

УДК 621.833:539.4

Д.И. ХАРИТОНЧИК

Белорусский автомобильный завод, г. Жодино

КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩИХ СТАЛЕЙ В КРУПНОГАБАРИТНЫХ АЗОТИРОВАННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕСАХ С ВНУТРЕННИМ ЗАЦЕПЛЕНИЕМ

Рассмотрены научные и практические аспекты конструкционной прочности современных крупногабаритных зубчатых колес внутреннего зацепления из сталей, содержащих в своем составе алюминий до 2%. Уточнены расчетные зависимости, необходимые при создании зубчатых колес планетарных редукторов. Приведены результаты стендовых и эксплуатационных испытаний крупногабаритных зубчатых колес мобильных машин из известных и новых алюминийсодержащих сталей. Даны рекомендации по применению сталей, обеспечивающих безаварийную эксплуатацию зубчатых колес при длительных пробегах мобильных машин. Полученные решения основаны на впервые изученных явлениях сегрегации (концентрации) и взаимодействия легирующих и примесных элементов на границах и в приграничных объемах зерен, формирующих зернограничные дислокации, а также прочностные и технологические свойства конструкционных сталей.

Ключевые слова: конструкционная прочность, крупногабаритные зубчатые колеса, азотирование, твердость, вязкость, усталость, ресурс

В современном машиностроении повышение надежности и ресурса зубчатых колес все чаще решается за счет оптимизации их материала и технологии получения деталей. Известно, что при переходе от твердости поверхности зубьев 200 НВ к твердости 60 HRC (при их цементации) достигается снижение веса колес в 7 раз [1].

Диаметр колес с внутренним зацеплением, которые являются составной частью планетарных редукторов мобильных машин, вплотную приблизился к 1500 мм, а ширина их зубчатого венца — к 250 мм. При цементации коробление таких деталей столь велико, что устранить деформацию (например, рихтовкой или шлифованием) и получить пригодные к эксплуатации детали практически невозможно. При азотировании (даже очень крупных колес) их форма и размеры практически не изменяются. Указанное обстоятельство послужило основной причиной применения азотирования для упрочнения рабочих поверхностей зубьев крупногабаритных зубчатых колес с внутренним зацеплением. Эти колеса чаще всего изготавливаются из сталей, содержащих алюминий, получивших название «нитраллои». Поверхность азотированного слоя нитраллоев может иметь исключительно высокие характеристики твердости (часто более 1000 НВ) и износостойкости. Вместе с тем, в ряде случаев при указанной твердости слой склонен к растрескиванию, сколам и «шелушению». Но более низкий уровень контактных напряжений в зубьях внутреннего зацепления позволяет (при твердости сердцевины зубьев >250 НВ) допускать повышение твердости азотированного слоя до 950 НВ, без опасности его разрушения. Следует также указать, что нитраллои обладают и низкой обрабатываемостью, что отрицательно сказывается на точности колес из-за интенсивного износа инструмента и невозможности его замены в процессе обработки крупногабаритных деталей.

Принципиально отличается поведение азотированного слоя коронных шестерен под нагрузкой из сталей, содержащих никель, особенно при отсутствии в материале алюминия. Даже при пластическом деформировании азотированного слоя, вызванном вдавливанием в поверхность стальных фрагментов поврежденных деталей, разрушений слоя не происходит, но изготовление шестерен из таких сталей (например, стали 38ХНЗМФА) также затруднительно из-за крайне низкой обрабатываемости материала.

При современных подходах и нормах по созданию азотированных колес усталости считается, что сопротивление усталостному разрушению в основном определяется твердостью сердцевины зубьев, а износостойкость, как сказано выше, — твердостью поверхностей зубьев. Рекомендованные значения твердости сердцевины составляют 23—42 HRC, а твердости азотированной поверхности — до 750 НВ [1]. Для алюминийсодержащих сталей допускается повышение твердости азотированной поверхности до 950 НВ [2].

Для определения допускаемых напряжений изгиба в зубьях F_{lim0} рекомендуется использовать следующую зависимость [1]:

$$\sigma_{F_{lim0}} = 430 + 190HRC_{серд} \quad (1)$$

При отсутствии в азотированном слое замкнутой нитридной сетки или ϵ -фазы в интервале твердостей сердцевины 24...40 HRC и поверхности — 550...750 НВ, а также при условии, что толщина азотированного слоя $t = 0,07...0,10$ м для алюминийсодержащих сталей и $t = 0,1...0,13$ для прочих легированных сталей, рекомендовано [3].

$$\sigma_{Fem0} = 290 + 12HRC_{серд} \quad (2)$$

Известно, что азотирование повышает сопротивление усталости материала и деталей, особенно при наличии поверхностных концентраторов напряжений [3, 4] (таблица 1).

Данные ряда исследований показывают, что при азотировании зубьев их максимальная изгибная выносливость достигается при оптимальной глубине упрочненного слоя. Дополнительное увеличение циклической прочности по критерию изгиба при этом достигает 20—30 % [4].

Точная расчетная оценка ресурса азотированных колес с внутренним зацеплением затруднена, так как природа повышения циклической прочности азотированных колес до конца не изучена [5]. Стандартизированная методика расчета распространяется лишь на колеса с наружным зацеплением [2]. Расчетная оценка ресурса азотированных коронных шестерен планетарных редукторов карьерных самосвалов грузоподъемностью свыше 130 тонн, проведенная по методу, предложенному в работе [6], показывает, что при твердости сердцевины зубьев, равной 32—33 HRC (алюминийсодержащая сталь), пробег составляет около 350 тысяч км при действующих напряжениях изгиба 360—370 МПа. Если учесть, что по критерию обрабатываемости (в первую очередь на долбежных станках) твердость сердцевины зубьев из указанных сталей обычно составляет не более 280 HB, то долговечность рассматриваемых колес может обеспечить пробег карьерных самосвалов на уровне 200—250 тысяч км, что подтверждается практикой эксплуатации и используется при плановых ремонтах редукторов карьерных самосвалов.

Несмотря на имеющийся широкий спектр азотируемых сталей, для современных производств крупногабаритных колес, к которым предъявляются высокие требования по точности, ресурсу и технологичности, требуются новые подходы, направленные на повышение твердости сердцевины зубьев и на разработку технологий получения заготовок, улучшающих их дальнейшую механическую обработку.

Приоритет и новизна проведенных исследований, направленных на достижение конструкционной прочности нитраллоев, заключаются в разработке для наиболее распространенного материала — стали 38Х2МЮ — новых подходов и технологий по обеспечению высоких характеристик сопротивления изгибным и контактными нагрузкам, производительности и точности при механической обработке деталей,

а также при создании нового материала, твердеющего при азотировании и тем самым открывающего новые перспективы повышения надежности и ресурса деталей машин большой единичной мощности.

Сущность нового подхода к повышению обрабатываемости колес при одновременном росте твердости колес перед нарезкой зубьев основано на общих принципах механики разрушения конструкционных сталей и положений механики резания металлов: более 90 % энергии резания приходится на процесс макролокализованного пластического течения стали [7], основу которого определяют дислокационные явления в материале. При этом приоритетное внимание уделено зернограницным эффектам сегрегации и взаимодействия элементов, особенно в феррите. Впервые предложено формировать в структуре сорбита небольшое (регламентированное) количество феррита — 2—3 %, что резко улучшает обрабатываемость стали [8]. Конструкционная прочность при этом достигается за счет повышения твердости феррита до 200—240 HV_{0,025}, при твердости сорбита — 285—310 HV_{0,025} и общей твердости материала 285—295 HB, а также повышения твердости и прочности приграничных объемов зерен при одновременной интенсификации процессов пластической деформации в смежных (с указанными объемами) областях зерен [8]. Рассматриваемые эффекты были отмечены и ранее [9], но должного объяснения их природы тогда не было дано. Позднее с развитием локальных методов исследования (в рамках разработки материаловедческих основ конструкционной прочности сталей) было показано и доказано, что повышение прочности границ ферритных зерен и интенсивности пластического течения в их приграничных объемах определяется локальным повышением в них концентрации легирующих элементов, что формирует структурную неоднородность зерна и повышает, как правило, механические и конструкционные свойства сталей и деталей из них, не изменяя механизма пластического течения металла в приграничных объемах зерен [8, 10]. Изложенная концепция одновременного повышения прочности стали и ее обрабатываемости реализована при создании технологии «неполной закалки» при термическом улучшении структуры заготовок зубчатых колес перед нарезанием зубьев [8].

Стендовые исследования циклической прочности фрагментов зубчатых колес при пульсирующем поперечном изгибе (асимметрия цикла — $\sigma_{F0,1}$) позволили не только оценить и сравнить конструкционную прочность нитраллоев различных групп, имеющих отличающиеся структуры, но и уточнить рекомендуемые в литературе расчетные зависимости, используемые при создании крупногабаритных азотированных зубчатых колес с внутренним зацеплением.

Колеса $\varnothing 950$ ($m = 7$ мм), изготовленные из стали 38Х2МЮА с использованием технологии «неполной закалки», имели толщину азотированного слоя 0,3—0,35 мм и поверхностную твердость свыше

Таблица 1 — Влияние азотирования на усталостную прочность и чувствительность к надрезу Al-Cr-Mo сталей [3]

Условие	Усталостная прочность, кг/мм ²
До азотирования, образец без надреза	31,6
После азотирования, образец без надреза	63,3
До азотирования полукруговой надрез	17,6
После азотирования, полукруговой надрез	61,2
До азотирования V-надрез	16,9
После азотирования V-надрез	56,2

950 HV₅ при твердости сердцевины 290 HR. Из стендовых испытаний следует, что предел усталости фрагментов колес при поперечном изгибе указанных деталей равен 460—470 МПа. Расчетное значение предельных напряжений для таких колес, определяемое по зависимости (1) и (2), составляет 595—635 МПа соответственно. Учитывая более низкую относительную (*t/m*) толщину азотированного слоя (всего 0,05 вместо рекомендуемой 0,07—0,1 мм), полученное расчетное значение необходимо снизить примерно на 15 % [4]. В этом случае расчетная величина предела усталости составит по зависимости (1) 500 МПа, что неплохо коррелируется со значением, полученным при стендовых испытаниях. Поэтому при создании крупногабаритных колес с внутренним зацеплением целесообразнее пользоваться соотношением (1), приведенным в работе [1].

«Неполная закалка» заготовок при улучшении их структуры принята в ОАО «БелАЗ» в качестве базовой технологии и используется в серийном производстве крупногабаритных зубчатых колес из стали 38Х2МЮА.

Увеличение грузоподъемности, стоимости и ресурса (до 1,5—2 млн км пробега) карьерных самосвалов при постоянном росте уклонов дорог в карьерах требует дальнейшего повышения прочности зубчатых колес, используемых в их трансмиссиях. Согласно расчетам долговечности, необходимое повышение прочности сердцевин азотированных зубьев может достичь предельных значений, оговоренных нормами расчета [1]: 40—42 HRC — с одновременным сохранением или увеличением конструкционной вязкости материала до КСУ 40—60 Дж/см². Наиболее продуктивным решением проблемы является создание зубчатых колес на основе нитраллоев, твердеющих на стадии азотирования [3]. Эта группа никельалюминийсодержащих сталей позволяет (при определенных соотношениях в составе никеля и алюминия) получать заготовки деталей с твердостью 250—270 НВ и тем самым обес-

Таблица 2 — Свойства сердцевин: нитраллоя N до и после азотирования [2] (химический состав — см. таблицу 3)

Свойства*	До азотирования	После азотирования
Предел прочности при растяжении, МПа	931	1338
Предел текучести, МПа	806	1266
Удлинение, % (50 мм)	22,0	15,0
Сужение поперечного сечения, %	59,4	43,4
Твердость по Бринеллю	277,0	415,0

*Сталь была подвергнута закалке с 900° и затем отпуску при 650°

печивать приемлемые обрабатываемость и точность (7—8 степени) зубчатых колес больших габаритов, а при азотировании получать твердость сердцевин зубьев — 40—43 HRC (таблица 2).

Анализ существующих нитраллоев (используемых в США) и цикл проведенных исследований новых материалов (стали 20КН4МФЮА), полученных в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси и ОАО «БелАЗ» [11], позволяют считать оптимальной сталь, содержащую никель в количестве 3,8—4,2 % и алюминий — 0,8—1,2 % (таблица 3). Возможно использование стали с повышенным содержанием алюминия — до 2 %. Новый материал выгодно отличается от известных аналогов конструкционно-технологическими характеристиками и позволяет формировать качественно новую высокопрочную конструкционную прочность как материала, так и зубчатых колес из него, за счет изменения твердости сердцевин деталей в диапазоне 25—42 HRC, а также управления структурой азотированного слоя.

В зубчатых колесах с внутренним зацеплением (Ø400 и Ø600, длина зуба — 150 мм), твердость серд-

Таблица 3 — Механические свойства нитраллоев, твердеющих на стадии азотирования [3, 13]

Марка нитраллоя	Характеристики материалов						
	σ _r , МПа	σ _b , МПа	δ, %	ψ, %	КСУ, Дж/см ²	Твердость	
						сердцевин, HRC	поверхности азот. слоя, HV ₅
Нитраллой N [3]	800 (1260)	930 (1330)	23 (15)	— —	— —	— —	— —
Нитраллой 5-2 [13]	850	900 (1300)	16 (5)	55 (10)	120 10	30—32 (43)	— (920)
20ХН4МФЮА [11]	— — [900]	820 (1220) [1020]	20 (8) [16]	50 (9) [50]	130 (13) [44]	2—7 (42) [33—34]	— (970) [840—890]

Примечание:

1. Химический состав:

- нитраллой N: C = 0,2—0,27; Si = 0,20—0,40; Mn = 0,40—0,70; Cr = 1,0—1,3; Ni = 3,2—3,8; Mo = 0,2—0,3; Al = 0,85—1,2;

- нитраллой 5-2: C = 0,2—0,25; Mn = 0,25—0,45; Ni = 4,75—5,25; Cr = 0,4—0,6; Mo = 0,2—0,3; Al = 1,8—2,0; V = 0,08—0,15; Fe — ост.

- 20ХН4МФЮА: C = 0,17—0,22; Si = 0,07—0,37; Mn = 0,40—0,60; Ni = 3,90—4,20; Cr = 0,40—0,60; Al = 0,80—1,20; Mo = 0,40—0,60; V = 0,10—0,15; Fe — ост.

2. В скобках () — характеристики после старения (азотирования); в скобках [] — характеристики после старения (азотирования) и дополнительного отпуска детали.

цевины зубьев после азотирования достигала 42 HRC, твердость азотированного слоя — 950—970 HV, толщина слоя — 0,4—0,6 мм. В слое отсутствует сплошная нитридная сетка по границам зерен, что связано с повышенным ~4 % содержанием никеля и его концентрацией в приграничных объемах зерен [12]. Это обстоятельство является дополнительным фактором повышения циклической прочности сердцевин.

Неизбежное снижение ударной вязкости твердеющих при азотировании нитраллоев и крупных деталей из них, устраняется финишной операцией — отпуском, режим которого устанавливается в зависимости от содержания алюминия в стали и климатических условий эксплуатации машин.

Стендовые испытания фрагментов колес $\varnothing 600$ из стали 20ХН4МФЮА показали значительное (в сравнении со сталью 38Х2МЮА) увеличение циклической прочности: предел выносливости составляет 600—620 МПа (в деталях!) и практически равен пределу выносливости цементированных колес.

Повышение конструкционной прочности следует отнести как за счет увеличения твердости сердцевин зубьев, так и наличия в стали никеля, что обычно не только заметно повышает циклическую прочность улучшенных конструкционных сталей, но и несущую способность азотированного слоя колес в части сопротивления охрупчиванию при локальных перегрузках, которые характерны для планетарных редукторов с самоустанавливающимися зубчатыми колесами с большой шириной зубчатого венца.

Эксплуатационные испытания коронных шестерен из стали 20ХН4МФЮА в колесных редукторах самосвалов большой грузоподъемности, используемых в карьерах по разработке гранита, подтвердили высокую конструкционную прочность нового материала: азотированные зубчатые колеса из него имеют ресурс, необходимый для обеспечения всего жизненного цикла карьерных самосвалов грузоподъемностью 40 тонн.

Заключение. Конструкционная прочность крупногабаритных азотированных зубчатых колес с внутренним зацеплением, изготовленных из алюминийсодержащих сталей, практически полностью определяется твердостью сердцевин зубьев и отсутствием в стали нитридных фаз по границам зерен.

Одновременное повышение твердости сердцевин зубьев до 280—300 НВ и обрабатываемости деталей из нитраллоев, сохраняющих твердость на

стадии азотирования, достигается формированием в сорбитной структуре колес (перед нарезанием зубьев) регламентируемого количества феррита (~3—5 %) путем использования разработанного в Объединенном институте машиностроения нового метода — «неполной закалки» проводимой при термическом улучшении структуры заготовки [8].

Максимальное повышение прочности и ресурса зубчатых колес больших габаритов достигается применением в конструкциях зубчатых колес нитраллоя, твердеющего при азотировании, имеющего состав и технологию получения согласно патенту [11]. При использовании нового материала в строительных и дорожных машинах могут быть получены азотированные зубчатые колеса, обеспечивающие жизненный цикл изделия.

Список литературы

1. Справочник металлста / под ред. С.А. Чернавского. — М.: Машиностроение, 1976. — Т. 1. — 768 с.
2. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчеты на прочность: ГОСТ 21354-87. — М: Машиностроение, 1988. — 125 с.
3. Кейз, С.Л. Алюминий в чугунах и сталях / С.Л. Кейз, К.Р. Вангорн. — М.: Металлургиздат, 1959. — С. 457.
4. Повышение несущей способности механического привода / под ред. В.М. Кудрявцева. — М.: Машиностроение, 1973. — 223 с.
5. Терентьев, В.Ф. Использование азотирования для изменения механических характеристик металлических материалов / В.Ф. Терентьев, А.Г. Колмаков, М.С. Мичугина // Деформация и разрушение материалов: сб. науч. статей по материалам I Междунар. конф. — М., 2006. — С. 457—464.
6. Ресурс крупногабаритных азотированных зубчатых колес / И.А. Атрошонок [и др.] // Механика — машиностроению: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Инновации в машиностроении». — Минск, 2010. — С. 189—195.
7. Стариков, В.К. Дислокационные представления о резании металлов / В.К. Стариков. — М.: Машиностроение, 1979. — С. 5—140.
8. Харитончик, Д.И. Повышение обрабатываемости улучшенных конструкционных сталей для крупногабаритных азотированных зубчатых колес / Д.И. Харитончик [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2010. — № 1. — С. 78—80.
9. Мак Лиин, Д. Границы зерен в металлах / Д. Мак Лиин. — М.: Металлургиздат, 1960. — 322 с.
10. Моисеенко, В.И. Основы структурной равнопрочности стали и элементов крупногабаритных деталей машин / В.И. Моисеенко, П.Л. Мариев. — Минск, 1999. — 200 с.
11. Патент ВУ9749С1 2007.10.30 «Способ изготовления зубчатых колес».
12. Егоров, А.Н. Зернограничные эффекты, локализация пластической деформации и разрушения в материале крупногабаритных зубчатых колес / А.Н. Егоров [и др.] // Деформация и разрушение материалов: сб. науч. статей по материалам I Междунар. конф. ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН. — М., 2006. — С. 101—103.
13. Mounce, W.S. Nitriding Steel That Age Hardens / W.S. Mounce, A.J. Miller // Metal Progress. — 1960. — Vol. 77, № 2. — Pp. 91—95.

Kharitonchik D.I.

Structural strength of aluminum-containing steels in constructions of large-dimension nitrided internal gears

In the article it is considered the scientific and practical aspects of structural strength of modern large-dimension internal gears made of steel, containing aluminum up to 2 %. Calculated dependences required for production of gears for planetary gearbox are specified. The results of bench and operation tests of large-dimension gears made of generally known and new aluminum-containing steels are provided. Guidelines for application of steels, ensuring accident-free operation of gears at long-distance running of auto vehicles are given. The achieved solutions are grounded on the phenomenon of segregation (concentration), studied for the first time, and interaction of alloying and impurity elements on the boundary and near-border zone of grain volumes, forming grain boundary dislocation, as well as strength and technological properties of structural steels.

Поступила в редакцию 16.01.2012.