

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЗОТИРОВАННЫХ ПЕРЕДАЧ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ

А. Е. БЕЛЯЕВ

(Представлена научным семинаром кафедры прикладной механики)

Снижение габаритов и веса скоростных редукторов при одновременном стремлении к повышению их несущей способности немислимо без введения упрочнения рабочих поверхностей зубьев. Наиболее распространенными в настоящее время являются два способа упрочнения поверхности: азотирование и цементация.

Применение поверхностного упрочнения позволило резко повысить нагрузочную способность скоростных передач. Так, редукторы плавающих судов современной постройки имеют значение коэффициента $K_H = 25-30 \text{ кг/см}^2$ [6, 9, 11, 13]*.

Значительное повышение несущей способности зубчатых передач экспериментально получено рядом исследователей. Это хорошо иллюстрирует диаграмма на рис. 1 [8], где значение коэффициента K_H для улучшенных передач различных марок сталей лежит в интервале 8—18 кг/см^2 , а несущая способность зубчатых колес, подвергнутых поверхностному упрочнению, достигает $85 \div 95 \text{ кг/см}^2$.

Именно это обстоятельство позволило Ллойдсу существенно повысить допустимое значение коэффициента K_H для передач, подвергнутых поверхностному упрочнению, выпускаемых различными фирмами (Мааг, Аллен, Бровн-Бовери и т. п.).

Самым экономичным видом термохимического упрочнения является азотирование, так как после него зубчатые передачи не нуждаются в специальных отделочных операциях (например, шлифование, применяемое при цементации) с целью получения требуемой степени точности. Это происходит вследствие того, что сам процесс азотирования требует сравнительно низкой температуры ($T = 500-540^\circ \text{C}$), практически не вызывающей изменения размеров зуба.

* Коэффициент K_H характеризует нагрузочную способность зубчатых передач:

$$K_H = \frac{2M_1}{B \cdot d_{д1}} \cdot \frac{i+1}{i} \text{ кг/см}^2,$$

где M_1 — момент на шестерне, кгсм ;

$d_{д1}$ — диаметр делительной окружности шестерни, см ;

B — рабочая ширина зубчатого венца, см ;

i — передаточное число (знак минус — для внутреннего зацепления).

В настоящее время с помощью коэффициента K_H наиболее часто ведутся сравнения нагрузочных способностей скоростных передач.

На большое распространение азотирования для получения твердой поверхности у зубчатых передач турбинного типа указывает ряд работ [12; 13]. В последней работе при испытании натурной корабельной установки нагрузочная способность азотированной пары оказалась равной 95 кг/см^2 . При этом рабочая поверхность зуба не имела никаких повреждений. Таким образом, все более утверждающаяся тенденция изготовления зубчатых колес с повышенной твердостью рабочей поверхности зубьев предопределяет целесообразность испытания скоростных азотированных передач.

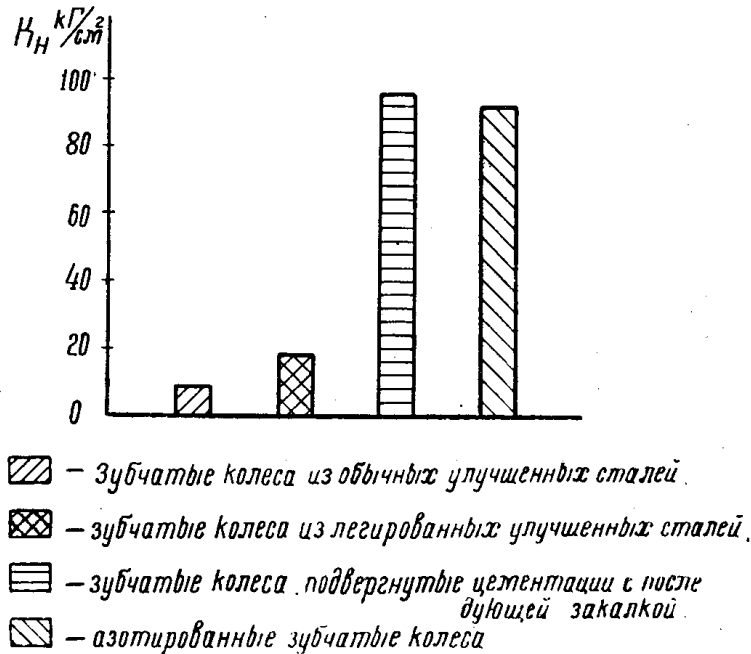


Рис. 1. Коэффициент K_H для зубчатых колес с различной термической и термохимической обработкой (по данным работы [8])

До недавнего времени в отечественном и зарубежном машиностроении применялись только стали типа 38ХМЮА (ГОСТ 3533—58) с высоким содержанием алюминия. Это было обусловлено стремлением к достижению максимальной поверхностной твердости (до 1000—1100 HV). Однако применение алюминиевых сталей имеет и ряд существенных недостатков. На поверхности образуется слой очень твердых хрупких нитридов, толщиной 20—30 $\mu\text{к}$, так называемая ϵ -фаза. Под действием нагрузки этот слой растрескивается и высыпается, искажая эвольвентный профиль зубцов.

И. М. Килимов [5], проводивший большое число экспериментов с зубчатыми азотированными колесами, наблюдал растрескивание и полное отслаивание ϵ -фазы с поверхности зубьев. В своих работах Р. Р. Гальпер [2] обнаружил по поверхности зубьев передач даже при относительно небольших нагрузках из сталей 38ХМЮА и 45Х2Н2МФЮА усталостные трещины, ориентированные по сильно развитой сетке ϵ -фазы.

Наличие ϵ -фазы отрицательно влияет и на предел усталости при изгибе. Е. А. Канторович [4] указывает, что чем меньше вероятность образования ϵ -фазы, тем выше предел усталости. Кроме того, по данным работы [7], с увеличением содержания азота в слое и повышением твердости статическая прочность азотированного слоя падает и разру-

шения носят хрупкий характер. Одновременно резко повышается чувствительность стали к растягивающим напряжениям. К этим же выводам приходит С. Ф. Балашов [1], который рекомендует для тяжело нагруженных деталей иметь твердость поверхности не более 650—700 *HV* (550—600 *HB*)*.

Существует также мнение, что повышение твердости поверхностного слоя не влечет за собой рост предела усталости при изгибе σ_{-1b} . Так, в работе [3] увеличение твердости от 41 *HRC* до 62 *HRC* не повлияло на σ_{-1b} .

Сказанное выше позволяет считать, что для зубчатых передач турбинного типа целесообразен выбор безалюминиевой марки стали и режима азотирования, при котором бы твердость поверхности не превышала 750 ÷ 800 *HV*.

Опыт эксплуатации высокоскоростных передач, а также эксперименты, проведенные на ЛКЗ, позволяют принять для экспериментальных пар новую сталь 30X2H2BФМА, механические свойства которой приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические характеристики стали 30X2H2BФМА

Наименование материала	Предел текучести, кг/см ² σ_T	Относит. удлинен. в % δ	Относит. сужение в % φ	Ударная вязкость, кг/мм ² a_K	<i>HB</i> , кг/см ²	Предел прочности, кг/см ² σ_b
Ст. 30X2H2BФМА	76,4	15,2	46,7	10,8	269	86,6

Режим азотирования зубчатых пар из этой стали предусматривает два периода. В первом — зубчатые пары при температуре $T=500 \pm 5^\circ$ выдерживаются в печи 40 часов при диссоциации аммиака от 16 до 25%, во втором — выдержка 60 часов при температуре $T=540 \pm 5^\circ$ (степень диссоциации 40 ÷ 55%).

Подобный режим позволяет получить твердость поверхности *HV* = 650—700 и глубину слоя 0,3 ÷ 0,5 мм. Твердость сердцевины *HB* = 240 ÷ 270.

Все зубчатые пары перед экспериментом были подвергнуты прикатке с абразивной пастой, представляющей собой смесь 1/4 карбида бора (ГОСТ 3647—59) и 3/4 жирового солидола. Прикатка производилась со скоростью 1,5 м/сек при незначительных нагрузках. Обычно после прикатки на зубьях замечался легкий металлический блеск по всей ширине зубчатого венца.

В процессе проведения эксперимента** производился постоянный контроль за поверхностью зубьев с целью обнаружения возможного скалывания чешуек твердого слоя или возникновения и развития питтинга.

Замечено, что после $N_{ц} = 10^8 - 2 \cdot 10^8$ на азотированных поверхностях колес появляются натирь, поверхности «засветляются». При дальнейшей работе вся поверхность шестерен и колес становится блестя-

* В последнее время за рубежом [10] применяют так называемое «мягкое азотирование». При этом процессе твердость поверхности лежит в интервале *HV* = 500—650.

** Сравнительные эксперименты проводились с некорригированными зубчатыми колесами, геометрические параметры которых были одинаковыми: $m=3$ мм, $\alpha=20^\circ$, $z_1=28$, $\beta=19^\circ 11' 17''$, $i=2$, $B=30$ мм, степень точности 5, зубофрезерование с частотой — $\nabla 7$. Материал улучшенных шестерен и колес соответственно 34ХН3М и 34ХН1М, твердость *HB*_ш = 262 и *HB*_к = 250.

щей. На шестернях обоих редукторов при испытаниях замечены полосы, ориентированные по направлениям скорости скольжения.

Испытания проводились ступенчатым нагружением, начиная с нагрузки, соответствующей $K_n = 50 \text{ кг/см}^2$. Работа на следующих ступенях нагрузки при базовых числах циклов не внесла изменения в состояние рабочих поверхностей зубьев.

Нагрузка $K_n = 74,5 \text{ кг/см}^2$ оказалась при наших экспериментах той максимальной нагрузкой, при которой стендовая установка работала нормально. Дальнейшее увеличение нагрузки по конструктивным условиям оказалось нецелесообразным.

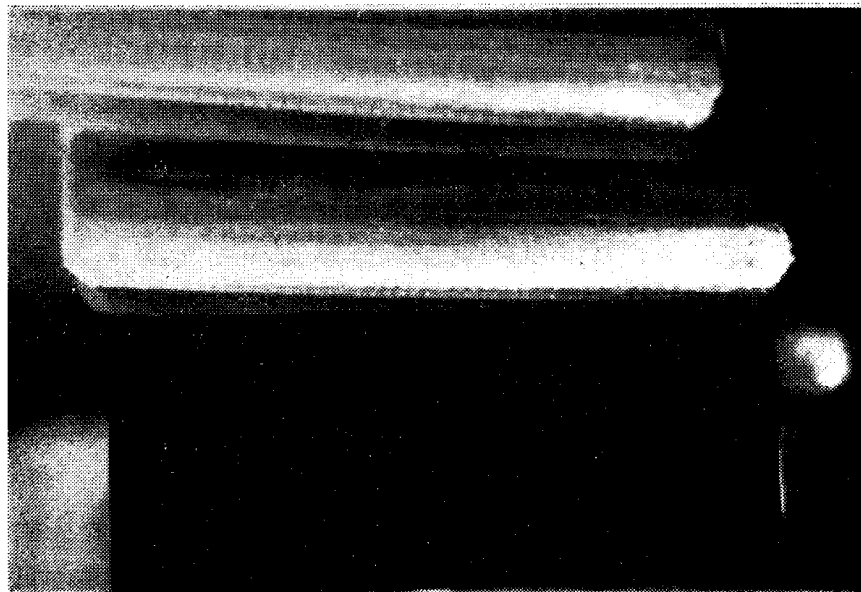


Рис. 2. Состояние рабочих поверхностей зубьев шестерни азотированного колеса после паработки трех базовых чисел циклов ($K_n = 74,5 \text{ кг/см}^2$)

После осмотра зубьев при указанной нагрузке невооруженным глазом ямки выкрашивания замечены не были, при осмотре замечен лишь матовый налет частиц поверхности зубьев. При рассматривании через лупу с 4-кратным увеличением матовая поверхность зубьев шестерен оказывалась покрытой в околополюсной зоне мельчайшими ямками выкрашивания. Поверхность зубьев колеса также была поражена многочисленными ямками выкрашивания (рис. 2).

Таким образом, нагрузка, очевидно, не достигала предельной. При этом несущая способность испытанных на скоростях 40—60 м/сек азотированных передач оказалась в 2—2,5 раза большей, чем в передачах, подвергнутых улучшению.

Выводы

1. Применение поверхностного упрочнения — один из путей резкого увеличения нагрузочной способности скоростных зубчатых передач.

2. Нагрузочная способность азотированных зубчатых передач, изготовленных из стали 30Х2Н2ВФМА ($HV = 700—750$), оказалось в 2—2,5 раза выше, чем нагрузочная

способность равнотвердых улучшенных передач ($HV=250\div 260$) при скоростях 40—60 м/сек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Ф. Балашов. Азотирование как метод повышения прочности деталей машин. Сб. «Повышение прочности деталей машин поверхностной обработкой». Машгиз, 1952.
 2. Р. Р. Гальпер. Контактная прочность высокоскоростных зубчатых передач с поверхностным упрочнением. ЛД НТП, Л., 1964.
 3. И. Е. Канторович. Повышение прочности деталей машин термохимической обработкой. Сб. «Повышение прочности деталей машин», 1949.
 4. И. Е. Канторович. Современные методы термохимической обработки и их влияние на усталостную прочность. Сб. «Повышение долговечности машин», 1960.
 5. И. М. Килимов. Повышение нагрузочной способности зубчатых передач при использовании эффекта перепада твердости. «Вестник машиностроения», № 3, 1959.
 6. О. А. Пыж. Производство турбинных зубчатых передач и перспективы повышения их точности и нагрузочной способности. Сб. «Современные методы оценки качества и пути новышения точности изготовления зубчатых передач». Машгиз, 1962.
 7. С. В. Серенсен. Сопrotивление усталости в связи с упрочнением и конструктивными формами. Сб. «Повышение усталостной точности деталей машин», М., 1952.
 8. A. Chamberlain. Proceedings of the International Conference of Gearing, London, 1958.
 9. W. H. Darlington. Transaction Institute of Marine Engineers, vol XVIII, 9, 1956.
 10. G. Niemann. Softnitrierten Zahnräder, VDI—Z, № 6, 1960.
 11. H. H. Page. Proceedings of the International Conference on Gearing, London, 1958.
 12. C. G. Wahl. The Marine Engineering and Naval Architect, May, vol. 83, № 1007, 1960.
 13. P. D. Weavings, W. H. Sampson. Transaction Institute of Marine Engineers, March, 1963.
-