

Рубрику ведет доцент кафедры «Ремонт машин» Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. П. Василенка Сыромятников Петр Степанович.

ВОССТАНАВЛИВАЕМ ДВИГАТЕЛЬ БАЛАНСИРОВКА КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА

При ремонте двигателя нередко возникает необходимость балансировки коленчатого вала и сопряженных с ним деталей - маховика и муфты сцепления. Практика показывает, что это может быть связано либо с большой предварительной деформацией вала перед шлифованием, либо с некачественно проведенным ремонтом, вследствие чего посадочные поверхности для маховиков получают значительные биения относительно коренных шеек. Коленчатый вал обладает достаточно большой массой (несколько десятков кг.) и имеет высокую рабочую частоту вращения, поэтому он тщательно балансируется на заводе-изготовителе. **Если при ремонте вала устраняется деформация (например, правкой) и не допускается грубых ошибок (например, несоосности коренных шеек с базовыми поверхностями), то вал в целом сохраняет уравновешенность.** Напротив, шлифование деформированного вала или недостаточная квалификация шлифовщика требует последующей балансировки коленчатого вала и, возможно, маховика и муфты сцепления. В некоторых случаях необходимость балансировки коленчатого вала и присоединенных к нему деталей возникает из-за нарушения технологии разборки и сборки двигателя, а также из-за неправильной комплектации двигателя новыми запасными частями. Речь идет о двигателях, у которых коленчатый вал сбалансирован в сборе с маховиком и муфтой. Нарушение порядка установки деталей (например, их взаимное угловое смещение), а также замена одной детали из сбалансированного в сборе комплекта на другую может вызвать повышенную вибрацию двигателя.

Это существенно увеличивает шум, нагрузки на подшипники коленчатого вала и опоры двигателя, что сокращает срок службы вала, подшипников и других деталей, а также способствует быстрой утомляемости водителя (не говоря уже вообще о создании некомфортных условий в салоне автомобиля). **Таким образом, применительно к ремонту двигателя балансировка позволяет при произвольном упорении или нарушении ремонтных технологий снизить вибрацию и нагрузки, с ней связанные, до уровня нового двигателя.** Неуравновешенный вал при вращении соз-

дает динамические нагрузки на опоры (подшипники), которые увеличиваются с ростом частоты вращения. **На практике наиболее часто встречаются статическая и динамическая неуравновешенность коленчатого вала и присоединенных к нему деталей.** *Статическая неуравновешенность характеризуется тем, что главная центральная ось инерции вала (ось, при вращении вокруг которой на опорах вала не возникает динамических нагрузок) и ось вращения вала параллельны и расположены на расстоянии друг от друга.* В соответствии с этим задачей балансировки является определение величины и направления (угла) дисбаланса и уменьшение дисбаланса корректировкой масс в одной плоскости. Такая балансировка называется статической и может быть проведена без вращения детали (см. ниже).

Статическая неуравновешенность характерна для дискообразных деталей, таких как вентилятор, муфта сцепления, маховик, шкив и других аналогичных деталей, у которых осевая длина значительно меньше диаметра. Эти детали чаще всего сбалансированы отдельно на заводе-изготовителе. При ремонте двигателя они вносят дополнительную неуравновешенность обычно в случае некачественного ремонта (шлифования) коленчатого вала, когда посадочные поверхности на валу получают биения относительно новой оси вращения. Тогда главная центральная ось инерции присоединенных деталей уже не будет совпадать с их новой осью вращения. Характерно, что в подобных случаях устранить неуравновешенность, возникающую от этих деталей, можно только их совместной балансировкой с валом. После этого как вал, так и присоединенные детали становятся невзаимозаменяемыми. Для коленчатых валов, имеющих достаточно большую длину и сравнительно небольшой диаметр, характерна динамическая неуравновешенность, при которой главная центральная ось инерции и ось вращения перекрещиваются или пересекаются. **При вращении такого вала на его опоры действуют неравные силы - в общем случае не только по величине, но и по направлению.** В результате этого, помимо неуравновешенной результирующей силы, как в случае статической неуравновешенности, возникает и неуравновешенный момент. *В соответствии с этим задачей балансировки таких валов будет определение величин и углов дисбалансов по крайней мере в двух плоскостях коррекции (обычно у крайних опор) и уменьшение величин дисбалансов корректировкой масс.* Такая балансировка называется динамической и выполняется с вращением вала.

Очевидно, что при **динамической балансировке** автоматически выполняется и статическая - динамически отбалансирован-

ный вал всегда оказывается отбалансированным и статически. Для высокооборотных двигателей коленчатые валы обычно балансируются на заводе-изготовителе с весьма высокой точностью. Для маховиков, шкивов, муфт сцепления, деталей крутильных колебаний остаточный дисбаланс должен быть по крайней мере в 2...3 раза меньше. Ориентируясь на эти значения дисбалансов, нетрудно определить допустимые деформации валов, а также ошибки при их шлифовании.

Если при шлифовании биения посадочных поверхностей на валу оказываются больше, то это свидетельствует о недопустимо низком качестве ремонта вала и необходимости дополнительной балансировки вала в сборе с маховиком. Как указывалось, у коленчатого вала из-за перегрева и разрушения шатунных подшипников нередко возникает достаточно равномерная деформация, по форме близкая к параболе, причем в середине вала деформация максимальна. Тогда при шлифовании вала с серьезными повреждениями шеек оси шатунных шеек приходится смещать на разные радиусы. Иногда не слишком опытный шлифовщик допускает подобную ошибку, особенно если вал перед шлифованием имеет ощутимую деформацию. Например, радиусы противоположных шатунных шеек нередко различаются на 0,2 мм. Если масса нижних головок шатунов составляет порядка 200 г, то нетрудно посчитать, что вал в сборе с шатунами будет иметь дополнительный дисбаланс порядка 8 гсм. Это может составлять 20...40% от дисбаланса самого коленчатого вала в сборе с маховиком и муфтой. Устранить этот вид дисбаланса, возникающий только из-за некачественного ремонта шатунных шеек, можно балансировкой вала в сборе со специальными технологическими втулками на шатунных шейках, имитирующими массу нижних головок шатунов (см. ниже). Таким образом, чем ниже качество ремонта вала, тем сложнее и дороже будут работы по его балансировке. И, наоборот, при высоком качестве ремонта балансировка, как правило, не требуется. Наиболее проста и доступна статическая балансировка валов и присоединенных к ним деталей, поскольку для этого не требуется дорогостоящее оборудование. В практике ремонта двигателей получили распространение так называемые параллельные стенды, представляющие собой закрепленные горизонтально на специальном основании две параллельные направляющие. Чаще всего направляющие выполняются в виде плоских «ножей», другие конструкции призматического и круглого сечения встречаются реже. Рабочая часть направляющих для уменьшения коэффициента трения должна быть закалена до > HRC 50 и отшлифована. Ширина рабочей поверхности направляющих для балансировки деталей двигателей легковых автомобилей долж-

на составлять 1...3 мм, причем края поверхности должны быть закруглены (в противном случае могут повреждаться поверхности деталей, опирающиеся на направляющие). Чем тяжелее деталь, тем больше должна быть ширина рабочей поверхности. Конструкция приспособления должна обеспечивать регулировку (выверку) положения направляющих точно «в горизонт», иначе балансировка окажется достаточно грубой из-за «скатывания» балансируемой детали. Кроме того, должна быть предусмотрена возможность изменения расстояния между направляющими в достаточно широких пределах.

Погрешности статической балансировки связаны с силами трения качения детали по направляющим. Если вращающий момент от силы тяжести больше момента сил трения, то деталь будет поворачиваться. Тогда погрешность (или чувствительность станда) будет равна $AD = m \cdot r_f$, где m - масса детали; r - радиус опорной шейки; f - коэффициент трения, зависящий от материала и состояния поверхностей ($f = 0,001$). При массе вала 10 кг и радиусе шеек $r = 25$ мм погрешность статической балансировки составит порядка 25 г·см. Следовательно, статическая балансировка на параллельных стандах является довольно грубым способом уравновешивания деталей. Она может применяться в тех случаях, когда другие, более точные способы, недоступны. Существуют и другие приспособления для статической балансировки деталей, например, дисковые и роликовые, которые имеют несомненные преимущества перед параллельным стандом, одно из которых - отсутствие необходимости в строгой выверке. Наиболее точные балансировочные весы в практике ремонта из-за сложности их изготовления и высокой стоимости не получили широкого распространения. Рассмотрим, как на параллельном станде может быть отбалансирован статически коленчатый вал, а также маховики и муфты сцепления, установленные на коленчатом валу.

Статическая балансировка коленчатого вала может применяться только в случаях, когда деформация вала перед шлифованием имела «плавающий» характер с максимумом в середине вала, а возможности проведения динамической балансировки отсутствуют. Как уже указывалось выше, маховики и муфты, балансируемые отдельно на заводах-изготовителях, требуют балансировки на коленчатом валу только в случае, если при шлифовании коренных шеек была смещена их ось вращения. Для балансировки деталей необходимо сначала отбалансировать коленчатый вал, после чего, установив детали на вал поочередно (сначала маховик, затем муфту), провести их балансировку. Предварительно необходимо сде-

лать метки на валу и деталях, т.к. менять их взаимное угловое положение после балансировки нельзя. Статическая балансировка может быть использована и тогда, когда требуется замена, например, маховика, отбалансированного на заводе-изготовителе в сборе с коленчатым валом, а также в случаях, когда из-за неквалифицированной разборки не представляется возможным найти правильное взаимное положение снятого маховика и вала, ранее уже отбалансированных в сборе. Технология статической балансировки на параллельном станде достаточно проста. Вал, установленный на направляющие, под действием силы тяжести перемещается (поворачивается) и останавливается. В этом положении эксцентриситет массы направлен вниз относительно оси вращения. Поэтому сверху на валу (или на балансируемой детали) закрепляются технологические грузы, масса которых подбирается из условия достижения валом состояния безразличного равновесия. Далее балансировка вала проводится, и при необходимости корректировка масс выполняется повторно. **Динамическая балансировка валов является значительно более сложным процессом, который требует дорогостоящего оборудования и высокой квалификации специалистов-балансировщиков.** Динамическая балансировка валов обычно выполняется на универсальных балансировочных станках, обеспечивающих: привод вала и вращение его с постоянной частотой (обычно в диапазоне $8...60$ с⁻¹); измерение параметров, позволяющих определить конкретные места корректировки массы вала. Универсальность станка позволяет балансировать валы, имеющие широкий диапазон габаритных размеров и масс.

Обычно балансировочные станки имеют ленточный (ременный) привод вала. Вал в станке вращается в двух специальных опорах, конструкция которых позволяет измерять силы, действующие на опоры со стороны балансируемого вала, а также направление действия этих сил. Эти данные используются для определения мест корректировки массы. **Динамическая балансировка вала проводится в двух плоскостях, расположенных обычно у крайних его опор.** Чтобы правильно выполнить балансировку, иногда следует знать, что произошло с валом, каковы были деформация и ее направление перед шлифованием. Рассмотрим этот вопрос более подробно. Если вал перед шлифованием имел большую деформацию, например, биение 0,4 мм, то как уже было указано выше, деформация по длине вала обычно равномерна с максимумом вблизи середины вала. **Тогда вал массой 20 кг получает эксцентриситет массы порядка $e \cdot s \cdot t = 0,13$ мм.** Несложно рассчитать, что при частоте враще-

ния $n = 6000$ мин⁻¹ появляется центробежная сила $F = m \cdot w^2 \cdot e \cdot s \cdot t = 1000$ Н. Эта сила, если вал не уравновешен, воспринимается опорами, причем, в основном, средними, т.к. именно здесь имеет место наибольшая деформация. В то же время согласно существующим методикам балансировки, корректировка масс выполняется на крайних противовесах вала. Следовательно, после такой балансировки происходит существенное смещение (или искривление) главной центральной оси инерции так. Нарушается и основное правило ремонта - поврежденная деталь после ремонта будет иметь несколько иные характеристики, чем новая. Необходимо отметить, что для «жестких» коротких валов с большими диаметрами шеек и мощными щеками (характерно для многих четырехцилиндровых двигателей прошлых лет выпуска) указанный эффект несущественен. Такие коленчатые валы обладают достаточной жесткостью и практически не испытывают деформаций под действием дополнительных центробежных сил. **Иное дело - длинные тонкие («гибкие») коленчатые валы рядных 6-цилиндровых двигателей, особенно сравнительно небольшого рабочего объема (2,0...2.5 л). Некоторые из таких валов (например, у двигателей японского производства) могут быть деформированы на 0,10...0,15 мм вручную усилием всего 200...300 Н. В то же время сила, действующая на шатунную шейку вала, например, от давления газов в цилиндре составляет порядка 1000...2000 Н, т.е. имеет тот же порядок, что и центробежная сила из-за деформации середины вала.**

Следовательно, балансировка длинных валов по двум крайним плоскостям коррекции без учета их «прошлой» деформации препятствует решению одной из задач балансировки, а именно снижению нагрузок в подшипниках, возникающих вследствие дисбаланса, и увеличения ресурса подшипников. Кроме того, балансировка по обычной схеме может дать здесь большую погрешность, если при вращении в станке вал будет испытывать деформацию от центробежных сил. Для того, чтобы учесть «искривление» главной центральной оси инерции вала, следует начинать балансировку с его середины. Здесь вполне достаточно статической балансировки на параллельном станде, при этом следует выполнить корректировку массы на одном из средних противовесов. Только после этого можно проводить динамическую балансировку по обычной схеме. Таким образом, указанный способ по трудоемкости незначительно превышает обычную динамическую балансировку в двух плоскостях коррекции, однако фактически масса корректируется в трех плоскостях. ■