

СЕРИЯ 2. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Поршневые кольца

д.т.н. проф. Околович Г.А., к.т.н. Околович А.Г.
АлтГТУ им. И.И. Ползунова
8 (3852) 290-963, e-mail: mitom@mail.altstu.ru

Аннотация. Разработана технология изготовления стальных поршневых колец методом холодной пластической деформации при волочении. Определены режимы термической обработки при рекристаллизационном отпуске, термофиксации и термостабилизации. Выполнен расчет степени пластической деформации при волочении. Проведено обоснование выбора инструментальных сталей. Исследованы способы химико-термической обработки волочильных роликов и стальных поршневых колец.

Ключевые слова: стальные поршневые кольца, волочение; деформация, термическая обработка, рекристаллизация, термостабилизация, термофиксация, карбонитрация, износостойкость, инструмент, ролики, полигонизация, дислокация.

Производители двигателей внутреннего сгорания постоянно ведут поиск новых технологий в изготовлении поршневых колец. Одно из них – это поршневые кольца из стального проката с высокой механической прочностью вследствие оптимального профильного деформационного упрочнения при волочении.

Технологический цикл изготовления поршневых колец состоит из предварительной термической обработки заготовки; подготовки поверхности заготовки; одно- или многократного волочения; промежуточной термической обработки.

Одним из возможных путей улучшения деформируемости металла при обработке давлением является повышение ресурса пластичности предварительной термической обработки заготовки. Этот путь наиболее эффективен, когда задачу улучшения пластичности нельзя или нерационально решать посредством изменения схемы деформирования. Нами установлено, что, независимо от состояния поставки, следует выполнить рекристаллизационный отжиг на 1020°C ниже As1 .

Компрессионные ПК изготавливают из пружинной стали 65Г после холодной пластической деформации ($\varepsilon = 50\ldots 70\%$) при протягивании проволоки диаметром 5-6мм через профильные волочильные ролики. Упрочнение при пластической деформации является результатом роста плотности дислокаций. В то же время, значения свойств, характеризующих пластичность и вязкость стали, с ростом степени обжатия увеличиваются лишь до обжатия до 75%, а затем снижаются. Такое состояние наклепанного металла является предельным; при попытке продолжить деформирование металл разрушается. Это объясняется возникновением очагов разрушения в результате дробления цементитных пластинок, расположенных в сильно упрочненной ферритной матрице.

Для залечивания деформационных дефектов и повышения пластичности стали перед навивкой профиля на оправку осуществляют рекристаллизационный отпуск при 500°C , 1ч. Навивка полученного профиля компрессионного кольца на оправку с натяжением сопровождается динамическим старением при последующем термостабилизационном отпуске 550°C 1ч., и полигонизацией, т.е. упорядочением и стабилизацией структуры.

Исследования показали, что при динамическом старении отмечаются признаки полигонизации, изменяется морфология и становятся более упорядоченно распложены частицы избыточной фазы. При этом дислокации преобразуются в более устойчивые системы в поле упругих напряжений.

В результате динамического старения резко повышается значение предела упругости,

заметно увеличивается предел текучести и несколько повышается предел прочности, достигаются значительно более высокие значения K_{ic} , усталостной прочности и релаксационной стойкости.

Так, после динамического старения предел упругости стали 65Г достигает 2100 МПа, что на 20...30% выше, чем после закалки и отпуска.

Характеристики пластичности – относительное удлинение и относительное сужение – при динамическом старении почти не изменяются. Существенно также, что повышение указанных свойств прочности наблюдаются в широком интервале температур динамического старения.

Главным достоинством динамического старения при отпуске под нагрузкой является то, что структурное и напряженное состояние стали оказывается таким, каким оно будет в деталях и конструкциях в условиях их эксплуатации. Это определяет большую стабильность свойств и повышение надежности. Для получения сложного профиля **маслосъемного кольца** необходимо многократное волочение (Рисунок 1).

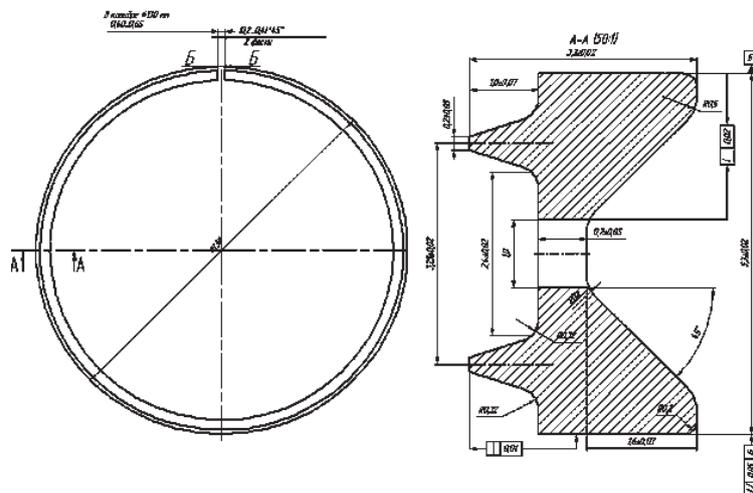


Рисунок 1. Маслосъемное кольцо

Количество переходов волочения обусловлено получением изделий с заданными прочностными характеристиками и высокими требованиями к поверхности, так как увеличение числа переходов способствует удалению мелких поверхностных дефектов и снижению шероховатости поверхности.

С целью получения повышенной производительности и стойкости инструмента величину единичного обжатия, вследствие упрочнения металла на каждом переходе, постепенно уменьшают. Однако уменьшение обжатия должно быть строго согласовано с кривой упрочнения металла таким образом, чтобы сопротивление деформации в каждом переходе были равными или близкими по величине. При этом единичное обжатие не должно превышать величину 35...40%, а суммарное – 95% (Рисунок 2).

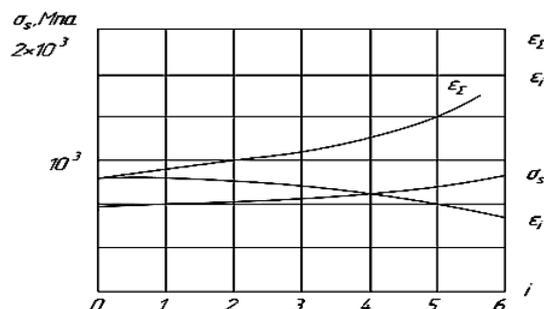


Рисунок 2. Графики изменения σ_s , ϵ_Σ , ϵ_i по переходам

С нарастанием степени общей деформации (ϵ_Σ) в процессе волочения, вследствие упрочнения металла, вытяжка за проход уменьшается. Чем меньше эти обжатия, тем медлен-

нее нарастает сопротивление деформации, тем выше степень суммарной деформации и тем выше уровень механических свойств. Падение единичной степени деформации (ε_i) должно компенсировать рост кривой упрочнения (σ_s), что обеспечивает оптимизацию силовых условий процесса волочения.

Выполненные математические расчёты и построения площади переходов на ЭВМ показали возможность получения сложного профиля стальных маслосъёмных ПК из стали 20X13 протягиванием проволоки $\varnothing 5 - 6$ мм через профильные волочильные ролики за 6 переходов с обжатиями: 21...23 %, 20-21 %, 18...20 %, 17...19 %, 16...18 %, 9...11 %.

Поскольку в исходном состоянии в структуре стали присутствуют избыточные карбиды, которые существенно препятствуют пластической деформации, перед волочением необходимо выполнить рекристаллизационный отжиг при температуре 800...820 °С, 1ч. ($A_{c1} - 10... 20$ °С). После рекристаллизационного отжига карбиды растворяются почти полностью, а твёрдость понижается с HV_{100} 228 до HV_{100} 190

Следует отметить, что после деформации твердость на поверхности и в центре распределяются неравномерно. Так, поле первого перехода твердость на поверхности составляла HV_{100} 334, а в центре HV_{100} 255 (рисунок 3). Сталь приобретает волокнистую структуру - текстуру деформации

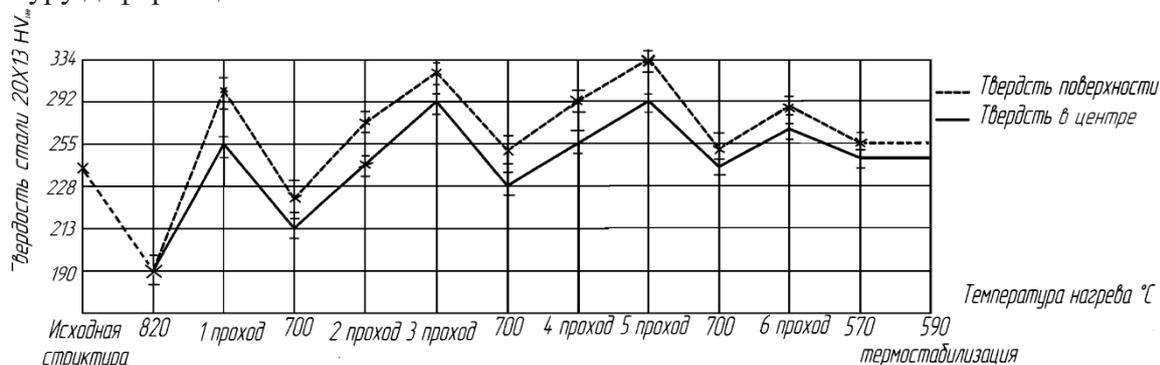


Рисунок 3. Изменение твердости стали 20X13 в зависимости от степени пластической деформации (ε) и температуры отпуска

При увеличении степени деформации, текстура стали изменяется от волокнистой до веретенообразной, а затем - до нитевидной. Поверхностные слои имеют большую склонность к удлинению, чем внутренние зоны. Возникают сжимающие напряжения, которые приводят к неравномерности деформации и локализуются в некоторых областях.

Путем наклепа твёрдость и временное сопротивление удастся повысить 1,5...3 раза, а предел текучести - в 3...7 раз. Такое состояние наклёпанного металла является предельным; при попытке продолжить деформирование металл разрушается.

Поэтому после первого, третьего и пятого деформационного упрочнения осуществляют рекристаллизационный отпуск профиля при температуре 690...710 °С в течение 1 часа, что способствует снижению твердости от HV_{100} 225... 242 после первого перехода до HRC HV_{100} 213...228 и равномерной деформации при волочении.

Отпуск при температуре менее 690 °С недостаточен для снижения твердости, а отпуск при температуре более 710 °С приводит к разориентировке деформированной структуры. Обжатие, составляющее 16...18%, при пятом деформационном упрочнении протягиванием проволоки через профильные волочильные ролики необходимо для получения максимально допустимой твердости 35HRC (HV 334) перед заключительным формированием заданного профиля маслосъёмного кольца. Обжатие менее 16% не дает достаточного упрочнения, обжатие более 18% нарушаются контуры профиля кольца. Обжатие, составляющее 9...11% на твердость HRC 26...28 (HV 240...255), при шестом деформационном упрочнении является оптимальным для получения сложного профиля маслосъёмного кольца без дальнейшей механической обработки.

При обжатии менее 9% происходит неравномерная калибровка профиля по сечению.

При обжати более 11% возможно шелушение поверхности профиля вследствие наклёпа.

При больших обжатиях продольное сечение имеет слабовыраженную волокнистую структуру, а структура поперечного сечения совсем не разрешается в оптическом микроскопе.

После волочения удлинение зерна остаются относительно равноосными, очень сложной формы, а текстура включает ось волокна. Ориентированные в результате деформации кристаллы имеют общее направление, совпадающее с направлением оси волокон.

При этом после пятого деформационного упрочнения выполняют пробивку перфорированных пазов и калибровку с обжатием 9...11 %, навивку на оправку и термофиксацию при температуре 560...580 °С в течение 1 часа.

На оправке профиль разрезают на отдельные кольца, которые устанавливают в гильзу и в ней подвергают термостабилизации при температуре 590°С в течение часа для протекания процессов полигонизации, т.к. окончательные свойства колец определяются условиями отпуска, в процессе которого реализуются потенциальные возможности для повышения сопротивления малым пластическим деформациям и всего комплекса прочностных свойств (твердость ПК составляет HRC 20...28)

Выполнены исследования износостойкости ПК после хромирования, карбонитрации и ионного азотирования. Карбонитрацию стальных маслоъемных поршневых колец из стали 20X13 ведут при разложении карбамида в расплаве солей или в газовой среде в интервале температур 540...580°С в течение 1 часа. Глубина карбонитридного слоя составляет 12...15 мкм при твердости HV 1158...1513

Осуществление карбонитрации в течение 1 часа в интервале температур 540...580 °С является оптимальным, так как при температуре карбонитрации ниже 540 °С снижается скорость диффузии. После карбонитрации стали в течение 1 часа при 525 °С твердость составляет 700 HV, глубина слоя 0,8 мкм; при 550 °С - 1100 HV, глубина слоя 0,15 мкм. При 600 °С твердость снижается до 800 HV с увеличением глубины слоя до 0,2 мкм, потому что диффузия в слое идет по параболическому закону.

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.

Обработка стали в расплаве дает на поверхности слой, имеющий гексагональную структуру, присущую нитриду железа Fe₃N и карбиду железа Fe₃C - карбонитридная фаза Fe₃(N, C). Размеры слоя - фазы Fe₃(N, C) зависят от температуры процесса и длительности насыщения.

Для устранения коробления маслоъемного поршневого кольца, вследствие температурного воздействия при карбонитрации, а также диффузионного насыщения поверхности углеродом и азотом, осуществляют алмазную притирку в гильзе со снятием карбонитридного слоя 3...6 мкм.

Последующее нанесение покрытия осуществляют путем ионной имплантации нитридов титана TiN₄ толщиной 5...7 мкм на поверхность карбонитридного слоя. Ионы титана высокой энергии разогревают поверхность до 500 °С и внедряются на глубину 1...2 мкм. Достоинство ионной имплантации обусловлено весьма низкими температурами процесса (500...600 °С), высокой твердостью нитрида титана (до HV 2400), отсутствием коробления изделий, что весьма важно для ажурных маслоъемных поршневых колец, и необходимостью в доводочных операциях механической обработки.

После этого, для улучшения прирабатываемости поршневых колец и повышения адгезии покрытия к основе, выполняют сульфидирование в электролитной плазме. Время обработки составляет 20...40с. В результате образуется пористый слой Fe₂S толщиной 8-10 мкм и твердостью 915...1158 HV (Рисунок 4-5).

Для улучшения прирабатываемости и повышения износостойкости нами разработана технология трехслойного упрочнения поверхности ПК, которая включает карбонитрацию,

ионную имплантацию нитрида титана с последующим сульфидированием в электролитной плазме.

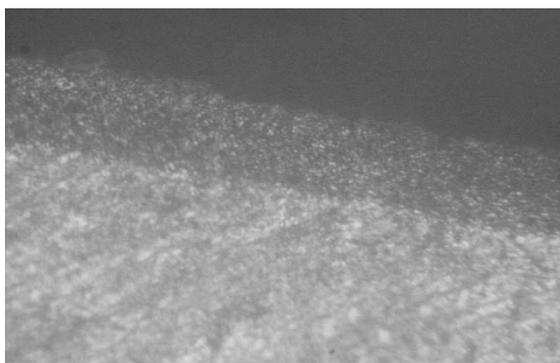


Рисунок 4. Карбонитридный слой стали 20X13 после карбонитрации ×500 HV₁₀₀ 1158-1513

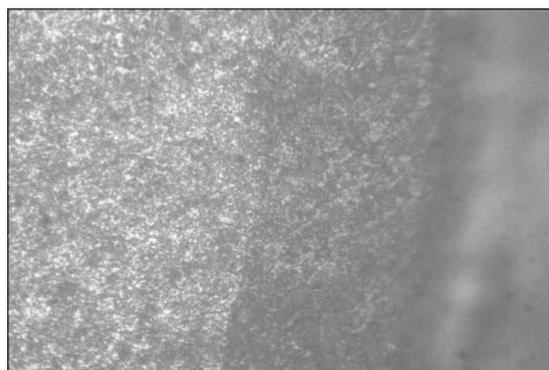


Рисунок 5. Покрытие: карбонитриция–TiN₄ – сульфидирование ×500 HV₁₀₀ 915-1189

Сравнительные испытания износостойкости стальных маслоъемных ПК из стали 20X13 проводились после упрочнения различными способами (таблица 1).

Таблица 1

Результаты испытаний стальных маслоъемных поршневых колец из стали 20X13 на износостойкость

№ п/п	Способ упрочнения	Микротвёрдость, HV ₁₀₀	Глубина слоя, мкм	Потеря веса, мг
1	Электролитическое хромирование	940– 1088	30 – 40	35 за 13 часов
2	Ионное азотирование	915–1158	5 – 7	18 за 3 часа
3	Оксикарбонитрация в расплаве солей	1158–1513	10 – 12	33 за 12 часов
4	Газовая карбонитрация	1158-1513	12 – 15	23 за 15 часов
5	Карбонитрация + нитрид титана (TiN ₄) + сульфидирование	915-1188	18 - 20	12 за 15 часов

Испытания показали, что карбонитридный слой не только не уступает хромированному, но и несколько превосходит его.

Наилучшие результаты достигаются после нанесения трёхслойного упрочнения: карбонитрация, осаждение нитридов титана и сульфидирования, которые в 2 раза превосходят традиционное хромирование.

Выводы

1. Установлено, что, не зависимо от структурного состояния поставляемой стали, для улучшения пластичности необходимо выполнить отжиг ниже A_{c1} на 10...20 °С.
2. Определены температурные интервалы рекристаллизации, термостабилизации и термофиксации ПК из сталей 65Г и 20X13 ($Tr=A_{c1}-10...20$ °С. Температура термофиксации = 500...570°С, термостабилизации = 550...590 °С) и их влияние на твердость.
3. Испытания ПК после комплексного поверхностного упрочнения (карбонитрация + нитрид титана + сульфидирование) показали повышение износостойкости в 1,5...2,0 раза.
4. Разработанная технология защищена 5-ю патентами и позволяет выпускать ПК для дизелей, бензиновых ДВС, компрессоров и др. установок в диапазоне (Ø 60-180мм. Достигается повышение работоспособности цилиндропоршневой группы в 1,5...2,0 раза по сравнению с чугунными кольцами. Технологический процесс изготовления ПК освоен в производстве ООО ЦРТ «Алтай». Комплектующие колец Ø 80...130мм, а также Ø 180 для К-700 поставляются на рынок запчастей Алтайского края.

Литература

1. Околович А.Г. Исследование технологии изготовления стальных поршневых колец. Ползуновский вестник / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул, №1-2, 2009, с.256-259.
2. Пат.2341362 РФ, МПК⁷ В23Р15/06, В21F37/02, С21В 8/06. Способ изготовления стальных компрессионных поршневых колец/ Околович Г.А., Карпов А.П., Околович А.Г., Карпов С.В.; заявитель и патентообладатель ООО «ЦРТ-Алтай» - № 2007109549/02, заявл. 15.03.07; опубл. 20.12.08, Бюл. №35.
3. Пат.2318645 РФ, МПК⁷ В23Р15/06. Способ изготовления стальных маслосъемных поршневых колец/ Околович Г.А., Карпов А.П., Околович А.Г.; заявитель и патентообладатель ООО «ЦРТ - Алтай» - №2005134301/02, заявл. 07.11. 05; опубл. 10.03.08, Бюл. №7.
4. Пат.2386726 РФ, МПК⁷ С23С26/00, С23С28/00. Способ упрочнения поверхностей стальных поршневых колец / Околович Г.А., Гурьев А.М., Околович А.Г.; заявитель и патентообладатель АлтГТУ им. И.И. Ползунова - № 2008139124/02, заявл. 01.10.08; опубл. 20.04.10, Бюл. №11.
5. Пат. 2407621 РФ, МПК⁷ В23Р С1В23Р 15/06, В23F 37/00,С21D8/00. Способ изготовления стальных компрессионных и маслосъемных поршневых колец. Околович Г.А., Околович А.Г., Сизова А.Е. заявитель и патентообладатель АлтГТУ им. И.И. Ползунова - № 2009125113/02, заявл. 30.06.2009; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 36

Исследование влияния разностенности штампуемых способом вытяжки с утонением деталей на неравномерность распределения твердости свойств в поперечных сечениях

к.т.н. проф. Агеев Н.П., Затеруха Е.В.
Балтийский Государственный Технический Университет
«Военмех»
8 (812) 251-84-67, bgtu_e4@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрено влияние разностенности на формирование механических свойств в поперечных сечениях штампуемых способами вытяжки с утонением деталей. Предложена модель формирования разностенности в многооперационных процессах вытяжки с утонением, учитывающая влияние геометрии рабочего инструмента и накапливаемой деформации.

Ключевые слова: разностенность, механические свойства, однофакторные модели.

Введение

В современном машиностроении предъявляются высокие требования по механическим свойствам к деталям ответственного значения, работающих под внутренним давлением, например, корпусам баллонов для хранения жидкостей и газов, тонкостенным оболочкам боеприпасов и т.п. Поэтому актуальной задачей является обеспечение требуемых по условиям эксплуатации значений характеристик механических свойств.

Постановка задачи. Характерной особенностью штампуемых способами вытяжки с утонением заготовок и деталей является наличие разностенности (разнотолщинности в поперечных сечениях), которая может составлять 10-25%, а в отдельных случаях превышает эти значения (рисунок 1).

Представленное на рисунке 1 поперечное сечение детали имеет минимальную толщину в продольном сечении А ($S_{0A} = S_{min}^j$), а в противоположном продольном сечении В – максимальную ($S_{0B} = S_{max}^j$).

Относительная разностенность определяется по следующему соотношению: