

УДК 621.785

Г. А. КОСТЮКОВИЧ¹, А. В. ПОПРУКАЙЛО¹, Е. В. ОВЧИННИКОВ²,
А. И. ВЕРЕМЕЙЧИК³, В. М. ХВИСЕВИЧ³, Д. А. ЛИННИК²

¹Открытое акционерное общество «Белкард», Гродно, Беларусь

²Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь

³Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ КРЕСТОВИН КАРДАНЫХ ПЕРЕДАЧ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Представлена технология изготовления крестовин шарниров карданных передач из стали пониженной прокаливаемости 60ПП с использованием поверхностной индукционной закалки при глубинном нагреве. В результате исследований выполнено обоснование технологии термической обработки, позволяющей повысить статические и динамические нагрузки.

Ключевые слова: карданная передача, крестовина, износ, разрушение, нагрузка, контактные напряжения, цементация, индукционная закалка, твердость, испытания.

Введение. Трансмиссия, передающая энергию от источника к исполнительным механизмам – неотъемлемая часть транспортных средств, обеспечивающая работу других машин в силовых установках. Карданные передачи, являющиеся составной частью трансмиссии, должны обеспечивать ее необходимую компоновку для передачи энергии, компенсируя при этом возможные линейные, угловые погрешности, возникающие при монтаже и сборке транспортных средств и других машин, а также при движении транспортных средств в эксплуатационных условиях [1–3]. Карданные передачи соединяют отдельные агрегаты трансмиссий, например, двигатель с коробкой передач, раздаточной коробкой или редуктором ведущего моста в автомобилях.

Конструкцию карданной передачи определяют элементы, позволяющие при надежной передаче энергии от источника обеспечивать им в трансмиссиях необходимые линейные и угловые перемещения, а также простоту и легкость монтажа и демонтажа передач с соединяемыми агрегатами и исполнительными механизмами. Основу этих элементов составляют шарниры, обеспечивающие угловые перемещения. В конструкциях, используемых в трансмиссионных карданных передачах, наиболее широко распространены шарниры, имеющие крестовину, соединенную с вилками ведущего и ведомого валов.

Увеличение грузоподъемности и скоростей современных автомобилей потребовало усложнения трансмиссий, в том числе карданных передач, что привело к возникновению колебаний и вибраций. Повышение динамических нагрузок стало причиной преждевременных отказов шарниров и, в первую очередь, крестовин, как наиболее нагруженных элементов карданной передачи. Поэтому существует необходимость повышения прочности и надежности в эксплуатации

крестовин шарниров на базе конструкторских решений, связанных с рациональным выбором применяемых материалов и технологий изготовления [4–7].

Передняя крестовина является высоконагруженной деталью и испытывает статические, динамические, в том числе циклические, нагрузки. Через нее передается весь крутящий момент двигателя, изменяющийся как по величине в процессе движения автомобиля, так и по скорости приложения при броске сцепления. Кроме того, шипы крестовины, являясь в большинстве конструкций внутренней опорой игольчатого подшипника, испытывают высокие контактные напряжения, приводящие к дефектам, называемым бриллением (вдавливание иголок в тело шипов) [8–10].

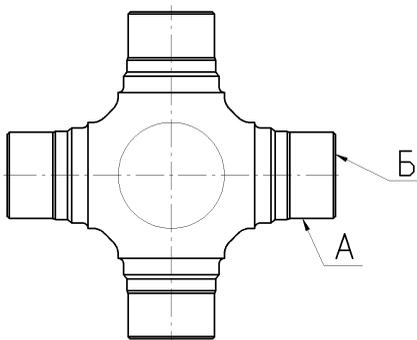
Практика показывает, что с целью достижения высокого сопротивления контактным напряжениям, твердость в зонах воздействия иголок должна превышать 61 HRC, а глубина слоя с высокой твердостью должна быть не менее 1,5 мм. У основания шипа для предотвращения хрупкого разрушения, свойственного стали с высокой твердостью, последнее может быть снижено до уровня 51–63 HRC. Такой уровень обеспечивает повышение сопротивления статическим и динамическим нагрузкам и достаточен для предотвращения износа от уплотнений, работающих у основания шипов. Глубина высокопрочного слоя у основания крестовины должна составлять 1,5–3,5 мм. При этом, если в вершине шипа глубина высокопрочного слоя может равняться радиусу шипа (т. е. быть сквозной), то у основания шипа глубина слоя выше 3,5 мм не допустима, так как при этом уменьшается характерный для поверхностной закалки высокий уровень остаточных напряжений сжатия, обеспечивающий достаточное сопротивление циклическим нагрузкам. При сквозном высокопрочном состоянии металла у основания шипа усталостная прочность крестовины снижается [11, 12].

Основная часть. В настоящее время крестовины (рисунок 1) изготавливаются из легированных цементируемых сталей типа 20ХГНТР, 20ХГТ, 15ХГН2ТА, которые подвергаются цементации на глубину 1,5–2 мм, закалке и отпуску.

Другой, более прогрессивный, способ заключается в том, что крестовины (рисунок 2) изготавливают из стали пониженной прокаливаемости 60ПП, подвергают поверхностной индукционной закалке при глубинном нагреве, а затем производят прерывистый самоотпуск [9, 10].

Преимущества данного способа заключаются в следующем.

- 1 Прочность крестовин увеличивается на 15–20 %.
- 2 Сталь 60ПП дешевле легируемых цементируемых марок стали.
- 3 Установка для индукционной закалки в несколько раз дешевле печей для цементации той же производительности.
- 4 Расходы, связанные с проведением термообработки, на газ, электроэнергию, жароупоры, амортизацию, также меньше.
- 5 Время термической обработки сокращается с 20 часов до 3 минут.

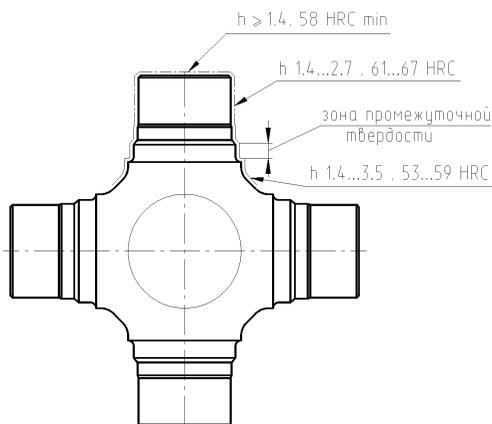


Цементировать: глубина слоя
1,6–1,9 мм;

На шипах А 60 HRC_{min}

На торцах Б 58 HRC_{min}

Рисунок 1 – Крестовина, изготовленная из стали 20ХГНТФ



Поверхностная индукционная за-
калка всей крестовины при глубин-
ном нагреве с прерывистым само-
отпуском

Твердость сердцевины 30–42 HRC.

Рисунок 2 – Крестовина, изготовленная из стали 60ПП

Предлагаемая поверхностная термообработка позволяет обеспечить повышение надежности крестовин по сравнению с уровнем, достигаемым при цементации. Индивидуальная обработка, характерная для индукционной закалики, дает возможность получить распределение характеристик по длине шипов в соответствии с действующими там нагрузками. Если при цементации твердость и глубина высокопрочного слоя постоянны по всей длине, то при индукционной закатке и прерывистом самоотпуске удается получить особо высокую твердость (до 67 HRC) и большую глубину высокопрочного слоя у вершины шипов, где действуют высокие контактные напряжения, и пониженную твердость 50–56 HRC при небольшой глубине этого слоя у основания шипа. Это обеспечивает высокое сопротивление максимальным на этом участке статическим, динамическим и циклическим нагрузкам при сохранении достаточного уровня сопротивления износу [9–10].

Однако индивидуальная обработка при индукционной закалке требует разработки технологии упрочнения для каждого типоразмера крестовин с созданием индивидуального оборудования и оснастки.

В качестве индуктора применяется устройство с расположением витков, приведенном на рисунке 3. Плюсом и минусом указано направление тока в витках 1. Крестовина 2 расположена на опоре 3. Нагрев в таком устройстве происходит с одновременным вращением крестовины на опоре. При этом магнитные силовые линии H пересекаются крестовиной в разных направлениях, что позволяет обеспечить равномерный нагрев рассматриваемого изделия, имеющего сложную форму.

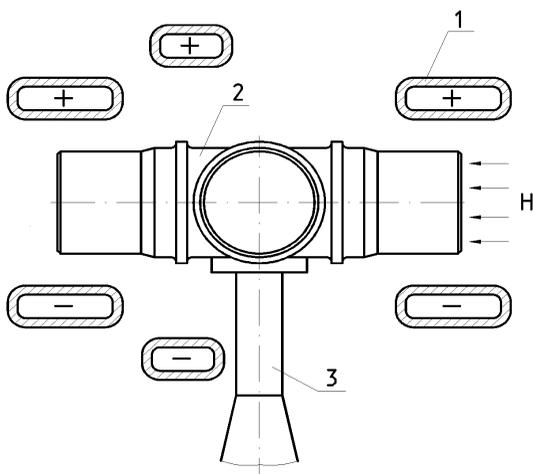


Рисунок 3 – Схема расположения крестовины в индукторе:
1 – витки индуктора; 2 – крестовина; 3 – опора

Охлаждающее устройство (рисунок 4) включает в себя сосуд 1, охватывающий крестовину 2 с зазором, камеру выравнивания давления 3, диафрагму 4 с центральным отверстием 5. В дне 6 имеется паз 7 для размещения опоры 15 крестовины. Боковые стенки 8, 9 сосуда 1 могут приподниматься, что делает доступным перемещение крестовины после нагрева внутри сосуда. Для подвода воды служит питающий патрубок 11, который отделяется от камеры выравнивания давления краном 12. В камере выравнивания давления имеется сливной патрубок 13 с краном 14. Перед закалкой поднимаются стенки 8, 9, смонтированные на корпусе охладителя 10, и в сосуд 1 вводится крестовина на опоре 15. Опора проходит через паз 7. Стенки опускаются и защелкиваются в нижнем положении. Затем открывается кран 12, одновременно закрывается кран 14 на сливном патрубке 13, и охлаждающая жидкость направляется под давлением в камеру выравнивания давления 3. Здесь

она образует направленный поток за счет изменения направления движения. Диафрагма 4 защищает крестовину от преждевременного попадания брызг воды, приводящих к образованию на поверхности трооститных пятен, что недопустимо.

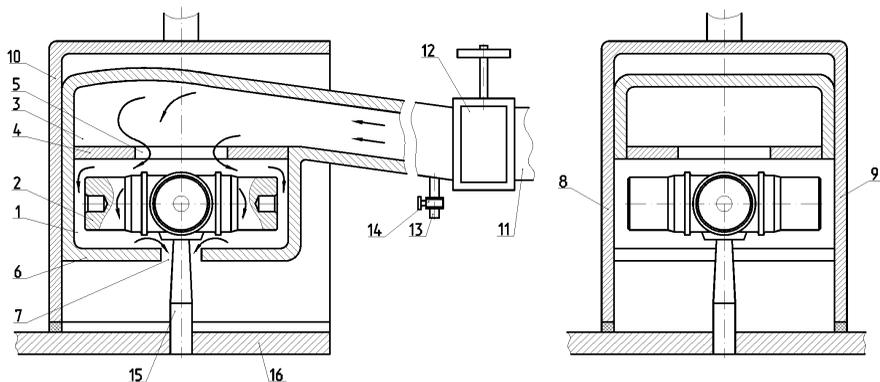


Рисунок 4 – Охлаждающее устройство:

- 1 – сосуд; 2 – крестовина; 3 – камера выравнивания давления; 4 – диафрагма;
 5 – центральное отверстие диафрагмы; 6 – дно; 7 – паз дна; 8, 9 – боковые стенки;
 10 – корпус охладителя; 11 – питающий патрубков; 12 – кран; 13 – сливной патрубков;
 14 – кран; 15 – опора; 16 – стол

Через центральное отверстие 5 диафрагмы 4 в сосуд 1 попадает сформировавшийся поток воды под высоким давлением, который обтекает крестовину со всех сторон и вытекает через щелевой паз 7. При этом в сосуде высокое давление воды поддерживается вследствие ограниченного размера паза 7. После окончания охлаждения кран 12 закрывается. Боковые стенки поднимаются, и крестовина на опоре 15 выдвигается из охладителя. Открывается кран 14, обеспечивающий слив оставшейся воды.

Нагрев крестовины в индукторе происходит равномерно. Охлаждение крестовин ведется по ряду режимов с целью определения качества нагрева и выбора оптимальных условий самоотпуска. Применяется прерывистое охлаждение, оно состоит из двух охладений различной длительности и паузы между ними. Нагретая выше критических температур крестовина охлаждается первый раз в течение времени, обеспечивающего образование вдоль всей поверхности изделия мартенсита на глубину слоя не менее 1,6 мм, после чего охлаждение прекращается.

Во время образовавшейся паузы тепло от более массивного (и обладающего большим запасом тепла) тела крестовины направляется к основанию шипов и далее к торцам. В какой-то момент температура у основания существенно выше (300 °С), чем у торцов (150 °С), соответственно отпуск мар-

тенсита выше, твердость меньше. При этом достигается неравномерная твердость вдоль шипов, обеспечивающая распределение характеристик, которое соответствует особенностям приложения нагрузок. Второе охлаждение в данном случае приводит к фиксации возникшего благоприятного распределения характеристик. Длительность второго охлаждения должна обеспечить сохранение некоторого остаточного тепла, которое существенно не влияет на распределение твердости, но дает возможность провести длительный самоотпуск торцов шипов при 100–150 °С, что снижает их склонность к сколам. Если не провести второе охлаждение, твердость шипов упадет ниже допустимого уровня.

Возможны два типа прерывистого самоотпуска.

1 С малым первым охлаждением, большим остающимся уровнем тепла в теле крестовины и, следовательно, с коротким временем паузы, за которое происходит нагрев основания шипа крестовины.

2 С относительно большим временем первого охлаждения и относительно большим временем паузы.

Первый тип позволяет получить существенное снижение твердости у основания шипа крестовины, но чувствителен к геометрическим отклонениям размеров поковки. Второй тип приводит к меньшему снижению твердости у основания шипа крестовины, но более стабилен.

С целью получения оптимального сочетания твердости на шипах и у основания шипа было экспериментально установлено, что время первого охлаждения должно составлять от 3 до 5 секунд, а соответствующее время паузы – до 7 с. Для обеспечения низкого самоотпуска (100–150 °С) второе охлаждение должно иметь длительность 3 с.

С учетом результатов экспериментов были изготовлены опытные образцы крестовин по двум технологиям: из стали 20ХГНТР с последующей цементацией, закалкой и отпуском и из стали 60ПП с последующей индукционной закалкой при глубинном нагреве с прерывистым самоотпуском.

Данные крестовины были подвергнуты испытаниям при действии статических нагрузок и усталостным при постоянной средней нагрузке цикла, соответствующей пределу прочности детали. При этом статические и усталостные испытания крестовин проводились при нагружении, обеспечивающем максимальный изгибающий момент в зоне галтели шипа, который реализуется при максимальном крутящем моменте двигателя, который возникает на первой передаче.

Результаты статических испытаний в условиях кручения изготовленных из сталей 60ПП и 20ХГНТР нескольких образцов крестовин приведены в таблице 1. Полученные в результате динамических испытаний на усталость зависимости амплитуды нагрузки от числа циклов нагружения приведены на рисунке 5.

Таблица 1 – Результаты статических испытаний крестовин при кручении

Материал крестовин	Крутящий момент без остаточной деформации и разрушения В ньютонах на метр			
	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
60ПП	29000	30000	29500	31500
20ХГНТР	25000	27500	22200	24000

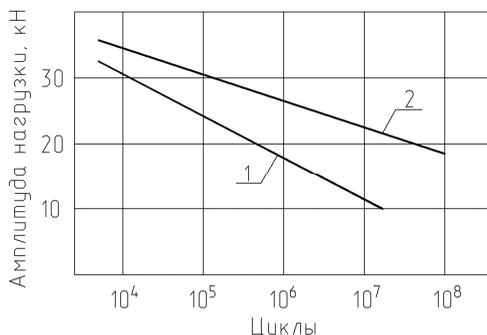


Рисунок 5 – Результаты усталостных испытаний крестовин:

1 – из стали 20ХГНТР; 2 – из стали 60ПП

Проведенные испытания деталей, изготовленных в соответствии с разными технологиями, показали:

- крестовины из стали 60ПП при кручении превосходят серийные из цементируемых марок стали по пределу прочности почти на 20 %;
- циклическая долговечность на всех уровнях нагружения у крестовин из стали 60ПП в 5–10 раз выше, чем у серийных из цементируемых марок стали.

Выводы.

1 Технология изготовления крестовин из стали 60ПП с нагревом токами высокой частоты обеспечивает повышение механических характеристик: увеличение твердости в местах работы иглол подшипника (большее сопротивление бринеллированию), статической и циклической прочности (по сравнению с изготовлением из легированных сталей и цементации).

2 Повышение статической прочности деталей обусловлено снижением хрупкости стали у основания крестовины вследствие снижения твердости на этом участке, а высокий уровень усталостной прочности связан с наличием значительных сжимающих остаточных напряжений, характерных для повышенной закалки с применением нагрева токами высокой частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Кравченко, В. И. Карданные передачи: конструкции, материалы, применение / В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, В. А. Струк. – Минск : Тэхналогія, 2006. – 409 с.
- 2 Малаховский, Я. Э. Карданные передачи / Я. Э. Малаховский, А. А. Лапин, Н. К. Веденев. – М. : Машгиз, 1962. – 156 с.

3 Проектирование универсальных шарниров и ведущих валов / А. Х. Беркер [и др.]. – Л. : Машиностроение, 1984. – 463 с.

4 Карданные передачи ОАО «Белкард» и перспектива развития их конструкций / Г. А. Костюкович [и др.] // Труды НАМИ. – 2019. – № 3. – С. 43–52.

5 Карданные передачи грузовых автомобилей. Проблемы и решения / С. Н. Иванов [и др.] // Автомобильная промышленность. – 1992. – № 11. – С. 12–15.

6 **Заславский, О. Я.** Системный подход как метод исследования долговечности карданной передачи / О. Я. Заславский // Автомобильная промышленность. – 1981. – № 11. – С. 21–24.

7 Методы создания конструкций карданных передач повышенного ресурса для наземных транспортных средств и сельскохозяйственной техники / Г. А. Костюкович [и др.] // Наука и техника. – 2023. – Т. 22, № 2. – С. 119–126.

8 **Иванов, С. Н.** Карданные передачи ведущих валов трансмиссий машин и систем (конструкция, теория, расчет, испытания, эксплуатация, ремонт) / С. Н. Иванов. – М. : НАМИ, 2014. – 232 с.

9 Fatigue resistance performance of universal cardan joint for automotive application / A. S. M. Cardoso [et al.] // Engineering Failure Analysis. – 2022. – Vol. 135. – Article 106128.

10 Material study and weight optimization of universal joints through finite element analysis / A. Agarwal [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3217. – Article 040008.

11 **Шепеляковский, К. З.** Самоотпуск стали при высокочастотной закалке / К. З. Шепеляковский. – М. : Машгиз, 1955. – 108 с.

12 **Костюкович, Г. А.** Технология изготовления крестовин карданных валов из стали пониженной прокаливаемости 60ПП / Г. А. Костюкович // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фізіка. Тэхніка. Інфарматыка. Біялогія. Хімія. Экалогія. Эканоміка. – 2003. – № 1. – С. 68–75.

*G. A. KOSTUKOVICH¹, A. V. POPRYKAILO¹, Y. V. AUCHYNNIKAU²,
A. I. VERAMEICHYK³, V. M. KHVISEVICH³, D. A. LINNIK²*

¹ *Open Joint Stock Company «Belcard», Grodno, Belarus*

² *Grodno State University named after Ya. Kupala, Grodno, Belarus)*

³ *Brest State Technical University, Brest, Belarus)*

TECHNOLOGY OF HEAT TREATMENT OF CARDAN TRANSMISSION CROSSES BY HIGH-FREQUENCY CURRENTS

The technology of manufacturing cardan transmission crosses from low-hardenability steel 60PP using surface induction hardening with deep heating is presented. As a result of the research, the technology of heat treatment is substantiated, it allows to increase its static and dynamic loads.

Keywords: cardan transmission, cross, wear, destruction, load, contact stresses, carburization, induction hardening, hardness, testing.

Получено 28.10.2024