

УДК 005.6

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-4-15

Определение параметров переходов обработки резанием в APQP-процессе подготовки производства на примере корпуса подшипника распределительного вала двигателя внутреннего сгорания

Л. Р. Сафарова, аспирант, Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия

С. В. Касьянов, кандидат технических наук, Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия

Д. Т. Сафаров, кандидат технических наук, Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия

Рассмотрен пример применения метода планирования эксперимента в APQP-процессе подготовки производства для нахождения значений параметров процесса резания, обеспечивающих заданный запас точности на примере черного и чистового растачивания специальной характеристики корпуса подшипника распределительного вала – диаметрального размера внутреннего отверстия, обеспечивающего посадку с натягом со сталебронзовой втулкой.

Из общей совокупности геометрических параметров выделены диагностические составляющие специальной характеристики – размер внутреннего отверстия, отклонения от круглости и высотного параметра шероховатости Ra, обеспечивающие допуск посадки сталебронзовой втулки, а также радиальное биение. Рассмотрены цели и результаты применения инженерных методов: расчета припусков, размерного анализа, оценки технологической точности станочных систем, планирования экспериментов, а также специальных методов APQP-процесса – инструментов управления качеством: FMEA-анализа, SPS, MSA. Обращено внимание на недостаточную информативность методов, не позволяющую обеспечить выбор показателей процесса для обеспечения необходимого запаса точности специальных характеристик. Для достижения заданного запаса точности выделены диагностические составляющие внутреннего диаметрального размера: отклонение настроечного размера, отклонение профиля поперечного сечения и высотный параметр шероховатости Ra, значения которых находятся в результате выполнения производственных экспериментов.

Планирование полнофакторного эксперимента выполняется по параметрам процесса резания – скорости резания, подаче и глубине резания. Для реализации плана спроектированы и изготовлены специальные образцы изделий со ступенчатым припуском. Форма образцов-изделий позволяет уменьшить для проведения полнофакторного эксперимента количество образцов с восьми до четырех, обеспечив проверку линейности регрессионных моделей. Приведен расчет и регрессионные модели, позволяющие на этапе проектирования операций изготовления деталей прогнозировать значения составляющих внутреннего диаметрального размера. Решение системы регрессионных моделей, удовлетворяющее заданным ограничениям по заданному запасу точности, позволяет найти оптимальный диапазон значений параметров процесса резания, обеспечить редкие настройки специальных характеристик в серийном процессе изготовления корпусов подшипников распределительного вала.

В дополнение к статистическим методам управления качеством применение разработанной методики позволяет обеспечить мониторинг технического состояния оборудования и поддержание его в требуемом для выпуска качественной продукции состоянии.

Ключевые слова: APQP-процесс, параметры режимов резания, специальные характеристики деталей машин, запас точности.

Введение
автомобильной промышленности постоянно ужесточаются допуски на изготовление деталей [1–3]. Основными ин-

струментами, позволяющими обеспечить постоянное улучшение изготовления деталей, являются инструменты APQP-процесса подготовки производства выпуска новых компонентов, тре-

бования к применению которых изложены в ГОСТ Р 51814.6–2005 или в ссылочных руководствах переводных материалов мировых производителей автокомпонентов. К этим инструментам можно отнести различные виды FMEA-анализа [4]: метод оценки последствий потенциальных дефектов изделия на этапах функционирования, конструирования и изготовления, реестры специальных показателей качества, планы управления, SPC-анализ мониторинга производственных процессов на основе применения контрольных карт Шухарта и MSA-анализ, необходимый для оценки приемлемости измерительной системы. Следует отметить, что применение перечисленных выше методов управления качеством не предполагает создания базы данных между параметрами процесса резания и значений составляющих показателей точности.

Отдельные авторы реализуют методики, повышающие качество и производительность производственных процессов, используя сочетание стандартных методов управления качеством [5–7].

В процессе подготовки производства важно проектирование каждой технологической операции для обеспечения оптимальной степени точности установочной партии деталей. Проектирование содержания технологических процессов выполняется по рекомендациям производителей основного оборудования, станочной оснастки и инструмента, справочных данных, основанных на исследованиях точности технологического оборудования, анализа межоперационных размеров [8, 9] как по линейным [10], так и по диаметральным и радиальным параметрам [11] или эксцентриситетам [12]. Перечисленные технологические методы хотя и позволяют задать значения показателей процессов обработки резанием, но не учитывают фактическое состояние технологического оборудования, оснастки и инструмента. Результаты проектирования часто значительно отличаются от фактически достижимого уровня точности специальных характеристик точности обрабатываемых автокомпонентов.

Следует отметить, что современными требованиями в области качества ведущих автомобильных предприятий является принятие решений на основе фактов [13]. Появляются новые информационные требования к корпоративным системам и информативности документации для управления качеством [14, 15]. Основная доступная информация о динамике изменения показателей точности может быть получена из контрольных карт, однако они не содержат ин-

формации о зависимости управляемых значений показателей точности и параметров основного процесса.

Известными методами практического изучения взаимосвязи параметров технологических процессов и показателей качества деталей машин являются методы планирования экспериментов [16–18], обеспечивающие получение регрессионных зависимостей. Авторы приводят примеры нахождения регрессионных моделей единичных показателей качества продукции в зависимости от различных технологических факторов, решая при этом локальные производственные задачи. Характерные примеры применения методов планирования эксперимента приведены в работах [19, 20]. Авторами найдены регрессионные зависимости между параметрами зубофрезерных операций и различными геометрическими показателями точности зубчатых венцов, а также показателями качества поверхностного слоя; в [21] показаны зависимости параметров процесса резания и отклонений профиля продольного сечения в переходах растачивания на обрабатывающем станке с ЧПУ. В ходе технологического проектирования характерна абсолютизация справочных регрессионных моделей, хотя очевидно, что результаты расчета по моделям будут справедливы только в тех производственных условиях, на тех моделях оборудования, материалах, уровне точности червячных фрез в течение ограниченного времени, в которых проводились эксперименты.

Таким образом, **цель исследования** – разработка методики нахождения значений параметров переходов обработки резанием, обеспечивающих заданный запас точности специальных характеристик автокомпонентов в изменяющихся производственных условиях.

Практическая реализация методики

Рассмотрим условия и особенности применения методов планирования эксперимента в APQP-процессе подготовки производства на примере процессов обработки резанием подшипника распредвала. Подшипник распредвала является сборочной единицей, состоящей из двух деталей – корпуса, изготовленного из чугуна марки СЧ 30, и запрессованной в базовое отверстие сталебронзовой втулки БРА10ЖЧН4Л ГОСТ 493-79 (рис. 1); он входит в состав блока цилиндра двигателя большегрузного автомобиля.

Для корпуса подшипника распределительного вала специальными показателями являются показатели точности, определяющие его положение в блоке цилиндров и сопряжение с ци-

лиندрической шейкой распределительного вала. К ним относятся: диаметральные размеры внутренних и наружных отверстий, радиальное биение по внутренней поверхности, отклонения

формы внутреннего отверстия, линейный размер по торцам, торцевое биение, диаметральный размер отверстий и позиционный допуск их относительного расположения (рис. 2).

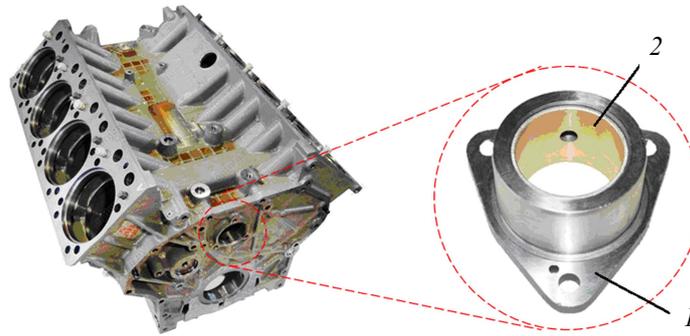


Рис. 1. Подшипник распределительного вала: 1 – корпус; 2 – антифрикционная втулка

Fig. 1. Camshaft bearing: 1 - housing; 2 - anti-friction sleeve

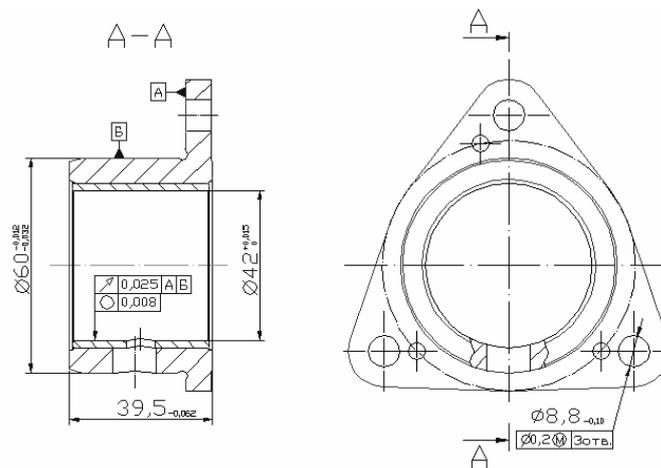


Рис. 2. Специальные показатели точности подшипника распределительного вала

Fig. 2. Special accuracy indicators of the camshaft bearing

Созданный при запрессовке втулки натяг с поверхностью внутреннего отверстия корпуса подшипника не должен допускать проворот втулки, так как это влечет отсутствие подачи смазки в подшипник и его разрушение. Поэтому специальными характеристиками корпуса подшипника являются диаметральный размер внутренней цилиндрической поверхности, отклонение от круглости и шероховатость, обеспечивающие допуск посадки со сталебронзовой втулкой (рис. 3).

Специальные характеристики корпуса подшипника обеспечиваются в соответствии с картой потока процесса на 005-й токарной операции. Конечные показатели обеспечиваются в двух переходах растачивания – черновом и чистовом (рис. 4). В ходе выполнения APQP-процесса принято решение о выполнении операция на имеющемся в производстве токарном станке мод. 16K20Ф3.

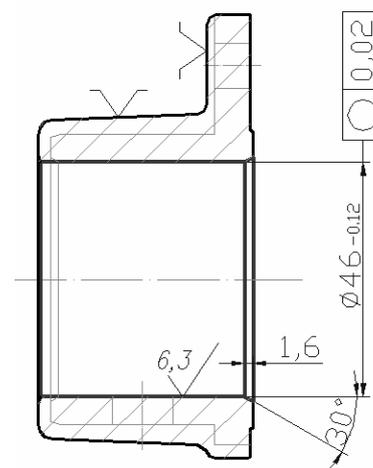


Рис. 3. Специальные показатели точности корпуса подшипника распределительного вала

Fig. 3. Special accuracy indicators of the camshaft bearing housing

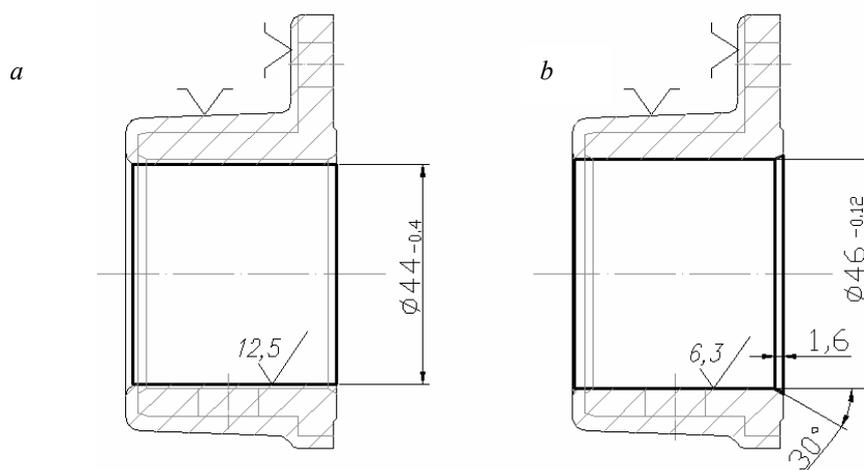


Рис. 4. Эскизы полуфабрикатов как результат грубого (а) и чистового (б) растачивания отверстий
 Fig. 4. Sketches of semi-finished products as a result of rough (a) and fine (b) boring holes

Документированные данные о технологической точности станка отсутствуют, поэтому в процессе проектирования назначить режимы обработки переходов возможно экспертным методом. Технологом принимаются значения режимов по результатам пробной обработки. Режимы должны обеспечивать производительность, а также заданную шероховатость поверхности и годность продукции по диаметральному размеру.

Для точного определения граничных значений необходимо найти зависимость специальных характеристик точности от глубины резания, подачи и скорости резания. Поскольку на ранних этапах проектирования заготовка отсутствует, то из того же материала – чугуна СЧ 30 – спроектирован специальный образец детали, выполненный в виде втулки, внутренняя поверхность которой выполнена ступенчатой формы (рис. 5). Размеры втулки выполнены близкими к будущей обрабатываемой детали, а форма не вызывает затруднений с ее индивидуальным изготовлением.

Показатели точности образца автокомпонента измеряются в местах нахождения ступеней имеющимися на предприятии средствами измерений. Высотные параметры (рис. 6, а) измеряются высоотомером ф. MahrDigimar817 CLM с ценой деления 1 мкм; шероховатость поверхности измеряется мобильным профилографом Mahr M 400 (рис. 6, б).

Значения диаметральных размеров находятся по формуле

$$d_{1-1} = \frac{h_b - h_n}{2},$$

где h_b – высотный размер в верхней точке профиля поперечного сечения внутренней цилиндрической поверхности, мм; h_n – высотный размер в нижней точке профиля поперечного сечения внутренней цилиндрической поверхности, мм.

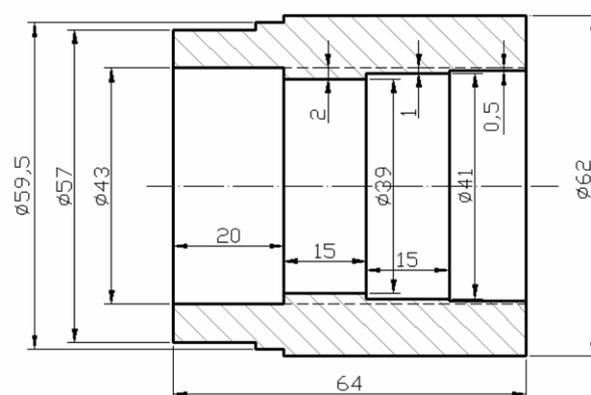


Рис. 5. Эскиз образца изделия для нахождения значений показателей переходов растачивания внутренней цилиндрической поверхности корпуса подшипника по специальным показателям точности

Fig. 5. Sketch of the product sample for finding the values of the boring transitions of the inner cylindrical surface of the bearing housing according to special accuracy indicators

Отклонение профиля поперечного сечения внутренней цилиндрической поверхности находится по формуле

$$\Delta_{п.с} = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2},$$

где d_{\max} – максимальный диаметральный размер, измеренный в выбранном поперечном сечении внутренней цилиндрической поверхности, мм;

d_{\min} – минимальный диаметральный размер, измеренный в выбранном поперечном сечении внутренней цилиндрической поверхности, мм.

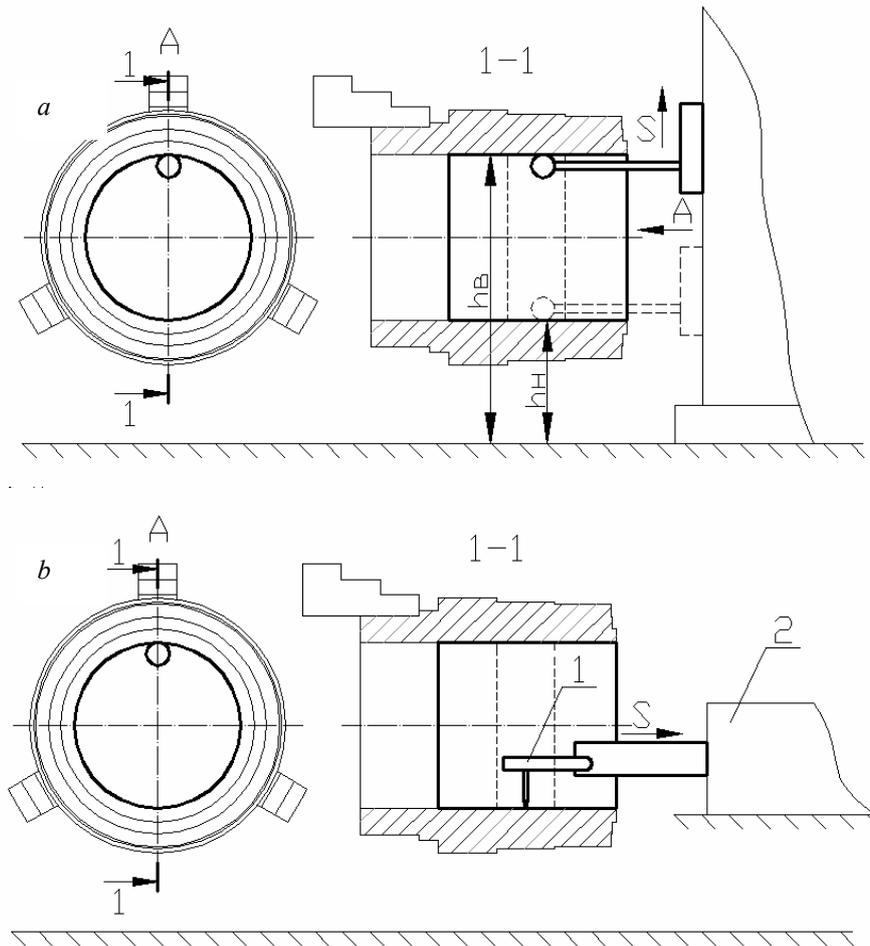


Рис. 6. Схемы измерений высотных параметров (а) и параметров шероховатости образцов изделий (b)

Fig. 6. Schemes for measuring height parameters (a) and roughness parameters of product samples (b)

Отклонение настроечного размера находится по формуле

$$\Delta_n = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2} - \frac{d_{\text{настр}}}{2},$$

где $d_{\text{настр}}$ – настроечный диаметральный размер растачивания внутренней цилиндрической поверхности, мм.

Для разработки плана эксперимента установлены уровни варьирования независимых факторов процесса: глубина резания, подача и скорость резания (табл. 1).

Глубина резания t изменяется от 0,5 до 2 мм, что соответствует ее значениям при выполнении чистового и чернового перехода. Основному уровню соответствует глубина резания 1,25 мм. Это значение близко к глубине резания при полустивой обработке.

Скорость резания V может варьироваться в пределах 150...250 м/мин. Диапазон определяется рекомендуемым интервалом стойкости расточного резца, оснащенного сменной многогранной пластиной из твердого сплава. Диапазон значений подачи определяется расчетным значением кинематической подачи, зависящей от радиуса скругления при вершине сменной многогранной пластины. Величина радиуса скругления R принята 2 мм, что соответствует имеющимся на рабочих местах сменным многогранным пластинам. Интервал варьирования подачи S от 0,1 до 0,2 мм/об.

В таблице 2 приведен план полнофакторного эксперимента, для проведения которого необходимо выполнить восемь опытов с варьированием уровней процесса.

Таблица 1. Значения верхнего, нижнего и основного уровня и интервалов варьирования параметров перехода растачивания

Table 1. Values of the upper, lower and main levels and intervals of variation of the parameters of the boring transition

Параметры процесса резания	Уровни варьирования параметров			Интервал варьирования $\Delta t, \Delta S, \Delta V$
	Нижний	Основной	Верхний	
	-1	0	+1	
t , мм	0,5	1,25	2,0	1,5
S , мм/об	0,1	0,15	0,2	0,1
V , м/мин	150	200	250	100

Таблица 2. Данные проведения полнофакторного эксперимента обработки образцов изделий по отклонению настроечного размера

Table 2. Data of a full-factor experiment of processing product samples by deviation of the tuning size

Уровни варьирования параметров процесса				Параметры процесса резания			Δ_n	$\Delta_{n,расч}$	%
0	Δt	ΔS	ΔV	t	S	V			
				мм	мм/об	м/мин	мм	мм	Погрешность
1	1	1	1	2,0	0,2	250	0,015	0,0150	0
1	-1	1	1	0,5	0,2	250	0,01	0,0095	-5
1	1	-1	1	2,0	0,1	250	0,011	0,0115	4,55
1	-1	-1	1	0,5	0,1	250	0,006	0,0060	0
1	1	1	-1	2,0	0,2	150	0,013	0,0130	0
1	-1	1	-1	0,5	0,2	150	0,007	0,0075	7,14
1	1	-1	-1	2,0	0,1	150	0,01	0,0095	-5
1	-1	-1	-1	0,5	0,1	150	0,004	0,0040	0
Проверка линейности регрессионной модели									
1	0	1	1	1,25	0,2	250	0,012	0,01225	2,08
1	0	-1	1	1,25	0,1	250	0,009	0,00875	-2,78
1	0	1	-1	1,25	0,2	150	0,01	0,01025	2,5
1	0	-1	-1	1,25	0,1	150	0,007	0,00675	-3,57

Благодаря тому, что внутренняя цилиндрическая поверхность выполнена ступенчатой формы, появляется возможность уменьшения количества обрабатываемых образцов. Достаточно внутреннюю цилиндрическую поверхность выполнить двухступенчатой, однако в конструкции образца изделия выполняется дополнительная промежуточная ступень. Она необходима для проверки адекватности линейной регрессионной математической модели:

$$П = (C + C_1\Delta t + C_2\Delta S + C_3\Delta V)K_H, \quad (1)$$

где $П$ – параметр точности образца-изделия, мм; C, C_1, C_2, C_3 – коэффициенты математической модели при уровнях варьирования показателей точности; K_H – поправочный коэффициент на факторы обработки резанием,

$$K_H = K_{HB}K_rK_\phi K_{м.л}K_{м.о}K_{СОЖ},$$

где $K_{HB}, K_r, K_\phi, K_{м.л}, K_{м.о}, K_{СОЖ}$ – поправочные коэффициенты на технологические факторы: твердость обрабатываемого материала, на угол в плане, на радиус при вершине, материал режущей части инструмента, обраба-

тываемый материал и условия обработки с подачей или без подачи смазочно-охлаждающей жидкости.

Коэффициенты принимаются за единицу для первоначальных условий проведения эксперимента. Повторная оценка точности станочной системы может выполняться при условии изменения только одного фактора процесса, но не одновременно нескольких. Например, оценка точности не может быть выполнена, если одновременно изменяется угол в плане и радиус при вершине сменной многогранной пластины. В процессе мониторинга происходит накопление информации и определение степени влияния каждого технологического фактора.

В результате производственный эксперимент выполняется растачиванием за один рабочий ход трех ступеней четырех образцов изделия (рис. 7).

В случае значительных погрешностей линейная регрессионная зависимость может быть изменена на параболическую. Зарегистрированы базовые условия эксперимента, для которых приняты значения коэффициентов, равные единице. Среднее значение твердости четырех образцов изделий составило 170 HB, сменная мно-

гогранная пластина – TNMG 160404-KR, радиус при вершине СМП $r = 2$ мм, угол в плане – 90° ,

марка обрабатываемого материала – СЧ 30, условия обработки – с подачей СОЖ.

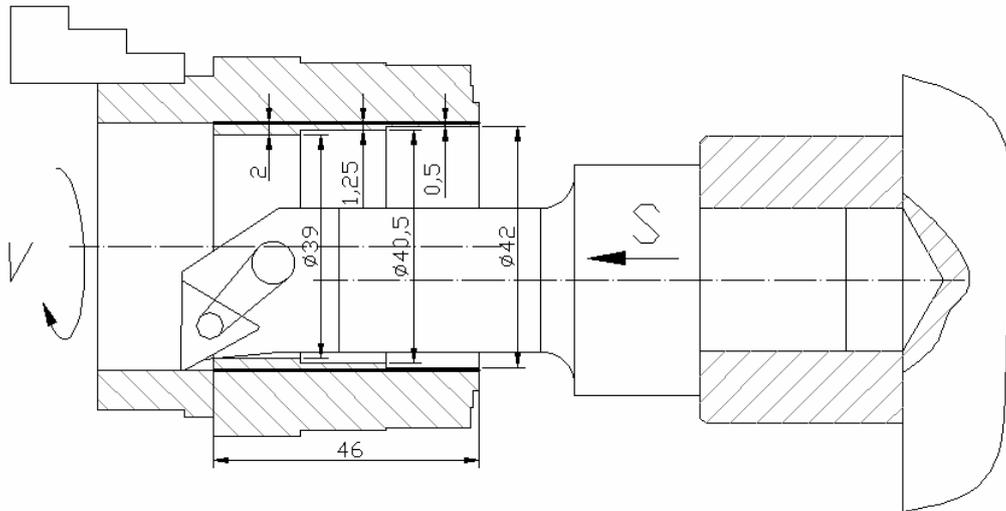


Рис. 7. Эскиз растачивания внутренней цилиндрической поверхности

Fig. 7. Sketch of boring the inner cylindrical surface

Коэффициенты регрессионной модели находятся по следующим математическим зависимостям:

$$C_{0H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \bar{\Delta}_H = \frac{0,015 + 0,01 + 0,011 + 0,006}{8} + \frac{0,013 + 0,007 + 0,01 + 0,004}{8} = 0,0095;$$

$$C_{1H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \Delta t_i \times \bar{\Delta}_H = \frac{0,015 - 0,01 + 0,011 - 0,006}{8} + \frac{0,013 - 0,007 + 0,01 - 0,004}{8} = 0,00275;$$

$$C_{2H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \Delta S_i \times \bar{\Delta}_H = \frac{0,015 + 0,01 - 0,011 - 0,006}{8} + \frac{0,013 + 0,007 - 0,01 - 0,004}{8} = 0,00175;$$

$$C_{3H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \Delta V_i \times \bar{\Delta}_H = \frac{0,015 + 0,01 + 0,011 + 0,006}{8} - \frac{0,013 + 0,007 + 0,01 + 0,004}{8} = 0,001.$$

В результате полученная регрессионная математическая формула по отклонению настроенного размера принимает следующий вид:

$$\Delta_H = 0,0095 + 0,00275\Delta t + 0,00175\Delta S + 0,001\Delta V. \quad (2)$$

Погрешность линейной регрессионной модели, найденная по разности расчетных $\Delta_{H, \text{расч}}$ и значений отклонений Δ_H , найденных по данным измерений, изменяется в диапазоне 5...7,14 %. Отклонение измеренных значений по второй ступени – менее ± 10 % от рассчитанного по регрессионной модели. Обращаем внимание, что в регрессионных моделях указаны кодированные значения факторов, а не фактические их значения.

Данные проверки линейности полученной регрессионной модели по промежуточной ступени внутренней цилиндрической поверхности изменяются в пределах от $-3,5$ до $2,5$ % (см. табл. 1). Следовательно, линейная модель приемлема для дальнейшего поиска значений параметров процесса обработки резанием.

Аналогичным образом получены регрессионные зависимости для отклонения профиля поперечного сечения и параметра шероховатости Ra:

$$\Delta_{n.c} = 0,015625 + 0,002625\Delta t + 0,002875\Delta S + 0,002875\Delta V; \quad (3)$$

$$Ra = 2,55625 + 0,00375\Delta t + 0,69375\Delta S - 0,01375\Delta V. \quad (4)$$

Полученные зависимости составляющих специальных характеристик расточного перехода от параметров процесса используются для

поиска их значений, обеспечивающих необходимый запас точности. В результате выполнения чистового перехода растачивания отверстия необходимо обеспечить диаметральный размер $\varnothing 46_{-0,12}$ (радиальный размер $23_{-0,06}$), шероховатость поверхности Ra – менее 6,3 мкм.

Значения коэффициентов запаса точности принимаются исходя из условий обеспечения стабильности показателей в течение настроечных и наладочных циклов.

Технологически сумма отклонений настроечного размера, формы поперечного сечения не должны превышать одной трети от поля допуска на диаметральные или радиальные размеры (см. рис. 4). Данные соотношения обеспечивают необходимый запас на проведение подналадок по диаметральному размеру. Приняты следующие коэффициенты запаса точности: $K_{зTr} = 0,3Tr$, $K_{зTн} = 0,1Tr$, $K_{зTп.м} = 0,1Tr$, $K_{зTRa} = 0,1Tr$.

Оставшаяся часть поля допуска необходима под неизбежное систематическое изменение

значений показателей вследствие износа режущей части инструмента и тепловых деформаций модулей станочной системы и оснастки. В зависимости от качества точности значения коэффициентов запаса точности могут изменяться. Поскольку для решение задачи выполняется в надстройке программного продукта Excel – Поиск решения, то значения параметров процесса находятся методом Ньютона решением системы уравнений (2)–(4) с одновременным выполнением условий $\Delta_n + \Delta_{п.с} + Ra \leq 0,018$ мм, $\Delta_n \leq 0,0066$ мм, $\Delta_{п.с} \leq 0,0066$ мм, $Ra \leq 0,0066$ мм. Для имеющегося на рабочем месте станка найденные значения – параметры процесса, обеспечивающие заданный запас точности в переходе чистового растачивания внутренней цилиндрической поверхности, приведены в таблице 3 (материал образца СЧ 30; твердость образцов 170 НВ; пластина – TNMG 160404-KR; радиус при вершине – 2 мм; главный угол в плане $\varphi - 90^\circ$; условия обработки – с подачей СОЖ).

Таблица 3. Значения параметров переходов растачивания отверстия в токарной операции для обеспечения заданного запаса точности по радиальному размеру внутренней цилиндрической поверхности

Table 3. Values of the parameters of hole boring transitions in the turning operation to ensure a given margin of accuracy

Параметры процесса	Чистовой переход растачивания			К з.т	Предельные значения Δ_n , $\Delta_{кр}$, Ra, мм	Условие выполнения неравенства
	<i>t</i>	<i>S</i>	<i>V</i>			
	мм	мм/об.	м/мин.			
	0,66	0,12	166,27			
Расчетная геометрическая точность						
Показатели точности процесса	Δ_n	0,0057		0,1Tr	0,0066	Выполняется
	$\Delta_{кр}$	0,0101		0,1Tr	0,0066	Выполняется
	Ra	0,0022		0,1Tr	0,0066	Выполняется
	Сумма	0,01799		0,3Tr	0,018	Выполняется
Параметры процесса	Черновой переход растачивания			К з.т.	Предельные значения, мм	Условие выполнения неравенства
	<i>t</i>	<i>S</i>	<i>V</i>			
	мм	мм/об	м/мин			
	2,00	0,20	250,00			
Расчетная геометрическая точность						
Показатели точности процесса	Δ_n	0,015		0,1Tr	0,02	Выполняется
	$\Delta_{кр}$	0,024		0,1Tr	0,02	Выполняется
	Ra	0,00324		0,1Tr	0,02	Выполняется
	Сумма	0,04224		0,3Tr	0,066	Выполняется

Таким образом, найдены рекомендуемые значения параметров резания: глубина резания – $0,5 \leq t \leq 0,66$ мм; величина подачи – $0,1 \leq S \leq 0,12$ мм/об; скорость резания – $150 \leq V \leq 166,27$ м/мин.

Для чернового перехода растачивания отверстия необходимо получить диаметральный размер $\varnothing 44_{-0,4}$ или радиальный размер $22_{-0,2}$; шероховатость поверхности Ra менее 12,5 мкм.

Коэффициенты запаса точности: $K_{зTr} = 0,3Tr$, $K_{зTн} = 0,1Tr$, $K_{зTп.м} = 0,1Tr$, $K_{зTRa} = 0,1Tr$. Значения параметров процесса также находятся решением системы уравнений (2)–(4) методом Ньютона, также исходя из условий обеспечения неравенств $\Delta_n + \Delta_{п.с} + Ra \leq 0,066$ мм, $\Delta_n \leq 0,02$ мм, $\Delta_{п.с} \leq 0,02$, $Ra \leq 0,02$ мм.

Черновые режимы обеспечивают запас точности во всем диапазоне варьирования значе-

ний показателей растачивания отверстия:
 $0,5 \leq t \leq 2,00$ мм; $0,1 \leq S \leq 0,20$ мм/об;
 $150 \leq V \leq 250,00$ м/мин и даже могут быть форсированы при условии применения более износостойкой режущей пластины или за счет снижения стойкости имеющейся.

Согласно требованиям ГОСТ Р 51814.4–2004 «Одобрение производства автомобильных компонентов» в результате процесса одобрения производства формируется следующий комплект документов:

- реестр специальных характеристик изделия;

- протокол D FMEA-анализа конструкции;
- протокол P- FMEA-анализа технологического процесса;
- планы управления;
- протоколы SPC-анализа;
- протоколы MSA-анализа.

Найденные регрессионные модели включаются в планы управления по специальным характеристикам в папке PPAР одобрения производства авкомпонентов и передаются потребителю. Пример записи в плане управления приведен в таблице 4.

Таблица 4. Пример плана управления токарной операцией по специальным характеристикам корпуса подшипника распределительного вала

Table 4. Sample Control Plan Turning Operation for Special Characteristics Camshaft Bearing Housing

№	Операция	Специальная характеристика	Средство измерения	Цена деления, мм	Частота выборки	План управления	План реагирования	Исходная регрессионная модель
1	Токарная	Диаметральный размер	Трехточечный нутромер	0,001	Каждая 10-я деталь	Внесение коррекции в программу ЧПУ	Остановить станок Сделать запись в журнале Дать заявку на ремонт	---
2	Токарная 005	Отклонение настроечного размера	Высотомер	0,001	Каждая 50-я деталь, после наладки	Внесение коррекции в программу ЧПУ	Остановить станок Сделать запись в журнале Дать заявку на ремонт	(2)
3	Токарная	Отклонение от круглости	Высотомер	0,001	Каждая 50-я деталь, после наладки	---	Остановить станок Сделать запись в журнале Дать заявку на ремонт	(3)
4	Токарная 005	Шероховатость	Профилограф	---	3 детали в смену	Уменьшение периода смены многогранной пластины	Остановить станок Сделать запись в журнале Дать заявку на ремонт	(4)

Приведенный в статье пример нахождения регрессионных моделей и значений показателей процесса обработки резанием не требует от инженерного персонала выполнения сложных математических расчетов и может быть выполнен даже в офисном программном продукте, например Microsoft Excel.

В серийном производстве на рабочих местах формирование специальных характеристик для рассматриваемого в статье примера модели должно обновляться не реже, чем один раз в три месяца. Обновление совмещается с процессами текущего обслуживания и ремонта оборудования.

Реализация предлагаемой методики в ходе проведения технологического аудита потреби-

телем на месте позволяет наряду с данными статистического анализа подтвердить соответствие оборудования для целей обеспечения стабильности изготовления специальных характеристик продукции. В процессе подготовки производства новых компонентов нахождение подобных регрессионных моделей необходимо выполнять для оценки приемлемости закупаемого оборудования.

Выводы

Применение методики в процессе APQP-процесса подготовки производства на примере корпуса подшипника распределительного вала двигателя внутреннего сгорания позволяет уменьшить риски потерь в процессе изготовления

установочных партий автокомпонентов и на ранних стадиях их серийного производства. Систематическое выполнение диагностических экспериментов наряду с применением статистических методов управления качеством в процессе серийного выпуска изделий является достаточно эффективным инструментом текущего мониторинга технического состояния металло-режущего оборудования для обеспечения стабильности специальных показателей качества автокомпонентов.

Библиографические ссылки

1. Развитие конструкции и технологии производства нового поколения дизельных двигателей КамАЗ Р6 / И. Ф. Гумеров, Д. Х. Валеев, А.С. Куликов, А. И. Карпов, Л. И. Фардеев, Р. Д. Гарипов, М. Д. Ханнанов // *Двигателестроение*. 2020. № 1 (279). С. 30–39.
2. Галиев Р. М., Нуретдинов Д. И., Назаров Ф. Л. Исследование надежности дизельных двигателей внутреннего сгорания грузового автомобиля // *Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация*. 2022. № 1 (90). С. 14–22.
3. Кулаков А. Т., Барыльникова Е. П., Фахруллин И. Р. Влияние износов в коренных и шатунных подшипниках на режимы смазки шатунных подшипников КамАЗ-740 // *Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация*. 2021. № 1 (87). С. 31–36.
4. Панюков Д. И., Коловский В. Н. Эффективное применение метода анализа видов, последствий и причин потенциальных дефектов (FMEA) в автомобилестроении : монография. Самара : Изд-во СамНЦ РАН, 2016. 202 с.
5. Антипов Д. В., Антипова О. И., Еськина Е. В. Экспресс-программа повышения производительности труда в производстве // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. № 11. С. 542–551.
6. Антипов Д. В., Клентак А. С. Разработка рабочих инструкций операторов для обеспечения производительности производственных процессов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2020. Т. 22, № 2 (94). С. 11–15.
7. Разработка и реализация процедуры решения производственных проблем / Б. В. Бойцов, В. Н. Козловский, Д. И. Благовещенский, Д. И. Панюков // *Качество и жизнь*. 2021. № 1 (29). С. 59–65.
8. Масягин В. Б., Мухомолов А. В. Методы автоматизации размерного анализа конструкций в России // *Современные проблемы теории машин*. 2016. № 4-2. С. 105–110.
9. Деканоидзе Э. М., Юдаков В. С. Сравнительный анализ вариантов решений размерных цепей традиционным методом и с помощью САПР / *Оригинальные исследования*. 2020. Т. 10, № 6. С. 253–259.
10. Крыжченко А. П., Беляев Г. Я. Размерный анализ технологического процесса обработки вала-шестерни по линейным размерам // *Машиностроение: республиканский межведомственный сборник научных трудов*. Минск : Белорусский технический университет, 2018. С. 67–74.
11. Хвощевская Л. Ф., Журавлев Д. А. Анализ точности изделий машиностроения для случая параллельно связанных линейных размерных цепей // *Системы. Методы. Технологии*. 2022. № 1 (53). С. 48–56.
12. Беляев Г. Я., Шкин Н. В., Крутев Р. И. Размерный анализ технологического процесса обработки фланца по эксцентриситетам // *Машиностроение: Республиканский межведомственный сборник научных трудов / Белорусский национальный технический университет*. Минск, 2018. С. 17–27.
13. Статистическое управление качеством продукции и сложных процессов / В. Н. Козловский, Г. Л. Юнак, Д. И. Благовещенский, А. Г. Сорокин // *Стандарты и качество*. 2021. № 10. С. 98–104.
14. Васильев В. А., Биктимирова Г. Ф. Процесс одобрения поставщиков автомобильных компонентов как элемент корпоративной системы менеджмента отечественного автопроизводителя // *Качество. Инновации. Образование*. 2017. № 8 (147). С. 17–22.
15. Валиева Е. Г., Касьянов С. В. Анализ информативности документации для управления качеством сложных поковок по требованиям IATF 16949 // *Автомобильная промышленность*. 2020. № 5. С. 4–6.
16. Алейников Д. П., Лукьянов А. В., Костин П. Н. Влияние параметров резания на вибрационное состояние станка и шероховатость обработанных поверхностей при мехобработке // *Системы. Методы. Технологии*. 2021. № 3 (51). С. 14–19.
17. Новоселов Ю. К., Богущий В. Б. Оценка степени влияния отдельных режимов резания на показатели процесса шлифования // *Вестник науки и образования северо-запада России*. 2019. Т. 5, № 3. С. 69–76.
18. Ингеманссон А. Р. Разработка математических моделей для технологической подготовки производства и адаптивного управления токарной и фрезерной обработкой в цифровых производственных системах // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22, № 1. С. 27–40.
19. Кане М. М., Шелег В. К., Кравчук М. А. Моделирование и оптимизация процесса зубофрезерования цилиндрических шестерен червячными фрезами // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2020. № 4 (53). С. 19–27.
20. Анализ взаимосвязей некоторых параметров качества поверхностей зубьев цилиндрических шестерен с режимами зубофрезерования / М. М. Кане, В. К. Шелег, М. А. Кравчук, П. И. Кот // *Актуальные вопросы машиноведения*. 2019. Т. 8. С. 251–255.
21. Гусев В. Г., Наумов Г. М., Харитонова Т. А. Многофакторное исследование профиля продольного сечения отверстий, обработанных на станке с ЧПУ // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2014. № 5 (307). С. 79–83.

References

1. Gumerov I.F., Valeev D.H., Kulikov A.S., Karpov A.I., Fardeev L.I., Garipov R.D., Khannanov M.D. [Development of the design and production technology of a new generation of KAMAZ R6 diesel engine parts]. *Dvigatelsestroenie*, 2020, no. 1 (279), pp. 30-39 (in Russ.).
2. Galiev R.M., Nuretdinov D.I., Nazarov F.L. [Reliability study of diesel internal combustion engines of a truck]. *Social'no-jekonomicheskie i tehnicheckie sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizacija*, 2022, no. 1 (90), pp. 14-22 (in Russ.).
3. Kulakov A.T., Baryl'nikova E.P., Fakhrullin I.R. [Influence of wear in core and connecting rod bearings on the lubrication modes of KAMAZ-740 connecting rod bearings]. *Social'no-jekonomicheskie i tehnicheckie sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizacija*, 2021, no. 1 (87), pp. 31-36 (in Russ.).
4. Panyukov D.I., Kolovsky V.N. *Jeffektivnoe primenenie metoda analiza vidov, posledstvij i prichin potencial'nyh defektov (FMEA) v avtomobilestroenii* [Effective application of the method of analysis of types, consequences and causes of potential defects (FMEA) in the automotive industry]. Samara, Publ. House of the Russian Academy of Sciences, 2016, 202 p. (in Russ.).
5. Antipov D.V., Antipova O.I., Eskina E.V. [Express-program for increasing labor productivity in production]. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheckie nauki*, 2021, no. 11n pp. 542-551 (in Russ.).
6. Antipov D.V., Klentak A.S. [Development of operators' working instructions for ensuring the productivity of production processes]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2020, vol. 22, no. 2 (94), pp. 11-15 (in Russ.).
7. Boitsov B.V., Kozlovskiy V.N., Blagoveshchenskiy D.I., Panyukov D.I. [Development and implementation of the procedure for solving production problems]. *Kachestvo i zhizn'*, no. 1 (29), pp. 59-65 (in Russ.).
8. Masyagin V.B., Mukholzoev A.V. [Methods of automation of dimensional analysis of structures in Russia]. *Sovremennye problemy teorii mashin*, 2016, no. 4-2, pp. 105-110 (in Russ.).
9. Dekanoidze E.M., Yudakov V.S. [Comparative analysis of solutions of dimensional circuits by the traditional method and using CAD]. *Original'nye issledovaniya*, 2020, vol. 10, no. 6, pp. 253-259 (in Russ.).
10. Kryzhchenko A.P., Belyaev G.Ya. [Dimensional analysis of the technological process of shaft-gear processing by linear dimensions]. *Mashinostroenie: respublikanskij mezhdovedstvennyj sbornik nauchnyh trudov*. Minsk, Belorusskij tehnicheckij universitet, 2018, pp. 67-74 (in Russ.).
11. Khvashchevskaya L.F., Zhuravlev D.A. [Precision analysis of mechanical engineering products for the case of parallel connected linear dimensional circuits]. *Sistemy. Metody. Tehnologii*, 2022, no. 1 (53), pp. 48-56 (in Russ.).
12. Belyaev G.Ya., Shkin N.V., Krutev R.I. [Dimensional analysis of the technological process of flange processing by eccentricities]. *Mashinostroenie: respublikanskij mezhdovedstvennyj sbornik nauchnyh trudov*. Belorusskij nacional'nyj tehnicheckij universitet. Minsk, 2018, pp. 17-27 (in Russ.).
13. Kozlovskiy V.N., Yunak G.L., Blagoveshchenskiy D.I., Sorokin A.G. [Statistical quality management of products and complex processes]. *Standarty i kachestvo*, 2021, no. 10, pp. 98-104 (in Russ.).
14. Vasiliev V.A., Biktimirova G.F. [The process of approving suppliers of automotive components as an element of the corporate management system of a domestic automaker]. *Kachestvo. Innovacii. Obrazovanie*, 2017, no. 8 (147), pp. 17-22 (in Russ.).
15. Valieva E.G., Kasyanov S.V. [Analysis of the information content of documentation for quality management of complex forgings according to the requirements of IATF 16949]. *Avtomobil'naja promyshlennost'*, 2020, no. 5, pp. 4-6 (in Russ.).
16. Aleynikov D.P., Lukyanov A.V., Kostin P.N. [The influence of cutting parameters on the vibration state of the machine and the roughness of the treated surfaces during machining]. *Sistemy. Metody. Tehnologii*, 2021, no. 3 (51), pp. 14-19 (in Russ.).
17. Novoselov Yu.K., Bogutskiy V.B. [Assessment of the degree of influence of individual cutting modes on the indicators of the grinding process]. *Vestnik nauki i obrazovaniya severo-zapada Rossii*, 2019, vol. 5, no. 3, pp. 69-76 (in Russ.).
18. Ingemansson A.R. [Development of mathematical models for technological preparation of production and adaptive control of turning and milling processing in digital production systems]. *Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty)*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 27-40 (in Russ.).
19. Kane M.M., Sheleg V.K., Kravchuk M.A. [Modeling and optimization of the gear milling process of cylindrical gears with worm cutters]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov*, 2020, no. 4 (53), pp. 19-27 (in Russ.).
20. Kane M.M., Sheleg V.K., Kravchuk M.A., Kot P.I. [Analysis of interrelations of some quality parameters of surfaces of teeth of cylindrical gears with gear milling modes]. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya*, 2019, vol. 8, pp. 251-255 (in Russ.).
21. Gusev V.G., Naumov G.M., Kharitonova T.A. [Multifactorial study of the profile of the longitudinal section of holes processed on a CNC machine]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii*, 2014, no. 5 (307), pp. 79-83 (in Russ.).

Determination of Cutting Transition Parameters in the APQP Pre-production Process of the Engine Camshaft Bearing Housing

L.R. Safarova, Post-graduate, Kazan Federal University - Naberezhnye Chelny Institute, Naberezhnye Chelny, Russia
S.V. Kasyanov, PhD in Engineering, Kazan Federal University - Naberezhnye Chelny Institute, Naberezhnye Chelny, Russia

D.T. Safarov, PhD in Engineering, Kazan Federal University - Naberezhnye Chelny Institute, Naberezhnye Chelny, Russia

An example of the application of the experimental planning method in the APQP pre-production process to find the values of the cutting process parameters that provide a given margin of accuracy is considered on the example of roughing and finishing boring of the inner hole of the camshaft bearing housing.

From the total set of geometric parameters, special characteristics are highlighted – the size of the inner hole, which ensures the fit tolerance of the steel-fiber sleeve and the height parameter of roughness Ra, as well as radial runout. The objectives and results of the application of engineering methods (calculation of allowances, dimensional analysis, evaluation of technological accuracy of machine systems, planning experiments) as well as special methods of APQP process (quality management tools - FMEA analysis, SPS, MSA) are considered. Attention is drawn to the insufficient information content of the methods, which does not allow for the selection of process indicators to ensure the necessary margin of accuracy of special characteristics. In order to achieve a given margin of accuracy, technological components of the internal diametrical size are identified – the deviation of the tuning size, the deviation of the cross-section profile and the height roughness parameter Ra, the values of which are found as a result of production experiments.

The planning of a full-factor experiment is carried out according to the parameters of the cutting process - cutting speed, feed and cutting depth. To implement the plan, special samples of products with a stepped allowance were designed and manufactured. The shape of the product samples makes it possible to reduce the number of samples for a full-factor experiment from eight to four, providing a check of the linearity of regression models. The calculation and regression models are given, which allow predicting the values of the components of the internal diametrical size at the design stage of the manufacturing operations of parts. The solution of the regression model system that satisfies the specified limitations for a given margin of accuracy allows you to find the optimal range of values of the parameters of the cutting process, to provide rare settings of special characteristics in the serial manufacturing process of camshaft bearing housings.

Systematic application of the methodology, along with statistical methods of quality management, allows monitoring the technical condition of equipment and maintaining it in the condition required for the production of quality products.

Systematic application of the methodology, along with statistical methods of quality management, allows monitoring the technical condition of equipment and maintaining it in the condition required for the production of quality products.

Keywords: APQP process, parameters of cutting modes, special characteristics of machine parts, accuracy margin.

Получено 20.06.2022

Образец цитирования

Сафарова Л. Р., Касьянов С. В., Сафаров Д. Т. Определение параметров переходов обработки резанием в APQP-процессе подготовки производства на примере корпуса подшипника распределительного вала двигателя внутреннего сгорания // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 3. С. 4–15. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-4-15.

For Citation

Safarova L.R., Kasyanov S.V., Safarov D.T. Determination of Cutting Transition Parameters in the APQP Pre-production Process of the Engine Camshaft Bearing Housing. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 4-15 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-4-15.