

Б. Н. Гузанов, Г. Н. Мигачева,
М. Ю. Большакова

ОЦЕНКА КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ АЗОТИРОВАННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Правильный выбор вида поверхностного упрочнения для зубчатых колес, используемых в тяжело нагруженных зубчатых передачах, играет важную роль в обеспечении их надежности. В настоящее время в отечественной практике, наряду с широко известными видами термической и химико-термической обработки (цементация, азотирование) [4], все большее признание получают методы ионного азотирования. Для серийно выпускаемого ОАО «Уралмаш» бурового насоса УНБ-600 предложено в качестве окончательной обработки зубчатой передачи привода использовать технологию ионного азотирования на оборудовании фирмы *KLÖKNER IONON*.

Основным преимуществом метода ионного азотирования является существенное повышение контактной выносливости сталей за счет формирования в поверхностных слоях специального нитридного покрытия заданной толщины и регулируемого фазового состава. Это дает возможность для конкретных условий эксплуатации разработать свой собственный технологический процесс насыщения, обеспечивающий заданные параметры защитного слоя. Кроме того, относительно низкие температуры процесса позволяют сохранить исходную твердость стали, полученную в результате улучшения, и уменьшить возможное коробление, что исключает необходимость дополнительной механической обработки [1].

Процессу азотирования предшествует процесс термической обработки, состоящий в закалке и последующем высоком отпуске, который полностью устраняет остаточные напряжения, возникшие при закалке. С повышением температуры отпуска происходит изменение структуры материала, не связанное с фазовыми превращениями, в ходе которого интенсивно протекает процесс коагуляции и сфероидизации частиц цементита, имеющего форму тонких пластин. При температуре отпуска, превышающей

температуру последующего азотирования, структура стали представляет собой сорбит – ферритно-цементитную смесь с зернистой формой цементита. Изменение структуры при отпуске вызывает изменение и механических свойств закаленной стали. Наличие включений цементита препятствует перемещению дислокаций под воздействием внешних сил, что повышает прочностные свойства ферритно-цементитных смесей. Чем больше включений цементита и чем меньше они по размеру, тем сильнее они препятствуют перемещению дислокаций. Поэтому с повышением температуры отпуска твердость (НВ) и прочность (σ_B) стали понижаются, а пластичность (δ) и вязкость (ψ) повышаются.

Повышение допустимых нагрузок для колес тяжело нагруженных зубчатых передач заключается не только в повышении прочности поверхностного слоя, но и в выборе оптимальных механических свойств сердцевины. При низких значениях твердости сердцевины колеса более твердый поверхностный слой продавлиывает вязкую основу, вследствие чего повышается вероятность выкрашивания и отслаивания тонкого азотированного слоя. При высоких значениях твердости сердцевины под воздействием ударной нагрузки может иметь место поломка зуба.

С целью выбора оптимального сочетания свойств азотированного поверхностного слоя и более вязкой сердцевины зубчатого колеса были проведены стендовые испытания [5]. В исследовании использовались зубчатые колеса из стали 34ХН1М с модулем $m = 5$ мм, числом зубьев $z = 34$ и шириной венца $b_w = 25$ мм. Для них было выбрано два режима предварительной термообработки. В первом случае применялся оптимальный режим улучшения для крупномодульных зубчатых колес, изготовленных из стали 34ХН1М, при котором температура отпуска составила 580 – 600 °С. Этот режим термообработки позволил получить следующие значения механических свойств: твердость 255–265 НВ, временное сопротивление $\sigma_B = 700$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2} = 550$ МПа, относительное удлинение $\delta = 12–14\%$, ударная вязкость $KCU = 45–50$ Дж/см². Во втором случае температура отпуска была понижена до 520 – 540 °С, что позволило получить значение твердости 300–310 НВ, $\delta = 11–12\%$, $KCU = 40–45$ Дж/см², а прочностные свойства стали сохранить практически на том же уровне.

Стендовые испытания на контактную выносливость активных профилей зубьев являются весьма продолжительными по времени, так как не-

обходимо оперировать величинами порядка $10^5 - 10^7$ циклов нагружения. Поэтому с целью сокращения количества опытов было предложено разбить шестерни на 3 сектора (с приблизительно равным числом зубьев), и для каждого сектора установить свое время последующей операции ионного азотирования. Технология упрочнения деталей в плазме тлеющего разряда позволяет участки, не подлежащие обработке, защитить специальными чехлами и лишь затем осуществить азотирование. Ионное азотирование экспериментальных зубчатых колес проводили в азотоводородной атмосфере с добавлением аргона (не более 25 объемных%) при температуре в рабочей камере 510 – 520 °С по особой технологии [2]. Вначале защитным чехлом был закрыт один сектор шестерни, а два сектора выдержали в плазме тлеющего разряда в течение 8 ч. После этого закрыли еще один сектор исследуемого зубчатого колеса и вновь продолжили операцию азотирования в течение 16 ч. Таким образом, были получены шестерни, у которых один сектор был подвергнут только термической обработке, второй сектор был выдержан в плазме тлеющего разряда в течение 8 ч, а третий – в течение 24 ч.

В качестве экспериментальной установки был использован стенд, в состав которого входили приводной электродвигатель постоянного тока с регулируемой частотой вращения и одноступенчатый редуктор. Кроме того, был предложен следующий принцип сопряжения шестерен в редукторе. Редуктор нагружался таким образом, чтобы каждый сектор одной шестерни перекрывался двумя секторами сопряженной шестерни примерно в равных пропорциях. При этом в качестве экспериментальной была принята зубчатая передача с передаточным отношением равным единице, что позволило наблюдать взаимодействие зубьев ведущей и ведомой шестерен в постоянных парах (исключалось взаимодействие зуба одной шестерни со всеми зубьями сопряженной шестерни). Таким образом, в редукторе одновременно исследовалось шесть сочетаний материалов (рис. 1).

Окончательно программа эксперимента включала четыре опыта (сборки стенда). В нашем случае пару шестерен, находящихся в зацеплении, можно изобразить, развернув зубчатый венец в виде полосы, разделенной на сектора. Схема эксперимента представлена на рис. 2 (обозначения такие же, как на рис. 1).

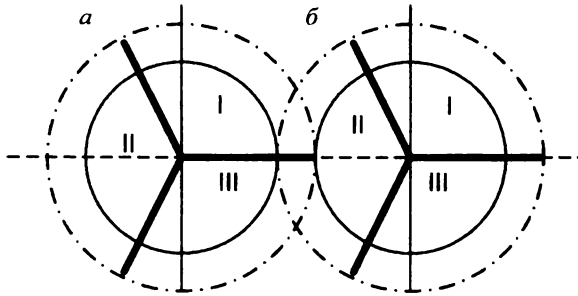


Рис. 1. Схематическое изображение зубчатого зацепления:
a – ведущая шестерня с твердостью сердцевины колеса 255–265 НВ,
б – ведомая шестерня с твердостью сердцевины колеса 300–310 НВ;
 I – без азотирования, II – время азотирования 8 ч, III – время азотирования 24 ч

<i>a</i> I	<i>a</i> II	<i>a</i> III	<i>a</i> I
<i>б</i> I	<i>б</i> II	<i>б</i> III	

<i>a</i> I	<i>a</i> II	<i>a</i> III	<i>a</i> I
<i>б</i> II	<i>б</i> III	<i>б</i> I	

<i>a</i> I	<i>a</i> II	<i>a</i> III	<i>a</i> I
<i>a</i> II	<i>a</i> III	<i>a</i> I	

<i>б</i> I	<i>б</i> II	<i>б</i> III	<i>б</i> I
<i>б</i> II	<i>б</i> III	<i>б</i> I	

Рис. 2. Схема эксперимента

Исходя из критерия минимизации длительности испытаний, продолжительность каждого опыта была ограничена величиной $N = 10^6$ циклов нагружения, что соответствует наработке $T = 24$ ч, при частоте вращения вала электродвигателя $n = 700$ об/мин. При этом контактные напряжения в зубчатом зацеплении составляли величину $\sigma_H = 950$ МПа.

Область максимальных контактных напряжений, в которой обычно имеет место процесс выкрашивания, расположена на ножке зуба, ниже точки соответствующей начальному диаметру. Кроме того, контакт зубьев с эвольвентным профилем, находящихся в зацеплении, происходит по прямой линии. Поэтому в качестве критерия для оценки процесса выкрашивания активных поверхностей зубьев была принята относительная протяженность зон выкрашивания на ножке зуба, определяемая как отноше-

ние суммы длин очагов выкрашивания к ширине фактического пятна контакта в данном сечении зуба:

$$k_f = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} L_i}{b},$$

где k_f – величина, описывающая степень выкрашивания активных поверхностей зубьев; L_i – протяженность фрагмента выкрашивания, определенная вдоль линии зацепления в рассматриваемом сечении зуба; b – ширина фактического пятна контакта в рассматриваемом сечении зуба.

Величина, описывающая степень выкрашивания активных поверхностей зубьев, изменяется в пределах от 0 до 1. В качестве критерия начала прогрессирующего выкрашивания на рабочей поверхности зуба (питтинга) была принята суммарная площадь очагов повреждения $S = 10 - 15 \text{ мм}^2$, что составляет примерно 5–8% от общей площади рабочей поверхности зуба [3]. В общей сложности были исследованы 42 пары рассматриваемых сочетаний. Оценка степени выкрашивания проводили путем визуального осмотра зуба шестерни, с зарисовкой картины разрушения (рис. 3).

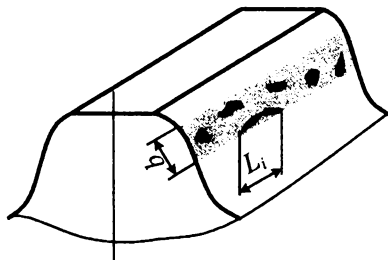


Рис. 3. Картина разрушения зуба шестерни

По окончании каждого опыта был вычислен коэффициент k_f , характеризующий степень выкрашивания зубьев. Обобщенные данные по оценке степени выкрашивания активных поверхностей зубьев, полученные в результате эксперимента, приведены в таблице.

Сводная таблица результатов испытаний на контактную выносливость

Марка стали	Твердость заготовки	Время азотирования, т, ч	Среднее значение коэффициента k_f	Число исследованных сочетаний	Число сочетаний с отсутствием питтинга
34ХН1М	255–265 НВ	24	0,120	7	3
		8	0,151	7	2
		0	0,405	7	0
	300–310 НВ	24	0,010	7	6
		8	0,057	7	3
		0	0,286	7	0

Из таблицы видно, что наиболее высокая контактная выносливость наблюдается на участке шестерни с исходной твердостью заготовки 300–310 НВ и временем азотирования 24 ч, что соответствует наименьшему значению коэффициента k_f . После стендовых испытаний для зубчатых колес, использованных в первом опыте, было проведено металлографическое исследование на образцах, вырезанных из венца зубчатых колес после наработки. Изучение участков зубьев шестерен в контактной зоне показало, что появление очагов разрушения обусловлено хрупким растрескиванием нитридных фаз, расположенных на более вязкой основе. Также были проведены измерения толщины и микротвердости нитридного слоя. Графики распределения микротвердости по глубине азотированного слоя представлены на рис. 4 (заштрихованная полоса характеризует разброс твердости основного материала колеса по сечению).

Как видно из графиков, твердость заготовки зубчатого колеса из стали 34ХН1М не влияет на твердость поверхности зубьев, подвергнутой ионному азотированию, так как твердость нитридного покрытия определяется только концентрацией азота в слое и, как следствие, формированием соответствующих химических соединений на основе нитридов железа. С увеличением времени выдержки растет концентрация азота в поверхностном слое, происходит его диффузия вглубь металла, вследствие чего возрастает величина диффузионного слоя. Аналогичным образом изменяется в зависимости от времени насыщения и поверхностная твердость за счет формирования нитридных фаз, которые адсорбируются на поверхности в виде равномерного слоя.

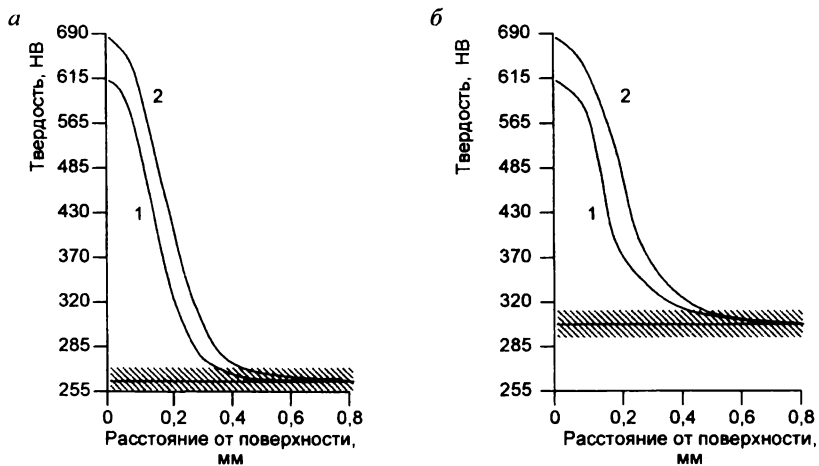


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине азотированного слоя:
а – твердость заготовки 255–265 НВ; *б* – твердость заготовки 300–310 НВ;
 1 – время азотирования 8 ч; 2 – время азотирования 24 ч

Исследование фазового состава было выполнено на установке ДРОН – 3.0. Рентгеноструктурный анализ показал, что в очень тонких приповерхностных слоях зубьев шестерни, выдержанных в плазме тлеющего разряда в течение 24 ч, фиксируется наличие ϵ -фазы (Fe_{2-3}N). В поверхностных слоях зубьев, азотированных в течение 8 ч, преобладающей является γ' -фаза (Fe_4N). В общем случае выявлена типичная структура азотированного слоя, состоящая из зоны железоазотистых соединений и следующей за ней диффузионной зоны, в которой содержание азота с увеличением глубины снижается до исходной концентрации в основном материале. Так, эффективная толщина упрочненной поверхности, состоящая из очень тонкого слоя соединений азота и половины диффузионной зоны, регулируется длительностью процесса азотирования.

Таким образом, ионное азотирование можно рекомендовать для поверхностного упрочнения зубчатых колес, используемых в тяжело нагруженных зубчатых передачах, работающих в условиях повышенного износа. При этом нитридные покрытия значительно повышают износостой-

кость изделия, а правильно проведенная термическая обработка обеспечивает комплекс прочностных свойств его сердцевины.

Библиографический список

1. Азотирование ответственных деталей тяжелого машиностроения с использованием плазмы тлеющего разряда: Обзор / *Б. Н. Гузанов, В. Н. Кеткин, А. Н. Калинин*. М., 1986.

2. А. с. 1767024 СССР, МКИ³ С23С8/22. Способ обработки стальных изделий / *Б. Н. Гузанов и др.* (СССР). № 4813600/02; Заявл. 12.04.90; Опубл. 07.10.92, Бюл. № 37.

3. *Мурашко В. П.* О функции накопления выкрашивания при контактной усталости // Детали машин: Респ. межвед. науч.-техн. сб. 1971. Вып. 19.

4. *Поляк М. С.* Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения: В 2 т. М., 1995.

5. Разработка экспериментальных методов исследования моделей износа тяжело нагруженных зубчатых передач приводов машин / *Г. Н. Мигачева, С. А. Кокшаров, С. Н. Карпов, З. П. Пасуманский* // Надежность крупных машин: Сб. науч. тр. Екатеринбург, 1990.

**А. А. Карпов, Е. А. Окунев,
О. Б. Лунегов, Г. Л. Нечаева**

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСРЕДНИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ НА ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИКАХ

Показатели работы обогатительных аппаратов во многом зависят от постоянства свойств продуктов, поступающих в переработку. В связи с этим качество промежуточных или товарных продуктов определяется не только значением величин, характеризующих их потребительские свойства, но и мерой стабильности этих величин. Одним из путей стабилизации качественных характеристик технологических продуктов является организация рециклов (рис. 1).