УДК 621.785.53:620.178.16:620.186

ПОВЫШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ АКТИВАЦИИ ПРОЦЕССА ЦЕМЕНТАЦИИ

[1]Герасимов С.А., [2]Куксенова Л.И., [2]Лаптева В.Г., [1]Фахуртдинов Р.С., [2]Данилов В.Д., [2]Щербаков Ю.И., [2]Алексеева М.С., [1]Смирнов А.Е., [3]Громов В.И.
[1]МГТУ им. Н.Э.Баумана, г. Москва, Россия
[2]Институт машиноведения РАН, г. Москва, Россия
[3]ФГУП «ВИАМ», г. Москва, Россия
lkukc@mail.ru

Экспериментально исследованы механические свойства: микротвер-дость, износостойкость и контактная выносливость – теплостойких сталей ВКС-7 и ВКС-10 при применении новой комплексной технологии термиче-ской и химико-термической обработки. Технология обработки основана на создании мелкодисперсной структуры при теплой деформации и на активизации процесса диффузионного насыщения при ионно-плазменной цементации.

Ключевые слова: активизации процессов диффузионного насыщения, вакуумная цементация, износостойкость, пластичная смазка, качение с проскальзыванием, контактная усталость, металлографические исследования, микротвердость, поверхностные слои, предел контактной выносливости.

Значительные ресурсы повышения комплекса эксплуатационных свойств ответственных деталей машин заключены в разработке новых технологий термической и химико-термической обработки (ХТО), основанных на активизации процессов диффузионного насыщения и обеспечивающих объемное и поверхностное мелкодисперсное состояние.

Создание в деталях машин мелкодисперсного состояния поверхностного слоя достигается с использованием методов интенсивного пластического деформирования [1] и высокоэффективных процессов ХТО [2]. При получении мелкодисперсного состояния наблюдается существенное повышение скоростей диффузионного насыщения поверхности углеродом, азотом и другими элементами, что может привести к существенному изменению технологии ХТО.

Главное достоинство вакуумной цементации состоит в формировании диффузионных слоев высокой несущей способности. Процесс цементации широко применяется для упрочнения ответственных деталей турбо- и моторостроения, гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания, зубчатых колес, валов. Вместе с тем потенциальные возможности этого процесса не исчерпаны.

Целью данной работы является обеспечение требований повышенной твердости, износостойкости и контактной выносливости теплостойких сталей путем применения новой технологии термической и химико-термической обработки, основанной на активизации процесса диффузионного насыщения при вакуумной цементации.

Исследуемые материалы и обработка

Испытываемые образцы изготавливали из теплостойких сталей ВКС-7 (16Х2Н3МФБАЮ-Ш по ТУ 14-1-4483-88) и ВКС-10 (13Х3Н3М2ВФБ-Ш по ТУ 14-1-4999-91). Состав исследуемых сталей приведен в табл. 1. Эти стали используются для

изготовления высоконагруженных деталей машин после поверхностного упрочнения путем азотирования, цементации и нитроцементации.

При подготовке к вакуумной цементации проводили закалку образцов из стали ВКС-7 при температуре 880 °С (закалочная среда – масло) и высокий отпуск при температуре 570 °С, время обработки – 3 ч. Образцы из стали ВКС-10 подвергали закалке при температуре 1010 °С и высокому отпуску при температуре 570 °С, время обработки – 3 ч. Для создания мелкодисперсного состояния поверхностного диффузионного слоя образцы из сталей ВКС-7 и ВКС-10 подвергали предварительной интенсивной пластической деформации – осадке (степень деформации 80 %) при температуре 700 °С в условиях мультиосевой деформации [2].

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей (масс. %)

	C	Cr	Ni	Mo	Mn	W	Si	V	Nb	Al	S	P
ВКС-7	0,14-0,18	1,8-2,2	2,7-3,0	0,40-0,60	0,30-0,60	0,20-0,30	0,17-0,37	0,10-0,20	0,10-0,20	0,02-0,07	Не более 0,015	Не более 0,025
ВКС-10	0,10-0,15	3,0-3,4	2,7 - 3,0	1,90-2,30	0,30-0,60	0,20-0,50	0,17-0,37	0,05-0,15	0,05-0,15	Не более 0,04	Не более 0,015	Не более 0,015

Вакуумную цементацию осуществляли на опытной установке вакуумной цементации и нитроцементации при температуре 940 °С. Выход на температурный режим вакуумной цементации проводили при нагреве образцов последовательно до 800 °С, 900 °С и 940 °С. Рабочая среда – ацетилен. Общее время цементации – 6 ч с соблюдением соотношений времени насыщения и времени диффузии.

После цементации образцы подвергали высокому отпуску при температуре (650 ± 10) °С в течение 5 ч и закалке. Закалку образцов из стали ВКС-7 проводили по режиму: нагрев до температуры 880°С, охлаждение в масле, обработка холодом при температуре -70 °С, отпуск при температуре 200 °С. Закалку образцов из стали ВКС-10 проводили по режиму: температура закалки 1010 °С, охлаждение в масле, отпуск при температуре 510 °С, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе, обработка холодом при температуре -70 °С, выдержка 2 ч, отпуск при температуре 510 °С, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе.

После вакуумной цементации образцы подвергались шлифованию.

Методики проведения испытаний

Оценка микротвердости. Распределение микротвердости по толщине цементованного слоя оценивали на поперечном шлифе, полученном на образцах, вырезанных на станке Duscotom-6 с охлаждением в воде. Шлифование и полирование запрессованных в специальную смолу образцов проводили на автоматизированной установке Tegramin-25. Для травления шлифов применяли 5%-ый спиртовой раствор азотной кислоты. Оценку микротвердости проводили на микротвердомере Durascan-70 при нагрузке 100 г.

Испытания на износостойкость. Испытания образцов на износостойкость проводили по двум схемам:

1. На восьмипозиционном стенде с возвратно-поступательным движением сопрягаемых образцов, имеющих плоские поверхности трения [3]. Испытываемый образец 1 после активизированной вакуумной цементации с меньшей поверхностью трения является неподвижным, и к нему прикладывается нагрузка. В качестве контробразца (образец 2 с большей поверхностью трения) использовали сталь 20 в состоянии после цементации в

твердом карбюризаторе и закалки до твердости 59 - 60 HRC. Он совершает возвратно-поступательное движение относительно неподвижного образца со средней скоростью скольжения 0,19 м/с. Ход подвижного образца *H*=0,04 м. Смазочным материалом служила пластичная смазка Литол-24 (ТУ 0254-116-04001396-05), предназначенная для смазывания всех типов подшипников качения и скольжения, шарниров зубчатых передач, индустриальных механизмов и электромашин. Износ упрочненного слоя определяли после работы на стенде в течение 15 ч при *p*=10 МПа (*N*=705,6 Н). Величину линейного износа и интенсивности изнашивания по ГОСТ 27674-88 оценивали по потере массы образцов пяти аналогичных пар трения.

2. На стенде СМЦ-2 в условиях качения с проскальзыванием, характерных для работы зубчатых передач [4]. В испытании участвуют два ролика: ролик 1 из испытываемой стали и сопряженный ролик 2 из стали 18ХГТ (60 HRC), прошедшей цементацию в твердом карбюризаторе. Приработку осуществляли при капельной смазке маслом индустриальным И-20А (ГОСТ 20799-88) со скоростью 30 капель/мин в условиях ступенчатого повышения нагрузки через каждые 10 мин работы. Ступени нагружения при приработке: 200, 300, 400 и 500 Н до полного прилегания поверхностей трения. Износ упрочненного слоя определяли после работы на стенде в течение 1 ч при *N*=500Н (p=348 МПа) и V=0,96 м/с, проскальзывании – 4,8 % в масле И-20А. По окончании испытаний фиксировали величину потери массы, а величину интенсивности изнашивания по ГОСТ 27674-88 определяли расчетом по величине потери массы.

Испытания на контактную усталость. Целью испытаний является определение предела контактной выносливости цементованных образцов из стали ВКС-7 при ограниченном объеме партии. Эти испытания проводили по ГОСТ 25.501-79 на двухпозиционном стенде Ш-17, позволяющем смоделировать контакт зубьев вблизи полюса зацепления [5]. Геометрическая модель испытаний: образец диаметром d=30,2 мм сжимается с двух сторон в радиальном направлении нажимными контртелами диаметром D=121 мм. Исследуемый образец приводится во вращение с помощью повышающей зубчатой передачи; контртела приводятся во вращение с помощью понижающих зубчатых передач, связывающих валы образца и контртела. Суммарная скорость качения – 25,47 м/с; скорость скольжения на отстающей поверхности образца – 0,75 м/с (удельное скольжение на этой поверхности 6,1 %). Нагружение исследуемых образцов осуществлялось с помощью пружин сжатия. Испытания проводились при обильной подаче масла И-20А в зону контакта образцов и нажимных контртел.

Методикой проведения испытаний на контактную усталость предусматривался этап проверки качества прилегания образцов и нажимных контртел по ширине дорожки контакта под нагрузкой 50 и 150 кг на пружинах сжатия узла нагружения. Смещение полосок контакта на образце от двух контртел не превосходил 0,1 мм, а прилегание контактных поверхностей добивались по всей ширине дорожки контртела.

Далее следовал этап 30-ти минутной приработки образцов и контртел при каждой нагрузке на пружине сжатия, равной 50, 100 и 150 кг. После каждой нагрузочной ступени контролировали качество прилегания и состояния контактных поверхностей.

После приработки на последней нагрузочной ступени, не останавливая привод вращения, устанавливали рабочие нагрузки на пружинах сжатия, соответствующие диапазону максимального нормального напряжения 2160 - 1690 МПа. На каждой рабочей нагрузке испытания проводили до питтинга контактной поверхности образцов с регистрацией соответствующих чисел циклов нагружения, либо до получения базового числа циклов нагружения, равного $(1,5 – 3)\ 10^7$.

Пределом контактной выносливости являлось напряжение, при котором испытано не менее пяти образцов, причем не менее трех из них не разрушались до базового числа циклов нагружения.

Результаты испытаний и их обсуждение

В изучаемом процессе вакуумной цементации реализована концепция двухэтапной технологии упрочнения: создание термически стабильного мелкодисперсного состояния поверхностного слоя детали на первом этапе и использование такого состояния для многократно ускоренного и качественного насыщения углеродом на втором этапе. На первом этапе мелкодисперсное состояние в слое формируется за счет интенсивной пластической деформации (ИПД) и динамической полигонизации. ИПД выполнялась в режиме теплой осадки с обжатием 80 % для создания условий многократной динамической полигонизации – факторов интенсивного измельчения зеренной и формирования термически стабильной субзеренной структуры.

Металлографические исследования указывают на сильное (до 16 раз) измельчение исходной крупнозернистой структуры сорбита [2]. Кристаллы феррита, сохранявшие кристаллографическую ориентировку бывших реек мартенсита, дробятся на мелкие фрагменты, приобретая форму новых достаточно равноосных зерен размером до 0,8 мкм.

Сравнение результатов распределения микротвердости исследуемых сталей после интенсивного пластического деформирования (рис.1) и без такового (рис. 2) показывает ускорение процесса науглероживания. Есть основания полагать, что увеличивается концентрация углерода в приповерхностной зоне диффузионного слоя. Эффективная толщина цементованного слоя возрастает на 0,4 – 0,5 мм. с 1,5 мм до 2,0 мм Микротвердость цементованных слоев мало отличаются для двух исследованных сталей, но для стали ВКС-10 значения микротвердости по толщине слоя стабильно на 1,0 - 1,5 % меньше, чем для стали ВКС-7, что близко к точности определения величин HV.

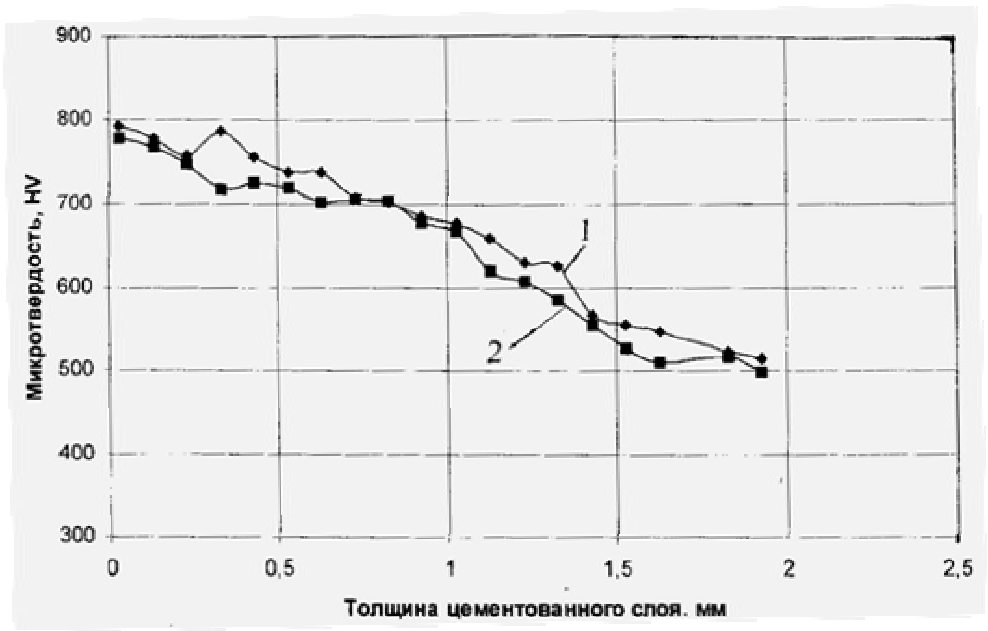


Рис. 1. Распределение микротвердости HV по толщине цементованного слоя после интенсивного пластического деформирования и вакуумной цементации: 1 – сталь ВКС-7; 2 – сталь ВКС-10.

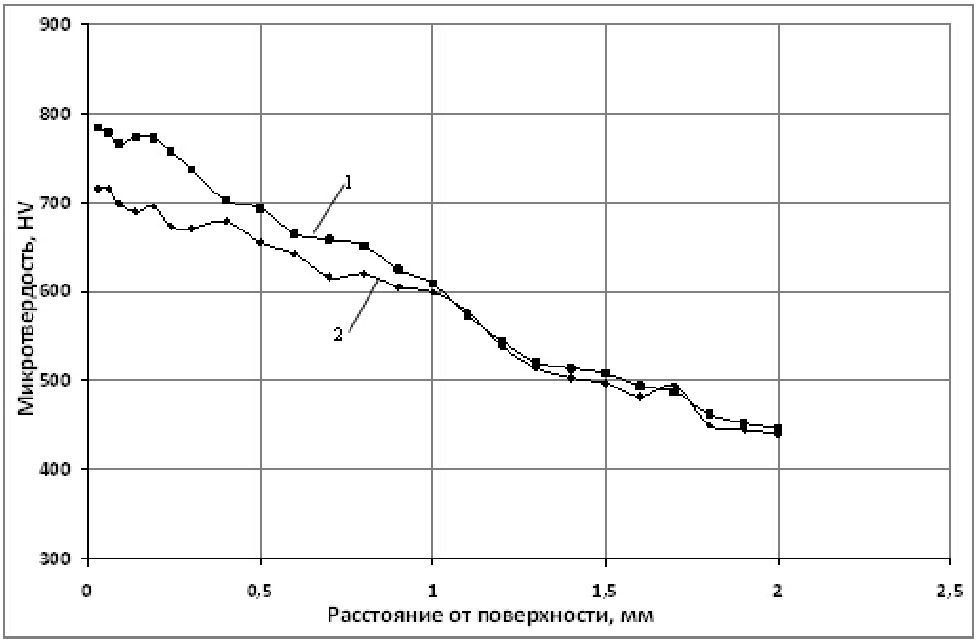


Рис. 2. Распределение микротвердости HV по толщине цементованного слоя после вакуумной цементации: 1 – сталь ВКС-7; 2 – сталь ВКС-10.

Процесс вакуумной цементации наследует мелкодисперсное состояние поверхностного слоя, полученного при теплой осадке. Проведенные исследования показали, что вследствие развитой субструктуры и высокой плотности дислокаций существенно сокращается продолжительность диффузионного насыщения из-за ускорения процессов диффузии углерода, образуются высокодисперсные частицы карбидов, увеличивается эффект дисперсионного упрочнения поверхностного слоя, формируются остаточные напряжения сжатия и высокий уровень твердости поверхности при равномерном ее снижении по толщине слоя (см. рис.1).

Результаты оценки интенсивности изнашивания реверсивной пары трения с образцами из сталей ВКС-7 и ВКС-10, прошедших вакуумную цементацию после предварительной ИПД, приведены в табл. 2.

После вакуумной цементации с предварительной теплой осадкой средние интенсивности изнашивания (I_1) поверхностных цементованных слоев сталей ВКС-7 и ВКС-10 не превышают величины $1 \cdot 10^{-10}$, что является показателем их высокой износостойкости. При этом следует подчеркнуть, что средние интенсивности изнашивания стали ВКС-10 в 1,8 раза больше, чем стали ВКС-7. Сопряженные контробразцы изнашиваются практически одинаково при работе, как со сталью ВКС-7, так и со сталью ВКС-10.

Сравнивая результаты испытаний на износостойкость сталей марок ВКС-7 и ВКС-10, прошедших упрочнение предварительной теплой осадкой и вакуумной цементацией с износостойкостью, например, стали 20Х, прошедшей цементацию в твердом карбюризаторе [6], видим, что активизация процесса цементации (применение специальных марок сталей,

введение теплой осадки, переход к вакуумной цементации) приводит к десятикратному повышению износостойкости реверсивных пар трения.

Таблица 2

Средние значения интенсивности изнашивания при работе пар трения в смазке Литол-24 при p=10 МПа в течение 15 часов

Марка стали образца	Вид упрочнения	Марка стали и вид упрочнения контробразца	$I_1.10^{10}$	$I_2.10^{10}$	$I_\Sigma.10^{10}$
ВКС-7	ИПД и вакуумная цементация	Сталь 20, цементация в твердом карбюризаторе, закалка	0,48	0,86	0,61
ВКС-10			0,89	0,88	1,02

Результаты оценки интенсивности изнашивания при испытаниях роликов из сталей ВКС-7 и ВКС-10, прошедших вакуумную цементацию после предварительной ИПД приведены в табл. 3.

Видно, что средняя интенсивность изнашивания (I_1) поверхностных слоев стали ВКС-7 при вакуумной цементации равна $0{,}14 \cdot 10^{-9}$, что является показателем их высокой износостойкости. Средняя интенсивность изнашивания стали ВКС-10 равна $0{,}63 \cdot 10^{-9}$, т.е. износостойкость стали ВКС-10 в более чем в 4 раза ниже износостойкости стали ВКС-7. Сопряженные контробразцы в паре со сталью ВКС-7 изнашиваются в 2 раза меньше, чем со сталью ВКС-10. В целом износостойкость образцов исследованных сталей после активизированной вакуумной цементации выше износостойкости образцов из стали 18ХГТ после цементации в твердом карбюризаторе (табл. 3) до 2,5 раз. Экспериментально установлена важная особенность исследуемых сталей после комплексной обработки: поверхностные слои не склонны к задирам.

Таблица 3

Средние значения интенсивности изнашивания при работе пар трения по схеме качения с проскальзыванием при p=348 МПа в масле И-20А

Марка стали образца	Вид упрочнения	Марка стали и вид упрочнения контробразца	$I_1.10^{9}$	$I_2.10^{9}$	$I_\Sigma.10^{9}$
ВКС-7	ИПД и вакуумная цементация	Сталь 18ХГТ, цементация в твердом карбюризаторе, закалка	0,14	0,33	0,47
ВКС-10			0,63	0,71	1,34

Испытания на контактную усталость показали, что значения предела контактной выносливости стали ВКС-7, обработанной по описанной выше технологии, составляют 1704 – 1763 МПа. Предел контактной выносливости по разным источникам для цементованных поверхностей может изменяться в диапазоне 1200 - 1600 МПа [7, 8]. Следовательно, использование предварительной теплой пластической деформации и последующей вакуумной цементации является средством повышения контактной выносливости теплостойких сталей более чем на 20 %.

Необходимо отметить существенную роль равновесной шероховатости исследуемых образцов и нажимных контртел, когда достигалось базовое число циклов нагружений (2,49 – 3,0)×107 при пределе контактной выносливости, равной 1704 - 1763 МПа. В дополнительных испытаниях за счет снижения высотного параметра шероховатости нажимных контртел с Rz

= 2,5 мкм до Rz = 1,5 мкм (рис.3) число циклов нагружения увеличилось в 1,7 раза (до 4,8×107) без каких-либо элементарных актов повреждения контактных поверхностей (рис.4).

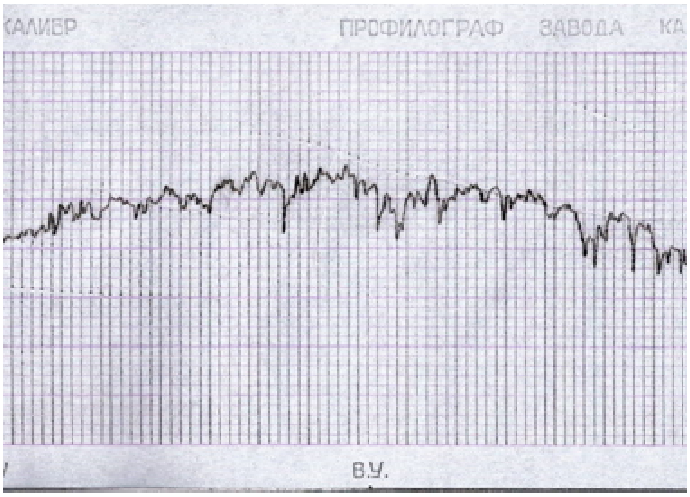


Рис.3 Шероховатость нажимного контртела: ВУ 4000; ГУ 20.



Рис.4 Состояние контактных поверхностей испытанных образцов с нажимными контртелами.

Таким образом, представленные выше результаты оценки влияния режимов деформационной, термической и химико-термической обработки на триботехнические характеристики сталей ВКС-7 и ВКС-10 подтвердили реальность существования дополнительных и значительных ресурсов повышения комплекса эксплуатационных свойств ответственных деталей машин, которые могут быть реализованы путем разработки новых технологий термической и химико-термической обработки, основанных на активизации процессов диффузионного насыщения поверхностных слоев.

Выводы

- Стали марок ВКС-7 и ВКС-10, прошедшие вакуумную цементацию с предварительной теплой осадкой, при испытаниях в условиях реверсивного трения при p=10 МПа и пластичной смазке, а также в условиях трения с проскальзыванием при p=348 МПа в индустриальном масле обладают высокой износостойкостью, до 10 раз большей износостойкости сталей 20Х и 18ХГТ прошедших цементацию в твердом карбюризаторе.

- При вакуумной цементации лучшие результаты получены для пар трения со сталью ВКС-7, средняя суммарная интенсивность изнашивания при реверсивном трении составляет

$0{,}61 \cdot 10^{-10}$, что в 1,7 раза меньше, а при трении качения с проскальзыванием – $0{,}47 \cdot 10^{-9}$, что в 2,8 раза меньше, чем для пары со сталью ВКС-10.

- Предел контактной выносливости опытных образцов из стали ВКС-7, в результате вакуумной цементации, увеличен на ~ 20% при достижении базового числа циклов нагружения.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 16.523.11.3010

Список литературы

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. Логос, 2000, 272с.
2. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Фахуртдинов Р.С., Данилов В.Д., Смирнов А.Е., Громов В.И. Повышение характеристик механических свойств теплостойких сталей методом активизации процесса азотирования//Проблемы машиностроения и надежности машин, 2014, № , с.
3. Методы испытаний на трение и износ/Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева, А.Г. Колмаков, Л.М. Рыбакова. М.: Интермет Инжиниринг, 2001.
4. Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки служебных свойств смазывающих масел и присадок к ним с использованием роликовых испытательных установок. Методические указания. Госстандарт СССР, М. 1980.
5. Мишарин Ю.А., Палкин Б.А.. Новая роликовая установка для испытания контактной прочности материалов. – В кн.: Методы и средства контроля и испытания материалов, деталей и механизмов. Вып.3. М.: ГОСИНТИ, 1960. с.33-34.
6. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Структура и износостойкость азотированных сталей и сплавов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 518 с.
7. Петрусевич А.И. Контактная прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1970, 63с.
8. Зинченко В.И. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2001, 303 с.