

УДК 62-242.3

Околович Г. А.
Околович А. Г.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ

Основным материалом для изготовления поршневых колец (ПК) служит чугун. По строению своей металлической основы он близок к стали, но чугун весьма существенно отличается от неё своим строением. Его металлическая основа пронизана микропорами, заполненными графитом. Наличие микропор в чугуне несколько снижает его механические свойства по сравнению со сталью, но вместе с тем делает более износостойким, т.к. свободные включения графита служат своеобразной смазкой сопряжённых поверхностей [1, 2].

Однако это преимущество поршневых колец не реализуется в эксплуатации двигателей, так как рабочие поверхности колец для повышения износостойкости покрываются хромом толщиной в 0,8–1,5 мм, а после износа хромированного слоя кольца практически непригодны к работе.

Во всём мире производители двигателей внутреннего сгорания постоянно ведут поиск новейших технологий в изготовлении деталей цилиндропоршневой группы. Одно из направлений – это изготовление поршневых колец из стального проката, которые по отношению к чугунным обладают уникальными свойствами [3].

Иное применение стали, как материалы для поршневых колец, возникло с созданием стальных пластинчатых колец. Исходным материалом служит тянутая или катаная стальная лента или плоская проволока относительно небольшой толщины, из которой изготавливаются имеющие форму поршневых колец пластинки, устанавливаемые одна на другую по несколько штук в одну канавку поршня. Такая конструкция колец выдвигает много новых проблем не только в многочисленности применяемых конструктивных форм, но и разнородности в применяемых материалах.

В тоже время стальные пластинчатые кольца не могут применяться в качестве уплотнительных колец в верхних канавках поршня [4].

Известен способ изготовления кольцевых упругих элементов протягиванием стальной проволоки через профильные волочильные ролики, обжатием 40–60 % навивку на оправку и отпуск 280–300 °С [5].

Однако, при достижении высоких упругих свойств ($\sigma_{0,01} = 1200$ МПа) приобретаются низкие показатели пластичности ($\delta = 3–4$ %), которые приводят к поломкам от значительных динамических нагрузок во время работы двигателя и потери упругих свойств стальных компрессионных поршневых колец, т.к. при эксплуатации двигателя тепловая нагрузка и механические сотрясения вызывают изменения размеров замка и пропорциональное снижение упругости.

Целью работы является создание технологии производства цельнонатянутых стальных ПК двигателей внутреннего сгорания с высокими эксплуатационными характеристиками методом холодной пластической деформации.

Для достижения поставленной цели в настоящей работе были поставлены следующие задачи:

1. Провести расчет пластической деформации для получения заданного профиля компрессионных колец.
2. Выполнить расчет переходов для получения сложного профиля маслосъемных ПК.
3. Определить температуры рекристаллизационного отпуска для получения ориентированной структуры и равномерной деформации при волочении.
4. Определить температуры термофиксации и термостабилизации ПК.
5. Исследовать эффективность прирабатываемости и износостойкости ПК.
6. Промышленные испытания и внедрение в производство.

Для получения профиля компрессионных поршневых колец нами разработана технология волочения – прокатки проволоки из пружинной стали 65Г (ГОСТ 14959-79), (рис. 1) [6].

Переходом волочения называется степень изменения размеров поперечного сечения металла при прохождении через одну волоку. Обычно процесс волочения ведут в несколько переходов, при которых поперечные сечения заготовки постепенно приближаются к сечению готового изделия.

Для стабильного протекания процесса необходимо, чтобы у протянутой части был определенный запас прочности и пластичности.

В тоже время, поставляемый металлургами прокат после отжига или нормализации не однозначен по структурному состоянию. Поэтому для получения стабильных результатов упрочнения нами предлагается выполнять рекристаллизационный отжиг сталей при температуре ниже A_{c1} на 10–20 °С в течение часа [7].

Процесс волочения следует вести при оптимальных условиях, т. е. с минимальным числом переходов с применением эффективных смазок, высококачественного волочильного инструмента.

Достижение высокого упрочнения сталей в результате холодной пластической деформации является следствием увеличения числа дефектов строения при изменении характера их распределения и измельчения пластинок феррита и цементита. В тоже время значения свойств, характеризующих пластичность и вязкость стали, с ростом степени деформации увеличиваются лишь до обжата 75–82 %, а затем снижаются [8].

Поэтому для получения профиля компрессионного поршневого кольца нами разработана технология волочения – прокатки проволоки d 5–6 мм из пружинной стали 65Г, за один проход проволоки через профильные волочильные ролики с обжатием 70...75 % с последующим отпуском при 500 °С для залечивания деформационных дефектов и повышения пластичности перед навивкой профиля на отправку. Навивка полученного профиля компрессионного кольца на оправку с натяжением сопровождается динамическим старением под нагрузкой при последующем термостабилизационном отпуске при температуре 550 °С и протекание процессов полигонизации, т. е. выстраивание дислокационных стенок и повышение механических свойств деформированной структуры, т. к. окончательные свойства упругих элементов определяются условиями отпуска, в процессе которого реализуются потенциальные возможности повышенного сопротивления малым пластическим деформациям.

Во время нагрева до 550 °С и выдержки развивается процесс полигонизации – упорядочение дислокационной структуры, определяющий структурную стабильность и долговечность в эксплуатации. Кроме того, достигается повышение предела текучести, упругости и выносливости, а также пластичности. Упрочнение происходит в результате закрепления подвижных дислокаций атомами примесей в дислокационных стенках, возникающих при полигонизации деформированного металла.

Для изготовления маслосъемных поршневых колец выбрана нержавеющая сталь 20Х13 (ГОСТ 5632–72), которая относится к мартенситному классу, обладает стойкостью против общей коррозии в атмосферных условиях, в слабых растворах кислот, солей и в других слабоагрессивных средах.

Так как в исходном состоянии в структуре стали присутствуют избыточные карбиды, которые существенно препятствуют пластической деформации, необходимо выполнить рекристаллизационный отжиг при температуре 800–820 °С.

Изготовление стальных маслосъемных поршневых колец сложного профиля с перфорированными пазами производят пятикратно протягиванием проволоки из стали 20Х13 диаметром 5...6 мм через профильные волочильные ролики, так как свойства стали после холодной деформации зависят не только от величины общей или суммарной деформации, но и от величины частных обжатий. Чем меньше эти обжатия, тем медленнее нарастает прочность, тем выше степень суммарной деформации и тем выше абсолютная величина механических свойств.

Первое деформационное упрочнение протягиванием проволоки через профильные волоочильные ролики производят с обжатием 35...40 % для получения высокой твердости и ориентированной структуры. После него осуществляют рекристаллизационный отпуск при температуре 660...680 °С в течение одного часа для снижения твердости до 20...22 HRC и повышения пластичности во избежание растрескивания при следующем деформационном упрочнении.

Второе и третье деформационное упрочнение протягиванием проволоки осуществляют с обжатием 20...25 % и 10...15 %, соответственно, необходимое для формирования профиля маслосъемного кольца с последующим рекристаллизационным отпуском при 660–680 °С в течение часа для снятия напряжений. Кроме того, после отпуска достигаются высокие степени обжатия, связанные с получением ориентированной структуры, что способствует равномерной деформации при волочении (рис. 2).

Четвертое деформационное упрочнение 15...20 % обеспечивает необходимое деформационное упрочнение и получение заданного профиля. После чего выполняют пробивку перфорированных пазов и калибрующее обжатие 6...8 % для получения готового профиля маслосъемного поршневого кольца с дальнейшей навивкой на оправку и термофиксации при 500 °С в течение одного часа (рис. 3, 4) [9].

Процесс термофиксации имеет диффузионный характер. Известно, что еще до температур рекристаллизации протекают процессы отдыха и полигонизации, которые приводят к возврату физических механических свойств.

На оправке профиль разрезают на отдельные кольца, которые устанавливают в гильзу и в ней подвергают термостабилизации при температуре 550 °С в течение часа для протекания процессов полигонизации, т. е. выстраивание дислокационных стенок, повышение комплекса механических свойств деформационной структуры, т. к. окончательные свойства пружин определяются условиями отпуска, в процессе которого реализуется потенциальные возможности для повышения сопротивления малым пластическим деформациям и всего комплекса прочностных свойств.

В результате процессов скольжения и переползания дислокаций образуются дислокационные стенки одного знака, которые являются малоугловой границей, разделяющей соседние субзерна с небольшой разориентировкой решеток. Таким образом, во время термостабилизации 550 °С деформированного металла и выдержкой, развиваются процессы полигонизации – упрочнение дислокационной субструктуры, определяющий структурную стабильность и долговечность в эксплуатации поршневых колец [10].

Производительность и качество поршневых колец во многом зависит от волоочильных роликов. Вследствие высоких контактных нагрузок, значительных сил трения в поверхности инструмента к волоочильным роликам предъявляются высокие требования по точности размеров и форм. Правильный выбор марки стали для изготовления роликов определяет стабильность формоизменения профиля поршневых колец и стойкость инструмента [11].

Из большой группы штамповых сталей для холодного деформирования металла выделяются высокопрочные стали, используемые с высокими удельными силами $\sigma_{0,2} \approx 2000$ МПа и динамическими нагрузками (6Х4М2ФС–Ди55, 8Х4В2С2МФ–ЭП761, Х6ВФ и Р6М5). Для получения высокой прочности эти стали должны иметь мелкое зерно и сравнительно небольшое количество карбидной фазы при ее равномерном распределении. Повышенное сопротивление пластической деформации достигается получением твердости 58–62 HRC, если в структуре отсутствует остаточный аустенит [12].

Износостойкость можно повысить химико-термической обработкой (азотирование, карбонитрация и др.), которая создает на поверхности слой с твердостью 70–80 HRC. При этом повышается усталостная прочность вследствие объемных напряжений сжатия.

Однако такие стали должны обладать повышенной теплостойкостью, т. е. обрабатываемые на вторичную твердость при дисперсионном твердении.

Работоспособность холодноштамповочного инструмента в условиях эксплуатации характеризуют следующие критерии прочности:

- 1) $\sigma_{изг}$; $\sigma_{0,2}$; $\sigma_{0,02}$; КС, которые определяют допустимые рабочие напряжения;
- 2) циклическая долговечность (малоцикловая усталость) и износостойкость – определяют долговечность инструмента.

Поэтому, в качестве основного пути повышения стойкости инструмента следует считать увеличение усталостной прочности, в зависимости от твердости, прочности на изгиб, ударной вязкости, предела текучести и упругости.

Однако, холодноштамповочный инструмент не работает на пределе выносливости, а преждевременно выходной из строя из-за разрушений по малоцикловой усталости.

Экспериментально установлено, что максимальные значения малоцикловой усталости достигаются при твердости 58–60 HRC и высокой прочности стали (4000 МПа). При этом наивысшие значения усталости обеспечиваются при дисперсионном твердении. Т. к. выделившиеся карбиды упрочняют матрицу и блокируют движение дислокаций.

Несмотря на некоторое различие между волочильными и шлиценакатными роликами существует много общего в условиях их работы, причин выхода из строя инструмента, зависимости его работоспособности от качества изготовления и выбора материала, режимовковки, термической обработки и способов поверхностного упрочнения; т. е. – это тяжело нагруженный инструмент холодного деформирования.

Вследствие высоких контактных нагрузок, значительных сил трения в поверхности инструмента, волочильные и шлиценакатные ролики изготавливаются из высокопрочных инструментальных сталей Х6ВФ, 6Х4М2ФС (ДИ55) ГОСТ 5950-00 или быстрорежущей стали Р6М5 с высоким сопротивлением пластической деформации. Заготовку получают ковкой из круга 80-100мм. с осадкой на круг диаметром 180 мм.

Для волочильных роликов из сталей Х6ВФ, 6Х4М2ФС (ДИ55) разработаны режимы термической обработки на вторичную твердость (дисперсионное твердение):

Закалка от 1020 °С, охлаждение в масле.

Отпуск 520–540 °С на твердость 56–58 HRC [13].

Для повышения твердости, износостойкости, контактной прочности и выносливости инструмента проведены следующие исследования упрочнения поверхности роликов:

- 1) кратковременное газовое азотирование;
- 2) ионное азотирование;
- 3) карбонитрация в расплаве солей.

Производственные испытания шлиценакатных роликов (условия работы которых аналогичны волочильным роликам) показали повышение стойкости инструмента от 1,5 до 3-х раз. Наилучшие результаты достигаются при карбонитрации в расплаве солей и газовой карбонитрации (табл. 1).

Таблица 1

Стойкость шлиценакатного инструмента в зависимости от режимов термообработки и карбонитрации

№ п/п	Марка стали	Температура		Твердость, HRC	Стойкость, кол-во валов	
		закалки	Отпуска		18ХГТ, НВ 200	
					Сталь 45, НВ 250	
					без карбонит.	после карбонитр.
1	Р6М5	1180	580	59–61	<u>10000</u>	<u>40000</u>
					7000	31000
2	Р6М5	1140	580	56–58	<u>25000</u>	<u>90000</u>
					18000	56000
3	Х6ВФ	1020	520	56–58	<u>20000</u>	<u>84000</u>
					15000	50000
4	6Х4М2ФС	1040	540	58–60	<u>30000</u>	<u>120000</u>
					25000	80000

Главным фактором, ограничивающим срок службы деталей машин различного назначения, является абразивное изнашивание.

Для исследования износостойкости упрочненных поверхностей была выбрана схема изнашивания неподвижно-закрепленными частицами. Сущность ее состоит в том, что производится трение испытуемого и эталонного образцов о поверхность с закрепленными частицами при статической нагрузке и отсутствии нагрева, и полученные результаты сравниваются. В качестве абразивного материала использовался диск из стали 38Х2МЮА, аналогичной материалу гильзы цилиндра.

Сравнительные испытания износостойкости стальных маслоъемных поршневых колец из стали 20Х13 проводились после упрочнения различными способами:

1. Ионного азотирования.
2. Оксикарбонитрации в расплаве солей.
3. Газовой карбонитрации.
4. Электролитического хромирования.

Результаты испытаний стальных маслоъемных поршневых колец на износостойкость из стали 20Х13 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Механические характеристики поршневых колец после испытаний на износостойкость

№ п/п	Способ упрочнения	Микротвёрдость, HV ₁₀₀	Глубина слоя, мкм	Потеря массы, МГ
1	Ионное азотирование	915–1158	5–7	18 за 3 часа
2	Оксикарбонитрация в расплаве солей	1158–1513	10–12	33 за 12 часов
3	Газовая карбонитрация	1158–1513	12–15	23 за 15 часов
4	Электролитическое хромирование	940–1088	30–40	35 за 13 часов

Обработка стали при карбонитрации дает на поверхности слой, имеющий гексогональную структуру, присущую нитриду железа Fe₃N и карбиду железа Fe₃C – карбонитридная фаза Fe₃(NC). Размеры слоя – фазы Fe₃(NC) зависят от температуры процесса и длительности насыщения.

В тоже время карбонитридный слой образуется не только при длительных процессах, а наблюдается уже после 3–5 минутной обработки. Но с момента образования слоя и установления на его границе предельных концентраций диффузионный процесс начинает идти фронтально от поверхности в глубь.

В тоже время азотированный слой значительно уступает карбонитрированному по прирабатываемости изделий и износостойкости. Применение карбонитрации для обработки деталей обеспечивает повышение усталостной прочности на 50–80 %, резкое повышение сопротивления износу по сравнению с цементацией, нитроцементацией, азотированием. Полученные на поверхности нитридные фазы даже при отсутствии смазки не проявляют склонности к схватыванию.

Для улучшения прирабатываемости и повышения износостойкости нами разработана технология трехслойного упрочнения поверхности поршневых колец, которая включает карбонитрацию, ионную имплантацию нитрида титана с последующим сульфидированием в электролитной плазме. В результате на поверхности образуется пористый слой Fe₂S 8–10 мкм и твердостью 915–1158 HV, что улучшает прирабатываемость, т. е. отсутствие задиров и схватывания трущихся поверхностей, повышаются износостойкости и эксплуатационная стойкость ПК.

ВЫВОДЫ

1. Выполнен расчет переходов для получения заданного профиля поршневых колец, по которому разработана конструкторская документация для изготовления волоочильных роликов.
2. Изготовлены и проведены испытания опытных волоочильных роликов из инструментальных сталей Х6ВФ, 6Х4М2ФС и Р6М5.
3. Проведены испытания износостойкости волоочильных роликов и поршневых колец после поверхностного упрочнения карбонитрацией и сульфидирования.
4. Холодная пластическая деформация, термические процессы, упрочнение рабочих поверхностей инструмента и поршневых колец обеспечивают производство качественных колец.
5. Разработанная технология позволяет выпускать поршневые кольца для дизелей, бензиновых ДВС, компрессоров и др. установок в диапазоне \varnothing 60–180 мм. Достигается повышение работоспособности цилиндропоршневой группы в 1,5–2,0 раза по сравнению с чугунными кольцами.
6. Технологический процесс изготовления поршневых колец освоен в производстве ООО ЦРТ «Алтай». Комплектующие колец \varnothing 80–130 мм, а также \varnothing 180 для К-700 поставляются на рынок запчастей Алтайского края.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энгелиш К. Поршневые кольца. Теория, изготовление, конструкция и расчет : в 2-х томах. Т. 1. – Машгиз, 1962. – 583 с.
2. Адамович А. В. Конструкция и расчет стальных вытых поршневых колец / А. В. Адамович // Автомобильная промышленность. – 1962. – № 1. – С. 4–7.
3. Duck Gerhard / Tendenzen in der Kolbenringentwicklung // Gerhard Duck // MTL. – 1969. – № 3. – С. 13–16.
4. Молдаванов В. П. Производство поршневых колец ДВС / В. П. Молдаванов. – М. : Машиностроение, 1980. – 190 с.
5. Рахитадт А. Г. Пружинные стали и сплавы / А. Г. Рахитадт. – М. : Металлургия, 1971. – 495 с.
6. Пат. 2341362 Российская Федерация, МПК⁷ C1 B23P 15/0. Способ изготовления стальных поршневых колец / Околович Г. А., Карпов А. П., Околович А. Г., Карпов С. В. – № 2007109549/02 ; заявлено 03.15.07; опубл. 20.12. 08, Бюл. № 35.
7. Потёмкин К. Д. Термическая обработка и волочение высокопрочной проволоки / К. Д. Потёмкин. – М. : Металлургиздат, 1963. – С. 382.
8. Богатов А. А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, С. В. Смирнов. – М. : Металлургия, 1984. – 413 с.
9. Пат. 2318645 Российская Федерация, МПК⁷ C2 B23 P15/06 Способ изготовления стальных масло-съемных поршневых колец / Околович Г. А., Карпов А. П., Околович А. Г. – № 2005134301/02 ; заявл. 11.07.05; опубл. 10.03. 08, Бюл. № 7.
10. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. – М. : Металлургии, 1978. – 390 с.
11. Пат. 2380210 Российская Федерация, МПК⁷ C2 B23P 15/06. Способ изготовления стальных масло-съемных поршневых колец / Околович Г. А., Карпов А. П., Околович А. Г. – № 2008115773/02 ; заявл. 21.04.08 ; опубл. 27.01. 10, Бюл. № 3.
12. Геллер Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. – М. : Металлургия, 1983. – 525 с.
13. Околович Г. А. Инструментальные стали для штампов холодного деформирования / Г. А. Околович. – МиТОМ, 2006. – С. 3–9.

Околович Г. А. – д-р техн. наук, проф. АлтГТУ;

Околович А. Г. – аспирант АлтГТУ.

АлтГТУ – Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул, Россия.

E-mail: karpov43@list.ru