

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ Б С С Р
БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

инженер НИЧИПОРОВИЧ Г.Ф.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

(05.325 – порошковая металлургия)

(на русском языке)

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

Минск, 1972

Работа выполнена в Проблемной лаборатории порошковой металлургии и на кафедре "Приборы точной механики" Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института.

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ:

Заслуженный деятель науки и техники БССР, академик АН БССР, доктор технических наук, профессор СЕВЕРДЕНКО В.П.,

кандидат технических наук, доцент КОСТЮКОВИЧ С.С.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор технических наук, и.о.профессора ЖДАНОВИЧ Г.М.,

кандидат технических наук, доцент ДЕЧКО Э.М.

Ведущее предприятие - Минский завод шестерен

Автореферат разослан мая 1972 года.

Защита диссертации предполагается 23 июня 1972 года на заседании Объединенного Совета по присуждению ученых степеней по механико-технологическим, машиностроительным, автотракторным и торфяным специальностям при Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Отзывы в 2-х экземплярах просим направлять по адресу: г.Минск 220027, Ленинский проспект, 65, Белорусский политехнический институт, ученому секретарю Совета.

О дне и времени защиты будет объявлено в газете "Вечерний Минск".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БПИ за 10 дней до защиты.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук,
доцент

Н.В.КИСЛОВ

В решениях XXIV съезда КПСС и в ряде постановлений ЦК КПСС и Совета Министров СССР подчеркивается необходимость широкого внедрения порошковой металлургии в народное хозяйство. Только для автомобильной промышленности предусматривается введение в 1973 году цеха по производству металлокерамических деталей (МКД) с объемом производства 10 тыс. тонн, что более, чем в 10 раз превышает объем продукции цеха металлокерамических изделий Волжского автомобильного завода. Особое внимание при совершенствовании технологических процессов и, в частности, методов порошковой металлургии должно быть уделено вопросам коренного улучшения качества, в том числе повышению точностных показателей изделий. Удовлетворение высоких требований к точности МКД, как правило, связано с применением операций калибрования или механической обработки. Низкая точность, получаемая на предшествующих операциях, благодаря проявлению технологической наследственности, отрицательно сказывается на точности финишных операций. В результате неоправданно увеличивается себестоимость МКД и ограничивается их номенклатура. Следует также учесть, что обработка резанием ухудшает некоторые эксплуатационные параметры поверхностного слоя, поэтому желательно добиваться ее исключения.

Вместе с тем, имеются потенциальные возможности увеличения точности получаемых деталей до уровня, позволяющего в ряде случаев частично или полностью устранить операции калибрования и механической обработки. Выявление наличных резервов точности связано с исследованием кинетики появления погрешностей по операциям в ходе технологического процесса. Результаты таких исследований могут быть использованы как для прогнозирования точностных характеристик МКД, так и для назначения параметров процесса, обеспечивающих повышение точности изготовления деталей.

Ц е л ь ю настоящей работы, в связи с этим, является исследование кинетики точностных характеристик деталей, получаемых методом порошковой металлургии, а также определение путей повышения их точности.

Первая глава диссертационной работы посвящается анализу литературных данных по вопросу изготовления МКД и исследования их точностных характеристик. Здесь же приводится обзор методов и средств измерения размеров, отклонений формы и шероховатости по-

верхности.

Проведенный анализ опубликованных в отечественной и зарубежной литературе данных показал, что наиболее распространенный в производственной практике метод изготовления МКД путем статического холодного прессования и последующего спекания исследован с точностной точки зрения явно недостаточно. В монографиях и в справочной литературе по порошковой металлургии практически отсутствуют сведения о достижимых значениях точностных характеристик МКД на различных стадиях технологического процесса.

Результаты исследования размерной точности МКД немногочисленны (работы Е.Г.Копаневича, Кавакита Убу, С.Халзена, Р.Бургеса и др.) и в ряде случаев противоречивы. Так, по экспериментальным данным Е.Г.Копаневича полные поля рассеивания диаметральных и высотных размеров спеченных МКД оцениваются соответственно 7-8 и 8-9 классами точности, в то время как по утверждению А.Я.Артамонова, Э.М.Дечко и др. они соответствуют 4-5 и 7-8 классам.

Наиболее изученной с точки зрения размерной точности является операция спекания, так как все исследования, связанные с изучением влияния различного рода технологических факторов на процесс усадки, в полной мере характеризуют стадию изменения размеров МКД в процессе спекания. Работами Г.Бокштигеля, Ф.Зауэрвальда, В.Айлендера, И.М.Федорченко, С.С.Ермакова, Р.Майснера, Ф.Ленели, О.В.Романа, М.Ю.Бальшина, В.В.Скорохода, В.А.Ивенсена, Б.Я.Пигеса и др. выяснены характер и степень влияния множества технологических факторов (температура, время и скорость спекания; размеры и свойства поверхности спекаемых порошков; гравитационные силы; начальная пористость брикетов и др.) на протекание линейной и объемной усадки при спекании МКД.

Несколько в меньшей степени изучена размерная точность прессованных металлосерамических брикетов. Данных, освещающих процесс деформирования рабочих поверхностей матриц, а также влияние этого процесса на получение размеров прессованных брикетов, в литературе практически не встречается. Большинство имеющихся работ (В.Рутковского, С.Я.Плоткина, Г.В.Самсонова, И.М.Федорченко, Н.А.Филатовой и др.) посвящено изучению упругого последействия. Однако в его оценке также имеются некоторые противоречия. Так, по данным С.Я.Плоткина величина упругого последействия для железных порошков составляет 2%, Н.А.Филатовой - 0,5%, а В.Рутковского - 4-9% и

Сведений о погрешностях формы МКД в опубликованных источниках не приводится.

Вопросам изучения шероховатости поверхности и, в частности, выяснению механизма образования микрорельефа поверхности также уделено недостаточное внимание. Известно краткое сообщение В.С. Раковского и В.В.Саклинского, отражающее результаты исследования влияния давления прессования и зернистости прессуемого порошка на шероховатость поверхности бронзо-графитовых МКД.

Анализ методов исследования точностных характеристик, а также средств их измерения, показал, что при изучении размерной точности, погрешностей формы и шероховатости МКД практически не используются современные методы анализа точности и прогнозирования точностных характеристик, применяемые, например, в обработке резанием; в ряде случаев отсутствуют средства для измерения отдельных точностных характеристик и т.д.

Обобщение технических требований к применяющимся МКД позволяет установить необходимые пределы их точностных характеристик. Так, точность диаметральных размеров должна быть не ниже 2а-3 класса, отклонения формы должны соответствовать УІ-УІІІ степени точности, а шероховатость поверхности - 6-8 классу. При соблюдении этих требований МКД, изготовленные методом прессования и спекания, могут устанавливаться в ряд узлов и сопряжений без дополнительной обработки.

Основными задачами, на решение которых направлена диссертационная работа, являются:

1. Комплексное исследование точностных характеристик МКД, заключающееся в изучении влияния технологических факторов на размерную точность, погрешности формы и шероховатость поверхности (с использованием прогрессивных методов исследований и математического анализа достигнутых результатов).

2. Разработка и создание необходимых средств измерения точностных характеристик для обеспечения выполнения комплексных исследований.

3. Определение путей повышения точностных характеристик МКД.

Вторая глава содержит методику проведения исследований, выбор методов и средств измерений точностных характеристик, описание специального оборудования, разработанного для проведения исследований.

Здесь же приведено обоснование математического аппарата, использованного для обработки экспериментальных данных.

Точностные характеристики исследовались на образцах типа сплошных цилиндров и цилиндрических втулок, изготовленных из железного порошка марки ПЖ 2М ГОСТ 9648-61 с добавкой стеарата цинка. Порошок использовался в состоянии поставки (при содержании железа не менее 96%). Изготовление деталей производилось по технологическому процессу, включающему приготовление шихты определенного состава, дозирование весовым или объемным методом, статическое холодное прессование по различным схемам ("по давлению" или "по кольцу") и спекание в атмосфере диссоциированного аммиака.

Факторы, влияющие на точностные характеристики МКД, условно были разделены на четыре группы. К первой группе относятся факторы, определяемые свойствами прессуемой шихты: степень дисперсности порошка D (пределы изменения от -0,05 до +0,4), гранулометрический состав q (содержание в шихте отдельных фракций от 0 до 100%), компонентный состав (добавка 0-100% порошка стали ШХ-15, 0-3% стеарата цинка S , 1-10% графита). Вторая группа факторов определяется применяемым формообразующим инструментом: размерный износ матрицы по диаметру d_m (до выхода из строя), ее некруглость (II-У степени точности) и шероховатость поверхности ($\nabla 7 - \nabla 13$). Факторы, входящие в третью группу, характеризуют условия прессования. К ним относятся: давление прессования p (200-1050 МН/м²), величина навески G , обеспечивающая получение деталей с отношением высоты к диаметру от 0,1 до 2,5, и количество циклов прессования (до 18000). И, наконец, четвертая группа факторов, определяющая условия спекания: температура T (900-1200°C) и время t (1-3 часа) спекания.

Основной объем исследования осуществлялся методом полного факторного эксперимента, в ряде случаев использовались методы планирования (дробных реплик и рандомизации входных параметров).

Исследование точностных характеристик производилось на охватываемых поверхностях МКД.

Измерения диаметральных d и высотных h размеров производились на длиномерах ИЗВ-1 и фирмы Карл Цейс, ГДР, а также рычажными скобами и рычажными микрометрами с различными пределами измерений. Результат измерения диаметральных размеров одной детали оценивался средним арифметическим значением шести измерений, производив-

шихся в двух взаимноперпендикулярных плоскостях, расположенных вдоль оси детали, по три измерения в каждой плоскости; а высотный размер – по среднему арифметическому значению четырех измерений, выполнявшихся через 90° . Для обеспечения представительности выборки количество образцов в ней составляло не менее 20 штук. Исследованию размерной точности было подвергнуто около 10000 образцов.

При обработке результатов исследований рассчитывались средние арифметические значения изучаемых параметров, их средние квадратичные отклонения, а также величины доверительных интервалов. Наличие функциональной зависимости между исследуемыми факторами и параметрами размерной точности определялось по критерию Кокрана, а теснота корреляционной связи – по значению коэффициента корреляции. Вид связи устанавливался путем аппроксимации методом наименьших квадратов экспериментальных зависимостей различными видами теоретических линий регрессии. Кроме того, определялся вид распределения охватываемых размеров. По виду эмпирического распределения и вычисленным статистическим характеристикам подбирались теоретическая функция распределения и производилось их сравнение. Степень согласования оценивалась критерием К.Пирсона (χ^2).

Математическая обработка многофакторного эксперимента производилась с привлечением методов регрессионного анализа и нелинейной множественной корреляции. В качестве теоретической многомерной поверхности регрессии использовались соответственно функции вида:

$$\theta = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{j=1}^n b_j x_j^2 + \sum_{i,j=1}^{C_n^2} b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

и

$$\theta = K \cdot \prod_{i=1}^n f_i(x_i), \quad (2)$$

где θ – выходной параметр (h, d на различных стадиях технологического процесса),

x_i, x_j – исследуемые факторы (давление прессования, величина навески, диаметр матрицы, степень дисперсности порошка и т.д.).

То-есть функции отклика θ представлялись в виде полинома второй степени (см. уравнение (1)) или в виде произведения некоторых функций отдельных исследуемых переменных $f_i(x_i)$ (см. уравнение (2)).

В процессе вычислений производилось определение значений коэффициентов регрессии, расчетных величин исследуемого параметра, а также оценка адекватности полученных уравнений с эмпирическими данными путем сравнения расчетных и наблюдаемых дисперсий.

Погрешности формы поперечного сечения измерялись на кругломере мод. 218 завода "Калибр". Величина погрешности оценивалась комплексным показателем - некруглостью. Выделение дифференцированных отклонений профиля производилось путем разложения тригонометрического ряда - аналога профиля методом гармонического анализа. В процессе вычисления определялись параметры 12-ти первых гармоник.

Измерение шероховатости поверхности выполнялось на профилографе-профилометре мод. 201, профилометре мод. 240 завода "Калибр", а также на специально сконструированном и изготовленном профилографе, позволяющем производить запись профиля поверхности при расположении трассы измерения по дуге окружности. Создание такого прибора было обусловлено необходимостью проведения измерений шероховатости на боковых поверхностях цилиндрических МКД, механизм образования микронеровностей на которых требует расположения трассы измерения в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра, т.е. по дуге окружности. Оценка численных значений шероховатости поверхности производилась по рекомендуемым в настоящее время ГОСТ 2789-59 параметрам R_a и R_z (среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии и высота неровностей в мкм), кроме того использовались вспомогательные параметры, такие как высота A и шаг B периодических составляющих профиля. Необходимость использования этих параметров определяется спецификой поверхности МКД (наличие пор, следов выпрессовки и отпечатка формообразующей поверхности), а также попыткой объяснить механизм образования микро-рельефа поверхности. Для этих целей применялся метод амплитудно-частотного представления профиля (спектральный анализ), апробированный рядом авторов (И.В.Дунин-Барковский, Б.С.Давыдов, А.И.Карташев) при исследовании шероховатости поверхности компактных деталей.

Спектральный анализ шероховатости поверхности МКД выполнялся аппаратным методом на специально разработанной для этой цели установке. В основу работы установки положен принцип, предложенный А.И.Карташевым и заключающийся в преобразовании светового

потока, изменяющегося в результате пересечения с вращающейся маской-профилограммой профиля, в электрический сигнал – аналог профиля с помощью фотоэлемента и последующем разложении полученного сигнала анализатором спектра. Функция, описывающая профиль поверхности МКД, разлагалась на дифференцированные периодические составляющие, амплитуда и частота появления которых соответствует отдельным технологическим факторам. Так как периоды отдельных составляющих в данном случае не являются членами гармонического ряда и классический гармонический анализ не может быть применен, параметры периодических составляющих определялись с помощью метода выявления скрытых периодичностей. Функция, описывающая профиль поверхности, представлялась в виде суммы двух функций:

$$Y(x) = \sum_{j=1}^m S_j(x) + n(x), \quad (3)$$

где $S_j(x)$ – периодические составляющие функции, параметры которых определялись с помощью анализатора,
 $n(x)$ – стационарная случайная функция.

Исследование погрешностей формы и шероховатости поверхности МКД проводились на 7000 образцов.

Все вычисления параметров размерной точности, погрешностей формы, шероховатости поверхности и спектра профиля производились по специально разработанным программам на ЭЦМ "Одра -I204" и "Проминь -М".

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований размерной точности, погрешностей формы и шероховатости поверхности МКД.

Результаты исследований позволили выявить доминирующие факторы, влияющие на систематическую составляющую погрешности размера, которыми являются давление прессования и величина навески – при прессовании "по давлению" и величина навески – при прессовании "по кольцу". При увеличении давления прессования диаметральный размер увеличивается прямо пропорционально, а высотный – асимптотически приближается к значению высоты брикета, имеющего 100-процентную плотность. Влияние величины навески оказывается специфическим, так как зависит от схемы прессования. При прессовании "по давлению" колебание навески приводит к значительному изменению высотных размеров и почти не влияет на диаметральные, в то время как при прессовании "по кольцу" высота брикетов изменяется меньше, а диаметральные размеры – более

заметно, чем при прессовании "по давлению".

По сравнению с доминирующими факторами гранулометрический состав и степень дисперсности прессуемого порошка, а также компонентный состав шихты оказывают меньшее влияние на изменение размеров. Действие степени дисперсности порошка зависит от метода приготовления навески (весовой или объёмный). Высота детали изменяется более интенсивно при объёмном методе, отвечая изменению насыпного веса прессуемой шихты. С увеличением размера зерна высота брикетов вначале уменьшается (для объёмного метода приготовления навески до фракции 0,15 мм), а затем увеличивается, но менее интенсивно. Диаметральные размеры деталей, изготавливаемых из порошков различной степени дисперсности, изменяются независимо от метода приготовления навески. После прессования минимум размера наблюдается для образцов из фракции 0,2 мм, а после спекания — для образцов из фракции 0,1 мм, так как мелкие фракции имеют большую усадку.

Анализ, выполненный для прессованных и спеченных МКД, позволил установить, что рассеивание охватываемых размеров не противоречит закону нормального распределения. Диапазоны рассеивания размеров на операциях прессования и спекания при использовании различных схем прессования соответствуют следующим классам точности:

Схемы прессования	Прессование		Спекание	
	d	h	d	h
"по давлению"	3-3а	5-7	3а-4	7-8
"по кольцу"	3а-4	5	4-5	7

Как видно, при изготовлении МКД методом однократного прессования и спекания, между показателями размерной точности прессованных и спеченных деталей существует определенная взаимосвязь: точность размеров спеченных деталей на I-2 класса ниже, чем прессованных.

Схема прессования "по кольцу" обеспечивает несколько более высокую точность высотных размеров, но проигрывает в точности диаметральных размеров, так как погрешности изготовления навески вызывают изменение размеров прессовок, находящихся под нагрузкой, и приводят к неоднозначному по величине упругому последствию из-за различия в плотности брикетов.

Точность охватываемых диаметральных размеров после спекания

в лучшем случае достигает 3а-4 класса, что несколько ниже требуемой и не всегда позволяет обойтись без дополнительной обработки (например, калибровки),

Одновременное влияние всех исследованных технологических факторов на охватываемые размеры МКД отражено в обобщающих математико-статистических уравнениях прогнозирования. Они получены для МКД, прошедших операции прессования, первого и второго спекания. Например, для спеченных МКД охватываемые размеры могут быть вычислены по формулам:

$$h^{Cn} = 134,865 - 1,165 \cdot p - 1,332 \cdot T - 1,57 \cdot t + 1,315 \cdot G - 5,398 \cdot d_M - 4,337 \cdot S - 34,19 \cdot D + \\ + 0,005 \cdot p^2 + 0,00006 \cdot T^2 + 0,46 \cdot t^2 + 0,001 \cdot G^2 + 0,117 \cdot d_M^2 + 0,772 \cdot S^2 + 145,8 \cdot D^2 + \\ + 0,012 \cdot p \cdot T + 0,005 \cdot p \cdot G + 0,024 \cdot p \cdot d_M + 0,063 \cdot p \cdot S + 0,538 \cdot p \cdot D - 0,0005 \cdot T \cdot t + \\ + 0,0001 \cdot T \cdot d_M + 0,003 \cdot T \cdot S - 0,004 \cdot T \cdot D + 0,002 \cdot t \cdot G + 0,018 \cdot t \cdot d_M + 0,1 \cdot t \cdot S - \\ - 0,94 \cdot t \cdot D - 0,038 \cdot G \cdot d_M + 0,008 \cdot G \cdot S - 0,09 \cdot G \cdot D - 0,027 \cdot d_M \cdot S + \\ + 0,408 \cdot d_M \cdot D - 1,71 \cdot S \cdot D \quad (4)$$

$$d^{Cn} = -1,275 + 0,002 \cdot p + 0,003 \cdot T + 0,027 \cdot t - 0,002 \cdot G + 0,991 \cdot d_M - 0,119 \cdot S + 0,8 \cdot D + \\ + 0,0003 \cdot p^2 - 0,000001 \cdot T^2 - 0,022 \cdot t^2 - 0,00001 \cdot G^2 + 0,00004 \cdot d_M^2 + 0,016 \cdot S^2 + \\ + 0,6 \cdot D^2 - 0,00003 \cdot p \cdot T + 0,001 \cdot p \cdot t + 0,00001 \cdot p \cdot G - 0,00006 \cdot p \cdot d_M + 0,0008 \cdot p \cdot S - \\ - 0,001 \cdot p \cdot D + 0,00001 \cdot T \cdot t - 0,0000005 \cdot T \cdot G - 0,000003 \cdot T \cdot d_M + 0,0000 \cdot T \cdot S - \\ - 0,0005 \cdot T \cdot D - 0,0001 \cdot t \cdot G - 0,0004 \cdot t \cdot d_M + 0,001 \cdot t \cdot S - 0,03 \cdot t \cdot D + 0,0001 \cdot G \cdot d_M - \\ - 0,0003 \cdot G \cdot S + 0,003 \cdot G \cdot D + 0,002 \cdot d_M \cdot S - 0,012 \cdot d_M \cdot D + 0,04 \cdot S \cdot D \quad (5)$$

Применение полученных уравнений правомерно при значениях влияющих факторов в пределах, использованных при эксперименте.

В результате оценки величин погрешности формы по комплексному показателю - некрутлости установлено, что доминирующим фактором в данном случае является погрешность формы матрицы. Вычисление гармонических составляющих погрешностей формы матриц и МКД показывает, что основными элементарными погрешностями формы поперечного сечения МКД являются те, которые преобладают в спектре профиля матриц (т.е. овальность и 3-гранная огранка). Они переносятся на деталь, усугубляясь только на первых четных гармониках за счет деформации детали при выпрессовывании. При применении матриц, выполненных по II-Y степеням точности, отклонения формы прессованных образцов оказываются на I-2 степени точности грубее. Операция спекания вызывает увеличение погрешностей формы еще на I-2 степени, таким образом, отклонения формы спеченных МКД оцениваются UI-UM сте-

пенью, что не выходит за пределы требований, предъявляемых к готовым МКД.

Профили поверхности МКД, в силу специфики их образования, даже при одинаковых значениях параметра R_a имеют различную структуру (в частности, различное число пересечений профиля со средней линией, различное число мелких неровностей, различные углы наклона боковых поверхностей выступов и т.д.). Вычисление автокорреляционной функции показало, что профиль поверхности МКД можно представить в виде суммы периодических и случайных составляющих, описываемых уравнением (3). Спектральный анализ функции - аналога профиля подтвердил наличие в профиле периодической составляющей, соответствующей формообразующей поверхности; были выявлены также периодические составляющие, связанные с размером зерен прессуемого порошка. Появление этих составляющих и изменение их параметров по операциям в ходе технологического процесса позволяет установить источники происхождения шероховатости поверхности, а также степень и характер их влияния.

Доминирующими технологическими факторами, изменяющими шероховатость поверхности прессованных МКД, являются давление прессования, шероховатость формообразующей поверхности и степень дисперсности прессуемого порошка.

Зависимость параметра R_a от давления прессования носит криволинейный характер. С увеличением давления прессования значение этого параметра асимптотически приближается к его значению для формообразующей поверхности. Влияние степени дисперсности прессуемого порошка и шероховатости формообразующей поверхности R_a'' на шероховатость поверхности МКД по параметру R_a подчиняется линейным зависимостям, описываясь уравнениями вида: (для $\rho = 900 \text{ МН/м}^2$ и $R_a'' = 0,14 \text{ мкм}$)

$$R_a^{Cn} = 1,255 + 6,357 \cdot D \quad (6)$$

и (для $\rho = 900 \text{ МН/м}^2$ и $D = 0,1 \text{ мм}$)

$$R_a^{Cn} = 0,866 + 0,723 \cdot R_a'' \quad (7)$$

Значения коэффициентов регрессии являются в свою очередь функциями технологических факторов (давление прессования, степень дисперсности порошка и т.д.).

Оптимальное содержание стеарата цинка, исходя из условия

получения наименьшей шероховатости поверхности МКД, зависит от давления прессования. В диапазоне давлений 450–1050 МН/м² оно составляет соответственно 1–0,25% и не связано с шероховатостью формообразующей поверхности.

Установлено, что высота периодических составляющих поверхности МКД уменьшается с увеличением давления прессования и уменьшением высоты микронеровностей формообразующей поверхности. Шаг периодических составляющих определяется периодом составляющих спектра формообразующих поверхностей (так как происходит его копирование) и размером зерна прессуемого порошка, возрастая с его увеличением.

Операции первого и второго спеканий несколько ухудшают шероховатость поверхности, увеличивая значения параметра R_a соответственно на 0,033 и 0,057 мкм. Это влияние можно объяснить ростом отдельных зерен и образованием конгломератов на поверхности, перераспределением количества открытых и закрытых пор и т.д. Величина приращения параметра R_a остается практически постоянной для МКД, изготовленных при различных режимах прессования, т.е. имеющих различную исходную шероховатость поверхности. Качество поверхности МКД по параметру R_a на последующих операциях прессования улучшается по сравнению со спеканием на I–2 класса. На операции второго прессования шероховатость МКД определяется в основном шероховатостью применяемого формообразующего инструмента и очень незначительно зависит от шероховатости поверхности детали после спекания (при $p_1 = p_2$).

Достижимая шероховатость поверхности спеченных МКД колеблется в диапазоне от 6 до 10 кл., причем она тем меньше, чем выше давление прессования, чище формообразующая поверхность и мельче прессуемый порошок. Использование метода регрессионного и корреляционного анализа и планирования эксперимента позволило получить общие зависимости для прогнозирования шероховатости поверхности МКД по параметру R_a в связи с одновременным изменением основных технологических факторов, как для операций прессования, так и для спекания. В частности, полученная зависимость параметра R_a от давления прессования, шероховатости формообразующей поверхности и содержания стеарата цинка для спеченных МКД имеет вид:

$$R_a^{Cn} = 5,038 - 0,277 \cdot R_a^n - 0,783 \cdot p - 1,566 \cdot S + 0,286(R_a^n)^2 + 0,033 \cdot p^2 + 0,48 \cdot S^2 + 0,087 \cdot R_a^n \cdot p + 0,017 \cdot R_a^n \cdot S + 0,086 \cdot p \cdot S \quad (8)$$

Изменение шероховатости поверхности МКД в зависимости от гра-

нулометрического состава порошка описывается уравнением вида
(для $\rho = 600 \text{ МН/м}^2$, $R_{\alpha}^n = 0,304 \text{ мкм}$):

$$R_{\alpha}^{Cn} = (0,995 - 0,0177 \cdot q_{0,04})(1,041 - 0,033 \cdot q_{0,04})(0,979 + 0,03 \cdot q_{0,1})(1,006 - 0,0011 \cdot q_{0,15})(1,013 - 0,008 \cdot q_{0,063}) \quad (9)$$

Гранулометрический состав изменяет шероховатость поверхности незначительно (в пределах 2-3 разрядов).

Результаты исследования точностных характеристик наглядно показали, что в настоящее время в практике порошковой металлургии не всегда обеспечиваются рекомендуемые соотношения между величиной рассеивания размеров, отклонениями формы и шероховатостью поверхности МКД. По своим реально достигшим показателям отклонений формы и шероховатости поверхности МКД после операции спекания могли бы эксплуатироваться в сопряжениях 2-2а класса точности, в то время как практически достигшая размерная точность лежит в пределах 3а-4 класса.

Четвертая глава посвящена определению путей повышения размерной точности изготовления МКД, разработке метода прессования деталей с повышенной точностью диаметральных размеров и созданию системы автоматического регулирования (САР) размеров в процессе прессования.

Для повышения точности размеров в производственной практике могут использоваться два метода: многократного деформирования с промежуточным спеканием и ужесточения интервалов разброса значений влияющих факторов. Границы колебания этих факторов можно определить, пользуясь уравнениями прогнозирования размерной точности (см. уравнения 4-5). Однако оба пути при определенных обстоятельствах (высоких требованиях к размерной точности) могут оказаться экономически несправедливыми или даже технически невыполнимыми.

Изучение характера изменения диаметральных размеров последовательно изготовленных МКД с целью оценки мгновенной точности обработки, проведенное путем вычисления автокорреляционной функции размерной последовательности прессованных МКД и ее спектральной плотности (по методу М.С.Невельсона), показало, что в размерной последовательности присутствует систематическая составляющая, среднее квадратичное отклонение которой составляет 30-40% среднего квадратичного отклонения генеральной совокупности. Это обстоя-

тельство явилось предпосылкой для использования в процессе изготовления МКД системы автоматического регулирования размеров, предусматривающей контроль размера изделия в процессе его получения (прессования) и корректирование режима изготовления с целью компенсации систематических (постоянных и переменных) составляющих отклонений размера от заданного значения.

Как показали результаты проведенных нами исследований, исключение этих составляющих следует производить на ранних стадиях технологического процесса, т.е. на операции прессования, так как между параметрами рассейвания размеров МКД на операциях прессования и спекания существует достаточно тесная корреляционная связь:

$$\sigma_d^{Cs} = 3,00 + 2,16 \sigma_d^{np} \quad (10)$$

(при значении коэффициента коррелиции равном $r = 0,78 \pm 0,03$), где σ_d^{np} , σ_d^{Cs} - соответственно средние квадратичные отклонения диаметральных размеров на операциях прессования и спекания.

В основу принципа действия САР был положен разработанный нами метод прессования МКД с повышенной точностью диаметральных размеров. Повышение точности изготовления достигается за счет уменьшения погрешностей размера брикета под нагрузкой в момент окончания процесса прессования и компенсации изменения этого размера (в результате упругого последствие после выпрессовывания брикета из матрицы) при прессовании последующих деталей.

Контроль размера прессовки осуществляется координным образом путем измерения деформации боковой стенки матрицы в радиальном направлении непосредственно в процессе нагружения. Так как деформация боковой стенки матрицы оказалась связанной линейной зависимостью не только с размером прессовки, находящейся под нагрузкой, и давлением прессования, но и с величиной диаметрального размера выпрессованного брикета, то она была выбрана в качестве параметра регулирования САР.

Компенсация систематической погрешности размера, возникающей в результате воздействия таких факторов как состав шихты, условия трения, износ формообразующей поверхности матрицы и др., между действиями которых и размером брикета в соседних циклах прессования существует корреляционная связь, выполняется путем автоматического введения поправки в размер прессовки. Коррекция происходит при

смещении центра группирования четырех последовательно изготовленных брикетов за установленные контрольные границы.

Деформация стенки контролируется с помощью пневмоэлектро-контактного измерительного преобразователя обратной связи, подающего через усилитель сигнал на электрозолотник отключения пресса-автомата. Положение центра группирования определяется на измерительной позиции вторым измерительным преобразователем, подающим через усилитель сигнал, управляющий узлом подналадки измерительного преобразователя обратной связи.

Поправка в размер прессовки вводится за счет корректировки зазора между контактами измерительного преобразователя обратной связи на величину, пропорциональную подналадочному импульсу.

Если в процессе прессования произошло изменение, например, свойств шихты, вызвавшее смещение центра группирования размеров за одну из контрольных границ поля допуска, то с измерительной позиции будет подан сигнал на управление узлом подналадки. Произойдет корректировка зазора между контактами измерительного преобразователя обратной связи. Процесс прессования последующих деталей будет заканчиваться при достижении другой величины деформации стенки матрицы, т.е. при другом давлении прессования. Размеры прессовки окажутся скорректированными на величину смещения центра группирования, вследствие чего размеры последующих выпрессованных деталей окажутся в пределах поля допуска.

Производственными испытаниями предложенного метода, проведенными на Минском заводе шестерен, установлено, что точность диаметральных размеров прессованных МКД типа втулок повышается на I-2 класса по сравнению с методом прессования "по давлению" (среднее квадратичное отклонение уменьшилось с 6,6 мкм до 1,41 мкм).

Технико-экономический расчет показывает, что предполагаемая экономическая эффективность использования САР на Минском заводе шестерен для изготовления шести наименований МКД с общей годовой программой в 2 млн. штук составит около 1800 рублей в год (за счет устранения операции калибрования). Срок окупаемости САР составляет 3 месяца.

Разработанные материалы и результаты исследований САР переданы Минскому заводу шестерен для внедрения в производство в 1973 году.

Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы:

1. Факторами, оказывающими наиболее существенное влияние на изменение размеров МКД являются: величина давления прессования и величина навески, причем влияние последней зависит от схемы прессования. При прессовании "по давлению" колебания навески вызывают значительные изменения высотных размеров (исчисляемые в мм) и практически не сказываются на диаметральных (несколько мкм). При прессовании "по кольцу" высота брикетов остается практически неизменной, а диаметр существенно изменяется (десятки мкм) с изменением величины навески.

2. Рассеивание охватываемых высотных и диаметральных размеров после прессования и спекания с достаточной точностью описывается законом нормального распределения.

3. Точность размеров прессованных брикетов при применении схемы прессования "по давлению" соответствует для высотных размеров 5-7 классу, для диаметральных - 3-3а кл., а при применении схемы прессования "по кольцу" - для высотных - 5 кл. и для диаметральных - 3а-4 кл. То есть схема прессования "по давлению" обеспечивает более высокую точность диаметральных размеров, а схема прессования "по кольцу" - высотных.

4. Процесс спекания приводит к снижению точности высотных и диаметральных размеров на I-2 класса. Между рассеиванием размеров прессованных и спеченных МКД наблюдается тесная корреляционная связь, так коэффициент корреляции для высотных размеров равен 0,92, а для диаметральных - 0,78.

В результате, после спекания диаметральные размеры МКД получаются не точнее 3а-4 кл., что явно ниже требуемых (2а-3 кл.) и вызывает необходимость дополнительной обработки (механической, калибрования и т.д.).

5. Погрешности формы поперечного сечения МКД (некруглость) при прессовании практически не зависят от схемы прессования и определяются в основном некруглостью матрицы. При выполнении матриц по П-У степеням точности, достигаются IV-VI степени точности прессованного брикета.

6. Спекание снижает точность формы поперечного сечения на I-2 степени, т.е. до VI-VIII степени точности, что практически приемлемо для готовых МКД и позволяет избежать дополнительной обработки.

7. Установлено, что специфика поверхности МКД (наличие пор, отпечаток формообразующей поверхности, следы выпрессовки) при оценке шероховатости вызывает необходимость дополнения стандартных параметров вспомогательными — высотой и шагом периодических составляющих профиля.

8. Высота микронеровностей поверхности МКД определяется давлением прессования и высотой микронеровностей профиля формообразующей поверхности, в то время как периодичность составляющих профиля является функцией спектрального состава профиля формообразующей поверхности и размеров зерен прессуемого порошка. Влияние остальных технологических факторов, таких как колебание гранулометрического состава, содержание стеарата цинка, шероховатость поверхности изделия перед вторым прессованием, менее существенно.

9. Шероховатость прессованных металлокерамических брикетов соответствует 6–10 классам при использовании инструментов с шероховатостью формообразующих поверхностей 7–12 классов. Основными факторами, определяющими значение параметра R_a , являются давление прессования и шероховатость формообразующей поверхности.

10. Процесс спекания сравнительно мало влияет на изменение шероховатости поверхности МКД (по параметру R_a). Поверхность спеченных образцов на 1–2 разряда грубее поверхности прессованных брикетов.

11. Размеры и шероховатость поверхности МКД на различных стадиях технологического процесса могут быть определены путем расчета по предлагаемым уравнениям прогнозирования (4), (5), (8), (9). Используя эти уравнения, можно управлять технологическим процессом с целью повышения размерной точности и улучшения шероховатости поверхности МКД за счет изменения значений одного или нескольких одновременно действующих факторов. Кроме того, эти уравнения могут быть использованы для нормирования точностных характеристик проектируемого инструмента и назначения параметров технологического процесса.

12. С целью получения более высокой точности диаметральных размеров МКД рекомендуется применение системы автоматического регулирования (САР) размеров в процессе прессования, являющейся аппаратной реализацией предлагаемого способа прессования.

13. Рекомендуемым параметром регулирования диаметральных размеров МКД является деформация стенок матрицы в направлении регулируемого размера. Применение такого параметра регулирования эффективно с точки зрения компенсации влияния колебания технологических факторов (состава шихты, величины навески, условий смазки и т.д.) на систематическую составляющую погрешности размера и конструктивно легко осуществимо.

14. Предлагаемая САР позволяет исключить систематическую погрешность изготовления размеров, величина среднего квадратичного отклонения которой составляет 30-40% среднего квадратичного отклонения генеральной совокупности. В этом случае необходимо в обязательном порядке нормировать погрешности формы и шероховатость поверхности рабочей полости матрицы. Погрешности формы рекомендуется назначать по П-У степени точности ГОСТ 10356-63, а шероховатость поверхности по 10-13 классу ГОСТ 2789-59.

15. Предлагаемая САР охватываемых диаметральных размеров, как показали производственные испытания на Минском заводе шестерен, позволяет получить точность в пределах 2а-3 классов, что дает возможность полностью исключить дополнительную обработку МКД после прессования и спекания.

При ужесточении принятых на заводе допусков на технологические факторы можно ожидать дальнейшего увеличения размерной точности МКД до 2 класса.

По теме диссертации сделаны доклады на XXII (1966) - XXIII (1971) научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института совместно с работниками промышленности, г. Минск и на XXII научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава Северо-Западного заочного политехнического института, Ленинград, 1971.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Кузнецов В.П., Куцер М.Я., Ничипорович Г.Ф., Клецко Б.И. Некоторые вопросы точности металлокерамических изделий, Порошковая металлургия. Материалы IX Всесоюзной конференции по порошковой металлургии, май 1966, Рига.

2. Кузнецов В.П., Ничипорович Г.Ф. Исследование влияния смазок на изменение размеров металлокерамических изделий. Новая техника и прогрессивная технология. Сб. докладов Республиканской научно-методической конференции по механико-технологическим специальностям, октябрь 1967, Минск, изд. "Высшая школа", 1969.

3. Кузнецов В.П., Куцер М.Я., Ничипорович Г.Ф. О влиянии степени дисперсности порошков на размеры металлокерамических деталей. Новая техника и прогрессивная технология. Сб. докладов Республиканской научно-методической конференции по механико-технологическим специальностям, октябрь 1967, Минск, изд. "Высшая школа", 1969.

4. Ничипорович Г.Ф. Шероховатость поверхности металлокерамических деталей. Прогрессивная технология машиностроения, вып. I, Межведомственный республиканский научно-технический сборник, изд. "Высшая школа", Минск, 1970.

5. Ничипорович Г.Ф. Спектральный анализ шероховатости поверхности металлокерамических изделий. Известия Академии наук БССР, серия физико-технических наук № 3, Минск, 1970.

6. Ничипорович Г.Ф. Использование метода множественной корреляции при исследовании шероховатости поверхности металлокерамических деталей. Прогрессивная технология машиностроения, вып. 2, Межведомственный республиканский сборник, изд. "Высшая школа",

Минск, 1971.

7. Ничипорович Г.Ф. Исследование размерной точности металло-керамических деталей с применением регрессивного анализа. Прогрессивные способы изготовления металлокерамических изделий, Материалы I республиканской конференции по порошковой металлургии (октябрь 1971), изд. "Полымя", Минск, 1971.