

### **13. Влияние методов финишной обработки зубчатых колес горных машин на повышение их надежности.**

Тяжелые условия работы редукторов горных машин, которые связаны с высокой нагруженностью и абразивной средой, определяют необходимость использования поверхностно упрочненных зубчатых колес, имеющих высокую твердость и износостойкость поверхности при сохранении вязкой сердцевины.

Анализ повреждений зубчатых колес редукторов горных машин показал, что 60-70% из бракуемых колес составляют колеса с разрушениями контактной поверхности зубьев, 4-10% с изломом зубьев, остальные износом зубьев. Различают два вида поверхностных макроразрушений материала зубьев, связанных с действием высоких контактных напряжений: выкрашивание (питтинг) и отслаивание поверхностного слоя. Природа разрушений - усталостная. Они возникают при потере материалом устойчивости к действию переменных по величине и длительности контактных нагрузок. Каждому виду соответствует свой механизм разрушения. В зависимости от величины действующих контактных нагрузок, конструкции и материала зуба, качества упрочненного поверхностного слоя оба вида разрушения могут возникать одновременно или один из них будет превалировать.

При прогрессивном выкрашивании страдает вся или большая часть длины зуба. При этом повышается контактное давление на еще целую часть поверхности зуба. Макротрещины на контактирующих поверхностях развиваются под действием касательных напряжений. Стойкость к выкрашиванию зависит от физико-химических свойств упрочненного слоя и толщины смазочного слоя.

Прогрессирующее выкрашивание опасно тем, что может привести к отслаиванию упрочненного поверхностного слоя, которое характеризуется большими по глубине и по площади выкрошившимися ямками, распространяющимися ко всей боковой поверхности зуба от полюса зацепления.

В настоящее время отслаивание упрочненного слоя является наиболее опасным видом поверхностного усталостного разрушения зубчатых колес трансмиссий горных машин.

Отслоение упрочненного слоя, связанное с действием глубинных контактных напряжений, может возникнуть и независимо от появления питтинга. Контактные нагрузки определенного уровня, неопасные для поверхностных слоев, вызывают

подслойные касательные напряжения, превышающие предел глубинной выносливости и приводящие к развитию подслоевых усталостных трещин.

Глубина расположения и величина максимальных глубинных касательных напряжений зависит от различных факторов, основными из которых являются: твердость сердцевины зуба, радиус кривизны профиля зуба, толщина упрочненного слоя, величина действующих контактных напряжений. Исследования, проведенные в данной области Р.Р.Гальпером, В.Н. Кудрявцевым, Е.И. Тескером, С.А. Герасимовым и другими учеными, позволили установить зависимости для определения максимальных значений приведенных напряжений по глубине слоя, величину предельного глубинного напряжения и установить влияние на глубинную прочность толщины упрочненного слоя, твердости сердцевины и приведенного радиуса кривизны зуба.

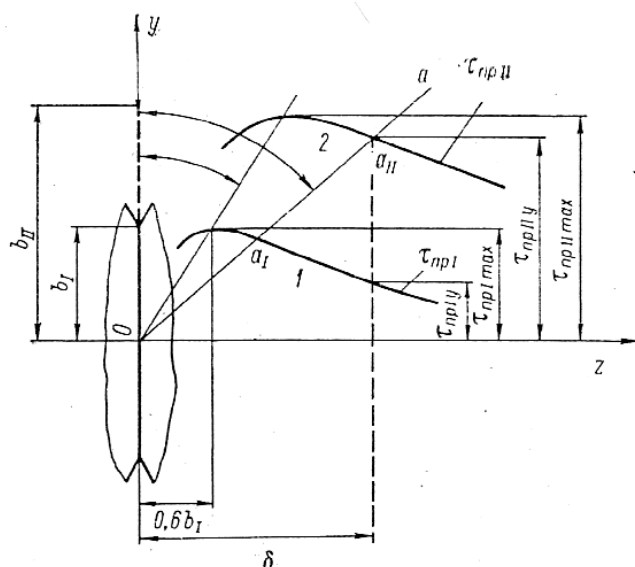


Рис. 1. Кривые изменения приведенных глубинных касательных напряжений в зависимости от координаты  $z$  глубины их залегания.

На рис.1 кривая 1 соответствует распределению приведенных глубинных касательных напряжений  $\tau_{пр1}$  в зависимости от расстояния от поверхности  $z$  при действии номинальной расчетной контактной нагрузки  $T_1$  ( $b_1$  – полуширина площадки контакта,  $\delta$  – толщина упрочненного слоя).

В случае если фактическая нагрузка на зуб в процессе эксплуатации превышает расчетную -  $T_2$ , полуширина площадки контакта увеличивается  $b_{11}$  и кривая распределения приведенных касательных напряжений  $\tau_{пр11}$  смещается в тело зуба (кривая 2). Увеличение контактных напряжений и смещение точки максимальных касательных напряжений в глубь зуба до границы упрочненного слоя может вызвать развитие подслоевых усталостных трещин, приводящих к отслоению слоя.

Установлено, что глубина расположения наибольших глубинных касательных напряжений при действии расчетных контактных нагрузок для цементованных и нитроцементованных колес приблизительно равна  $0,8b$ , а для азотированных колес  $0,6b$ .

Анализ глубины действия наибольших приведенных касательных напряжений был проведен для трех пар зубчатых колес трансмиссии поворотного редуктора очистного комбайна К-500, изготовленных из стали 20Х2Н4А. В качестве исходной нагрузки задавался устойчивый момент  $T_{уст}$ , максимальный длительно-действующий момент  $T_{дд}$  и максимальный кратковременно-действующий момент  $T_{мах}$ . Результаты расчетов приведены в табл.1.

Таблица 1

Параметры з.к.	1-2 $z_1=15, z_2=35$ $m=8\text{мм}, h=0,9-1,3\text{мм}$	2-3 $z_1=35, z_2=35$ $m=8\text{мм}, h=0,9-1,3\text{мм}$	4-5 $z_1=21, z_2=35$ $m=10\text{мм}, h=1,1-1,5\text{мм}$
Результаты расчетов			
<b>Приведенные касательные напряжения, <math>\tau_{пр}</math>, МПа</b>			
$\tau_{пр\ уст}$	240,8	185,28	202
$\tau_{пр\ дд}$	236,9	220,7	241
$\tau_{пр\ мах}$	342,2	265,37	289,5
<b>Глубина действия <math>\tau_{пр}</math>, <math>Z_0</math>, мм</b>			
$Z_0\ уст$	0,32	0,384	0,42
$Z_0\ дд$	0,37	0,456	0,5
$Z_0\ мах$	0,45	0,552	0,59

Расчет показал, что глубина действия наибольших глубинных касательных напряжений находится на расстоянии 0.3 - 0.6 мм от поверхности для колес различных пар зацепления.

Все рассмотренные зубчатые колеса подвергались поверхностному упрочнению – газовой цементации. Режим ХТО для стали 20Х2Н4А следующий: цементация  $t=920-950\text{ C}$ , отпуск  $t=630-650\text{ C}$ , закалка  $t=780-820\text{ C}$ , отпуск  $t=180-200\text{ C}$ ; для стали 20Х3НЗМФБА в основном применяемой в настоящее время для изготовления зубчатых колес, следующий: цементация  $t=900-920\text{ C}$ , отпуск  $t=580\text{ C}$ , закалка  $t=800\text{ C}$ , отпуск  $t=180\text{ C}$ .

Высокотемпературный режим газовой цементации зубчатых колес и последующей закалки, приводит к их короблению, деформации и снижению точности изготовления на 2...3 порядка. Поэтому для достижения 8 степени точности изготовления после химико-термической обработки применяют операцию зубошлифования.

Снятие при шлифовании 0,3 - 0,4 мм упрочненного слоя приводит к значительному снижению его эффективной толщины. Удаляется наиболее насыщенная углеродом и наиболее твердая часть диффузионной зоны. Как показали исследования, твердость поверхностного слоя имеет тенденцию к снижению уже на глубине 0,4 - 0,6 мм.

В результате шлифования удаляется примерно третья часть упрочненного слоя, самая эффективная по механическим характеристикам. Для зубчатых колес модулем  $m=5$  - 8 мм толщина упрочненного слоя по нормативам составляет 0,9 - 1,3 мм. Если учесть слой, снимаемый при зубошлифовании, то получится, что глубина действия наибольших касательных напряжений приходится на глубинную часть цементованного слоя, т.е. область в которой твердость значительно снижается. Таким образом, действие высоких контактных напряжений может привести к возникновению глубинных трещин [ 1 ].

Выходом из сложившейся ситуации может быть повышение толщины цементационного слоя. Однако, это будет связано с увеличением времени выдержки в печи при температуре  $950^{\circ}$ , что приведет к дополнительным деформациям.

Другой путь - использование альтернативных методов химико-термической обработки, а именно ионной цементации и ионного азотирования.

При ионной цементации в граничном слое создается высокий градиент концентрации углерода. Скорость роста науглероженного слоя материала составляет 0,4...0,6 мм/ч, что в 3...5 раз превышает этот показатель для газовой цементации. Продолжительность ионной цементации для получения слоя толщиной 1...1,2 мм сокращается до 2...3 часов.

Её главное достоинство состоит в том, что она формирует протяженные диффузионные слои высокой несущей способности. Этот процесс необходим для нагруженных зубчатых колес.

Для сопротивления контактной усталости требуются определенные показатели насыщенности диффузионного слоя. Условиями высокой контактной выносливости являются высокое сопротивление пластической деформации при высокой структурной однородности диффузионного слоя и высокая насыщенность твердого раствора карбидообразующими элементами. В соответствии с этим требуется обеспечить рациональную концентрацию углерода на рабочей поверхности, определенную долю избыточной карбидной (карбонитридной) фазы в виде мелкодисперсных частиц округлых форм, а также протяженную площадку равной и высокой твердости вблизи рабочей поверхности. Выполнение этих требований достигается при двухстадийных и циклических режимах диффузионного насыщения. Двухстадийные режимы предусматривают стадию активного науглероживания в течение времени  $t_1$  при

достаточно высоком (1,8...2,0 %) углеродном потенциале и стадию диффузионного выравнивания в течение  $t_2$  при более низкой (1,2...1,5 %) насыщающей способности газовой среды. В результате устраняется пересыщение поверхности углеродом, увеличивается эффективная толщина слоя и толщина активной карбидной зоны.

По сравнению с одностадийным режимом ионной цементации контактная долговечность после двухстадийного режима повышается в 1,4 раза, а по сравнению с газовой цементацией - в 1,6 раза.

В настоящее время кроме ионной цементации широко применяется метод ионного азотирования в зубчатых колесах при котором можно достичь толщины слоя до 0,9 мм при применении новых перспективных материалов. Причем при одинаковой твердости сердцевины твердость поверхности выше: при цементации 56 - 62 HRC или 650 - 800 HV, при азотировании 750 - 820 HV. Азотирование проводится при более низких температурах 540 – 560<sup>0</sup>C и является окончательной операцией технологического процесса. При этом деформации минимальны и сохраняется точность и шероховатость поверхности. Причем, как показали исследования, пределы контактной и изгибной выносливости для цементованных и азотированных сталей отличаются не более чем на 6 - 8% (предел выносливости азотированных сталей ниже) [ 2 ].

Азотирование зубчатых колес горных машин целесообразно применять при удельной нагрузке в зубчатом зацеплении  $W < 450$  Н/мм, т.к. в этом случае максимальные касательные напряжения лежат на глубине 0,2...0,3 мм. При больших удельных нагрузках – ионную цементацию с последующим шлифованием рабочих поверхностей зуба.

Цементация и последующая закалка, проходящие при высоких температурах, приводят к значительным и нестабильным деформациям, обуславливая неравномерность снятия припуска при зубошлифовании. Процесс зубошлифования, связанный с тепловым воздействием, может вызвать структурные изменения в поверхностном слое зубчатого колеса в виде прижогов. Микротвердость в зоне прижогов снижается, а в поверхностном слое возникают растягивающие остаточные напряжения. Соответственно снижается долговечность зубчатого колеса по контактной (в 3,5 раза) и изгибной (в 1,4...1,6 раз) выносливости.

Снижение теплового воздействия как одной из причин возникновения прижогов может быть достигнуто применением высокопористых шлифовальных кругов и оптимально подобранных режимов обработки. Шлифование высокопористыми кругами снижает температуру нагрева на 300...400 градусов по сравнению со шлифовальными кругами типовой структуры. Кроме того, при чистовом профильном шлифовании получены стабильные результаты по величине и характеру распределения остаточных

напряжений. Сжимающие напряжения 5...42 МПа на глубине около 5 мкм переходят в растягивающие напряжения 55...62 МПа с общей глубиной распространения до 90 мкм.

Исследования, проводимые на зубчатых колесах из цементованной закаленной стали 20Х2Н4А (типовой для изготовления зубчатых колес горных машин) показали, что применение высокопористых кругов оптимальной характеристики при чистовом шлифовании методом обката гарантировано исключает появление прижогов и микротрещин на обработанных поверхностях зубьев, которые имели место при шлифовании нормальной кругами структуры [ 3 ].

Таким образом, на основании проведенных исследований, можно сказать, что повышение надежности зубчатых колес горных машин может быть достигнуто применением новых современных технологий на финишных операциях технологического процесса их обработки, а именно ионных процессов ХТО и высокопористых кругов для операций зубошлифования. Требуется разработка методов исключаящих проявление отрицательных факторов «технологической наследственности».

#### **Список литературы:**

1. Анализ качества обработки зубчатых колес трансмиссий горных машин/**Солодухин В.В., Сурина Н.В.**// Горные машины и автоматика. 2003.№2.
2. Ионная химико-термическая обработка сплавов/ **Б.Н.Арзамасов, А.Г.Братухин, Ю.С.Елисеев, Т.А.Панайоти.** – М.:Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 1999. – 400 с.
3. **Старков В.К.** Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.