки резанием детали получают специфические отклонения от правильных геометрических форм, которые были предусмотрены конструктором. Эти отклонения, вполне определённым образом связанные с геометрической формой поперечных и продольных сечений деталей, взаимным расположением их поверхностей, изменяют условия контактирования в сопряжениях и влияют на показатели надёжности работы деталей и изделий в целом. В данных условиях возникает настоятельная необходимость в изыскании возможностей управления названными отклонениями, особенно в связи с тем, что из-за постоянно растущих требований к точности изготовления они становятся соизмеримы с допусками на предельные отклонения даже при легких режимах обработки.

Цель работы. Исследование физики процесса и разработка математических зависимостей, связывающих геометрические параметры деталей и режимы резания с точностными параметрами отверстий для различных методов чистовой обработки. Наличие таких зависимостей позволит целенаправленно воздействовать на ход технологического процесса изготовления деталей с высокоточными отверстиями в условиях переменной жесткости стенок в поперечном сечении



для достижения заданной точности при максимальной производительности и минимальной себестоимости.

Методы исследования. Поставленные в работе теоретические задачи решались с применением методов сопротивления материалов, теории упругости, теории подобия и теории резания с использованием ЭВМ. Экспериментальные исследования первого этапа проводились на специально разработанных установках, оснащённых современной измерительно-регистрирующей аппаратурой. Эксперименты по обоснованию выбора рациональной длины ЭПЖ проводились на поляризационной установке ИМАШ-КБ-2. Основная часть экспериментов второго этапа проводилась на координатно-расточном станке 2В440А в лаборатории кафедры "Технология металлов" МВТУ им. Н.Э. Баумана, а эксперименты по алмазному развёртыванию проводились в лаборатории алмазной и абразивной обработки НИИТракторосельхозмаш. При проведении экспериментов второго этапа также использовалась высокоточная контрольно-измерительная аппаратура. Обработка экспериментальных данных проводилась с применением ЭВМ.

Научная новизна. Получены аналитические зависимости для расчёта величины упругих отжатий (податливости) элементов пониженной жесткости для различных условий контактирования пары инструмент - деталь при моделировании различных методов обработки высокоточных отверстий. Проведен теоретический анализ механизма образования отклонений формы и смещения оси отверстия в условиях упругого режима деформирования ЭПЖ при различных методах чистовой обработки, в результате чего получены аналитические зависимости, связывающие физико-механические и геометрические параметры деталей, режимы резания с параметрами геометрической точности.

Практическая ценность. Разработаны математические модели формирования точности геометрических параметров отверстий в деталях с ЭПЖ при различных методах чистовой обработки, что позволяет целенаправленно воздействовать на ход технологического процесса их изготовления. Данные математические модели позволяют прогнозировать не только величину отклонений, но и, при известных начальных условиях, профиль поперечного сечения отверстия. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации, позволяющие повысить надёжность технологических процессов изготовления деталей, имеющих высокоточные отверстия при наличии ЭПЖ.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались на

- научных семинарах кафедры "Технология металлов" МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1981 - 1985 г.г.;
- научно-техническом семинаре "Поверхностный слой, точность и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов МДНП им. Ф.Э. Дзержинского, г. Москва, 1984 г.;
- Республиканской научно-практической конференции "Повышение эффективности обработки конструкционных материалов", г. Улан-Удэ, 1985 г.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, списка литературы и приложения, изложена на 218 страницах, в том числе содержит 122 страницы машинописного текста, 70 рисунков, 16 таблиц, список литературы из 97 наименований и приложение на I странице.

Первая глава. посвящена проблеме обеспечения надёжности деталей с ЭПЖ, основными рабочими поверхностями которых являются гладкие цилиндрические отверстия, имеющие высокие требования к точности и стабильности геометрических параметров как в процессе изготовления, так и в процессе эксплуатации. Причина существования данной проблемы кроется в том, что собственно конструктивная форма деталей может порождать отклонения от правильных геометрических форм или приводит к условиям, в которых они возникнуть не смогут. Сущность явления сводится к тому, что заготовки, имея в зависимости от конструктивных особенностей переменную жесткость в том или ином сечении, под действием сил резания получают различные отжатия, вызывающие отклонения формы готовых деталей. Особое значение это имеет для высокоточных деталей в связи с тем, что возникающие отклонения могут быть соизмеримы с допусками на их изготовление. Для деталей нормальной точности отклонения формы данного вида, как правило, не учитываются. Поэтому в диссертационной работе идет речь о высокоточных отверстиях.

На основании обзора и соответствующего анализа литературных источников установлено, что наименее изученным является вопрос о влиянии переменной жесткости деталей, вызванной в частности наличием ЭПЖ, на отклонения формы внутренних цилиндрических поверхностей в поперечном сечении при упругом режиме деформирования стенок, наиболее характерном для чистовых методов обработки

(тончайшая, в несколько микрометров, зона пластической деформации при этом не учитывается ввиду малости). Указанное влияние проявляется в виде местных отклонений формы в зоне ЭПЖ.

Анализ работ, посвященных смещению оси отверстия при обработке мерным инструментом, показал, что наличие ЭПЖ должно привести к возникновению неуравновешенных сил резания и, как следствие, дополнительным погрешностям.

Из анализа работ, посвящённых влиянию жесткости системы СИПД на шероховатость поверхности, можно сделать следующее заключение: переменная жесткость детали по углу поворота инструмента должна привести к неоднородности параметров шероховатости поверхности высокоточного отверстия на различных участках.

Таким образом определен объект исследований – гладкие цилиндрические отверстия в деталях с ЭПЖ, имеющие высокие требования к точности и стабильности геометрических параметров – шероховатости (R_a не более 1,25 мкм), допускам на размеры (6 качество точности и выше) и отклонениям от цилиндричности (в пределах допуска на размер), как в процессе изготовления, так и в процессе эксплуатации. Под элементами пониженной жесткости (ЭПЖ) здесь и далее будем понимать перемычку между высокоточным отверстием и другим близко расположенным отверстием (любым), а также краем детали, лыской и прочими конструктивными элементами. Количество и расположение ЭПЖ может быть любое. На рис. 1 представлены фрагменты деталей, имеющих высокоточные отверстия с ЭПЖ.

На основании проведенного анализа и в соответствии с целью работы поставлены следующие основные задачи:

1. Теоретически и экспериментально исследовать влияние ЭПЖ на отклонения формы и смещение оси высокоточных отверстий при различных методах обработки.

2. Экспериментально исследовать влияние ЭПЖ на шероховатость поверхности высокоточных отверстий.

3. Сформулировать расчётные выражения, связывающие геометрические и физико-механические параметры деталей, режимы резания с параметрами геометрической точности отверстий.

4. Определить технологические пути для обеспечения требуемой точности геометрических параметров отверстий в деталях с

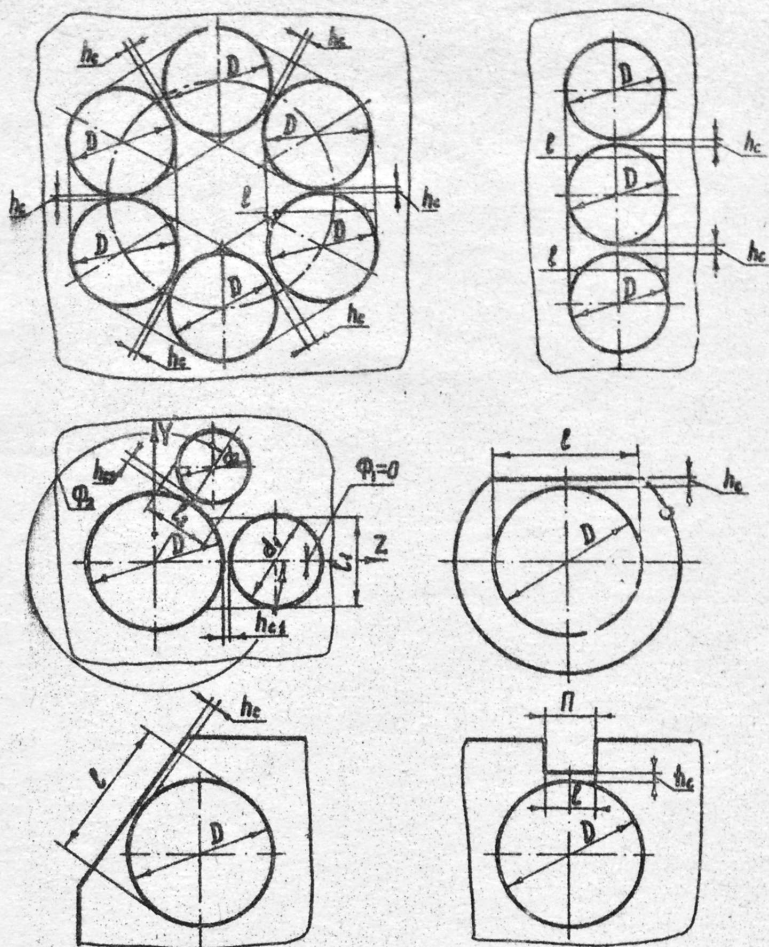


Рис. 1. Примеры деталей с ЭПЖ:
 l — длина ЭПЖ; h_c — минимальная толщина ЭПЖ

Во второй главе рассмотрены теоретические основы оценки точности геометрических параметров отверстий в деталях с ЭПЖ в ходе технологического процесса.

Основной исходной предпосылкой является предположение о существовании связи между величиной упругих деформаций стенок обрабатываемых отверстий под действием силы резания и точностью их геометрических параметров. Жесткость стенок отверстия вне ЭПЖ достаточно велика, упругие перемещения на этих участках малы и ими можно пренебречь. Упругие перемещения ЭПЖ могут быть соизмеримы с допусками на изготовление высокоточных отверстий. Таким образом, решение поставленных в первой главе задач основано на теоретическом и экспериментальном определении величины упругих перемещений ЭПЖ под действием нагрузок, моделирующих различные методы чистовой обработки высокоточных отверстий. Для этого ЭПЖ представляется в виде балки переменного сечения, заделанной с двух сторон, находящейся под действием сосредоточенной или распределенной нагрузки, в зависимости от того какой метод обработки моделируется.

Одним из методов, который может быть использован для определения прогибов балок, является метод конечных разностей. Уравнение линии прогибов в конечно-разностной форме для сосредоточенной нагрузки можно записать как

$$f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1} = - \frac{12 \cdot S_p^2 \cdot P \cdot F(\Gamma)}{E \cdot B \cdot h_i^3} ; \quad (1)$$

а для распределенной нагрузки

$$f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1} = - \frac{12 \cdot S_p^2 \cdot p \cdot F(\Gamma)}{E \cdot h_i^3} , \quad (2)$$

где S_p — шаг разбивки; f_i — прогиб в точке i ; f_{i+1} — прогиб справа от точки i ; f_{i-1} — прогиб слева от точки i ; P и p — сосредоточенная и распределенная нагрузки; E — модуль упругости; B — ширина ЭПЖ; h_i — толщина ЭПЖ в i -той точке; $F(\Gamma)$ — функция, определяемая геометрией детали, характером и местом приложения нагрузки.

Вычисление величины прогибов ЭПЖ в различных точках производится по разработанным программам на ЭВМ "Искра-1256".

Для практического применения удобнее использовать податливость $W_i = f_i / P$ или удельную податливость $W_i' = f_i / p$ ЭПЖ в данной точке, которые не зависят от силовых факторов, связанных с режимами обработки.

Для предварительной оценки ожидаемых отклонений точности геометрических параметров важно знать величину максимальной податливости ЭПЖ. Зависимость максимальной податливости (по центру ЭПЖ) от геометрических параметров детали хорошо аппроксимируется функцией вида

$$W_c = \zeta \cdot (l/h_c)^\alpha, \quad (8)$$

где ζ и α - коэффициент и показатель степени, вычисляемые по методу наименьших квадратов. За длину l ЭПЖ можно принять наименьший из диаметров обрабатываемого D или соседнего d отверстия, то есть $l = D_{\min}$.

Зная податливость ЭПЖ при различных условиях контактирования пары инструмент - деталь, можно перейти к теоретическому определению влияния ЭПЖ на величину отклонения формы и смещения оси отверстий с учётом особенностей различных технологических методов обработки высокоточных отверстий.

Обработка однолезвийным инструментом (растачивание) характеризуется жестким закреплением инструмента и заготовки. Принято, что жесткость систем, связанных с приспособлением и узлами станка, на которых закрепляются инструмент и деталь, постоянна по углу поворота инструмента. Тогда можно рассматривать только жесткость (податливость) заготовки в различных сечениях и жесткость инструмента J_n как функцию его вылета.

Используя известные положения технологии машиностроения и теории резания, получили следующую формулу для определения фактической глубины резания в i -той точке при произвольном расположении ЭПЖ:

$$t_{pi} = \frac{t}{1 + C_{py} \xi_y \cdot 1/J_n + [C_{py} \xi_y \cdot \cos(\varphi - \varphi_i) + C_{pz} \xi_z \cdot \sin(\varphi - \varphi_i)] \cdot K \cdot W_i \cdot \cos(\varphi - \varphi_i)}, \quad (4)$$

где t - заданная глубина резания; Φ - угловая координата центра соседнего отверстия (центра ЭП); φ_i - угол положения инструмента; K - некоторый коэффициент, учитывающий динамику и прочие реальные условия обработки; C_{py} и C_{pz} - коэффициенты для расчёта радиальной и тангенциальной составляющих силы резания.

Коэффициенты ξ_y и ξ_z находятся как

$$\xi_y = t^{x_{py}}/t; \quad \xi_z = t^{x_{pz}}/t$$

Зная фактическую глубину резания в любой точке обрабатываемой поверхности, нетрудно определить величину отклонений от круглости и профиль поперечного сечения отверстия при принятых допущениях.

В случае обработки отверстий двухлезвийным инструментом методом деления подачи фактическая глубина резания t_p на диаметрально противоположных лезвиях, когда одно из них находится в зоне ЭП, будет различной, что является причиной возникновения неуравновешенных сил. Равнодействующая неуравновешенных сил резания ΔP является переменной как по величине, так и по направлению.

Используя эпюру неуравновешенных сил резания, определяем величину и направление смещения оси инструмента в любой фиксированный момент времени. Зная мгновенные положения оси инструмента, графоаналитическим способом определяем профиль поперечного сечения отверстия (при этом необходимо помнить, что после снятия нагрузки ЭП восстанавливается на величину f_i). Величина местных отклонений δ_i точек реального (расчётного) профиля от окружности заданного радиуса определяется как

$$\delta_i = \Delta t_i = t - t_{pi} \quad (5)$$

Если имеется m произвольно расположенных ЭП и обработка производится N -лезвийным инструментом, фактическая глубина резания на i -ом лезвии будет

$$t_{pi} = \frac{t - \bar{U}_n \cdot \sin \varphi_i - \bar{Z}_n \cdot \sin(\varphi_i - \pi/2)}{1 + K \cdot W_{ji} [C_{pz} \cdot \xi_z \cdot \cos(\Phi_j - \varphi_i) + C_{py} \cdot \xi_y \cdot \sin(\Phi_j - \varphi_i)] \cdot \cos(\Phi_j - \varphi_i)} \quad (6)$$

где W_{ji} - податливость j -того ЭПЖ в i -ой точке; φ_j - угловая координата j -ого ЭПЖ, а координаты мгновенных положений оси $\bar{y}_n$ и $\bar{z}_n$ инструмента находятся из уравнений равновесия.

Давая приращения $\Delta\varphi = 2\pi/(N \cdot T)$, где T - заданное количество мгновенных положений инструмента, получим T координат $\bar{y}_n$ и $\bar{z}_n$ и $N \cdot T$ значений $t_{\varphi i}$. Величина упругого смещения оси инструмента в любой фиксированный момент времени определяется по формуле

$$\Delta y_n = \sqrt{\bar{y}_n^2 + \bar{z}_n^2} \quad (7)$$

Траектория прецессии и максимальное значение отклонения оси инструмента от номинального положения зависят от величины податливости ЭПЖ, их количества и расположения, а также от количества лезвий инструмента, углов между ними и режимов резания.

В отличие от рассматриваемых методов, алмазное развёртывание и хонингование характеризуется тем, что при обработке инструментом или заготовка имеет возможность самоустанавливаться. Если режущий элемент алмазной развёртки представляет собой разрезную втулку на которую гальваническим способом нанесен алмазо-содержащий слой, то можно считать, что инструмент и деталь контактируют по всему периметру отверстия.

Погрешность обработки в любой точке

$$\Delta_i = f_i \cdot \cos(\varphi_j - \varphi_i) - \bar{y}_n \cdot \sin\varphi_i + \bar{z}_n \cdot \cos\varphi_i, \quad (8)$$

где первое слагаемое представляет собой местное отклонение от круглости, а второе и третье дают смещение оси отверстия. В данном случае $\bar{y}_n$ и $\bar{z}_n$ являются постоянными как по величине, так и по направлению.

Хонингование отличается многопроходностью, инструмент и заготовка контактируют по одной (однобрусковый хон) или несколькими (многобрусковый хон) площадкам. В силу того, что хонинговальная головка представляет собой достаточно сложную конструкцию с большим количеством деталей, в рассматриваемом случае считать ее абсолютно жестким телом нельзя. Принимаем, что хонинговальные бруски являются недеформируемыми безинерционными элементами, находящимися на линейно-упругом основании с удель-

ной жесткостью $B_{\text{бр.}}$.

В этом случае упругие отжатия брусков будут различны вследствие колебания фактической глубины резания по периметру отверстия. Кроме того, в каждый момент времени из-за неравномерности сил резания на различных брусках будут иметь место относительные смещения осей обрабатываемого отверстия и конинговальной головки на величину Δy_k . Направление и величина Δy_k изменяются за период $2\pi/\omega$, если угловые расстояния между брусками одинаковы.

Фактическая глубина резания

$$t_{\varphi i} = \frac{t + \bar{y}_k \cdot \sin \varphi_i - \bar{z}_k \cdot \cos \varphi_i}{\lambda_i}, \quad (9)$$

где

$$\lambda_i = f(P_z, P_r, P_j, \varphi_i, W_i', B_{\text{бр.}}, L_k, \gamma_{\text{бр.}})$$

$B_{\text{бр.}}$ — ширина бруска; L_k — длина контакта бруска с заготовкой (в продольном сечении).

В данном случае t представляет собой линейный съем металла, приведенный к середине бруска (по ширине), без учета влияния ЭПХ, а t_{φ} — это линейный съем с учетом влияния ЭПХ.

Таким образом выведены аналитические зависимости, связывающие геометрические параметры точности обработки с геометрическими и физико-механическими параметрами детали, выраженными через податливость W_i или удельную податливость W_i' , и режимами обработки. Но в силу того, что ЭПХ является лишь одним из факторов, влияющих на погрешности обработки, общим условием достижения заданной точности является:

$$[\delta_z] \leq K_f \Delta,$$

где $[\delta_z]$ — допустимое отклонение параметра точности, вызванное наличием ЭПХ; K_f — коэффициент, показывающий какая часть допуска отводится на погрешности, связанные с упругими отжатиями ЭПХ и инструмента; Δ — допуск на предельное отклонение параметра.

Третья глава посвящена экспериментальному подтверждению адекватности зависимостей для оценки точности геометрических параметров отверстий в деталях с ЭПХ. При выводе аналитических зависимостей был принят ряд допущений и положений, использова-

лись приближенные методы расчёта, нуждающиеся в экспериментальной проверке и уточнении. Не представляется возможным учесть динамику и некоторые особенности конкретных методов обработки, в связи с чем был введен ряд коэффициентов, величину которых необходимо установить. Все это требует проведения специальных экспериментальных исследований. Как и теоретические исследования, основные экспериментальные исследования также разбиты на два этапа.

На первом этапе экспериментально определено влияние конструктивных параметров детали и инструмента, а также силовых факторов на величину упругих перемещений ЭПЖ при моделировании различных методов обработки, то есть проверена достоверность и произведено уточнение аналитических зависимостей для расчёта упругих перемещений (податливости) ЭПЖ. В соответствии с теоретической моделью задача решалась в статической постановке. Эксперименты второго этапа производились непосредственно на станках. Целью этих экспериментов являлось установление действительных соотношений между величиной упругих перемещений ЭПЖ, технологическими факторами и точностью геометрических параметров отверстий и уточнение на этой основе выведенных расчётных зависимостей. Подразумевалось также выяснение доли местных отклонений формы, вызванных наличием ЭПЖ, в суммарной погрешности формы обработанных отверстий.

Изложены основные методические положения проведенных экспериментальных исследований. Дана краткая характеристика и обоснование выбора материалов для проведения экспериментальных исследований. Величина упругих отжатий ЭПЖ измерялась при помощи электронной измерительной системы модели 212 завода "Калибр".

В результате предварительных экспериментов было установлено, что при отношении $D_{min}/h_c < 8$ (у стальных образцов) даже если приложить значительную нагрузку (P до 500 Н или p до 1,5 МПа) величина f_c не превышает 1 мкм. Погрешности обработки известных методов при таких нагрузках значительно больше и поэтому влияние ЭПЖ вряд ли будет ощутимым. На этом основании стандартные детали с $D_{min}/h_c < 8$ можно считать достаточно жесткими для чистовых методов обработки. Установлено также, что при сосредоточенной нагрузке играют роль не абсолютные размеры образца, а

их соотношения - в первую очередь $-D_{min}/h_c$ и D/d .

Выбор в качестве длины ЭПМ меньшего из диаметров двух отверстий в большинстве случаев, как показали эксперименты первого этапа, приводит к значительным расхождениям расчётных и опытных данных. Поэтому были проведены эксперименты по обоснованному выбору рациональной длины ЭПМ с помощью поляризационно-оптического метода определения деформаций и напряжений. Но можно производить расчёты и полагая, что $l = D_{min}$, только надо ввести коэффициент уточнения K_y .

При проведении предварительных экспериментов было замечено, что на величину упругих перемещений оказывает влияние также и место приложения осредоточенной нагрузки по ширине ЭПМ. Теоретическая модель не позволяет оценить это влияние и получить распределение упругих отжатий по ширине ЭПМ. Экспериментальные исследования показали, что для деталей, у которых ЭПМ представляет собой перемычку между двумя близкорасположенными цилиндрическими отверстиями при точечном контактировании инструмент-деталь, отношение величины прогиба под нагрузкой, приложенной на расстоянии $0,05 \cdot B$ от свободного края детали к величине прогиба под такой же нагрузкой, приложенной в середине ЭПМ

$$f_{0,05B}/f_{0,5B} = 1,3 \dots 1,75 \quad (D_{min}/h_c = 10 \dots 25; B/D_{min} = 42 \dots 1).$$

Для деталей у которых ЭПМ представляет собой перемычку между отверстием и плоскостью, отношение

$$f_{0,05B}/f_{0,5B} = 1,4 \dots 2,0.$$

Краевой эффект тем больше, чем больше величина отношений D_{min}/h_c , B/D_{min} и разность диаметров D и d .

Если нагрузка равномерно распределена по всей ширине ЭПМ, краевой эффект незначителен и им можно пренебречь.

Наличие краевого эффекта отмечено и при проведении экспериментов второго этапа - имело место при растачивании стальных стожённых заготовок при $D_{min}/h_c \geq 15$. Обработка заготовок при проведении экспериментальных исследований второго этапа производилась на общепринятых режимах резания. Отклонения формы определялись по круглограммам, снятым при помощи кругломера "Ta-Cyround-50". Круглограммы снимались до и после обработки отвер-

ствия при неизменном положении шупа по высоте заготовки. Ориентация ЭПЖ на столе кругломера при снятии круглограмм и на столе станка при обработке оставалась постоянной для всех образцов. Для сравнения в каждой партии имелись образцы без ЭПЖ.

Эксперименты второго этапа подтвердили, что величина местных отклонений формы в поперечном сечении при любых методах обработки зависит прежде всего от отношения D_{min}/h_c . Установлено, что если в деталях имеются ЭПЖ, причём отношение

$5 \leq D_{min}/h_c \leq 10$, наблюдается общее повышение отклонений от круглости. Местные отклонения от круглости, вызванные наличием ЭПЖ, не являются доминирующими. При $D_{min}/h_c > 10$, в зоне ЭПЖ заметна "приплюснутость" круглограммы, а при росте отношения D_{min}/h_c и некоторое ее "выпучивание". Местное отклонение от круглости приобретает при этом доминирующее значение. При дальнейшем увеличении отношения до $D_{min}/h_c = 24 - 25$, заметно резкое общее увеличение отклонения от круглости со значительным "выпучиванием" в зоне ЭПЖ. Если исключить, или хотя бы уменьшить влияние других факторов, то по выведенным в теоретической части зависимостям с учётом уточнений, сделанных по результатам экспериментальных исследований, можно с достаточной точностью рассчитать профиль отверстия в поперечном сечении в интервале $10 \leq D_{min}/h_c \leq 25$. Если известны отклонения δ_0 от круглости деталей без ЭПЖ, то приближенная величина отклонений от круглости деталей с ЭПЖ, обработанных на том же оборудовании и при тех же условиях, может быть определена по формуле

$$\delta = K_3 \cdot (\delta_0 + K \cdot P \cdot W_c),$$

где $K_3 = 1, 1, \dots, 1, 2$ - коэффициент запаса.

Результаты исследования влияния ЭПЖ на микрогеометрию обработанных поверхностей позволяют сделать вывод, что оно наиболее существенно отражается на высотных параметрах шероховатости. На основании результатов экспериментальных исследований можно утверждать, что при увеличении отношения D_{min}/h_c до 25 при обработке деталей на общепринятых режимах резания шероховатость поверхности по R_a увеличивается по сравнению с обработкой деталей без ЭПЖ в (1,5...2) раза.

При проведении экспериментов по растачиванию и алмазному

развёртывании производились измерения и запись упругих отжатий ЭПЖ на диаграмму. По диаграммам упругих отжатий ЭПЖ можно судить об отклонениях от круглости обработанных отверстий.

В четвёртой главе даны практические рекомендации по повышению надёжности технологического процесса изготовления деталей, имеющих высокоточные отверстия, при наличии в деталях ЭПЖ. Предлагаемые мероприятия основываются на установленных математических зависимостях, позволяющих оценить влияние ЭПЖ на точность геометрических параметров высокоточных отверстий при различных методах чистовой и получистовой обработки. При этом отмечается, что эффективность мероприятий находится в прямой зависимости от степени учёта особенностей конкретного оборудования и условий производства.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Решение проблемы повышения качества и надёжности продукции машиностроения самым тесным образом связано с технологическим обеспечением точности геометрических параметров деталей. Это относится, в частности, к многочисленным деталям, имеющим высокоточные цилиндрические отверстия при наличии ЭПЖ.

2. На основании проведенных исследований сформулированы достаточно точные и удобные для инженерных расчётов количественные зависимости, связывающие линейные размеры и отклонения формы деталей в поперечном сечении с технологическими параметрами обработки, выраженными через силу резания P или давление p , а также с учётом характера и размеров зон контакта пары инструмент-деталь. Параметром, характеризующим линейные размеры и физико-механические свойства материала детали, является податливость

W или W' — удельная податливость ЭПЖ. Критерием податливости может служить отношение D_{min}/h_c .

3. Наличие ЭПЖ вызывает смещение оси мерного инструмента. При обработке двух- и многолезвийным инструментом, а также хонингованием это смещение переменное как по величине, так и по направлению: инструмент совершает прецессирующее движение, что увеличивает отклонение формы и размеров отверстия. При большом количестве режущих лезвий или брусков и при алмазном развёртывании втулочными развёртками имеет место смещение оси обра-

танного отверстия. Как показали расчёты, величина этого смещения не превышает нескольких микрометров.

4. Экспериментальные исследования показали, что с увеличением податливости ЭПЖ (увеличением отношения D_{min}/h_c), при всех рассмотренных методах обработки наблюдается возрастание высотных параметров шероховатости. Причём, при растачивании отверстий средних диаметров, $D = (30...70)$ мм, было отмечено, что шероховатость поверхности отверстий по R_a в зоне ЭПЖ в среднем на (15...20)% выше, чем шероховатость в других зонах. С увеличением диаметра обрабатываемого отверстия и отношения D_{min}/h_c , эта разница возрастает и проявляется все отчетливее.

5. Наличие количественных зависимостей, связывающих геометрические размеры и параметры точности деталей с технологическими параметрами, позволяет обоснованно назначать для каждой конкретной детали метод обработки и режимы резания, а также некоторые геометрические параметры инструмента.

Обоснованные рекомендации по выбору метода обработки и режимов резания особенно необходимы в период освоения новой продукции, позволяют сократить этот период и уменьшить брак. В установленном производстве предложенные рекомендации позволяют скорректировать режимы резания с целью увеличения производительности и технологической надёжности производства деталей.

6. Для "идеальных" или известных начальных условий обработки (метод, режимы резания, радиальная жёсткость системы СПИД, отклонения формы заготовки и т.д.) выведенные математические зависимости при использовании ЭВМ позволяют рассчитать профиль поперечного сечения высокоточного отверстия в деталях с ЭПЖ. Это дает возможность при целенаправленном воздействии на те или иные факторы управлять не только величиной отклонений, но и в некоторых пределах формой отверстий для обеспечения надёжности работы детали в процессе эксплуатации.

7. На основании проведенных исследований разработаны и внедрены практические рекомендации по обеспечению требуемой точности геометрических параметров высокоточных отверстий в деталях с ЭПЖ.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Олоев А.Т. Метод прогнозирования величины отклонения от круглости. - Машиностроитель, 1984, № 10, с. 28.

2. Олоев А.Т. Влияние элементов пониженной жесткости на отклонения формы внутренних цилиндрических поверхностей. - Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 1984, № 10, с. 128-131.

3. Олоев А.Т. Влияние элементов пониженной жесткости высокоточных деталей на качество поверхностного слоя при растачивании. - В сб.: Поверхностный слой, точность и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов. Материалы семинара. М.: МДНТП, 1984, с. 34-35.

4. Олоев А.Т. Определение точности формы высокоточных отверстий в деталях с элементами пониженной жесткости.: Тез. докл. Респ. конф., Улан-Удэ, 1985, с. 37-38.

5. Олоев А.Т., Хараева М.И. Приспособление для профилографирования шероховатости поверхности внутренних цилиндрических поверхностей по дуге окружности. - Информ. листок/ЦНТИ, Улан-Удэ, № 84-2, 1984, с. 3.

Олоев

