

пресс-порошка подвергнутого воздействию взрывной волны и компактированием под давлением ЗГПа.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что применение различных технологий получения керамики состава ЦТБС-3М значительно изменяет ее диэлектрические свойства. Использование полученных результатов позволит прогнозировать диэлектрические свойства керамик, получаемых с использованием высокоэнергетических технологий.

1. Прюммер Р. Обработка порошковых материалов взрывом. М.: Мир. 128 с.
2. Шилин А.Д. Метастабильные перовскитные фазы на основе алюмоиобата свинца, синтезированные при высоком давлении: диссертация ... кандидата физико-математических наук./ А.Д. Шилин. - Минск, ИФТП, 1988. – 138 с.
3. Рубаник В.В., Шилин А.Д., Рубаник В.В. мл. и др. Перспективные материалы / Витебск: Изд. Центр УО ВГТУ, 2009. – 542 С.
4. Шилин А. Д., Рубаник В.В. мл. Свойства сегнетоэлектрической керамики, полученной с использованием ультразвуковых колебаний и энергии взрыва. // Сборник докладов Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела - С. 338(2)- 338(3), ФТТ -2009», 20 – 23 октября 2009, Минск, Беларусь.
5. В.В. Рубаник, А.Д. Шилин, В.В. Рубаник мл., И.В. Петров, Л.В. Маркова. Использование ультразвуковых колебаний и энергии взрыва для получения сегнетокерамики. Тезисы II Международной научной конференции «Наноструктурные материалы–2010: Беларусь-Россия-Украина» (НАНО–2010)- С.179, 19–22 октября 2010, Киев.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Функциональные и машиностроительные материалы и технологии, наноматериалы».

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АЗОТИРОВАННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С ВНУТРЕННИМ ЗАЦЕПЛЕНИЕМ

Харитончик Д.И., Моисеенко В.И.

ОАО «Белорусский автомобильный завод» г. Жодино, Республика Беларусь;

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»

г. Минск, Республика Беларусь (e-mail: ks_oim@tut.by)

Современные зубчатые колеса массового производства имеют высокую надежность и практически неограниченные сроки службы. Основные проблемы с ресурсом возникают с ростом габаритов колес, прежде всего колес с внутренним зацеплением. Это, в первую очередь, связано с их короблением при цементации. Большие габариты колес: диаметр до 1500 мм при длине зуба до 300 мм - не позволяют устранять их деформацию ни при закалке в штампах, ни при шлифовании. В последнем случае необходимо снимать толщину металла, соизмеримую с величиной упрочненного слоя. Поэтому крупногабаритные колеса сегодня изготавливаются преимущественно с азотированными зубьями.

Принято считать, что прочность азотированных колес с внутренним зацеплением определяется напряжением изгиба и твердостью сердцевины зуба. Азотированный слой обеспечивает, в первую очередь, износостойкость колес. Современны-

ми тенденциями в конструировании и в производстве крупногабаритных зубчатых колес с внутренним зацеплением являются: обеспечение твердости сердцевины 270-300 НВ, использование сложнелегированных сталей, увеличение толщины азотированного слоя, предотвращение хрупкого разрушения и «шелушения» упрочненного слоя.

Высокая твердость соединений азота с алюминием в стали предопределила широкое применение в производстве азотированных колес сталей, легированных алюминием в пределах 0,7-2%.

Указанный класс сталей получил название - нитралои.

В практике машиностроения известны как нитралои не изменяющие твердость при азотировании (например, сталь 38Х2МЮА и ее аналоги), так и нитралои у которых твердость при азотировании может повышаться на 30-70%. Твердение при азотировании позволяет резко повысить несущую способность колес. Твердеющие при азотировании стали имеют сложный состав, они более дорогие, а в ряде случаев требуют усложнения технологии получения колес. Известно их применение в машиностроении США [1].

Нетвердеющие нитралои широко используются в парах трения. Рекомендации по применению нитралоев в зубчатых колесах неоднозначны, особенно при перекосах деталей и возрастании местных контактных нагрузок [2].

Тем не менее, сталь 38Х2МЮА является одной из самых распространенных в производстве азотированных зубчатых колес, особенно крупногабаритных, что обусловлено возможностью получения высокой твердости на поверхности зубьев.

Основная проблема производства крупногабаритных зубчатых колес с внутренним зацеплением при использовании стали 38Х2МЮА - плохая обрабатываемость материала, вызванная крайне неравномерным распределением алюминия в стали. Как показали наши исследования, локальная концентрация алюминия в прокате изменяется в широких пределах - до 20-30%. При таком рассеянии концентрации алюминия в стали могут образовываться как исключительно твердые фазы (корунд с твердостью до 3000-4500 НВ), так и вязкие составляющие сложного состава.

По нашим данным, при 20% алюминия даже чугун при твердости 240 НВ практически не поддается токарной обработке.

В основу разработки нового метода повышения обрабатываемости стали 38Х2МЮА положено основополагающее положение механики резания металлов: более 90% энергии резания приходится на процесс макролокализованного пластического течения материала [3]. Ранее установлено, что зарождение дислокаций и макролокализованной пластической деформации наиболее активно происходит в узлах сопряжения кристаллических решеток с различающимися параметрами [4].

Распространению же зародившейся локализованной пластической деформации наиболее активно способствует феррит, который может находиться или специально формироваться в улучшенной структуре детали, подлежащей обработке. В то же время, количество феррита должно быть ограничено с целью сохранения конструкционной прочности материала.

Эксперименты с применением специального метода выявления макропластической локализованной деформации [5] подтвердили, что локальная пластическая деформация, определяющая процесс резания, зарождается в тех объемах, где сопрягаются структуры, кристаллические решетки которых имеют наиболее отличающиеся параметры. При этом твердость материала и напряженное состояние в локальном объеме имеют, судя по всему, меньшее влияние, чем возникающие дислокации.

Для повышения обрабатываемости предложен новый вид термообработки – неполная закалка – она приводит к созданию в материале дополнительных дислокационных структур.

Под неполной закалкой в данной работе понимается целенаправленное получение в структуре стали феррита исключительно вследствие распада негомогенизированного аустенита.

Принципиально новым в данной работе является выбор времени выдержки детали при температуре выше АС3.

Время превращения феррито-перлитной структуры в аустенит происходит достаточно быстро и считается, что обычно оно составляет не более 2 мин — даже для деталей из легированных сталей [2]. Однако, для реальных изделий время аустенитного превращения обычно приходится увеличивать из-за значительного эндотермического поглощения тепла при перлитно-аустенитном превращении, недостаточной теплоотдачи и мощности агрегата, состава стали [6].

При недостаточных выдержках и закалке деталей с неоднородным аустенитом, даже при скоростях охлаждения выше критических, в упрочненном материале получаются микроструктуры, отличающиеся от мартенсита, в том числе и феррит.

Для оценки времени выдержки при неполной закалке предложено пользоваться следующей зависимостью [7]:

$$\tau_{\text{ауст}} = 50 \cdot \frac{\rho_{\text{ауст}}}{\tilde{n}_0 - \tilde{n}_0} \cdot \frac{\delta_{\text{ауст}}}{2 \cdot D_c'} \cdot \sqrt{\frac{H}{h}}$$

(1)

где:

D_c' - коэффициент диффузии углерода в аустените (см²/с);

$c_{\text{эвт}}$ - содержание углерода в аустените (перлите) — 0,8%;

$c_{\psi} - c_{\phi}$ - разность концентрации углерода в феррите и цементите — c_{ψ} 6,67%, c_{ϕ} 0,02-0,04% при температуре до 930⁰С;

$\delta_{\text{зерн}}$ - размер зерна по ГОСТ 5639-81 (мм);

H – толщина обода колеса, мм;

h – толщина зуба по делительной окружности, мм (h ≥ 10 мм).

Процесс неполной закалки с получением структур распада при закалке негомогенизированного аустенита является эффективным средством обеспечения необходимого ресурса азотированных колес из сталей легированных алюминием, в которых прочность обеспечивается повышенной твердостью сердцевины (~300 НВ), а износостойкость азотированным слоем толщиной (0,3-0,5 мм) с твердостью до 1000 НV₅.

Азотированные колеса карьерных самосвалов, термическая обработка которых проводится с использованием неполной закалки, стала составной частью технической политики Белорусского автозавода по обеспечению заданного ресурса планетарных редукторов с гарантированным пробегом не менее 200 тыс. км.

Постоянное увеличение надежности и ресурса машин, особенно карьерных самосвалов большой и особо большой грузоподъемности, делает актуальной задачу увеличения долговечности редукторов до 300-400 тыс. км.

Поставленная задача решена применением в конструкциях колес нитралоев, твердеющих при азотировании. В этом случае твердость сердцевины зубьев достигает 40 HRC и обеспечивает необходимый рост ресурса.

Известно твердение стали при 7% суммарного содержания никеля (Ni) и алюминия (Al) [1]. В выполненной работе твердение материала впервые достигнуто при более низком содержании в материале Ni и Al за счет эффекта целенаправленного взаимодействия легирующих и примесных элементов, концентрирующихся в приграничных объемах зерен стали.

Установлен примесной элемент, постоянно присутствующий в стали и способный регулировать концентрацию и перераспределение основных легирующих элементов в азотируемых сталях: Ni, C, Mn, Mo, Al. Показано, что примесная медь (0,5% и менее), концентрирующаяся на границах и в приграничных объемах зерен, приводит к концентрации никеля и марганца, уменьшая концентрацию углерода в тех же объемах. Зернограничная концентрация Ni инициирует зернограничную концентрацию Al [4]. В конструкционной стали содержащей около 3% Ni, его содержание в приграничных объемах может достигать 20-25% [4].

Учитывая, что примесная медь инициирует концентрацию Ni и Al на границах зерен было предложено, а затем и реализовано в промышленных условиях на реальных зубчатых колесах твердение стали с более низким содержанием Ni.

Определен наиболее рациональный состав предлагаемого конструкционного материала, получаемого рециклингом на основе имеющихся отходов конструкционной сталей и обеспечивающего необходимые служебные свойства (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительный химический состав нитралоев твердеющих при азотировании

Марка стали	Содержание химических элементов							
	C	Si	Mn	Al	Cr	Mo	Ni	V
Нитралой N (США)	0,20-0,25	-	-	2,0	0,5	0,25	5,0	до 0,13
Новая сталь 20ХН4МФЮА (ОАО «БелАЗ»)	0,15-0,22	0,22-0,25	0,5-0,7	0,8-2,0	0,6-1,0	0,35-0,40	3-4	0,1-0,15

В разработанной стали 20ХН4МФЮА во время азотирования наблюдается значительное повышение твердости до 45 HRC при исходной (перед азотированием) - 24-25 HRC - обеспечивающей удовлетворительную обрабатываемость. Присутствие Ni не только увеличивает ударную вязкость и прокаливаемость стали, но и повышает вязкость азотированного слоя, что исключает его охрупчивание. Хромоникелевые стали с содержанием V и Mo - мелкозернистые, нечувствительны к перегреву и к отпускной хрупкости. Наличие V облегчает процесс азотирования, способствуя увеличению твердости поверхностного слоя.

Разработана также комплексная оригинальная технология получения новой стали и зубчатых колес из нее. Заготовки, полученные в виде слитка или литых колес, предпочтительно должны быть деформированы в горячем состоянии с уковом 1,5-2 и термообработаны по режиму: нормализация, высокий отпуск, охлаждение на воздухе, затем в масле, второй отпуск, воздух. В таком состоянии материал и детали из него достаточно хорошо обрабатываются при твердости 250-270 НВ.

Сталь хорошо азотируется. Ионное азотирование, проведенное на установке PLATEC-PP200/60 при температуре 520⁰С, гарантировано обеспечивает твердость азотированной поверхности ~1000 НV₅ при толщине слоя 0,3-0,5 мм. В результате твердения при азотировании твердость сердцевины и прочность материала повыша-

ется, но пластические свойства снижаются. Ударная вязкость может снижаться в зависимости от содержания алюминия.

Дополнительный отпуск после азотирования позволяет сохранить достаточно высокие свойства азотированного слоя (твердость поверхности 850-1000 HV₃) ударная вязкость стали: при +20⁰С KCU=112,7 Дж/см², -40⁰С KCU=73,5 Дж/см², при -60⁰С KCU=44 Дж/см². Твердость сердцевины при этом составляет 35-39 HRC. Отпуск после азотирования способствует также диффузии азота вглубь и устранению хрупкой ε-фазы.

Микроструктура азотированного слоя – азотистый твердый раствор основного металла, хрупкие нитридные фазы практически отсутствуют, в том числе и по границам зерен, что исключает растрескивание и «шелушение» слоя при эксплуатации.

Зубчатые колеса, изготовленные по опытно-промышленной технологии обеспечили пробег карьерных самосвалов грузоподъемностью 40 т в 350 тыс. км. При этом рабочие поверхности зубьев практически не имели дефектов.

Литература

1. Э.А. Гудремон Специальные стали, т.1. М.: Металлургия. 1966. 736 с.
2. А.П. Гуляев Металловедение. М.: Металлургия. - 1986. С. 256-260.
3. В.К. Стариков Дислокационные представления о резании металлов. М.: Машиностроение. - 1979. С. 5-140
4. В.И. Моисеенко, П.Л. Мариев Основы структурной равнопрочности стали и элементов крупногабаритных деталей машин. Мн.. - 1999. – С. 27-69.
5. А.с. №523326 (СССР). Способ исследования нагруженности элементов конструкций при упругопластическом деформировании. С.В. Кошелев, С.П. Кравчук, В.И. Моисеенко и др. Оpubл. В БИ и ТЗ. – 1976. - №12.
6. А.А. Шмыков Справочник термиста. Ленинград типография №6. - 1961. С. 59-64.
7. В.И. Моисеенко, Д.И. Харитончик, В.С. Колтович, Н.Д. Шкатуло Основы повышения обрабатываемости улучшаемых конструкционных сталей для крупногабаритных азотированных зубчатых колес // Механика машин, механизмов и материалов. №1 (10) 2010. С. 78-81.