



Д. И. Харитончик
В. И. Моисеенко

КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ЗУБЧАТЫЕ КОЛЕСА

С ВНУТРЕННИМ
ЗАЦЕПЛЕНИЕМ
ИЗ АЛЮМИНИЙ-
СОДЕРЖАЩИХ
СТАЛЕЙ



УДК 621.833.16

Харитончик, Д. И. Крупногабаритные зубчатые колеса с внутренним зацеплением из алюминийсодержащих сталей / Д. И. Харитончик, В. И. Моисеенко. – Минск : Беларуская навука, 2012. – 125 с. : ил. – ISBN 978-985-08-1414-2.

Монография посвящена созданию крупногабаритных азотированных зубчатых колес с внутренним зацеплением, изготавливаемых из сталей, специально легированных алюминием. Приведенные результаты выполненных оригинальных исследований, в том числе в области зернограницных эффектов в конструкционных сталях, позволяют получить решения, направленные на повышение надежности и ресурса деталей, их технологичности, в первую очередь – обрабатываемости. Они могут стать научной основой и практическим руководством создания новых высокоэффективных материалов для машиностроения, в том числе сталей и деталей, твердость которых заметно повышается при нагреве.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников, а также студентов технических вузов, занятых конструированием, технологией и материаловедением зубчатых передач.

Табл. 38. Ил. 36. Библиогр.: 42 назв.

Р е ц е н з е н т ы:

академик НАН Беларуси П. А. Витязь,
член-корреспондент НАН Беларуси А. П. Ласковнев

ISBN 978-985-08-1414-2

© Харитончик Д. И., Моисеенко В. И., 2012
© Оформление. РУП «Издательский дом
«Беларуская навука», 2012

ВВЕДЕНИЕ

Технический уровень современного машиностроения (проектирования и изготовления) позволяет получать высококачественные зубчатые колеса с неограниченным сроком службы, преждевременное разрушение которых практически исключено. Примером могут служить КПП и редукторы задних мостов легковых и транспортных машин, в которых зубчатые колеса при вполне приемлемых весовых характеристиках не имеют повреждений и поломок. В конструкциях крупногабаритных редукторов выход из строя зубчатых колес (даже в гарантийный период) встречается достаточно часто из-за особенностей их конструкции и технологий изготовления.

Работоспособность зубчатых колес определяется главным образом сопротивлением материала изгибной и контактной усталости, хрупкому разрушению и износу. Для крупногабаритных колес особое значение приобретает минимизация деформации при термообработке во избежание резкого увеличения локальной нагруженности материала деталей.

Необходимость достижения высоких эксплуатационных характеристик предопределила следующие основные направления конструирования, производства и применения крупногабаритных зубчатых колес с внутренним зацеплением, в том числе для карьерных самосвалов:

нешлифуемые цементируемые колеса диаметром до 500 мм, закаливаемые в штампах;

зубчатые колеса диаметром до 600–700 мм, термически улучшаемые перед нарезкой зуба с последующей закалкой токами высокой частоты (ТВЧ) рабочих поверхностей зубьев;

азотированные зубчатые колеса диаметром свыше 600 мм (до 1500 мм), с термическим улучшением кольцевой заготовки или заготовки после предварительного нарезания зуба;

азотированные колеса, твердость всего объема материала у которых дополнительно повышается на стадии азотирования. Колеса указанного типа изготавливаются из специальных сталей, содержащих никель до 5% и алюминий до 2%, и до последнего времени широкого распространения не получили.

Указанное разнообразие связано с тем, что масса зубчатой передачи (у мобильных машин она всегда должна быть минимальной) в значительной мере определяется суммарной массой входящих в нее зубчатых колес. Известно, что переход твердости поверхности зубьев от 200 HB к 340 HB снижают массу передачи примерно в 2,5 раза, а с переходом твердости от 200 HB к 60 HRC (при их цементации) достигается снижение в 7 раз [1]. Поэтому при снижении массы зубчатых передач с одновременным ростом их ресурса предпочтение обычно отдается цементированным колесам, хотя и получаемым наиболее трудоемкими и энергоемкими процессами.

Длительный опыт эксплуатации крупногабаритных цементированных колес с внутренним зацеплением показал, что они имеют максимальный срок службы при типовом конструктивном решении: материал – сталь 20ХН3А (или ее аналог), напряжения изгиба – не более 500–550 МПа. Хотя закалка указанных колес после цементации производится в закалочных штампах, но даже в этом случае часто требуется рихтовка деталей, что ограничивает возможности применения цементации для колес с диаметром более 500 мм.

Рост грузоподъемности мобильных машин и передаваемых редукторами мощностей привел к увеличению размеров и веса всех зубчатых колес. Диаметр колес с внутренним зацеплением вплотную приблизился к 1500 мм, а ши-

рина их зубчатых венцов – к 250 мм. Коробление при закалке зубьев колес указанных размеров достигает нескольких миллиметров, что соизмеримо или превышает глубину цементации. Устранить последствия деформации указанной величины (например, рихтовкой или шлифованием) и получить пригодные к эксплуатации детали практически невозможно. Это обусловлено дефицитом оборудования для шлифования колес с внутренним зубом, а также неизбежным в этом случае подрезанием ножки зуба и удалением упрочненного слоя, приводящим к значительной концентрации напряжений и снижению несущей способности материала деталей.

Указанные обстоятельства послужили основной причиной применения азотирования для упрочнения рабочих поверхностей зубьев крупногабаритных зубчатых колес с внутренним зацеплением. При азотировании даже очень крупных колес их форма и размеры практически не изменяются. Однако твердость сердцевины зуба и глубина упрочненного поверхностного слоя, во многом определяющих их сопротивление изгибной и контактной усталости, не могут заметно превышать величины: 260–280 HB и 0,4 мм соответственно, что ограничивает дальнейший рост ресурса рассматриваемых деталей при существующих технологиях и используемых материалах.

Крупногабаритные азотированные зубчатые колеса с внутренним зацеплением чаще всего изготавливаются из сталей, содержащих алюминий. Основная причина применения этих сталей в азотированных колесах – возможность повышения износостойкости деталей при больших сроках их службы. Азотированный слой сталей такого класса имеет исключительно высокие характеристики твердости (часто более 1000 HV) и износостойкости. Вместе с тем в ряде случаев при указанной твердости слой склонен к растрескиванию, сколам и «шелушению». Кроме того, допустимые нагрузки на азотированные слои меньше по сравнению с нагрузками, применяемыми для цементованных слоев. Следует также указать, что производство крупногабарит-

ных колес с внутренним зацеплением из сталей, содержащих алюминий, связано с решением ряда других проблем, важнейшие из которых: повышение обрабатываемости и точности колес, особенно при формировании зуба долблением, а также обеспечение необходимого качества азотированного слоя.

Особое место занимают колеса, твердость сердцевины которых повышается на стадии азотирования. Они имеют высокую несущую способность, но как при получении материала, так и при изготовлении деталей из него до последнего времени существовали нерешенные проблемы.

В настоящей работе рассмотрены научные и практические аспекты создания современных крупногабаритных зубчатых колес с внутренним зацеплением повышенной надежности и обрабатываемости из сталей, содержащих в своем составе алюминий до 2%. Полученные решения основаны на впервые изученных явлениях сегрегации (концентрации) и взаимодействия легирующих и примесных элементов на границах и в приграничных объемах зерен, формирующих зернограницные дислокации, а также прочностные и технологические свойства конструкционных сталей.

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АЗОТИРОВАННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С ВНУТРЕННИМ ЗАЦЕПЛЕНИЕМ

1.1. Служебные свойства азотированных зубчатых колес и их отказы в эксплуатации

Зубчатые колеса с внутренним зацеплением – неотъемлемая часть планетарных редукторов, которые в мобильных машинах обычно размещают в колесах. По этой причине к указанным редукторам (в том числе к колесным редукторам карьерных самосвалов большой и особо большой грузоподъемности – 30–450 т) предъявляются особые требования по снижению их диаметра. А это, в свою очередь, приводит к увеличению длины зубьев.

Анализ причин отказов крупногабаритных планетарных редукторов мотор-колес карьерных автосамосвалов показал, что основными провоцирующими факторами разрушения являются низкая твердость сердцевины зубьев и хрупкость азотированного слоя, а также высокие контактные и изгибные нагрузки, вызванные неточностью изготовления деталей из-за повышенного износа режущего инструмента при плохой обрабатываемости материала.

Разрушению упрочненного слоя и детали может способствовать циклическая текучесть подслояных объемов зубьев по причине малой относительной толщины слоя при крупных (>10–12 мм) модулях зубьев.

Натурные исследования работоспособности крупногабаритных азотированных колес, изготовленных из разных сталей, проведены на карьерных самосвалах различных модификаций при их эксплуатации в регионах России.

К характерным повреждениям зубчатых колес при различных сроках службы обычно относят [2]:

излом (полный или частичный) зуба, вызванный вязким, хрупким или усталостным разрушением;

вмятины, образованные воздействием инородного тела;

скол торцов зубьев, чаще всего вызванный концентрацией нагрузки у края зуба или в результате попадания между зубьями какого-либо инородного тела;

выкрашивание, которое подразделяется на хрупкое и усталостное;

отслаивание упрочненного слоя, связанное с недостаточной его толщиной или с недостаточной прочностью сердцевины.

Существуют определенные различия в механизмах развития выкрашивания и отслаивания. Если при выкрашивании первичная трещина, как правило, появляется на поверхности или на небольшой глубине под поверхностью, то при отслаивании сначала образуется подслоная усталостная трещина. При отслаивании трещина в слое обычно располагается перпендикулярно профилю зуба, а трещина при выкрашивании составляет с профилем острый угол. Для отслаивания характерна сглаженная поверхность дефекта с выступами, представляющими собой следы фронта развития подслоных усталостных трещин.

Износ зубьев обычно возникает при отсутствии других дефектов поверхности зуба (следов заедания, выкрашивания и т. д.).

У азотированных колес с внутренним зацеплением коронные шестерни планетарных редукторов из алюминийсодержащей стали (38Х2МЮА) чаще всего возникают трещины в азотированном слое зубьев (рис. 1.1); происходит его шелушение и отслаивание; нередко является усталостный излом зубьев. Следует особо подчеркнуть, что отмеченное происходит практически всегда при твердости сердцевины ниже 220 НВ.

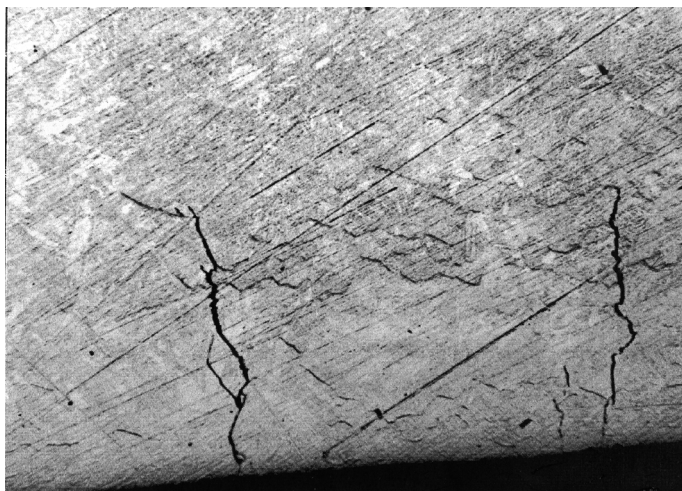
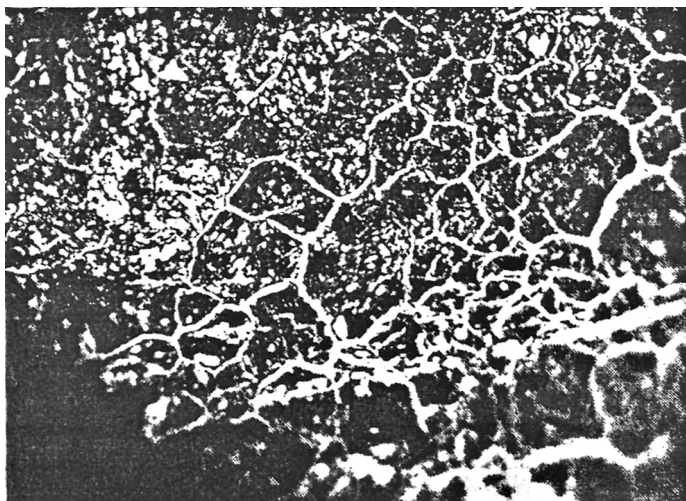


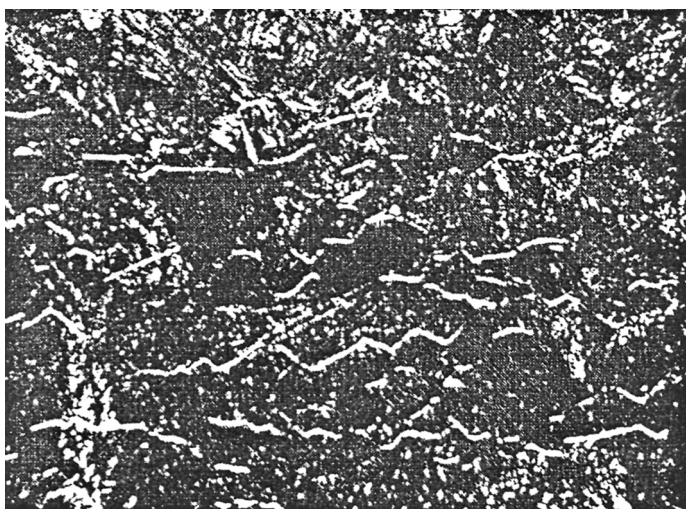
Рис. 1.1. Трещины в азотированном слое «коронной» шестерни планетарного редуктора карьерного самосвала, сталь 38Х2МЮА (начало трещин в зоне концентрации γ' -фазы, увеличение $\times 200$)

При этом твердость поверхности азотированного слоя обычно превышает 950–1000 HV₅. В микроструктуре слоя присутствует хрупкая нитридная фаза γ' в виде замкнутой и разорванной сетки (рис. 1.2 а, б), ориентированной параллельно поверхности зуба.

Высокая поверхностная твердость (1000–1200 HV₅) азотированного слоя обусловлена образованием в стали, легированной алюминием, γ'_{Al} -фазы, имеющей микротвердость (~1500 HV), и сильными упругими искажениями в местах сопряжения γ'_{Al} -фазы с имеющейся железистой γ' -фазой. При этом γ'_{Al} -фаза обычно находится в виде нитридной сетки на границах зерен упрочненного слоя. Это положение подтверждено работами ведущих специалистов в области азотирования [3, 4]. В наших исследованиях при твердости образцов-свидетелей свыше 950 HV наблюдались трещины в азотированных объемах и их отслаивание от основного материала даже при порезке объектов исследования вулканитом (с охлаждением).



a



б

Рис. 1.2. Наличие в микроструктуре слоя хрупкой нитридной γ' -фазы:
a – замкнутая; *б* – замкнуто-разорванная сетка, ориентированная параллельно поверхности, увеличение $\times 500$

Принципиально отличается поведение под нагрузкой азотированного слоя коронных шестерен из сталей, содержащих никель, при отсутствии в их составе алюминия. Поверхностная твердость деталей из стали 38ХНЗМФ, например, составляет 600–670 НВ₅, сердцевины – 270–285 НВ. Несмотря на пластическое деформирование азотированного слоя, вызванное вдавливанием в поверхность стальных фрагментов поврежденных деталей, разрушений слоя или его отслаивания не отмечено. Вместе с тем изготовление шестерен из таких сталей затруднено из-за крайне низкой обрабатываемости материала.

Результаты исследования отказов колес в процессе эксплуатации позволяют считать, что для обеспечения надежности и ресурса крупногабаритных колес необходимы исследования как в части совершенствования процесса азотирования, так и технологии термического улучшения материала колес перед нарезанием зуба (особенно из алюминийсодержащей стали) с целью максимального повышения его прочности и твердости при одновременном обеспечении приемлемой обрабатываемости материала и точности деталей на существующем оборудовании.

Приоритет и новизна исследований, приведенных в монографии, заключаются в оптимизации структуры алюминийсодержащих сталей, обеспечивающей высокое сопротивление азотированных зубчатых колес изгибным и контактным нагрузкам, приемлемую их обрабатываемость и точность; а также создание нового материала, отвечающего требованиям резкого увеличения ресурса крупногабаритных зубчатых колес при минимизации их веса и габаритов.

1.2. Выбор прочностных характеристик конструкционных сталей для азотированных зубчатых колес

Крупногабаритные азотированные зубчатые колеса имеют более низкие по сравнению с цементированными значения твердости сердцевины и существенно меньшие

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Глава 1. Конструкторско-технологические особенности и несущая способность крупногабаритных азотированных зубчатых колес с внутренним зацеплением	7
1.1. Служебные свойства азотированных зубчатых колес и их отказы в эксплуатации	7
1.2. Выбор прочностных характеристик конструкционных сталей для азотированных зубчатых колес	11
1.3. Служебные свойства конструкционных сталей, подвергаемых азотированию	15
1.4. Особенности механической обработки алюминийсодержащей стали 38Х2МЮА.....	34
Глава 2. Основы повышения твердости сердцевины зубьев и азотированного слоя при обеспечении обрабатываемости зубчатых колес с внутренним зацеплением из алюминийсодержащих сталей	45
2.1. Зернограницные эффекты конструкционной стали и формирование свойств азотированных зубчатых колес.....	45
2.2. Роль зернограницной диффузии при ХТО на качество упрочненного слоя	52
2.3. Повышение твердости алюминийсодержащих сталей на стадии азотирования	57
Глава 3. Азотированные зубчатые колеса из алюминийсодержащих сталей	62
3.1. Концепция повышения обрабатываемости алюминийсодержащих азотируемых термически улучшаемых сталей и деталей из них путем управления процессами пластического деформирования в зоне резания.....	62
3.2. Время выдержки заготовок при неполной закалке для формирования сорбитной структуры с ферритом.....	73

Глава 4. Новые конструкционные стали для зубчатых колес с твердеющей сердцевиной зуба при азотировании.....	80
4.1. Оптимизация состава конструкционной стали	80
4.2. Новый азотируемый конструкционный материал: ХТО, микроструктура, свойства.....	94
4.3. Состав и структура зернограницных объемов зерен стали, твердеющей при азотировании	105
4.4. Технологические основы получения крупногабаритных зубчатых колес с внутренним зубом из сталей, твердеющих при азотировании.....	110
Заключение	119
Литература.....	121