

тела и обработка металлов давлением. Тула: ТулГУ, вып.2, 2005, с.50-56.

### **Формирование технологического процесса изготовления колец подшипников**

к.т.н., проф. Колтунов И.И.  
МГТУ «МАМ»

*Описана методика оптимизации технологического процесса изготовления колец подшипников. Разработана математическая модель, позволяющая на этапе проектирования технологического процесса выявить оптимальные сочетания основных параметров изделия, технологических и эксплуатационных факторов.*

Актуальной задачей современного машиностроения является создание и проектирование машин нового целевого назначения, позволяющих повысить точность обработки при выполнении заданных требований по производительности и затратам на производство. Машиностроительные детали с внутренними криволинейными поверхностями используются в таких областях промышленности, как авиационная, энергетическая, автомобильная, металлургическая, станкостроительная, легкая и пищевая. Криволинейной поверхностью выполнены наиболее ответственные элементы механизмов и сложных деталей, которые определяют ее служебное назначение и ресурс работы [1, 2]. Это характерно для таких важных деталей и узлов машиностроения, как подшипники качения.

Проектирование подшипника качения подразумевает проведение большого количества инженерных расчетов по определению его эксплуатационных показателей, таких как статическая и динамическая грузоподъемность, быстроходность и так далее, зависящих в основном от формы контакта дорожек качения колец и роликов (шариков) [3, 4]. Но даже когда основные параметры и показатели будут рассчитаны, нельзя гарантировать их обеспечение, пока не будет разработан технологический процесс изготовления основных элементов подшипника. По конструкции подшипник качения представляет собой сложную механическую систему, состоящую из наружного и внутреннего колец, сепаратора, тел качения, уплотнения и других элементов. От точности и качества изготовления каждого из элементов конструкции зависит точность и качество подшипника в целом. Ниже на примере наружного кольца подшипника описана методология оптимизации технологического процесса его изготовления.

В общем случае последовательность формирования технологического процесса изготовления наружного кольца подшипника может быть представлена в виде объединения четырех этапов – заготовительного, механической и абразивной обработки, отделочного [5]. Кольца подшипников качения являются наиболее металлоемкими и трудоемкими деталями в подшипниковом производстве. Затраты на металл составляют в среднем более 35% от суммы затрат на изготовление колец. Поэтому усовершенствование методов и технологий изготовления заготовок колец подшипников направлено на мероприятия по экономии металла за счет повышения качества заготовок и снижения за счет этого себестоимости производства колец. Эксплуатационные требования, предъявляемые к подшипникам качения, определяют выбор исходного металла для их изготовления. Кольца подшипников должны обладать высоким сопротивлением пластическим деформациям в условиях контактных напряжений, высокой контактной выносливостью и износостойкостью. Этим требованиям удовлетворяют хромистые стали марок ШХ15 и ШХ15СГ, цементируемые легированные стали марок 18ХГТ, 15НМ, 20Х2НЧА, 203ХФ, среднеуглеродистые стали ШХ10, 65Г, 55СМА, 50ХН, нержавеющие стали марок Х18, 0Х18Н9 и 1Х18Н9Т, а также теплоустойчивые стали и сплавы ЭИ161, ЭИ347, ЭИ944, ЭИ94Е и др.

В зависимости от методов изготовления и габаритных размеров колец применяют металл в виде холоднотянутых и горячекатаных отожженных прутков круглого сечения, горячекатаного неотожженного проката круглого и квадратного сечений, отожженного полосового проката, а также холоднокатаных и горячекатаных обточенных труб. При изготовлении

кольцевых заготовок, независимо от применяемой технологии и конструктивных особенностей колец, технические условия на приемку заготовок предусматривают и регламентируют допускаемые отклонения на следующие геометрические параметры:

- овальность, или некруглость, определяемую как разность наибольшего и наименьшего диаметров наружных или внутренних колец, измеренных в одной плоскости (эти отклонения должны находиться в пределах допуска на соответствующие размеры);
- разностенность, определяемую разностью между наибольшей и наименьшей толщинами стенки заготовки (отклонения по этому параметру регламентируются в пределах 15-30% от минимального припуска на токарную обработку);
- непараллельность торцов, представляющую разность между наибольшей и наименьшей высотами заготовки, которая должна находиться в пределах допуска на высоту заготовки;
- конусность – разность величин диаметров по концам одного меридионального сечения, которая не должна превышать допуска на соответствующие размеры.

Одним из показателей, определяющим рациональное использование металла при изготовлении деталей подшипников, является коэффициент использования металла, представляющий отношение чистого веса  $Q_0$  детали к нормированному весу  $Q_n$  металла, расходуемого на ее изготовление:

$$K_u = \frac{Q_0}{Q_n} \rightarrow \max \quad (1)$$

Чем ближе форма и размеры заготовок к окончательно обработанным деталям и чем меньше непроизводительные расходы металла при изготовлении самих заготовок, тем выше коэффициент использования металла. При прочих равных условиях коэффициент использования металла тем выше, чем меньше отношение обрабатываемой резанием поверхности кольца к ее объему или весу. Таким образом, главным направлением дальнейшего усовершенствования технологии производства заготовок колец является максимальное приближение их формы и размеров к форме и размерам готовых колец.

С точки зрения сравнительной оценки вариантов заготовок для изготовления какого-либо определенного кольца, наилучшим при прочих равных условиях будет вариант, обеспечивающий минимальное значение нормированного веса  $Q_n$  металла, расходуемого на его изготовление:

$$Q_n \rightarrow \min \quad (2)$$

При сравнении вариантов заготовок, изготавливаемых из материала одной марки с учетом (2) следует, что наилучшим при прочих равных условиях будет вариант, обеспечивающий минимальное значение геометрического объема заготовки кольца:

$$V_i \rightarrow \min \quad (3)$$

Срок службы подшипников качения зависит от макроструктуры металла в зоне контакта [6, 7]. Важными технологическими факторами, оказывающими существенное влияние на долговечность, являются плотность  $\rho$  и чистота  $K_c$  подшипниковой стали, а также ориентировка макроволокон металла на дорожках качения колец  $\lambda$ . Наибольшей долговечностью обладают подшипники, на рабочих поверхностях которых сохраняются поверхностные слои металла с продольными волокнами исходного проката. Торцовый выход волокон металла на поверхность дорожек качения из внутренних, лежащих ближе к центру слоев исходного проката, резко снижает долговечность подшипников. Профильная раскатка повышает долговечность, однако при торцовом выходе волокон на рабочую поверхность эффективность раскатки резко снижается, так как при относительно небольших степенях обжатия, которые обычно не превышают 30-40%, ориентировка волокон на заготовке остается почти неизменной. С этой точки зрения метод штамповки кольцевых поковок на ГКМ не соответствует требованиям обеспечения повышенной эксплуатационной надежности и долговечности колец, поскольку этому методу присуща макроструктура, для которой характерен выход на некоторую

часть боковой поверхности (как наружной, так и внутренней) наиболее загрязненных внутренних слоев исходного пруткового металла, причем волокна макроструктуры частично ориентированы так, что торцы их выходят на поверхность под углами, близкими к  $90^\circ$ . Технологические процессы изготовления кольцевых поковок, использующие метод отрезки штучных заготовок, их осадки и последующей формовки лишены этих недостатков, поэтому с точки зрения формирования оптимальной макроструктуры материала являются более предпочтительными. Таким образом, с точки зрения получения заготовки, наилучшим будет являться метод, обеспечивающий:

$$\begin{cases} \rho \rightarrow \max \\ K_q \rightarrow \max \\ \lambda \rightarrow \min \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $0^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$ .

При выборе варианта технологического маршрута обработки следует исходить из того, что основным методом механической обработки колец, следующим за заготовительными операциями, является точение из прутка, трубы или штучной заготовки. Монтажные и рабочие поверхности колец обрабатываются с припусками под шлифование, поэтому размерная и геометрическая точность, а также чистота обработанных поверхностей лишь косвенно влияют на долговечность и качество готовых изделий. Вследствие того, что кольца подвергаются термической обработке, шлифованию и финишным операциям по рабочим поверхностям, изменения свойств поверхностного слоя, обусловленные влиянием режущего инструмента и режимов резания, практически не сказываются на износостойкости этих поверхностей. Ряд поверхностей колец (фаски, галтели, канавки) после их токарной обработки в дальнейшем не обрабатываются. Следовательно, их размерная точность и чистота поверхности непосредственно влияют на качество изделий, а именно на прочность опорных бортов колец роликоподшипников, на надежность крепления защитных шайб и на товарный вид подшипника. Кроме того, неправильно выполненные монтажные фаски в части отсутствия плавности перехода их к монтажным поверхностям приводят к нежелательным явлениям при монтаже подшипников, заеданиям, нарушению посадки и точности положения подшипника в узле.

В общем случае переменную составляющую технологической себестоимости операции металлообработки следует определять по выражению:

$$C_i = t_i \cdot K_i \rightarrow \min \quad (5)$$

Здесь  $t_i$  - время на операцию металлообработки;  $K_i$  - норматив затрат на электроэнергию, заработную плату, станочное оборудование и приспособления, режущий и вспомогательный инструмент, приходящиеся на выполнение операции.

С учетом (5) переменную составляющую технологического маршрута обработки поверхности следует определять по выражению:

$$C_{II} = \sum_{i=1}^{n_{III}} t_i K_i \rightarrow \min \quad (6)$$

Здесь  $n_{III}$  - количество операций технологического процесса механической обработки внутренней криволинейной поверхности.

Из (5) и (6) следует, что наилучшим при прочих равных условиях будет считать вариант технологического маршрута, обеспечивающий минимальные значения  $C_i$  и  $C_{II}$ .

При выборе варианта технологического маршрута абразивной обработки элементов кольца следует учитывать, что наибольшее влияние на качество окончательно обработанных колец оказывают погрешности их геометрической формы: некруглость, овальность, гранность, конусность, а также погрешности взаимного расположения поверхностей — непараллельность торцов, неперпендикулярность торцов к образующей и разностенность. Эти по-

грешности являются следствием разноразмерности припусков на шлифование, что, помимо соответствующего снижения производительности на этой операции, вызывает местные ожоги, которые могут явиться очагами образования микротрещин и других дефектов на обработанной поверхности. Аналогично влияет на возникновение ожогов и производительность шлифования разноразмерность колец, определяемая допуском на размеры полуфабрикатов. Погрешности формы и взаимного расположения поверхностей кольца перед шлифованием в определенной степени копируются на последующих операциях, что снижает точность готового изделия и, соответственно, влияет на долговечность подшипника в целом [8, 9].

Производительность шлифования есть произведение скорости перемещения  $V_{\Pi}$  и площади контакта  $S_k$  инструмента и обрабатываемой детали:

$$P = V_{\Pi} \cdot S_k \rightarrow \max \quad (7)$$

При прочих равных условиях максимальная производительность операции шлифования возможна при обеспечении максимальной силы резания, поскольку величина  $S_k$  экспоненциально зависит от  $P_z$ , и максимальной  $V_{\Pi}$ . Максимальное значение  $P_z$  определяется допустимым усилием, развиваемым приводом инструмента, прочностью инструмента и допустимыми упругими деформациями. Максимальное значение скорости перемещения определяется допустимой глубиной прижогов и чистотой поверхности. Кроме того, область значений  $P_z$  и  $V_{\Pi}$  ограничена допустимым значением мощности, затрачиваемой на относительное перемещение обрабатываемой детали или инструмента.

Этап отделочной обработки элементов кольца обеспечивает окончательное формирование параметров качества и точности. После выбора варианта маршрута предстоит синтезирование множества вариантов (способов обработки) для каждого отдельного этапа технологического маршрута  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$ , например: расточка – предварительное шлифование желоба – чистовое шлифование желоба – окончательное шлифование желоба – предварительная доводка желоба – окончательная доводка желоба и так далее; комплектование вариантов на отдельных этапах обработки в единый технологический комплекс:

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} & x_{31} & x_{32} & \dots & x_{3n} & x_{41} & x_{42} & \dots & x_{4n} \end{matrix} \\ \begin{matrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \\ \dots \\ M_n \end{matrix} & \begin{matrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{matrix} \end{matrix} \quad (8)$$

где:  $l_1 = \{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}\}$ ,  $l_2 = \{x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n}\}$ ,  $l_3 = \{x_{31}, x_{32}, \dots, x_{3n}\}$ ,  $l_4 = \{x_{41}, x_{42}, \dots, x_{4n}\}$  – этапы формирования технологического процесса изготовления наружного кольца подшипника.

После синтезирования множества вариантов необходимо произвести исключение некоторых отдельных комбинаций этапов по причине технической или технологической несовместимости; детализацию оставшихся вариантов внутри каждого перехода относительно каждого способа его осуществления (например, внутреннее шлифование, центровое или бесцентровое и так далее), используемых станков, способа закрепления заготовок (одноместные или многоместные приспособления, базирование без приспособления и так далее), инструмента и видов движений; окончательный выбор технологического процесса на основе сравнения вариантов по какому-либо критерию эффективности.

Эффективность варианта технологического процесса изготовления кольца подшипника может быть оценена через себестоимость получения отдельного размера (составляющего звена размерной цепи кольца), характеризуемую допуском на этот размер и функцией дос-

тижения требуемой точности замыкающего звена в зависимости от допусков составляющих звеньев с учетом их суммарной погрешности. Углубленный анализ составляющих себестоимости получения размера показал, что достижение необходимого допуска на размер составляющего звена размерной цепи оказывает влияние на число операций (переходов) механической и абразивной обработки отдельной поверхности, число операций термообработки, метод получения заготовки, нормы основного времени и времени размерной настройки, разряд рабочего, выбор режущего и абразивного инструмента, выбор технологического оборудования, оснастки и другие параметры.

Технологическую себестоимость получения размера  $i$ -го составляющего звена размерной цепи следует рассматривать в виде суммы технологических себестоимостей получения поверхностей, образующих этот размер. Такой подход дает возможность рассчитывать допуски как линейных, так и угловых размерных цепей, что очень важно при решении прямой проектной задачи размерного анализа проектируемой конструкции кольца. Выражение для оценки переменной составляющей технологической себестоимости получения отдельного размера в зависимости от требуемой точности замыкающего звена размерной цепи кольца имеет следующий вид:

$$C_P = \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=1}^2 C_{Pi} \rightarrow \min \quad (9)$$

Здесь  $N$  – количество звеньев рассматриваемой размерной цепи; 2 – количество поверхностей, определяющих  $i$ -е составляющее звено размерной цепи.

Оптимальным, согласно (1) – (9), будет вариант технологического процесса, обеспечивающий минимальные значения критериев по (2)-(4.1), (5), (6), (9) и максимальные значения критериев по (1), (4.2), (4.3), (7).

На основании изложенного сформирована оптимизационная модель проектирования технологического процесса изготовления наружного кольца подшипника качения, состоящая из системы целевых функций и системы критериальных ограничений:

$$\begin{array}{ll} K_u \rightarrow \max & K_{u\min} \leq K_u \leq K_{u\max} \\ Q_n \rightarrow \min & Q_{n\min} \leq Q_n \leq Q_{n\max} \\ V_i \rightarrow \min & V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \\ \lambda \rightarrow \min & \lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max} \\ K_q \rightarrow \max & K_{q\min} \leq K_q \leq K_{q\max} \\ \rho \rightarrow \max & \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max} \\ C_i \rightarrow \min & C_{i\min} \leq C_i \leq C_{i\max} \\ C_{II} \rightarrow \min & C_{II\min} \leq C_{II} \leq C_{II\max} \\ II \rightarrow \max & II_{\min} \leq II \leq II_{\max} \\ C_P \rightarrow \min & C_{P\min} \leq C_P \leq C_{P\max} \end{array} \quad (10)$$

### Выводы

Разработанная модель является универсальной и позволяет на этапе проектирования выявить оптимальные с точки зрения принятого критерия сочетания основных параметров кольца с учетом всего многообразия технологических и эксплуатационных факторов.

### Литература

1. Дружинский И.А. Сложные поверхности: Математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985.- 263 с.
2. Кальченко В.И. Шлифование криволинейных поверхностей крупногабаритных деталей. М.: Машиностроение, 1979. –162с.
3. Спришевский А.И. Подшипники качения. – М.: Машиностроение, 1968. – 632 с.
4. Подшипниковые узлы современных машин и приборов: Энциклопедический справочник /

- В.Б.Носов, И.М. Карпухин, Н.Н. Федотов и др.; Под общ. ред. В.Б.Носова.- М.: Машиностроение, 1997. – 640 с.
5. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1969.- 559 с.
6. Колотенков И.В. К вопросу о влиянии макроструктуры металла на долговечность подшипников качения. – М.: ВНИПП, №3, 1962.
7. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. –319с.
8. Альперович Т.А. Теория копирования погрешностей базовой поверхности при внутреннем бесцентровом шлифовании // Станки и инструмент. 1966. №5. с.7-10.
9. Рахчеев В.Г. Шлифование сложнопрофильных поверхностей прецизионных деталей // Автоматизация и современные технологии. 2000. №12. – с.4-13.

### **Повышение эффективности выглаживания и комбинированной обработки за счет изменения способа установки инструмента**

д.т.н., проф. Кузнецов В.А., Шестакин П.В.  
МГТУ «МАМИ»

*В статье рассмотрены инструменты с несколькими обрабатываемыми поверхностями, используемыми для различных видов механической обработки, на примере резцов для комбинированной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием. А именно резца с круглой пластиной, задняя поверхность которой выполнена в виде тора; резца, снабженного многогранной пластиной, с приподнятой относительно оси детали вершиной; резца с приподнятой вершиной, который может быть повернут вокруг трех координатных осей. Кроме того, рассмотрено устройство для выполнения комбинированной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием. Также в статье приводятся оптимальные способы установки обрабатываемого элемента при обработке закаленной и незакаленной стали, и указывается возможность осуществления фазовых превращений в поверхностном слое детали при высокотемпературном, скоростном протекании процесса выглаживания. Сделан вывод о том, что исследование влияния различных схем установки инструмента на параметры качества при проведении процесса выглаживания является перспективным направлением совершенствования производственного процесса.*

Создание инструментов с несколькими обрабатываемыми поверхностями, которые можно использовать для различных видов механической обработки, - одно из перспективных направлений совершенствования производства. Такой инструмент позволяет, во-первых, один и тот же инструмент использовать для выполнения нескольких разнотипных операций, во-вторых, в ряде случаев, отказаться от использования специального инструмента, в-третьих, увеличить производительность за счет сокращения технологических переходов или времени на переналадку станка.

Примером использования инструмента с несколькими обрабатываемыми поверхностями может служить резец для комбинированной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием (А.с. 1237399, СССР). Резец (рис. 1 а) состоит из державки 1, в которой на оси 2 закреплена круглая режущая пластина 3. Задняя поверхность пластины выполнена в виде тора, причем касательная, проведенная через вершину тора, расположена под углом к нижнему основанию пластины. Этот угол равен  $90^\circ - \alpha$ , где  $\alpha$  - задний угол режущей пластины, за который принят угол наклона хорды, соединяющей две крайние точки дуги окружности, образующей торовую заднюю поверхность резца.

Для осуществления процесса резания инструмент устанавливается на станке так же, как и обычный токарный резец (рис. 1 б; поз. I). Для выполнения поверхностного пластического деформирования инструмент поворачивают на  $90^\circ$  вокруг его продольной оси и наклоняют по отношению к направлению поперечной подачи на угол  $\alpha$ , за счет чего в контакт с деталью вводится центр дуги окружности, образующей заднюю поверхность резца (рис. 1 б; поз. II,