

УДК 621.787

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СБОРКИ АГРЕГАТОВ МАШИН НА ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ

© 2015 Г.А. Родимов, О.М. Батищева, В.А. Папшев

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 26.03.2015

Предлагается способ повышения качества сборки подшипниковых узлов путем применения ультразвуковых колебаний. Рассмотрена технология ультразвуковой сборки с одновременным упрочнением деталей подшипника.

Ключевые слова: *подшипник качения, сборка, ультразвуковые колебания, упрочнение*

Качество агрегатов машин зависит от качества отдельных деталей, входящих в агрегат. Назначение подавляющего большинства агрегатов машин – передача крутящего момента, следовательно, главным рабочим движением в этих агрегатах является вращение валов. Выделяют две группы агрегатов в зависимости от используемых опор валов:

- агрегаты с опорами валов на подшипниках скольжения,
- агрегаты с опорами валов на подшипниках качения.

К агрегатам с опорами валов на подшипниках качения относят агрегаты трансмиссии автомобилей, тракторов, дорожных, дорожно-строительных машин и других механизмов. Для агрегатов трансмиссии поверхностями рабочего движения являются поверхности качения колец подшипников, установленных неподвижно относительно корпуса и вала. Действительная форма поверхностей качения в подшипниковых узлах и их расположение достигаются в результате выполнения технологических операций сборки неподвижных соединений колец подшипников с корпусом и валом. Очевидно, что работоспособность и эксплуатационные показатели агрегата зависят от конструкторско-технологического обеспечения качества сборки подшипниковых узлов.

Основным вопросом в системе конструкторско-технологического обеспечения качества сборки подшипниковых узлов агрегатов машин является распределение натяга в неподвижном соединении между кольцом подшипника и сопрягаемой деталью, поскольку деформации, отнесенные

к поверхностям качения колец, являются формообразующим и размерообразующим факторами. Действительная поверхность главного рабочего движения в подшипниковом узле образуется в результате сборки неподвижного соединения, а ее форма зависит от действительной величины натяга в неподвижном соединении.

Неподвижные соединения подшипниковых узлов агрегатов автомобиля выполняются в основном методом запрессовки. Следовательно, имеет место силовое воздействие на кольцо подшипника и сопрягаемую с ним деталь неподвижного соединения. Силовое воздействие, в свою очередь, отличается неравномерностью, которая вызвана следующими технологическими факторами:

- погрешностью формы сопрягаемой поверхности;
- погрешностями ориентации сопрягаемых поверхностей при выполнении неподвижного соединения;
- неравномерным распределением материала корпуса вследствие погрешностей механической обработки;
- деформациями сборочного оборудования.

Как показали исследования [см., например, 1–4], компенсировать некоторые из этих технологических факторов позволяет применение ультразвуковых колебаний при сборке неподвижных соединений с натягом.

К общим закономерным результатам влияния ультразвуковых методов сборки на качество подобных изделий являются значительное улучшение микрогеометрии, в том числе несущей способности поверхностей, повышение точности, проявляющееся в уменьшении поля рассеяния контролируемого параметра и смещении центра группирования в сторону меньших отклонений. Введение в зону сопряжения деталей ультразвуковых колебаний является эффективным средством направленного регулирования основных показателей качества поверхностного слоя, в том числе тонкой кристаллической структуры, деформационного упрочнения и остаточных напряжений. Применение ультразвуковых методов сборки сопровождается значительным повышением усталостной прочности, контактной выносливости, контактной жесткости и износостойкости деталей [2–3]. Одним

---

*Родимов Геннадий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортные процессы и технологические комплексы». E-mail: rga@mail.ru*

*Батищева Оксана Михайловна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Транспортные процессы и технологические комплексы». E-mail: omb@list.ru*

*Папшев Валерий Александрович, кандидат биологических наук, доцент кафедры «Транспортные процессы и технологические комплексы». E-mail: pva\_samara@mail.ru*

из положительных эффектов введения ультразвука в зону сборки является значительное снижение сил, необходимых для образования соединения вследствие изменения условий контактного взаимодействия деталей. В частности, при ультразвуковой сборке происходит снижение сил сборки в 3-20 раз и повышение прочности соединений в 2-4 раза [4]. Установлена эффективность использования возможностей ультразвука для получения поискового движения при сборке прессовых соединений, что позволяет компенсировать погрешности ориентации сопрягаемых поверхностей.

Основное преимущество использования ультразвука при формировании прессовых соединений заключается в многократном снижении напряженности в зоне контакта сопрягаемых деталей [2, 4]. Проведенные экспериментальные исследования на физических моделях сопрягаемых деталей (валов и втулок) и последующий топографический анализ поверхностей после разборки показали, что поверхность валов после обычной сборки блестящая, состоит из кольцевых зон и характеризуется наличием продольных, длинных, часто расположенных рисок небольшой глубины. На внутренней поверхности втулок также наблюдаются кольцевые зоны, длина которых зависит от скорости запрессовки.

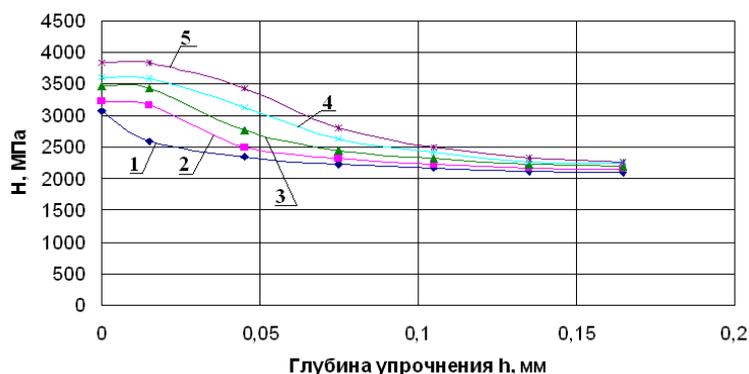
Как показали результаты моделирования контакта поверхностей с помощью скольжения единичного индентора, имитирующего неровность, перед его передней поверхностью образуется опережающий наплыв деформируемого материала. При множественном контакте единичных неровностей образование опережающего наплыва при запрессовке увеличивает сопротивление пластической деформации до момента, когда происходит срыв опережающего наплыва, и вал с увеличенной скоростью проходит часть длины втулки до следующего цикла образования опережающего наплыва. При этом в месте, где произошел срыв опережающего наплыва, наблюдается увеличение высоты неровностей, а на участке, где вал перемещался с повышенной скоростью – срезание неровностей и уменьшение шероховатости. Последнее сопровождается уменьшением реальной величины натяга и прочности соединения. При запрессовке вал осуществляет прерывистое скачкообразное перемещение относительно втулки, что отрицательно влияет не только на качество сопрягаемых

поверхностей и соединений в целом, но и приводит к значительным ударным нагрузкам и преждевременному выходу из строя сборочных агрегатов.

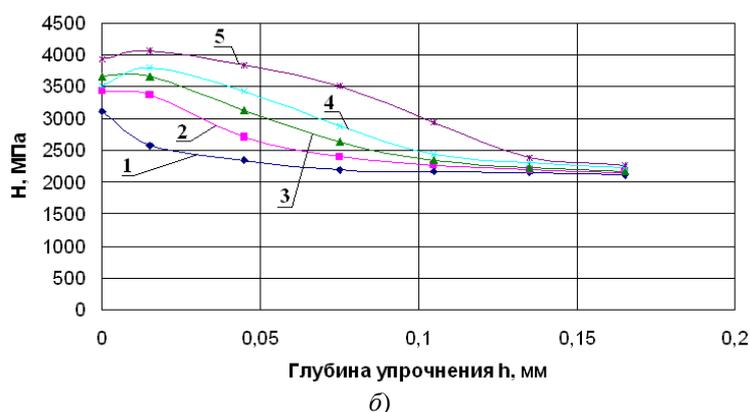
Микрорельефы поверхностей при ультразвуковой сборке зависят от схемы наложения ультразвуковых колебаний и характеризуются рядом особенностей по сравнению со сборкой в обычных условиях. Установлено, что после ультразвуковой сборки микрорельеф деформируется в меньшей степени и лишь небольшая часть наиболее высоких неровностей подвергается смятию или срезу, а на внутренней поверхности втулки кольцевых полос, отмечавшихся при обычной запрессовке, не наблюдается.

Эксплуатационные показатели соединений – прочность и контактная жесткость – во многом зависят от режимов сборки и параметров ультразвуковых колебаний. Исследованиями установлено, что увеличение амплитуды продольных колебаний вала при ультразвуковой сборке приводит к повышению статической прочности соединений  $P_p$ , причем наибольшая интенсивность роста  $P_p$  по сравнению с обычной запрессовкой наблюдается при натягах 0,005 мм и 0,010 мм. Так, при сборке с  $\xi=5$  мкм статическая прочность  $P_p$  увеличивается в 1,5 раза ( $\delta=0,005$  мм) и в 2 раза ( $\delta=0,010$  мм), а при  $\xi=20$  мкм соответственно в 3 и 3,5 раза. С увеличением натяга интенсивность роста прочности соединений замедляется: при  $\xi=20$  мкм на 57% ( $\delta=0,015$  мм) и на 39% ( $\delta=0,020$  мм) выше по сравнению с соединениями, собранными обычным способом [2].

Исследованиями напряженно-деформированного состояния, проведенного с использованием конечно-элементного анализа, установлено, что контактные напряжения при ультразвуковой сборке в несколько раз больше, чем при обычной, что является следствием меньшей деформации поверхностей [2]. Исследования физического состояния поверхностного слоя позволяют сделать вывод, что основным фактором, влияющим на повышение эксплуатационных показателей прессовых соединений, является увеличение фактической площади контакта соединяемых деталей в сочетании с большой степенью деформационного упрочнения посадочных поверхностей [2, 4].



a)



**Рис. 1.** Влияние амплитуды ультразвуковых колебаний на микротвердость поверхностного слоя вала (сталь 45), собиравшегося со втулкой (сталь ШХ15СГ) ( $V=0,0015$  м/с;  $\delta=0,015$  мм;  $d=15$  мм): 1 – обычная запрессовка; 2 – запрессовка с наложением УЗК  $\xi=5$  мкм; 3 – запрессовка с наложением УЗК  $\xi=10$  мкм; 4 – запрессовка с наложением УЗК  $\xi=15$  мкм; 5 – запрессовка с наложением УЗК  $\xi=20$  мкм; а) – радиальные (поперечные) УЗК; б) – тангенциальные (продольные) УЗК

На рис. 1 представлены результаты исследований микротвердости поверхностного слоя вала из стали 45 при сообщении втулке из стали ШХ15СГ (HRC 62...64) радиальных (поперечных) ультразвуковых колебаний, на вал – тангенциальных (продольных) колебаний. Скорость запрессовки  $V$  выдерживалась постоянной. Установлено, что величина степени ( $u_n$ ) и глубины упрочнения ( $h$ ) определяется амплитудой ультразвуковых колебаний, увеличиваясь с ростом последней. Так, если при обычной сборке  $u_n$  составляет 40%, а глубина упрочнения  $h=75$  мкм, то при  $\xi=5$  мкм величина степени упрочнения  $u_n$  равно 55%, глубины упрочнения  $h=90$  мкм. Дальнейший рост амплитуды до 20 мкм сопровождается повышением степени упрочнения до 73% и глубины до 135 мкм.

Результаты проведенных исследований показывают, что введение в зону соединения тангенциальных ультразвуковых колебаний оказывает более интенсивное воздействие на пластическую деформацию поверхностного слоя по сравнению с радиальными. В частности, глубина  $h$  упрочненного слоя возрастает в среднем на 15 мкм, а степень упрочнения  $u_n$  – на 10-12%. Вместе с тем, при больших значениях тангенциальных ультразвуковых колебаний наблюдается снижение поверхностной микротвердости, причем, при  $\xi=15$  мкм она даже ниже, чем у соединений, собранных с  $\xi=10$  мкм. Следующим фактором, во многом определяющим степень пластической деформации поверхностного слоя деталей, является скорость запрессовки. Как видно из графиков на рис. 1, увеличение скорости ведет к снижению степени и глубины упрочнения. Так, если при  $V=0,001$  м/с,  $u_n$  составляет 16%,  $h=150$  мкм, то при  $V=0,005$  м/с,  $u_n$  уменьшается до 68%, при глубине зоны деформирования 105 мкм. Увеличение скорости запрессовки до 0,01 м/с, снижает  $u_n$  еще на 12%, а  $h$  – до 90 мкм.

Иначе происходит пластическое деформирование поверхностного слоя при сборке деталей, обладающих одинаковыми физико-механическими свойствами. Для сравнительной оценки влияния направления и амплитуды ультразвуковых

колебаний на степень и глубину упрочнения использовалась приведенная выше схема сборки, но вал и втулка при этом изготавливались из стали 45. Установлено, что и в этом случае определяющее влияние на состояние поверхностного слоя оказывает амплитуда колебаний, но в отличие от предыдущих исследований, где производилась сборка деталей из материалов с разными характеристиками прочности и пластичности, в рассматриваемом случае более эффективным с точки зрения достижения больших величин степени и глубины деформационного упрочнения оказалось введение в зону соединения радиальных (поперечных) ультразвуковых колебаний. Кроме того, исследования позволяют сделать вывод, что поверхностный слой детали, которой сообщают колебания, приобретает большую степень и глубину упрочнения по сравнению с поверхностным слоем контрдетали.

Отмеченные выше особенности пластической деформации поверхностного слоя при ультразвуковой сборке можно объяснить следующим образом. При сборке закаленной втулки с валом, обладающим более высокой пластичностью, с радиальными ультразвуковыми колебаниями, поверхность вала подвергается высокочастотному ударно-циклическому воздействию с силой  $P_{уз}$ , которую в первом приближении можно принять пропорциональной некоторой приведенной массе втулки. Поэтому в связи с локальностью пластической деформации степень упрочнения поверхностного слоя возрастает по сравнению с обычной сборкой. Наложение тангенциальных ультразвуковых колебаний непосредственно на вал способствует значительному снижению сопротивления пластическому деформированию. Это интенсифицирует процесс упрочнения поверхностного слоя в условиях ударно-циклического взаимодействия вала и более прочной втулки, происходящего за счет изменения его диаметра на величину, сопровождающую изменение длины. При сборке деталей, материал которых обладает одинаковыми пластическими свойствами, важную роль играет изменение пластических свойств у сборочного элемента, которому сообщают ультразвуковые колебания.

Таким образом, в результате высокочастотного ударно-циклического взаимодействия более твердой и менее твердой поверхностей большее поверхностное пластическое деформирование приобретает последняя. Также следует отметить, что происходящее под воздействием ультразвука упрочнение, более устойчиво к последующему нагружению узла. Ультразвуковая запрессовка подшипников на вал сопровождается образованием на поверхностях желобов внутренних и наружных колец пластических отпечатков глубиной  $h=0,4-3,2$  мкм, определяемой радиальным зазором в подшипнике, амплитудой колебаний, скоростью соединения деталей и натягом [5].

Исследования поверхности желобов внутренних колец подшипников после разборки показали, что максимальная глубина  $h$  отпечатков пропорционально зависит от амплитуды ультразвуковых колебаний  $\xi$  и натяга в соединении  $\delta$ . Так, с увеличением  $\xi$  от 5 мкм до 20 мкм и  $\delta$  от 0,005 мм до 0,020 мм глубина  $h$  отпечатков возрастает соответственно с 0,8 мкм до 3,2 мкм и с 0,42 мкм до 3,2 мкм. И, наоборот, с ростом радиального биения и скорости запрессовки глубина пластических отпечатков уменьшается.

Установлено, что основной причиной образования на поверхностях желобов пластических отпечатков является возникновение между валом и внутренними кольцами подшипника акустического контакта, в результате которого ультразвуковые колебания передаются с вала на кольцо, и происходит удар желоба о шарики. Действие сосредоточенных в одних и тех же точках многократных циклических нагрузок в условиях снижения под воздействием ультразвука физико-механических характеристик материалов, в частности твердости [5], приводит к образованию отпечатков и снижению долговечности подшипников.

Для рационального использования этого эффекта предложено совместить процесс сборки с упрочнением колец поверхностным пластическим деформированием, для чего при запрессовке вала необходимо вращать наружное кольцо подшипника. Для реализации предложенного метода ультразвуковой сборки было разработано технологическое оснащение, схема которого приведена на рис. 2. Основными элементами устройства являются магнитострикционные преобразователи 1 и 2. Преобразователь 1 предназначен для сообщения продольных ультразвуковых колебаний валу 3, а преобразователь 2 – для поперечных (радиальных) ультразвуковых колебаний втулке 4, устанавливаемых в цанговых патронах 5 и 6. Магнитострикционный преобразователь 2 смонтирован на валу редуктора и имеет реверсивное вращение.

С целью оптимизации процесса ультразвуковой сборки подшипниковых узлов были проведены исследования, включавшие определение степени и глубины деформационного упрочнения, величины и глубины залегания остаточных напряжений, контактной прочности. Анализ приведенных данных позволяет сделать вывод, что при высокочастотном циклическом нагружении деформа-

ция локализуется в области, непосредственно прилегающей к шарик, и не распространяется на большую глубину. Напротив, увеличение натяга частично компенсирует радиальное биение и способствует возрастанию статической нагрузки на поверхности качения, что в сочетании с ультразвуковыми колебаниями увеличивает глубину их деформирования. Эффективность разработанной технологии подтверждается результатами стендовых испытаний подшипников на долговечность.

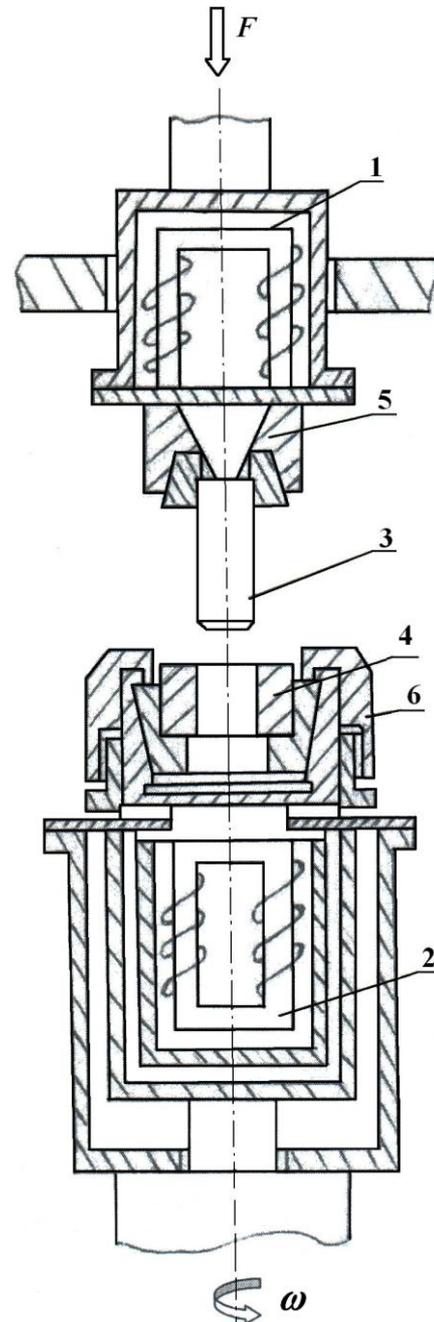


Рис. 2. Схема устройства для ультразвуковой сборки:

1, 2 – магнитострикционные преобразователи; 3 – вал; 4 – втулка; 5, 6 – цанговые патроны

Таким образом, ультразвуковая сборка позволяет совместить операции сборки с упрочнением поверхностей, что способствует повышению

качества поверхностного слоя деталей. При этом определяющее влияние на характеристики качества оказывают параметры ультразвуковых колебаний и режим сборки, оптимизация которых является значительным резервом повышения эксплуатационных показателей соединений.

С целью оптимизации процесса ультразвуковой сборки подшипниковых узлов были проведены исследования, включавшие определение степени и глубины деформационного упрочнения, величины и глубины залегания остаточных напряжений, контактной прочности. Анализ приведенных данных позволяет сделать вывод, что при высокочастотном циклическом нагружении деформация локализуется в области, непосредственно прилегающей к шариком, и не распространяется на большую глубину. Напротив, увеличение натяга частично компенсирует радиальное биение и способствует возрастанию статической нагрузки на поверхности качения, что в сочетании с ультразвуковыми колебаниями увеличивает глубину их деформирования. Эффективность разработанной технологии подтверждается результатами стендовых испытаний подшипников на долговечность.

**Выводы:** ультразвуковая сборка позволяет совместить операции сборки с упрочнением поверхностей, что способствует повышению качества поверхностного слоя деталей. При этом определяющее влияние на характеристики качества оказывают параметры ультразвуковых колебаний и

режим сборки, оптимизация которых является значительным резервом повышения эксплуатационных показателей соединений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Батищева, О.М.* Модификация статистических характеристик микрогеометрии поверхностей деталей при ультразвуковой сборке / *О.М. Батищева, В.А. Папшев, В.Г. Шуваев* // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2010. Т.2. С. 121-124.
2. *Родимов, Г.А.* Влияние ультразвуковых колебаний на изменение механических характеристик поверхностей контакта / *Г.А. Родимов, О.М. Батищева, В.А. Папшев* // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. №4. С. 64-68.
3. *Родимов, Г.А.* Влияние ультразвуковых колебаний на интенсивность изнашивания металлов / *Г.А. Родимов, О.М. Батищева, В.А. Папшев, А.И. Гудков* // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2013. Т.2. С. 176-178.
4. *Штриков, Б.Л.* Автоматизированная система научных исследований процессов ультразвуковой сборки / *Б.Л. Штриков, В.Г. Шуваев, В.А. Папшев* // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2007. №12. С. 19-22.
5. *Штриков, Б.Л.* Особенности сборки подшипниковых узлов / *Б.Л. Штриков, О.М. Батищева, Г.А. Родимов* // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. №1. С. 3-6.

## QUALITY IMPROVEMENT OF ASSEMBLING THE MACHINE UNITS OPERATING ON ROLLING BEARINGS

© 2015 G.A. Rodimov, O.M. Batishcheva, V.A. Papshev

Samara State Technical University

The paper provides with methods of quality improvement of bearing assemblies using ultrasonic vibrations. It also describes the ultrasonic assembling technology with simultaneous hardening of the bearing units.

Key words: *rolling bearing, assembling, ultrasonic vibrations, hardening*

---

*Gennadiy Rodimov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Transport Processes and Technological Complexes". E-mail: rga@mail.ru*

*Oksana Batishcheva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Transport Processes and Technological Complexes". E-mail: omb@list.ru*

*Valeriy Papshev, Candidate of Biology, Associate Professor at the Department "Transport Processes and Technological Complexes". E-mail: pva\_samara@mail.ru*