

А. В. ПОПРУКАЙЛО¹,
Г. А. КОСТЮКОВИЧ¹, канд. техн. наук, доц.
М. Е. КИПНИС¹,
Е. В. ОВЧИННИКОВ², д-р техн. наук, доц.

¹ОАО «Белкард» (Гродно, Беларусь)

²Гродненский государственный университет им. Янки Купалы (Гродно, Беларусь)

СВОЙСТВА И СТРУКТУРА СТАЛИ 60ПП В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЕСТОВИН КАРДАНЫХ ПЕРЕДАЧ

Аннотация. Представлена технология изготовления крестовин шарниров карданных передач из стали пониженной прокаливаемости 60ПП с использованием поверхностной индукционной закалки при глубинном нагреве. Показаны свойства и структура стали 60ПП после объемно-поверхностной закалки при глубинном индукционном нагреве. По результатам 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, структура, 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.

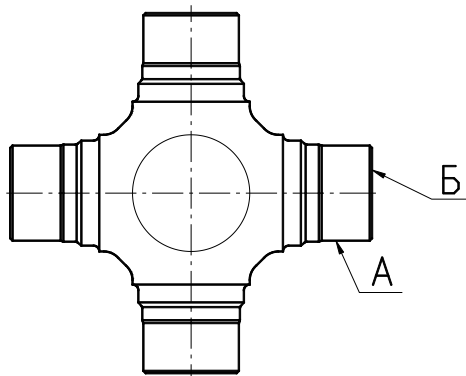
Увеличение грузоподъемности и скоростей современных автомобилей потребовало усложнения трансмиссий, в том числе карданных передач. В результате в трансмиссиях стали проявляться явления различных колебаний и вибраций. Повышение динамических нагрузок стало причиной преждевременных отказов шарниров и, в первую очередь, крестовин, как

наиболее нагруженных элемента карданной передачи. Поэтому возникает необходимость повышения прочности и надежности в эксплуатации крестовин шарниров на базе конструкторских решений, связанных с рациональным выбором применяемых материалов и технологиям изготовления [4-7].

Крестовина шарнира карданной передачи 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 бринеллированием (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 (рис.1) изготавливаются из легированных цементуемых сталей типа 20ХГНТР, 20ХГТ, 15ХГН2ТА, которые подвергаются цементации на глубину 1,5-2 мм., закалке и отпуску.



Цементировать: глубина слоя 1,6...1,9 мм;
На шипах А 60 HRCmin;
На торцах Б 58 HRCmin.

Рис. 1. Крестовина, изготовленная из стали 20ХГНТР

Решая проблемы повышения надежности, неизбежно приходится сталкиваться с задачей выбора материала крестовины, позволяющим добиться при оптимальном выборе вида термообработки значительного повышения прочностных характеристик и показателей износостойкости детали с одновременным снижением затрат в производстве.

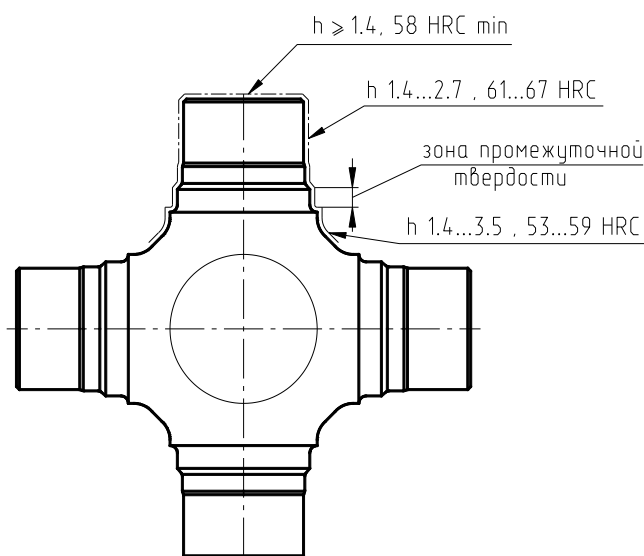
Примером такого подхода является разработанная в ОАО «Белкард» технология изготовления крестовин из стали пониженной прокаливаемости 60ПП (рис. 2), имеющей прокаливаемость более низкую, чем прокаливаемость стандартных конструкционных углеродистых сталей с равным содержанием углерода.

C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	S	P
		не более					
0,57 – 0,65	0,10 – 0,30	0,20	0,15	0,30	0,30	0,040	0,035

Примечание. Суммарная массовая доля марганца, хрома, никеля и меди не должна превышать 0,50%; допускается массовая доля остаточного титана не более 0,10%.

Рис. 2. Химический состав стали 60ПП

Разработанная технология, заключается в том, что крестовины (рис. 3) изготавливают из стали пониженной прокаливаемости 60ПП, подвергают поверхностной индукционной заалке при глубинном нагреве, а затем производят прерывистый самоотпуск [9-10].



Поверхностная индукционная заалка всей крестовины при глубинном нагреве с прерывистым самоотпуском;
Твердость сердцевины 30...42 HRC.

Рис. 3. Крестовина, изготовленная из стали 60ПП

Сталь пониженной прокаливаемости применяется для объемно-поверхностной заалки (ОПЗ) деталей тонких сечений, требующих высокой поверхностной твердости, вязкой сердцевины и подвергаемых термической обработке с нагревом ТВЧ. Они имеют малую склонность к росту зерна аустенита при нагреве под заалку, что не только предопределяет их высокое

сопротивление хрупкому разрушению в закаленном состоянии, но также резко снижает вероятность появления закалочных трещин и упрощает требования к стабильности и точности работы устройств, дозирующих режим индукционного нагрева под закалку.

Для обеспечения высоких прочностных свойств упрочняемых изделий прокаливаемость должна быть согласована с размером их рабочего сечения, с тем, чтобы глубина закаленного слоя по полумартенситу составляла 15 – 20% от диаметра или толщины детали в наиболее нагруженной ее зоне.

Рассматриваемая технология ОПЗ была внедрена взамен технологии изготовления крестовин из легированных цементируемых сталей типа 20ХГНТР, при котором использовалась ступенчатая термообработка: предварительно механически обработанные крестовины подвергались цементации на глубину 1,5...2 мм, а затем закаливались в масле. Отпуск проводился при 200°С. Основным недостатком данного вида термической обработки применительно к крестовинам карданных передач, работающим на изгиб и кручение, является необходимость закалки на мартенсит на относительно большую глубину, достаточно высокие затраты и узкий диапазон применения крестовин по крутящему моменту.

По общим требованиям после окончательной обработки крестовины карданных шарниров должны иметь твердость поверхностного слоя на цилиндрической поверхности шипов (61...67) HRC, на торцах шипов (61...66) HRC. Эффективная глубина поверхностного слоя после окончательной обработки не должна быть менее 0,8 мм, 0,9 мм, 1,6 мм, 1,8 мм (в зависимости от типоразмера крестовины по крутящему моменту). При этом для получения высокой статической и усталостной прочности крестовин необходимо обеспечить наличие поверхностного высокопрочного закаленного слоя (глубина должна находиться в определенном соотношении с размерами упрочняемого сечения), упрочнение сердцевины, наличие остаточных сжимающих напряжений в поверхностных слоях деталей.

Указанные требования были оптимально достигнуты с применением стали 60ПП именно благодаря применению ОПЗ при глубинном индукционном нагреве. Особенности этого метода является то, что глубина нагрева до надкритических температур больше, чем требуемая толщина закаленного слоя (при этом упрочняемые элементы прогреваются насквозь), деталь прокаливается на меньшую глубину, чем толщина нагретого слоя и зона закалки на мартенсит определяется не глубиной нагрева, а прокаливаемостью стали. При этом участки детали, расположенные глубже мартенситной зоны, нагреваемые до надкритических температур, при охлаждении приобретают структуру троостита закалки и существенно упрочняются (рис.4). Необходимость нагрева детали на большую глубину, требует применения относительно низкой концентрации энергии в зоне нагрева: удельная мощность обычно составляет (0,05...0,2) кВт/см², скорость нагрева в области фазовых превращений находится в пределах (2...10) град/сек, а время нагрева деталей

(20...100) с. Это определяет относительно небольшие значения установленных мощностей индукционных установок, в среднем $(0,1...0,2) \text{ кВт/см}^2$.

Термообработка ТВЧ крестовин проводится на полуавтоматических станках с поворотными столами. Поворотные столы имеют шпинделя, на которые устанавливаются крестовины.

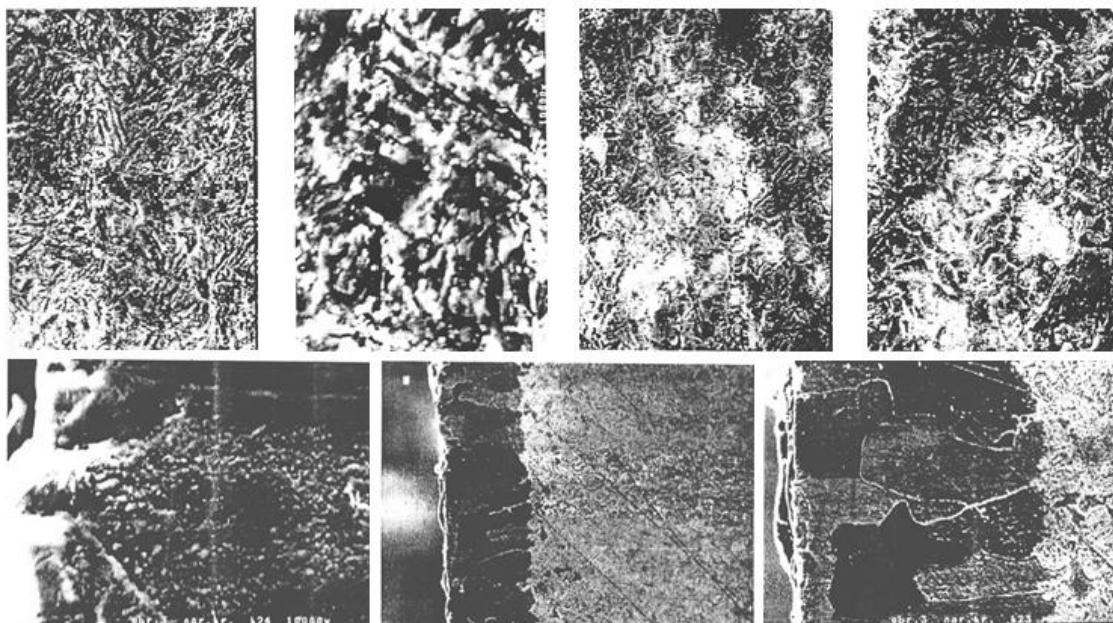


Рис. 4. Микроструктура крестовины из стали 60ПП после глубинного нагрева ТВЧ

Подача крестовин в индуктор, их нагрев и охлаждение осуществляется автоматически. Чтобы обеспечить равномерность нагрева деталей, предусмотрено их вращение в индукторе.

Равномерное охлаждение при закалке ТВЧ обеспечивается созданием избыточного давления порядка $(0,8...1) \text{ кгс/см}^2$ в камере охлаждения крестовин. Это достигается механизмом для создания избыточного давления, установленного под основным спрейером. Такое повышение давления в полости спрейера устраняет разрыхление потока, повышает температуру кипения воды и уменьшает связанную с ним неравномерность охлаждения закаливаемой поверхности.

Специфическая особенность метода ОПЗ заключается в том, что наряду с уменьшением прокаливаемости создаются условия для сквозной объемной термической обработки рабочего сечения крестовины, что значительно повышает конструктивную прочность. Кроме того, метод позволяет получить высокий комплекс механических свойств крестовины, превышающий уровень, достигаемый при цементации.

Преимущества разработанной технологии заключаются в следующем:

- Прочность крестовин увеличивается на 15-20 %.
- Сталь 60ПП дешевле легируемых цементуемых марок стали.
- Установка для индукционной закалки в несколько раз дешевле печей для цементации той же производительности.

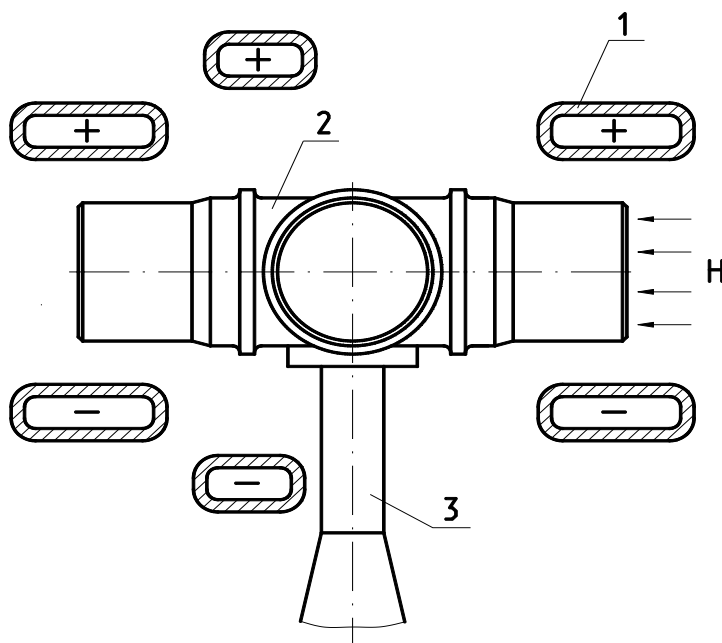
- Расходы, связанные с проведением термообработки, на газ, электроэнергию, жароупоры, амортизацию также меньше.
- Время термической обработки сокращается с 20 часов до 3 минут.

Кроме того, данный способ позволяет получить высокий комплекс механических свойств крестовин, превышающий уровень, достигаемый при цементации.

Индивидуальная обработка, характерная для индукционной закали, дает возможность получить распределение свойств по длине шипов, в соответствии с действующими там нагрузками. Так, если при цементации твердость и глубина высокопрочного слоя постоянна по всей длине, то при индукционной закатке и прерывистом самоотпуске удастся 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 закатке требует разработки технологии упрочнения для каждого типоразмера крестовин с созданием индивидуального оборудования и оснастки.

В качестве индуктора применяется устройство с расположением витков, приведенном на рис. 5.



1 – витки индуктора; 2 – крестовина; 3 – опора

Рис. 5. Схема расположения крестовины в индукторе

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 Н пересекаются крестовиной в разных направлениях, что обеспечивает равномерный нагрев изделия такой сложной формы, как крестовина.

Результаты статистических испытаний крестовин на кручение, изготовленных из стали 60ПП и стали 20ХГНТР, приведены в табл. 1.

Табл.1. Результаты статических испытаний крестовин на кручение

Материал крестовин	Крутящий момент без остаточной деформации и разрушения, Нм.			
	1	2	3	4
60ПП	29000	30000	29500	31500
20ХГНТР	25000	27500	22200	24000

Проведенные испытания крестовин, изготовленных по двум технологиям, показали, что крестовины из стали 60ПП при кручении почти на 20 % превосходят серийные из цементуемых марок стали по пределу прочности, а циклическая долговечность на всех уровнях нагружения у крестовин из стали 60ПП больше, чем у серийных из цементуемых марок стали в 5...10 раз.

Выводы

Технология изготовления крестовин из стали 60ПП с нагревом ТВЧ обеспечивает более высокий комплекс свойств: большую твердость в местах работы иглол подшипника (большее сопротивление бринеллированию), повышенную статическую и циклическую прочность, чем при ее изготовлении из легированных марок сталей и цементации.

Изучено влияние режимов индукционного нагрева и низкотемпературного отпуска на прочность и другие свойства закаленной стали.

Разработана технология объемно-поверхностной закалки при глубинном индукционном нагреве, которая имеет определенные преимущества в получении более высокого комплекса прочностных свойств, возможности снижать степень легирования стали и применять высокочастотные генераторы относительно низкой мощности. Принципиальная особенность этой технологии заключается в рациональном сочетании положительных качеств технологии поверхностной закалки (слой высокой твердости и прочности заданной глубины, благоприятная эпюра остаточных напряжений) и технологических процессов обычной термической обработки, как например, улучшения или цементации.

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. Веденеев. – М., 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. – Выпуск №3 (278). – С. 43-52.
5. Карданные передачи грузовых автомобилей. Проблемы и решения / С. Н. Иванов [и др.]. // Автомобильная промышленность. 1992. № 11. С. 35-37.
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 неземных транспортных средств и сельскохозяйственной техники / Г. А. Костюкович [и др.] // Наука и техника. 2003. 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, – Москва: 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 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 ГрДУ. – 2003. – №1. – С. 68-74.

Контакты:

ogt@belcard-grodno.by (Попрукайло Александр Витальевич);
gsktb@belcard-grodno.by (Костюкович Геннадий Александрович);
gsktb@belcard-grodno.by (Кипнис Марат Ефимович);
ovcin_1967@mail.ru (Овчинников Евгений Витальевич).