

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

In article discusses the methodology of increasing wear resistance of precision toothed gears through the using of thin-film amorphous coatings on the basis of the boron and silicon compounds, inflicted by method of plasma finish hardening.

Распространенной причиной отказа зубчатых колес (деталей типа вал-шестерня и др.) является усталостный износ, который развивается при воздействии знакопеременных и циклических нагрузок. Эти нагрузки воспринимаются локальными участками поверхностей пары трения на фоне тепловых, химических, адгезионных и других контактных взаимодействий между собой и средой, и вызывают распространение трещин и образование выкрашивающихся частиц износа. Длительная эксплуатация с сохранением геометрических параметров рабочих поверхностей особенно важна для ответственных прецизионных зубчатых колес, используемых в авиационной, космической, оборонной, судостроительной и атомной промышленности.

С целью увеличения ресурса зубчатых колес применяются новые режимы термической и химико-термической обработки [1, 2]. Следует признать, что имеющиеся резервы повышения износостойкости зубчатых колес с точки зрения свойств применяемых материалов и известных технологий их изготовления практически полностью исчерпаны. В связи с этим разработка новых технологий упрочнения является актуальной задачей. Наиболее перспективный для ее решения способ — использование тонкопленочных покрытий, наносимых на заключительной стадии изготовления деталей.

Рассмотрим отдельные механизмы упрочнения с позиции инженеры поверхности.

СНИЖЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ НА КОНТАКТНЫХ ПЛОЩАДКАХ

Для минимизации удельных давлений, приводящих к созданию и распространению трещин, образованию и выкрашиванию частиц износа, необходимо максимально увеличить фактическую площадь контакта.

Площадь фактического контакта пар трения составляет примерно десятые или сотые доли процента номинальной площади и в процессе износа изменяется незначительно. В то же время, даже при небольших давлениях на участках фактического контакта возникают пластические деформации контактной поверхности. Сближение поверхностей влияет на напряженно-деформированное состояние контакта, характер взаимодействия и деформацию выступов. От величины фактического давления зависит разрушение поверхностных пленок и возникновение адгезионных связей на контакте.

Шероховатость рабочих поверхностей зубчатых колес после окончательной финишной обработки в основном влияет на процесс приработки (рис. 1), который характеризуется изменением параметров микро рельефа в начальный период эксплуатации. Повышенные напряжения испытывают высокие и острые микро неровности, которые срезаются или пластически

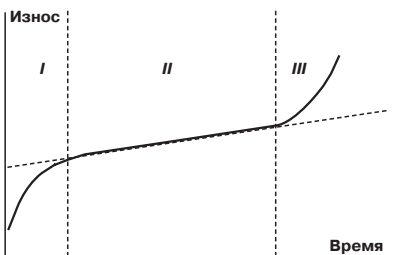


Рис. 1. Характеристика износа и стадии изнашивания от времени эксплуатации изделия, где 1 — приработка, 2 — стабильный износ, 3 — катастрофический износ.

на процесс приработки (рис. 1), который характеризуется изменением параметров микро рельефа в начальный период эксплуатации. Повышенные напряжения испытывают высокие и острые микро неровности, которые срезаются или пластически

деформируются. При этом во время приработки износ деталей максимален.

Вследствие расположения выступов на различных уровнях при увеличении нагрузки они последовательно вступают в контакт. Поэтому прирост фактической площади контакта происходит в основном за счет увеличения пятен контакта, а не их размера. При этом все же большой резерв фактической площади опорной поверхности остается неиспользованным. Следовательно, чтобы снизить удельные нагрузки (высоконапряженное состояние площадок фактического контакта при трении), уменьшить длительность приработки нужно увеличить фактическую опорную поверхность. Можно ожидать, что по мере увеличения площади фактического контакта произойдет уменьшение напряжений, возрастет непрерывность контакта, сократится время приработки и изделие будет более долговечным.

Однако, по законам классической трибологии, увеличение площади фактического контакта должно привести к увеличению коэффициента трения. Применительно к зубчатым колесам, чтобы этого не произошло, трение должно осуществляться при отсутствии адгезионного взаимодействия между поверхностями, и без разрывов контакта, что достигается использованием неметаллических материалов.

Критерием увеличения площади фактического контакта по международному стандарту ISO 13565–2:1996, где рассматриваются параметры формы шероховатости R_{pk} , R_k и R_{vk} , получаемые из построения опорной линии поверхности (кривой Аббота-Файрстона) [3], является уменьшение суммы параметров R_k и R_{vk} , а по ГОСТ 2789 — уменьшение параметра R_{max} (расстояние между линиями выступов и впадин профиля в пределах базовой длины). Косвенными доказательством является также наименьшая величина остаточной деформации при испытании на малоцикловую усталость, связанная с уменьшением смятия контактных поверхностей при высоких удельных нагрузках и значительно меньшая длительность приработки пары трения, измеряемая в условиях трибоиспытаний.

УМЕНЬШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СДВИГУ

Зубчатые колеса эксплуатируются в условиях интенсивного трения рабочих поверхностей. Согласно исследованиям Ф. Боудена и Д. Тейбора [4] из трех вариантов контактного взаимодействия самый низкий коэффициент трения реализуется при использовании мягкого тонкопленочного покрытия на твердой подложке (рис. 2). В соответствии с молекулярно-механической теорией трения, сила трения между несмазанными поверхностями складывается из адгезионной составляющей, связанной с межмолекулярным взаимодействием (образованием «мостиков» сварки) в местах фактической площади контакта, и деформационной составляющей, характеризующейся пропахиванием, смятием и срезанием выступов шероховатых поверхностей. Таким образом, сила трения может быть выражена как:

$$F = F_{адг} + F_{деф} = A \cdot s + F_{деф}$$

где $A = N/p$ — фактическая площадь контакта [m^2]; N — нормальная нагрузка [Н]; p — предел текучести (напряжение, при котором начинает развиваться пластическая деформация) более мягкого материала [Па]; s — прочность на срез адгезионной связи [Па].

В большинстве случаев адгезионная составляющая $F_{адг}$ является более важным фактором, поэтому если пренебречь деформационной составляющей $F_{деф}$, то коэффициент трения:

$$\mu = F/N = s/p$$

Исходя из этого выражения, для уменьшения коэффициента трения необходимо понижать прочность на срез адгезионной связи — s и повышать предел текучести более мяг-

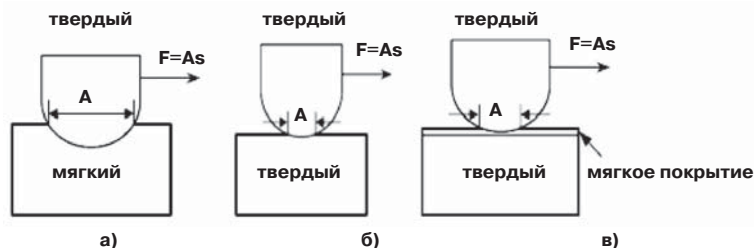


Рис. 2. Варианты фрикционного контакта: а — твердого с мягким материалом; б — твердого с твердым материалом; в — твердого с твердым материалом, имеющего мягкое тонкопленочное покрытие [4].

Таблица 1

Качественный анализ обеспечения низкого коэффициента трения при различных фрикционных контактах

Вариант	Прочность на срез адгезионной связи, s	Предел текучести материала, p	Фактическая площадь контакта, A	Коэффициент трения, μ
Рис. 2, а	низкая	низкий	большая	высокий
Рис. 2, б	высокая	высокий	низкая	высокий
Рис. 2, в	низкая	высокий	промежуточная	низкий

кого материала — p (табл. 1), поэтому коэффициент трения варианта на рис. 2, в должен обеспечивать самый низкий коэффициент трения. Нормальная нагрузка в этом варианте в основном осуществляется на твердую подложку. Под твердой подложкой понимается материал, прошедший объемную термообработку и имеющий твердость более 50 HRC, а под понятием мягкого покрытия — покрытие, имеющее низкую прочность на срез адгезионной связи.

Критерием уменьшения сопротивления сдвигу является более низкий коэффициент трения, получаемый в условиях трибоиспытаний.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ УПРОЧНЕНИЯ

Данные принципы упрочнения можно осуществить с использованием финишных тонкопленочных покрытий, после

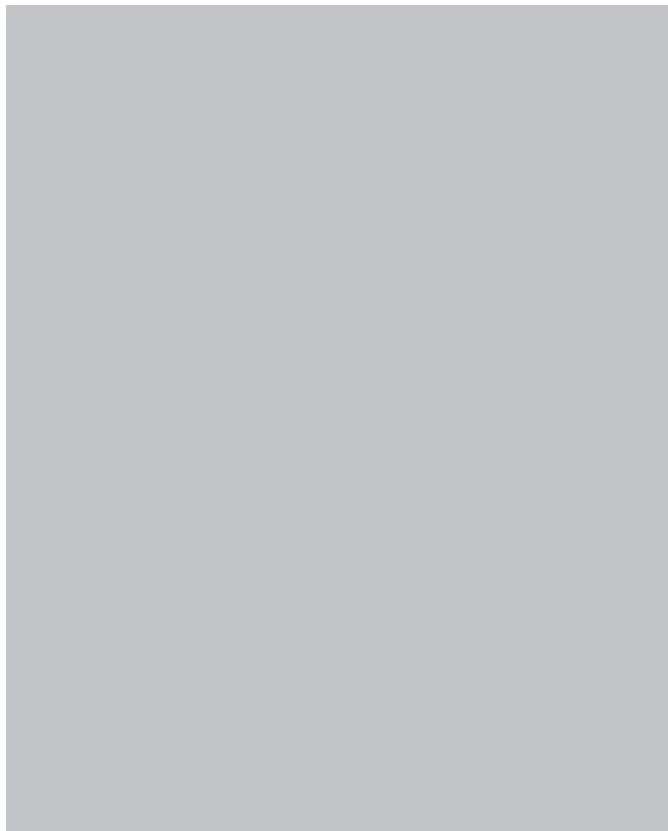
нанесения которых зубчатые колеса непосредственно поступают в эксплуатацию.

Основные требования к покрытию для увеличения площади фактического контакта — обеспечение его осаждения во впадины шероховатой поверхности исходного материала, достаточные адгезионные свойства к подложке и оптимальные физико-механические свойства (нанотвердость и модуль упругости). Для уменьшения сопротивления сдвигу покрытие должно иметь повышенные антифрикционные свойства (низкий коэффициент трения, минимальную длительность приработки, минимальное тепловыделение при трении, минимальный износ трущихся по верхностей).

Важно отметить, что повышенная твердость покрытия для изделий, работающих в условиях усталостного изнашивания неэффективна, так как минимизация износа в первую очередь зависит от упругости и стойкости к деформациям поверхностного слоя.

Адгезионная прочность к поверхности подложки зависит от материала покрытия и технологии его нанесения. При этом необходимо обеспечить химическую связь с поверхностным слоем исходного материала (говоря о стальных зубчатых колесах — это различные оксиды железа).

Современные технологии реализуют нанесение многочисленных покрытий в основном из тугоплавких соединений, которые имеют разные адгезионные характеристики к сталям. Для их нанесения используются в большинстве высокотемпературные CVD и PVD процессы, которые могут ухудшать свойства поверхностного слоя, создавая растягивающие остаточные напряжения, вызывая осаждение дефектной микрокапельной фазы. Для деталей, работающих в условиях усталостного изнашивания, эти негативные эффекты следует уменьшать. Поэтому мировые лидеры при нанесении покрытий стремятся использовать минимальную температуру нагрева деталей в процессе осаждения покрытий и в обязательном порядке предусматривают применение в качестве финишной операции процесс галтовочной полировки (хотя, в этом случае нанесение покрытий не является финишной операцией).



ЛУЧШИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТИ!

- Разработка технологий, изготовление и поставка оборудования, материалов применительно к процессам упрочнения, нанесения покрытий и ремонта.
- Услуги по наплавке, напылению, упрочнению и модификации.
- Выполнение НИР и ОКР по выбору и разработке упрочняющих технологий и оптимальных покрытий, аттестация покрытий.
- Маркетинговые и информационные услуги, инженерный консалтинг.
- Проведение конференций, школ-семинаров.



г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 68
 Бизнес центр "Буревестник", оф. 103
 Тел.: (812) 444-93-37, факс: (812) 444-93-36
 office@plasmacentre.ru, www.plasmacentre.ru

Из физических представлений заполнение впадин шероховатой поверхности твердой подложки наиболее оптимально обеспечивается с использованием материала, близкого по консистенции к жидкости, но нанесение таких покрытий

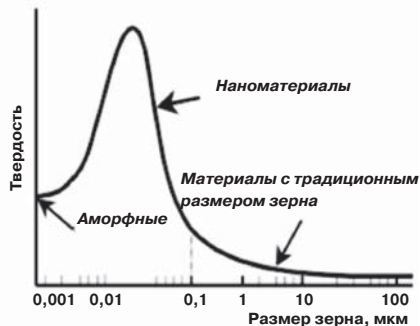


Рис. 3. Усредненная твердость покрытий в зависимости от размера зерна материала.

на стадии изготовления инструмента с необходимыми адгезионными характеристиками не представляется возможным. Для поставленной цели на современном этапе развития появилась возможность использования «замороженной жидкости», что реализуется при нанесении аморфных покрытий. При этом площадь фактического контакта теоретически может возрасти на полтора-два порядка. Теория близкого родства жидкости и конденсированного аморфного состояния была разработана Я.И. Френкелем. Характерным признаком аморфного состояния является отсутствие дальнего порядка, то есть трансляционной симметрии, и, как следствие, изотропия свойств и структуры. По ряду свойств эти материалы превосходят кристаллы. Кроме этого аморфность покрытия может обеспечивать химическую инертность, диэлектрические свойства и повышенную смазочную способность. Твердость покрытий в аморфном состоянии в несколько раз может превосходить твердость материалов с традиционным размером зерна, но в то же время она ниже твердости наноструктурированных материалов (рис. 3). Этот фактор является особенно благоприятным для деталей, эксплуатируемых в условиях усталостного разрушения.

Для нанесения аморфных тонкопленочных покрытий разработана специальная технология бескамерного химического осаждения при атмосферном давлении с применением летучих жидких элементоорганических соединений и газовых сред при одновременной активации поверхности электродуговой плазмой. Ее новизна заключается в отсутствии использования закрытых камер, более низких температурах нагрева изделий в процессе осаждения покрытий и применении гибко управляемой электродуговой плазмы. В связи с тем, что нанесение тонкопленочных износостойких покрытий на изделия происходит на заключительной стадии их изготовления или непосредственно перед использованием, данный процесс назван финишным плазменным упрочнением (ФПУ) (рис. 4).



Рис. 4. Процесс нанесения покрытия методом ФПУ.

В качестве источника тепловой энергии для нанесения износостойкого покрытия при ФПУ используется плазменная струя, истекающая при атмосферном давлении из малогабаритного дугового плазмотрона, дополненного плазмохимическим реактором.

К основным достоинствам ФПУ относятся: осуществление процесса без вакуума и камер; минимальный нагрев изделий, не превышающий 200 °С; возможность нанесения покрытий локально, в труднодоступных зонах и на изделиях любых габаритов; использование малогабаритного, мобильного и экономичного оборудования.

Основным принципом нанесения тонкопленочных износостойких покрытий, взятым за основу технологии ФПУ,

является разложение паров жидких элементоорганических препаратов, которые вводятся в плазмохимический реактор дугового плазмотрона, с последующим прохождением плазмохимических реакций и образованием покрытия на изделии. Для образования аморфных покрытий используются жидкие реагенты, имеющие в своем составе элементы-аморфизаторы, такие как бор и кремний. Нанесение покрытия осуществляется локально на упрочняемую поверхность изделия при циклическом сканировании плазменной струи, которая касается обрабатываемой зоны. Важной отличительной особенностью процесса ФПУ является также то, что нанесение покрытия может осуществляться многослойно при толщине каждого слоя порядка 2–20 нм полосами шириной 8–15 мм (с учетом линейного перемещения плазменной струи). С целью минимального термического воздействия на материал основы при ФПУ плазменную струю перемещают со скоростью 3–150 мм/с.

АМОРФНОСТЬ ПОКРЫТИЯ, НАНОСИМОГО МЕТОДОМ ФПУ

С целью получения информации о фазовом составе покрытия и подтверждении его аморфного состояния был проведен рентгенофазовый анализ образцов из стали 40Х, прошедших термическую обработку до твердости HRC 50–52 и процесс ФПУ. Были изготовлены восемь образцов с разной толщиной покрытия на основе соединений бора и кремния. Один из образцов был без покрытия. В процессе нанесения покрытия температура образцов не превышала 120 °С. Толщина покрытия оценивалась на эталонных образцах с использованием профилограмм поверхности. Данный метод основывается на замере расстояния между средними линиями профилограммы переходной зоны — участок с покрытием — участок без покрытия, при этом покрытие наносится на образец с использованием маски.

Исследования проводились на рентгеновском дифрактометре фирмы Rigaku (Япония). В качестве источника рентгеновского излучения использовалась трубка с железным анодом (рабочий ток — 25 мА, напряжение — 25 кВ). Длина волны излучения 0,193728 нм. При съемке образцов использовался фильтр из Мп. Фокусировка осуществлялась по методу Брегга-Бретано с двумя щелями Соллера. Идентификация фаз, присутствующих в образце, проводилась с помощью сравнения со стандартными данными фаз по таблице ASTM.

Как показал анализ, рентгенограммы всех исследуемых образцов идентичны и в них отсутствуют линии фаз, не относящиеся к материалу подложки.

Для уменьшения глубины проникновения рентгеновского излучения и получения информации о фазовом составе покрытия также были проведены исследования по методике «скользящего» пучка на рентгеновском дифрактометре D8 Discover (Bruker-AXS, Германия). На них, как и на предыдущих дифрактограммах отсутствуют какие-либо линии фаз, не относящиеся к материалу подложки, что подтверждает рентгеноаморфность покрытия.

УМЕНЬШЕНИЕ СМЯТИЯ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Для оценки смятия контактных поверхностей (в том числе, за счет увеличения площади фактического контакта) при повышенных статических удельных нагрузках, производились исследования различных видов упрочнения в условиях малоциклового усталости модельных образцов с контактируемыми поверхностями сфера-плоскость. В качестве методов упрочнения, способствующих повышению прочности материала образцов и их поверхностной модификации, использовались три технологии: термическая обработка, химико-термическая обработка и нанесение тонкопленочного аморфного покрытия методом ФПУ. Материалом образцов являлась сталь 35ХНЗМФА. Основными параметрами режимов используемых технологий упрочнения образцов являлись:

1. закалка с 870–880 °С в масле, низкий отпуск при 180 °С;
2. цементация при 950 °С, выдержка 8 часов в твердом

карбюризаторе, закалка с 870–880 °С в масле, отпуск при 450 °С;

3. закалка с 870–880 °С в масле, низкий отпуск при 180 °С и окончательное нанесение аморфного тонкопленочного покрытия системы Si-B-O-C-N методом ФПУ толщиной порядка 1 мкм.

Для испытания на сжатие контактные пары образцов (плоскость-сфера с радиусом 250 мм, Ra=1,25 мкм) устанавливались между нажимными плоскостями гидравлической разрывной машины с максимальной нагрузкой 110 тс. Величина суммарной деформации набора из пары образцов, двух уравнивающих полусферических опор и плоской опорной пластины измерялась с помощью магнитной стойки ИМ-1 и часовым индикатором с ценой деления 0,01 мм. Набор обжимался дважды от 0 до 100 т, затем нагружался от 0 до 20 т, и при нагружении ступенями по 20 т от 20 до 60 т и по 10 т от 60 до 103 т определялась суммарная деформация набора. Затем пары образцов подвергались малоцикловым испытаниям на базе 103–1,5х103 циклов при нагрузке от 40–60 т до 103 т. Измерение твердости осуществлялось в центре пятен контакта на поверхностях типа плоскость пары сфера-плоскость.

Результаты проведенных экспериментов показывают (табл. 2), что все три метода упрочнения позволяют получить высокую твердость более 48 HRC. После ФПУ с нанесением тонкопленочным аморфным покрытием системы Si-B-O-C-N объемно-закаленных образцов имеет место наименьшая осадка в пятне контакта по сравнению с образцами, упрочненными другими способами.

Таблица 2
Результаты измерения осадки образцов и твердости поверхности

Метод упрочнения	Вид исследуемой поверхности	Осадка в пятне контакта после испытаний, мм	Кол-во циклов нагружения	Твердость после испытаний, HRC
Закалка	сфера	0,4	1000	48–52,5
	плоскость	0,1–0,2		49–52
Цементация	сфера	0,2	1000	49–52
	плоскость	0,11		49–50
ФПУ	сфера	0,01	1500	58–58,5
	плоскость	0,05–0,06		58–58,5

УВЕЛИЧЕНИЕ ПЛОЩАДИ ФАКТИЧЕСКОГО КОНТАКТА

Влияние наносимого покрытия при ФПУ на изменение параметров шероховатости с разной исходной шероховатостью поверхности по ГОСТ 2789 и международного стандарта ISO 13565–2:1996 представлено в табл. 3. Для исследований использовался измерительно-вычислительный комплекс «Профиль», включающий стандартный профилограф-профилометр 201. В качестве материала исходных образцов применялась сталь 40X, прошедшая термическую обработку до HRC 50–52. Толщина нанесенного покрытия составляла порядка 1 мкм. Параметры шероховатости являются средними значениями при измерении пяти образцов с одинаковой исходной шероховатостью.

Анализ параметров шероховатости по ГОСТ 2789 показывает, что после нанесения покрытия:

- среднее арифметическое отклонение профиля R_a при минимальном исходном значении практически не изменяется, по мере увеличения исходного значения данный параметр уменьшается более чем в 2 раза;
- наибольшая высота неровностей профиля R_{max} уменьшается в среднем в 1,5 раза.

Анализ параметров шероховатости по ISO 13565–2:1996 показал следующие закономерности их изменения:

- параметр R_{pk} , характеризующий высоту выступов, быстро изнашивающихся в первый период эксплуатации, для минимальной исходной шероховатости уменьшается в 3 раза и практически мало изменяется с увеличением исходной шероховатости (начиная с $R_a = 0,72$ мкм);

Таблица 3
Параметры шероховатости поверхности до и после ФПУ при различном исходном параметре R_a

Исследуемая поверхность		R_a	R_{max}	R_{pk}	R_k	R_{vk}	$R_{pk}+R_k$
1	до нанесения покрытия	0,08	0,69	0,35	0,22	0,12	0,57
	после нанесения покрытия	0,07	0,44	0,10	0,20	0,14	0,30
2	до нанесения покрытия	0,43	4,17	2,09	1,25	0,83	3,34
	после нанесения покрытия	0,38	2,85	0,71	1,00	1,14	1,71
3	до нанесения покрытия	0,72	5,07	0,89	2,66	1,52	3,55
	после нанесения покрытия	0,31	3,47	0,69	0,69	1,27	1,39

- параметр R_k , характеризующий основу профиля, которая длительное время находится в работе и является несущей площадью по мере срабатывания наружных слоев, уменьшается для минимальной исходной шероховатости незначительно, а с увеличением исходной шероховатости уменьшается более чем в 3 раза;

- параметр R_{vk} , характеризующий глубину впадин профиля и, соответственно смазывающую способность поверхности не существенно;

- сумма параметров $R_{pk}+R_k$, характеризующая изнашиваемость рабочих поверхностей, уменьшается примерно в 2 раза.

На основании данных исследований видно, что процесс ФПУ ведет к повышению несущей площади поверхности по критерию $R_{pk}+R_k$. Изменение характеристик шероховатости после нанесения покрытия на основании профилограмм и параметров опорной поверхности является подтверждением заполнения впадин шероховатости поверхности материалом покрытия и, соответственно, увеличения площади фактического контакта.

УМЕНЬШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СДВИГУ

Трибологические испытания покрытий и материала основы — термообработанной стали 20X3МВФ-Ш проводились с использованием трибометра TRB-S-DE (CSM, Швейцария) по схеме ball-on-disk (шар-диск) в соответствии с международным стандартом ISO 20808:2004. Для исключения влияния материала контртела использовались шары, изготовленные из нитрида кремния Si_3N_4 (при этом моделируются условия трения двух поверхностей, имеющих неметаллический материал на основе соединений кремния). При каждом испытании использовался новый шар или неизношенная его поверхность. Нагрузка на контртело составляла 5 Н. Линейная скорость — 10 см/с. Путь трения — 80 м. При испытаниях использовалось масло Nissan SAE 5W-40. Ширина следа износа после трибоиспытаний определялась с использованием микроскопа Olympus GX 51.

Результаты трибологических испытаний образца из стали 20X3МВФ-Ш без покрытия и с покрытием представлены на рис. 5 в виде протоколов с графиками изменения со временем коэффициента трения (красная кривая) и глубины заглупления индентора в материал покрытия (зеленая кривая).

Коэффициент трения в данных трибоиспытаниях после нанесения аморфного покрытия снижается практически на порядок и составляет 0,022.

Необходимо отметить два важных признака эффективности нанесения аморфных покрытий системы Si-B-O-C-N — это падающая характеристика изменения коэффициента трения и минимальное время приработки. Уменьшение длительности приработки является также косвенным критерием создания поверхности с большей площадью фактического контакта, что принципиально может быть решено на стадии изготовления деталей с повышенным качеством.

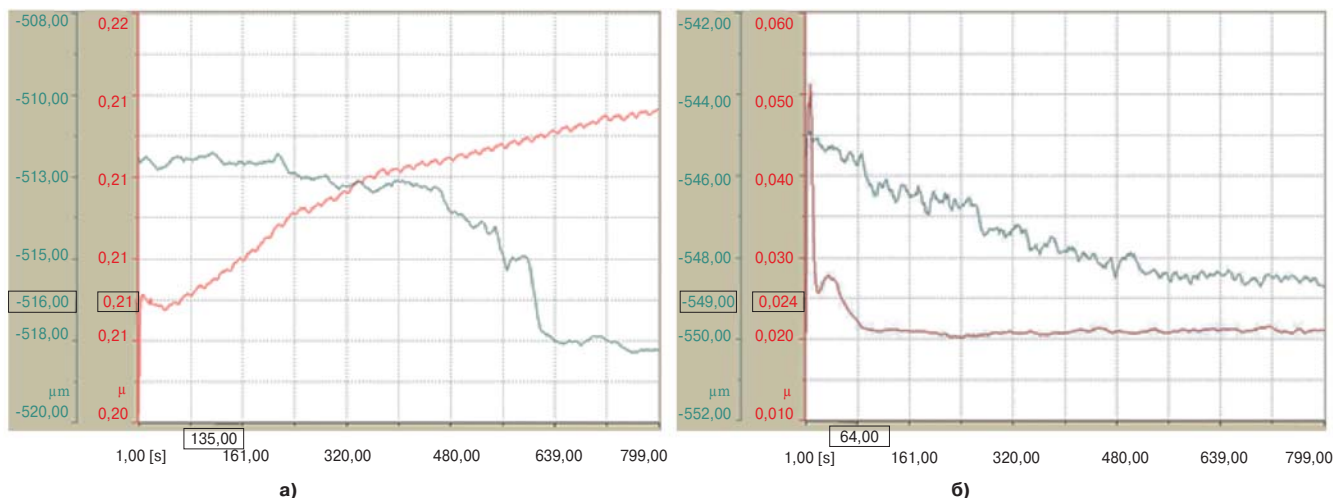


Рис. 5. Протоколы трибологических испытаний подложки стали 20X3MВФ-Ш без покрытия (а) и с покрытием Si-B-O-C-N (б).

ВЫВОДЫ

1. Эффективными направлениями повышения ресурса зубчатых колес, работающих в условиях усталостного разрушения, с точки зрения инженерии поверхности, является снижение удельных давлений на контактные площадки и уменьшение сопротивления сдвигу, что может быть решено за счет использования износостойких тонкопленочных покрытий, наносимых на финишной стадии изготовления при температуре нагрева менее 200 °С.

2. В качестве тонкопленочных покрытий перспективно применение покрытий в аморфном состоянии, которые за счет эффекта «замороженной жидкости» во впадинах шероховатости обеспечивают повышение площади фактического контакта, непосредственно влияющей на увеличение стойкости к усталостному разрушению.

3. Методом рентгенофазового анализа определена аморфность наносимого финишным плазменным упрочнением покрытия системы Si-B-O-C-N, имеющим характерный размер элементов порядка 60–100 Å.

4. Испытания по определению смятия контактных поверхностей при высоких удельных нагрузках показали, что наименьшая величина остаточной деформации (осадки контактной пары) при малоцикловых испытаниях на базе 103–1,5x10³ циклов при нагрузке от 40–60 т до 103 т при сравнении различных методов обработки имеет место при финишном плазменном упрочнении с нанесением аморфного покрытия системы Si-B-O-C-N.

5. Исследования профилеграмм и опорной кривой поверхностей инструментальной стали с покрытием, нанесенным при ФПУ, подтвердили, что нанесение покрытия уменьшает параметр R_{\max} в 1,5 раза, а сумму параметров $R_{pk} + R_k$ в 2,6 раза, что обосновывает увеличение площади фактического контакта.

6. Коэффициент трения в конкретных трибологических испытаниях после нанесения методом ФПУ аморфного покрытия снижается практически на порядок (по сравнению с аналогичными трибоиспытаниями поверхности без покрытия) и составляет 0,022, что является обоснованием уменьшения сопротивления сдвигу.

7. Технология ФПУ применительно к упрочнению зубчатых колес, деталей типа вал-шестерня прошла опытную апробацию на ряде промышленных предприятий (рис. 6).



Рис 6. ФПУ зубчатого колеса.

Павел Абрамович Тополянский
 ООО «Научно-производственная фирма «Плазмацентр»
www.plasmacentre.ru

Литература

1. Зинченко В. М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001, 303 с.
2. Сильченко П. Н., Новиков Е. С., Леканов А. В. Обоснования выбора способов упрочнения мелкомодульных зубчатых колёс приводов устройств исполнительной автоматики космических аппаратов. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 6* (2011 4) 670–673
3. Тополянский П. А., Тополянский А. П., Соснин Н. А., Ермаков С. А. Применение международных стандартов для оценки свойств поверхностей подверженных износу. *Технология машиностроения.* — 2010, № 6, — С. 56–60
4. Bowden F. P., Tabor D. *The friction and lubrication of solids*, Clarendon Press, Oxford, 1950