МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

УДК 629.083

DOI 10.12737/10389

Поиск новых технологических методов упрочняющей обработки коленчатых валов двигателей*

А. П. Бабичев¹, М. Е. Попов², А. Эль Дакдуки³, Ф. А. Пастухов^{4}**^{1, 2, 3, 4}Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Search for new technological methods of strengthening treatment of crankshafts***

A.P. Babichev¹, M. E. Popov², A. El Dakduki³, F. A. Pastukhov^{4}**^{1, 2, 3, 4}Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Цель работы — поиск новых методов упрочняющей обработки коленчатого вала. Исследуются современные эффективные методы (конструктивные и технологические) повышения прочности и износоустойчивости указанной детали. Обозначены особенности основных технологических методов — азотирования, местного наклепывания, обдувки стальной дробью галтелей. Рассмотрена главная задача конструктивных методов повышения прочности — придание коленвалу формы, обеспечивающей более равномерное распределение напряжения по объему детали — как в зонах концентрации напряжений, так и вне этих зон. Требуемые конструктивные формы вала определяются экспериментально. Предложены новые схемы установок для упрочняющей и стабилизирующей виброударной и виброволновой обработки коленчатых валов двигателей. Экспериментально установлено, что виброударная обработка позволяет достичь: равномерного упрочнения поверхностного слоя всех элементов детали; отделки и скругления острых кромок; плавности переходов; исключения поводки нежестких валов, имеющей место при локальной обработке обкатыванием галтелей крупногабаритных деталей.

Ключевые слова: коленчатый вал, технологическая схема, виброволновая обработка, стабилизирующая обработка, упрочняющая обработка.

The work objective is searching new methods of strengthening processing of the cranked shaft. Modern constructive and processing methods of increasing the durability of the engine cranked shaft are considered. Some features of the key processing methods — nitriding, riveting on, steel shot blasting of fillets — are identified. The main task of the constructive methods to increase strength — crankshaft shaping that provides a more uniform stress distribution on shaft volume — both in the stress concentration zones, and outside them is considered. The required design shapes of the shaft are determined experimentally. New installation diagrams for the strengthening and stabilizing vibrowave and shock-vibrating machining of the engine crankshafts are proposed. It is experimentally established that the shock-vibrating machining allows the following: uniform hardening of the surface layer of all part features; sharp edge finishing and rounding; smooth transitions; avoidance of non-rigid shaft distortion that takes place at the local rolling of large part fillets.

Keywords: crankshaft, process flowsheet, vibrowave processing, stabilizing treatment, hardening treatment.

Введение. Актуальными задачами развития технологии машиностроения являются увеличение жизненного цикла автомобильного транспорта, тракторов и сельскохозяйственной техники, улучшение их эксплуатационных характеристик. В значительной степени основные характеристики перечисленных типов изделий определяются прочностью деталей двигателя.

*Работа выполнена в рамках ЕЗН Министерства образования и науки Российской Федерации «Теоретические основы наукоемких технологий повышения качества поверхностного слоя деталей и их долговечности при обработке в гранулированных средах», ГРНТИ 1.17.12.

** e-mail: vibrotech@mail.ru, pme-dgtu@mail.ru, vibrotech@mail.ru, vibrotech@mail.ru

*** The research is done within the frame of the Unified Work Order of the RF Ministry of Education and Science “Theoretical foundations of high-end technologies to improve surface layer quality of the parts and their longevity under treatment in granular media”, State Rubricator of Scientific and Technical Information 1.17.12.

Коленчатый вал (рис. 1) является одной из важных деталей кривошипно-шатунной группы двигателя, и от его качества и прочности зависят эксплуатационные характеристики и долговечность двигателя [1]. Во время работы двигателя коленчатый вал передает крутящий момент трансмиссии, а также различным агрегатам и вспомогательным механизмам.

Рис. 1. Коленчатый вал двигателя внутреннего сгорания: 1 — носок коленчатого вала; 2 — посадочное место звездочки (шестерни) привода распределительного вала; 3 — отверстие подвода масла к коренной шейке; 4 — противовес; 5 — щека; 6 — шатунные шейки; 7 — фланец маховика; 8 — отверстие подвода масла к шатунной шейке; 9 — противовес; 10 — коренные шейки; 11 — коренная шейка упорного подшипника

Коленчатый вал воспринимает периодические нагрузки от сил газов и сил инерции возвратно-поступательно движущихся и вращающихся масс деталей кривошипно-шатунного механизма. Сложная конфигурация вала приводит к появлению в отдельных местах концентрации напряжений, являющейся причиной разрушения.

Силы, периодически действующие на коленчатый вал, вызывают крутильные и изгибные колебания, которые на определенных режимах работы двигателя создают дополнительные напряжения, иногда весьма значительные. Действующие усилия вызывают появление в элементах вала меняющихся в широких пределах напряжений кручения, изгиба, сжатия и растяжения, вследствие чего материал вала работает на усталость. Ввиду того, что коленчатый вал действует в условиях переменных нагрузок, одной из характеристик механических свойств этой детали является усталостная прочность.

Цель работы — представить анализ существующих технологических методов упрочняющей обработки коленчатых валов двигателей и разработать предложения по созданию новых.

Эксплуатационные требования к конструкции коленчатых валов. К конструкции коленчатого вала предъявляют следующие требования:

- 1) статическая и динамическая уравновешенность;
- 2) высокие прочность и надежность;
- 3) малая масса;
- 4) простота конструкции и большая жесткость;
- 5) отсутствие резонансов крутильных и изгибных колебаний;
- 6) высокая точность изготовления (в особенности шатунных и коренных шеек);
- 7) обтекаемость формы;
- 8) разгрузка коренных подшипников от центробежных сил и моментов.

Коленчатый вал должен обладать высокой прочностью и жесткостью, высокой износоустойчивостью трущихся поверхностей шеек. На прочность коленчатого вала большое влияние оказывает величина «перекрытия» коренной и шатунной шеек. «Перекрытие» шатунной и коренной шеек представляет собой разность суммы их радиусов и радиуса кривошипа. Если сумма радиусов коренной и шатунной шеек больше радиуса кривошипа, значит, шейки заходят одна за другую. При этом повышается прочность вала, так как увеличивается опасное сечение щеки между шейками. Одновременно возрастает и жесткость вала. Перекрытие шеек обычно имеют короткоходные двигатели с малым отношением хода поршня к диаметру. У современных высокооборотных двигателей отношение близко к единице и имеет тенденцию к дальнейшему снижению.

Конструкционные материалы и заготовки для изготовления коленчатых валов. Требования к коленчатым валам дизелей и газовых двигателей изложены в ГОСТ 10158-62 «Валы коленчатые стальные дизелей и газовых двигателей. Технические требования». В соответствии с этим стандартом валы должны изготавливаться из углеродистых сталей марок 35, 40, 45 и 50Г или из легированных сталей. Твердость шеек, подвергаемых поверхностной закалке, должна

быть не менее 52HRC для валов, изготавливаемых из сталей марок 45 и 50Г, и не менее 48HRC для валов из легированной стали.

Для изготовления коленчатых валов применяются стали 45, 45А, 40Х, 20Г2 и 50Г. В дизелях, работающих с давлением наддува $p_k = 0,15 \text{ МПа}$ ($1,5 \text{ кг/см}^2$), для коленчатых валов используют высоколегированные стали 18ХНМА, 18ХНВА и 40ХНМА с повышенными пределами текучести и прочности. Обычно для производства заготовок стальных коленчатых валов применяетсяковка.

Требования к стальным коленчатым валам автомобильных двигателей определяет ГОСТ 4669-68, согласно которому валы должны изготавливаться из стали марок 45, 50Г, 40Х, 40ХНМА и 50ХФА. В этом же ГОСТ изложены требования к точности изготовления и чистоте поверхности.

Помимо стальных кованых и штампованных валов применяют также литые валы из высокопрочного чугуна, модифицированного магнием, перлитного ковкого чугуна, легированного никельмолибденового чугуна. Чаще всего для литых коленчатых валов применяют высокопрочный ВЧ 50-1,5 (HB 187-255) и перлитовый чугун. В частности, чугунный коленчатый вал установлен на тепловозном дизеле Д100.

По сравнению со стальными валами чугунные обладают рядом преимуществ:

- меньший расход металла;
- снижение трудоемкости механической обработки за счет сокращения числа операций;
- возможность придания валу форм, обеспечивающих оптимальное распределение металла и повышение усталостной прочности.

При этом литые коленчатые валы из чугуна обладают лучшей способностью гашения крутильных колебаний.

При этом литые чугунные валы обладают меньшей прочностью (особенно на изгиб), чем штампованные стальные валы. Поэтому у чугунных валов увеличивают диаметры шатунных и коренных шеек, толщину щек и радиусы галтелей. Чугунные коленчатые валы изготавливают полноопорными. Шейки чугунных валов имеют высокую износостойкость, что позволяет применять подшипники из свинцовистой бронзы. Масса обработанного литого коленчатого вала на 10–15% меньше массы кованого.

Анализ технологического процесса изготовления коленчатых валов. Послековки коленчатые валы отжигают или нормализуют. Это позволяет снять внутренние напряжения, понизить твердость до HB 163–269 и облегчить механическую обработку. После механической обработки стальные коленчатые валы перед шлифованием подвергают вторичной термической обработке (закалка и отпуск), что значительно улучшает их механические свойства и повышает поверхностную твердость шеек. Обычно вторичная термическая обработка производится с нагревом токами высокой частоты (ТВЧ). Глубина закаленного слоя должна быть не менее 3–4 мм, чтобы после перешлифования шеек коленчатого вала под ремонтные размеры толщина закаленного слоя была не менее 1 мм. Твердость шеек коленчатого вала из стали 50Г — HRC 52–62, а из стали 45Г2 — HRC 48–50.

Методы упрочнения коленчатых валов. Так как коленчатый вал является высоконагруженной и дорогостоящей деталью, для повышения его прочности и износостойкости принимают ряд мер. Способы повышения прочности коленчатых валов делятся на конструктивные и технологические.

Конструктивно повысить прочность коленчатого вала можно следующим образом. Детали придают такую форму, при которой напряжения распределяются по объему более равномерно — как в зонах концентрации напряжений, так и вне этих зон. Требуемые конструктивные формы вала устанавливаются экспериментально.

К технологическим методам повышения прочности коленчатых валов относятся следующие.

1. Азотирование. Предел выносливости при изгибе (для хромомолибденовой стали) повышается на 25–60 %, а при кручении — на 30–40 %.

2. Местное наклепывание путем накатки роликами галтелей и обжатия краев масляного отверстия стальным шариком. Усталостная прочность коленчатых валов при изгибе увеличивается на 40 %, а при кручении — на 20 %.

3. Обдувка стальной дробью галтелей. Предел выносливости при изгибе возрастает до 40 %.

С точки зрения повышения износостойкости особенно эффективно азотирование валов, значительно повышающее твердость рабочих поверхностей. Недостаток этого способа — большая продолжительность производственного процесса.

Как известно, большинство стальных коленчатых валов упрочняется путем одновременной обкатки галтелей коренных и шатунных шеек на специальном станке конструкции НИИТСХМ (г. Москва) [2]. Однако конструктивные особенности коленчатых валов: сложная форма, большая длина, низкая жесткость и др. — не позволяют в полной мере эффективно использовать традиционные методы упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД). Так, например, необходимость конструктивной переделки коленчатого вала 01-0401 для форсированного двигателя требует разработки рекомендаций по применению новых прогрессивных методов упрочнения, включающих деформацию детали и повышающих усталостную прочность и ресурс работы.

Одним из прогрессивных методов упрочнения деталей и изменения их внутренней напряженности является отделочно-упрочняющая обработка с использованием низкочастотных вибраций [3].

В качестве термоупрочнения коленчатых валов 01-0401 применяется метод закалки ТВЧ коренных и шатунных шеек до твердости 52–62 HRC₃. Однако получение в металле остаточных напряжений и снятие их сопровождается изменением прочностных свойств поверхностного слоя. Согласно [2], основной причиной снижения усталостной прочности коленчатых валов следует считать наличие в зоне галтелей растягивающих (положительных) напряжений, возникающих в результате высокочастотной закалки шеек. Закаленная поверхность шеек не должна распространяться на галтель, так как при этом понижается усталостная прочность вала. Учитывая это обстоятельство, при закалке ТВЧ вала 01-0401 техническими условиями предусматривается отступление закаленного слоя от галтели на 5–8 мм, чтобы расположение эпюры растягивающих остаточных напряжений не могло совпасть с галтелью.

Согласно [4], осуществление закалки шеек с выходом зоны закалки на галтель позволило существенно (более чем в 2 раза) повысить предел выносливости по сравнению с незакаленными образцами. Однако значительное искажение геометрии вала за счет деформации его элементов затрудняет использование этого метода.

Согласно сведениям [1, 2], основными факторами, определяющими пониженную усталостную прочность коленчатых валов, а также ресурс их работы, являются:

- недостаточное качество поверхности галтелей после шлифовки;
- царапины, забоины, низкая шероховатость, нарушение радиуса плавного перехода от галтели к щеке (конструктивный концентратор);
- большое число правок в процессе изготовления коленчатых валов.

Наиболее опасной является усиленная правка (рихтовка) заготовки, т. е. рихтовка валов, вызывающая очень большую остаточную деформацию. Она приводит к появлению остаточных напряжений и микротрещин, которые являются очагами усталостного разрушения.

Шероховатость поверхности шеек не должна быть более:

- R_a 0,2 мкм (9-й класс обработки) — при диаметре до 100 мм;
- R_a 0,4 мкм (8-й класс обработки) — при диаметре свыше 100 мм;
- R_a 0,4 мкм (8-й класс обработки) — для галтелей.

Радиус кривошипа может иметь отклонение от номинального не выше $\pm 0,15$ мм на каждые 100 мм. Смещение углов между коленами относительно любого колена, принятого за базу, составляет $\pm 30'$. С увеличением радиуса кривошипа галтели (или углубления галтели в шейку) и перекрытия шатунных и коренных шеек усталостная прочность кривошипа повышается.

При увеличении перекрытия шеек на 10 мм предел выносливости кривошипа при изгибе повышается на 3,5 %; на 20 мм — на 29 %; на 30 мм — на 75 %.

Эксцентричное расположение внутреннего облегчающего отверстия в шатунной шейке относительно ее геометрической оси в сторону удаления от радиуса кривошипа сопровождается уменьшением напряжений изгиба у галтели и повышением усталостной прочности на 10–15 %. Чтобы повысить жесткость таких коленчатых валов на изгиб, увеличивают диаметры шатунных и коренных шеек, уменьшают их длину и увеличивают толщину щек.

В V-образных двигателях применяют полноопорные коленчатые валы. Жесткость щеки зависит от перекрытия коренных и шатунных шеек. Чем больше перекрытие шеек, тем больше жесткость и прочность щеки. При этом можно уменьшить толщину щеки без увеличения ее ширины. Величина перекрытия шеек зависит от диаметра шеек и отношения хода поршня к диаметру цилиндра. На усталостную прочность коленчатого вала большое влияние оказывают размеры закруглений (галтелей) на переходах от шеек к щекам. Чтобы избежать возникновения больших концентраций напряжения, переходы (галтели) от щек к коренным и шатунным шейкам выполняют радиусом около $r = (0,035 \div 0,08) \cdot d$, где d — диаметр коренной или шатунной шейки. Для уменьшения опорной поверхности шейки галтель в некоторых конструкциях состоит из двух-трех сопряженных дуг различных радиусов r_1 , r_2 , r_3 . При неправильно выбранных, слишком малых радиусах галтелей увеличивается концентрация напряжений у перехода от щеки к шейке и снижается запас прочности вала. Чрезмерное увеличение радиусов галтелей невыгодно, так как при этом уменьшается длина рабочей части шейки и возрастают удельные давления на подшипник.

Анализ методов упрочнения, применяемых в промышленности. Основная цель упрочнения — повышение прочности, надежности и несущей способности вала при сохранении конструктивных размеров и марки стали.

В промышленности находят применение различные методы повышения прочности коленчатых валов — такие, как: термическое, термохимическое и механическое упрочнение. К термохимическим и термическим методам упрочнения относятся: азотирование, цементация и поверхностная закалка.

Так, эффективное увеличение циклической прочности коленчатого вала может быть достигнуто путем азотирования [2]. В этом случае усталостная прочность на изгиб увеличивается на 40 %, на кручение — на 30 %. Однако при этом рекомендуется изготавливать валы из хромомолибденовой и других легированных сталей.

Более существенное повышение усталостной прочности можно получить применением химико-термической обработки, в частности низкотемпературного цианирования по методу «Тенифор», который широко применялся в зарубежном дизелестроении [2]. Основным фактором, сдерживающим внедрение этого процесса в отечественном тракторостроении, является применение сильнодействующих ядовитых растворов. Указанные методы не получили распространения на заводах также из-за высокой стоимости обработки и значительных остаточных деформаций коленчатых валов.

Из термических методов наиболее применяемым в производстве является закалка шеек ТВЧ. Однако, по данным Ярославского моторного завода (ЯМЗ) [4], усталостная прочность вала после закалки ТВЧ шеек понижается на 14–17 %.

В результате исследований был предложен способ местной закалки поверхностей шеек коленчатых валов. Указанный **способ** включает индукционную поверхностную закалку одновременно шеек и участков плоскостей шеек между коренными и шатунными шейками, причем галтели от шеек к щекам остаются незакаленными.

Рис. 2. Чеканка галтелей: упрочнение вибрирующим роликом (а);
вибрационная гидравлическая чеканка (б); упрочнение сферическим бойком (в)

Наиболее применяемыми методами упрочнения коленчатого вала являются механические методы упрочнения галтелей:

- наклеп чеканкой (рис. 2);
- дробеструйный наклеп;
- упрочнение вибрирующим роликом;
- упрочнение обкаткой шариками;
- упрочнение обкаткой роликами.

Основой методов является повышение механических показателей поверхностного слоя металла в наиболее напряженных местах вала.

В опытах ЦНИИТМАШ с образцами, упрочненными методом чеканки по термически необработанному металлу, установлено повышение предела выносливости ступенчатых валов [5, 6]. Однако метод не нашел широкого применения в промышленности.

Результаты экспериментов на ЯМЗ по определению эффективности применения дробеструйной обработки дробью диаметром 0,8–1 мм для упрочнения коленчатого вала двигателя, продемонстрировали повышение его усталостной прочности на 25 % [7, 8]. Однако изготовление опытной партии валов показало наличие у дробеструйного наклепа таких недостатков, как низкая производительность, необходимость экранирования поверхности шеек в процессе обработки.

Обкатка галтелей. Физическая сущность метода состоит в следующем. С целью снижения шероховатости поверхности и упрочнения необходимо, чтобы остаточное изменение профиля галтели было ограничено внедрением пуансона на высоту шероховатости.

При этом имеет место «эстафетный» механизм распространения пластической деформации в металле от зерна к зерну и образование пересекающихся плоскостей скольжения. Очаг пластической деформации располагается у поверхности и направлен фронтально вглубь. Поэтому при подаче ролика на глубину шероховатости глубина наклепанного слоя распространяется на 0,2–0,8 мм в основной металл. По данным фирмы «Хайгеншайдт», при глубине наклепа 0,2–0,8 мм предел выносливости коленчатого вала повышается на 40–50 % [9].

Для упрочнения галтелей обкаткой шариками создано несколько конструкций деформирующего приспособления двух видов (рис. 3) [9, 10]:

- упрочняющим инструментом является один шарик, закрепленный в специальном сепараторе;
- галтели упрочняются одновременно несколькими шариками.

Рис. 3. Упрочнение галтелей обкатыванием шариком

Обкатка галтелей коленчатых валов на Владимирском тракторном заводе с помощью циркулирующих шариков со средним усилием 15000 Н на обойму, показали увеличение усталостной прочности примерно на 85 %.

Однако наличие заедания шариков, закатов металла, неравномерности и ступенчатости профиля накатанных галтелей не позволили рекомендовать метод для широкого использования в промышленности.

Основными схемами для упрочнения галтелей коленчатых валов роликами являются накатки (рис. 4, 5):

- профильными роликами с материальной осью вращения;
- профильными роликами без материальной оси вращения;
- роликами с перемещающейся площадкой контакта.

Рис. 4. Упрочнение галтелей обкатыванием роликами: обкатка галтелей раздвижными роликами без материальной оси вращения (а); обкатка галтелей роликами с материальной осью вращения (б), (в), (з); обкатка галтелей циркулирующими шариками (д)

Варианты упрочнения галтелей с учетом особенностей роликов представлены на рис. 5.

Рис. 5. Упрочнение галтелей обкатывающим роликом: ролик с переменной площадью контакта (а); клиновидный ролик (б); ролик с биением рабочего профиля с перемещающейся площадкой контакта (в)

Согласно данным Московского авиационного технологического института (МАТИ) [9], после обкатки галтелей тремя парами роликов усталостная прочность коленчатых валов двигателей Д-35 и Д-54 возрастает на 50–55 %.

Слабыми сторонами приспособления являются заклинивание и пробуксовывание рабочих роликов, недостаточная жесткость и отсутствие самоцентрирования.

Малые шарики и ролики без материальной оси вращения для накатки галтелей применены фирмой «Хайгеншайдт» [10]. Усталостная прочность после обкатки валов повышается на 50 %. Однако схема накатного устройства нетехнологична и сложна. Ее недостатки:

- накатные ролики характеризуются низкой стойкостью;
- требуется повышенная точность профиля галтелей и минимальные биения шеек вала.

Применение обкатных роликов с перемещающейся площадкой контакта повышает эффективность за счет увеличения удельных давлений.

По данным фирмы «ФУТ Бэрт» (США), повышение усталостной прочности коленчатых валов достигает 40 %.

Однако сложность конструкции, изготовления и доводки накатных роликов, большие затраты на оборудование для точной чистовой шлифовки и дефицитность этого оборудования являются основными недостатками применения роликов с переменной площадкой контакта.

Результаты испытаний упрочненных обкаткой роликами коленчатых валов двигателей ЯМЗ № 238 на Ярославском моторном и Владимирском тракторном заводах показали значительное увеличение усталостной прочности — до 70 %. Однако при больших усилиях обкатки возникают значительные деформации валов, возрастают длина вала и биение коренных шеек, нарушается параллельность образующих шатунных шеек [5].

Согласно исследованиям [9, 10], накатка галтелей коленчатых валов двигателя А-41 из стали 45 показала повышение усталостной прочности на 15 %, а накатка коленчатых валов двигателей Д-240 — на 30 %. Установлены основные условия снижения усталостной прочности валов, а именно:

- отклонения в структуре металла вследствие упрочнения;
- состояние поверхности после накатки;
- разброс механических свойств упрочненного поверхностного слоя.

На Минском, Алтайском и Харьковском моторных заводах был внедрен метод гидродинамического упрочнения галтелей коленчатых валов [10] на полуавтомате конструкции НИИТСХМ. Это оборудование позволяет одновременно упрочнять накаткой роликами все шейки вала со строго регламентированной силой на каждую пару галтелей.

Проверка эффективности процесса на натурных коленчатых валах тракторных двигателей СМД-60, Д-50 показала, что при рациональных режимах упрочнения усталостная прочность коленчатых валов может быть увеличена в два раза за счет:

- снижения шероховатости поверхности;
- повышения глубины и степени наклепа;
- увеличения остаточных напряжений в 1,3–1,5 раза относительно статического накатывания.

При этом установлено, что после гидродинамического упрочнения коленчатых валов и последующей правки их со стрелой остаточного прогиба 0,1–0,2 мм усталостная прочность на 60–70 % превышает усталостную прочность ненакатанных валов.

Однако у данного метода есть недостатки, которые приводят к перенаклепу поверхностного слоя галтелей и преждевременному выходу из строя роликов:

- несовпадение геометрии галтели с геометрией обкаточных роликов на накатном станке;
- недостаточная чистота исходной поверхности;
- резкие изменения в гидросистеме.

Исследованиями НИИТСХМ было также установлено, что метод накатки галтелей не может быть применен при обработке нежестких коленчатых валов типа 01-0401, ввиду появления в них пространственной деформации элементов (возникает значительное биение коренных шеек), требующей длительной и трудоемкой рихтовки и в конечном итоге снижающей усталостную прочность вала.

Наличие большого коробления вала 01-0401 (свыше 0,1 мм) после обкатки галтелей можно объяснить двумя факторами. Первый — технологическая наследственность, определяемая неблагоприятным распределением остаточных напряжений при механической и термической обработке. Второй — влияние зонного характера упрочнения — обкатка только галтелей и создание в них дополнительных остаточных напряжений, приводящих к значительной деформации элементов нежестких валов.

В работе [5] экспериментально подтверждена возможность ликвидации холодных правок в процессе механической обработки и устранения деформаций коленчатых валов при упрочнении за счет комплексного применения высокотемпературного и низкотемпературного отпусков. Однако ввиду отсутствия оборудования для отпуска валов

большой длины типа 01-0401 данная схема термообработки коленчатых валов пока не нашла применения в промышленности.

Указанное обстоятельство требует поиска новых эффективных методов упрочнения нежестких коленчатых валов, позволяющих одновременно с повышением усталостной прочности получить минимальную (в пределах 0,03 мм) деформацию вала за счет стабилизации остаточных напряжений.

Один из методов ППД, позволяющих провести равномерное упрочнение всей поверхности коленчатого вала и повысить релаксационную стойкость материала, — виброобработка [3]. В последние годы получили распространение методы виброударной и виброволновой упрочняющей обработки.

Перспективы применения виброволновой обработки коленчатых валов. После изготовления коленчатых валов 01-0401 для повышения их усталостной прочности требуется проведение упрочняющей операции. Это позволяет исключить повышение деформации вала. С учетом анализа конструктивных особенностей валов и особенностей процесса виброобработки взамен ППД методом обкатки галтелей разработаны схемы объемной вибрационной отделочно-упрочняющей обработки, позволяющие провести:

- стабилизацию валов (рис. 6, а, б, в);
- упрочнение всей поверхности со стабилизацией напряжений (рис. 6, а);
- упрочнение (рис. 6, б).

Рис. 6. Экспериментальные схемы виброобработки для проведения стабилизации коленчатых валов:

1 — вибратор; 2 — рабочая камера; 3 — коленчатый вал (детали); 4 — пружина; 5 — груз; 6 — платформа I; 7 — платформа II

В основу схемы виброобработки (рис. 6, а) положен эффект наложения на фиксированный коленчатый вал вибраций (создаются вибратором камеры и приводят дополнительно к колебаниям вала в поперечном к оси направлении) с одновременным ударным воздействием рабочих тел (шаров) на всю его обрабатываемую поверхность.

Характерные особенности схем виброобработки:

- в схемах (рис. 6) вал жестко крепится к виброплощадке или к стенке вибрирующей камеры с возможностью фиксированного поворота вокруг оси;
- в схеме (рис. 6, б) вал с камерой не связан и установлен на опорах, находящихся вне зоны обработки;
- в схеме (рис. 6, в) используется двойная виброплатформа;
- схемы (рис. 6) целесообразно реализовать перед окончательной обработкой коленвала — операциями шлифования и полирования шеек;
- схемы (рис. 6, а, б) после окончательной обработки коленчатого вала.

В качестве рабочих сред для обработки валов по схемам (рис. 6, а, б) могут быть использованы шары диаметром 9–10 мм.

В целом, метод вибробстабилизации на нескольких резонансных частотах с применением накладных вибраторов является довольно эффективным. Но, несмотря на это, следует отметить, что сложность и нежесткость коленчатых валов 01-0401 требует, соответственно, сложных схем реализации данного метода и специального оборудования типа установки «Мартин инжиниринг». В настоящее время в условиях Донского государственного технического университета создать такие условия довольно сложно. При этом следует отметить, что данным методом создается только стабилизирующий эффект.

Использование указанных различных конструктивных схем процесса виброударной обработки на виброустановке обычной конструкции со специальной оснасткой позволяет обрабатывать коленчатые валы. При этом возможно совмещение стабилизирующего эффекта с упрочнением путем равномерного и одновременного наклепа всей поверхности вала (включая щеки).

Для проведения экспериментальных исследований по виброупрочнению коленчатых валов различной конструкции был дан анализ целесообразности указанных схем обработки.

Можно сказать, что обработка согласно схемам крепления вала (рис. 6) дает стабилизирующий эффект, но не улучшает качество поверхностного слоя и не упрочняет его. При этом если речь идет о промежуточной операции, то требуется дальнейшая механическая обработка, которая может указанный эффект уменьшить или ликвидировать.

Обработка коленчатых валов согласно схемам, представленным на рис. 7, является оптимальной, т. к. вал окончательно обработан и конечная операция (виброобработка) позволяет улучшить качество поверхности, упрочняя поверхностный слой.

Рис. 7. Экспериментальные схемы виброобработки коленчатых валов для проведения упрочнения всей поверхности со стабилизацией напряжений (а); только для проведения упрочнения всей поверхности (б):

1 — вибратор, 2 — рабочая камера, 3 — деталь, 4 — пружина, 5 — рабочая среда, 6 — опора, 7 — платформа

Обработка по данной схеме (рис. 7, а) позволяет одновременно с упрочнением поверхностного слоя вала создать определенный стабилизирующий эффект, что может существенным образом сказаться на повышении усталостной прочности детали. При этом проведение последующих операций не требуется.

Результаты анализа различных вариантов обработки свидетельствуют о целесообразности использования схем, приведенных на рис. 7. Именно они были приняты в качестве основных при проектировании экспериментального образца оборудования для проведения исследовательских испытаний коленчатых валов 01-0401.

Виброударная обработка коленчатых валов тракторных и судовых двигателей осуществляется в рабочей камере объемом 100 и 350 дм³. Каждый вал, размещенный в специальном зажимном приспособлении, вращается вокруг своей оси под динамическим воздействием рабочей среды и ее циркуляционного движения. Это позволяет равномерно обрабатывать поверхности детали. Приспособление жестко крепится к стенкам рабочей камеры, т. е. была выбрана схема, обеспечивающая наибольшую интенсивность процесса. В качестве рабочей среды использовалась смесь стальных шаров диаметром 8–12 мм. Продолжительность процесса при $A = 3$ мм и $f = 25$ Гц составила 60 минут. При этом достигается:

- равномерное упрочнение поверхностного слоя всех элементов детали;
- отделка и скругление острых кромок;
- плавность переходов;
- исключение поводки нежестких валов, имеющей место при избирательной обработке обкатыванием галтелей крупногабаритных деталей.

Сравнительные испытания усталостной прочности исходных и упрочненных валов проводились на специальном стенде в институте АН БССР. Виброударная упрочняющая и стабилизирующая обработка крупногабаритных нежестких коленчатых валов дизелей выполнена и апробирована совместно с ОАО «Барнаултрансмаш». С целью повышения качества и долговечности коленчатых и распределительных валов автомобильных и тракторных двигателей аналогичные работы проводились на Минском моторном заводе и Саратовском заводе «Автотракторозапчасть».

Заключение. Анализ практики изготовления и эксплуатации коленчатых валов позволяет сделать следующие выводы.

1. Для изготовления коленчатых валов двигателей тракторов и сельхозмашин чаще всего используется сталь 45. Заготовки вала 01-0401 получают методом штамповки из круглого проката.

2. Технологический процесс механической обработки коленчатого вала 01-0401 весьма сложен и включает 5 правок. Это обусловлено значительным короблением вала в процессе изготовления, что, естественно, сказывается на снижении его усталостной прочности и ресурса работы.

3. Термообработка коленчатого вала 01-0401 предполагает закалку методом ТВЧ только шеек на 50–52 HRC₃. Вследствие этого в переходной зоне (близко к галтели) возникают растягивающие напряжения, влияющие на усталостную прочность вала.

4. При эксплуатации излом вала происходит по щеке. При этом галтель шейки нередко является местом возникновения усталостной трещины. Это объясняется пластической деформацией при изгибе вала, отклонениями по шероховатости поверхности, напряжениями растяжения.

5. Результаты анализа литературных источников и исследований показали следующее. Для повышения ресурса работы коленчатых валов двигателей в сельхозмашиностроении в качестве упрочняющей операции наиболее широко применяется накатка галтелей одновременно всех коренных и шатунных шеек на станках конструкции НИИТ-СХМ.

6. В НИИТСХМ экспериментально установлено, что накатка галтелей нежесткого вала 01-0401 не дает положительных результатов, ввиду значительных пространственных деформаций его элементов.

7. Большая поводка вала 01-0401, вероятно, обусловлена влиянием технологической наследственности. Кроме того, в данном случае имеет значение и зонный характер упрочнения. Пластически деформируются только поверхности галтелей, и в них создаются дополнительные остаточные напряжения, значительно изменяющие общую пространственную картину напряженности элементов нежесткой детали и приводящие к потере продольной устойчивости вала.

Библиографический список

1. Баранова, Н. В. Коленчатые валы тракторных двигателей повышенной надежности и долговечности: обзор / Н. В. Баранова. — Москва : НИИТракторосельхозмаш, 1965. — 68 с.
2. Булыгин, Ю. С. Состояние и перспективы повышения усталостной прочности коленчатых валов двигателей тракторов и сельскохозяйственных машин / Ю. С. Булыгин, З. М. Ройфберг, В. А. Таранта. — Москва : ЦНИИТЭИтракторосельхозмаш, 1974. — 61 с. — (Производство и технология).
3. Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 1999. — 621 с.
4. Головин, Г. Ф. Остаточные напряжения, прочность и деформации при поверхностной закалке ТВЧ / Г. Ф. Головин. — Ленинград : Машиностроение, 1973. — 144 с.
5. Деформирующая обработка валов / С. А. Зайдес [и др.] ; под ред. С. А. Зайдеса. — Иркутск : Издательство ИрГТУ, 2013. — 452 с.

6. Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием / И. Р. Аслanian [и др.]; под ред. С. А. Зайдеса. — Иркутск : Издательство ИрГТУ, 2014. — 560 с.
7. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / под ред. М. А. Мейерса, Л. Е. Мура. — Москва : Металлургия, 1984. — 512 с.
8. Структура и механические свойства аустенитной хромомарганцовистой стали после нагружения ударными волнами / И. Н. Гаври́лев [и др.] // Физика металлов и металловедение. — 1988. — Т. 65, вып. 4. — С. 801–803.
9. Высокоскоростное взаимодействие тел / В. М. Фо́мин [и др.]. — Новосибирск : Издательство СО АН РАН, 1999. — 600 с.
10. Берштейн, Г. Ш. Технология и оборудование для упрочнения коленчатых валов без поводок / Г. Ш. Берштейн // Повышение прочности и долговечности деталей машин ППД. — Москва : НИИИНФОРМТЯЖ-МАШ, 1970. — С. 27–37.

References

1. Baranova, N.V. Kolenchatye valy traktornykh dvigateley povyshennoy nadezhnosti i dolgovechnosti: obzor. [Crankshafts of tractor engines of increased reliability and durability: a review.] Moscow: NIITraktorosel'khomash, 1965, 68 p. (in Russian).
2. Bulygin, Y.S., Royfberg, Z.M., Taranta, V.A. Sostoyanie i perspektivy povysheniya ustalostnoy prochnosti kolenchatykh valov dvigateley traktorov i sel'skokhozyaystvennykh mashin. [Condition and prospects for improving the fatigue strength of tractor engines and agricultural machinery crankshafts.] Moscow: TsNIITEItraktorosel'khomash, 1974, 61 p. (Production and technology) (in Russian).
3. Babichev, A.P., Babichev, I.A. Osnovy vibratsionnoy tekhnologii. [Fundamentals of vibration technology.] Rostov-on-Don, DSTU Publ. Centre, 1999, 621 p. (in Russian).
4. Golovin, G.F. Ostatochnye napryazheniya, prochnost' i deformatsii pri poverkhnostnoy zakalke TVCh. [Residual stress, strength, and strain under the surface HFC hardening.] Leningrad: Mashinostroenie, 1973, 144 p. (in Russian).
5. Zaides, S.A., ed., et al. Deformiruyushchaya obrabotka valov. [Deforming processing of shafts.] Irkutsk: Izdatel'stvo IrGTU, 2013, 452 p. (in Russian).
6. Aslanyan, I.R., et al., Zaides, S.A., ed. Obrabotka detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem. [Part cutting by surface plastic deformation.] Irkutsk: Izdatel'stvo IrGTU, 2014, 560 p. (in Russian).
7. Myers, M.A., Murr, L.E., eds. Udarnye volny i yavleniya vysokoskorostnoy deformatsii metallov. [Shock waves and phenomena of high-speed deformation of metals.] Moscow: Metallurgiya, 1984, 512 p. (in Russian).
8. Gavril'yev, I.N., et al. Struktura i mekhanicheskie svoystva austenitnoy khromomargantsovistoy stali posle nagruzheniya udarnymi volnami. [Structure and mechanical properties of austenitic chord-manganese steel after shock wave loading.] The Physics of Metals and Metallography, 1988, vol. 65, iss. 4, pp. 801–803 (in Russian).
9. Fomin, V.M., et al. Vysokoskorostnoe vzaimodeystvie tel. [High-speed interaction of bodies.] Novosibirsk: Izdatel'stvo SO AN RAN, 1999, 600 p. (in Russian).
10. Berstein, G.S. Tekhnologiya i oborudovanie dlya uprochneniya kolenchatykh valov bez povodok. [Technology and equipment for hardening crankshafts without distortion.] Povyshenie prochnosti i dolgovechnosti detaley mashin PPD. [Increasing the strength and durability of PMP machine parts.] Moscow: NIINFORMTYaZhMASH, 1970, pp. 27–37 (in Russian).

Поступила в редакцию 23.07.2014

Сдана в редакцию 24.07.2014

Запланирована в номер 28.01.2015