лей. – Л: Машиностроение, 1983. – 212 с. 6. Гонтаровский П.П., Руденко Е.К. Анализ неосесимметричного напряженно-деформированного состояния поршней // Двигатели внутреннего сгорания: Сб. науч. тр. – 1988. – Вып. 48. – С. 46 – 49. (ХПИ). 7. Моделирование кинетики трехмерных механических полей в элементах турбомашин / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Ю.И. Матюхин, Н.Г. Гармаш // Пробл. динамики и прочности в газотурбостроении: Тр. Междунар. конф. – К., 2004. (ИПП НАНУ). 8. Протасова Т. В. Алгоритм решения нестационарной нелинейной неосесимметричной задачи термомеханики для тел вращения // Современные проблемы машиностроения: Тез. докл. конф. молодых ученых и специалистов Ин-та пробл. машиностроения. –

Харьков, 2003. – С. 7. 9. Релаксация термоупругих напряжений в поршне с камерой сгорания типа ЦНИДИ / А.Ф. Шеховцов, П.П. Гонтаровский, Ю.И. Матюхин, Ф.И. Абрамчук, В.А. Пылев // Двигатели внутреннего сгорания: Сб. науч. тр. – 1989. – Вып. 49. – С. 7 – 13. (ХПИ). 10. Релаксация термоупругих напряжений в чугунном поршне быстроходного дизеля с учетом разносопротивляемости материала / А.Ф. Шеховцов, П.П. Гонтаровский, Ю.И. Матюхин, Ф.И. Абрамчук, В.А. Пылев // Двигатели внутреннего сгорания: Сб. науч. тр. – 1990. – Вып. 52. – С. 3 – 9. (ХПИ). 11. Голуб В.П., Погребняк А.Д. Высокотемпературное разрушение материалов при циклическом нагружении. – К.: Наук. думка, 1994. – 228 с.

УДК 621.43

А.А. Жуков, канд. техн. наук, Н.Н. Михайлов, инж., В.А. Жуков, канд. техн. наук, А.П. Навоев, асп.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПРИВОДА АГРЕГАТОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ЯМЗ-840

Введение

Быстрый рост мирового парка ДВС вынуждает правительства развитых стран ужесточать допустимые нормы расхода топлива и выбросов в атмосферу с отработавшими газами вредных отравляющих веществ. Это проявляется в принятии ряда документов, регламентирующих токсичность и дымность отработавших газов: Правила ЕЭК ООН ECE-R49 (1982г.); Правила ЕЭК ООН 49.01 (1989г.); Правила ЕЭК ООН Euro-1 (1993г.); Правила ЕЭК ООН Euro-2 (1996г.); Правила ЕЭК ООН Euro-3 (1999г.).

Для обеспечения установленных экологических нормативов в конструкциях современных двигателей предусмотрена установка дорогостоящих нейтрали-

заторов, дожигателей, фильтров, рекуператоров и т.п. Экспериментальные и эксплуатационные исследования последних лет, однако, показывают, что такие конструктивные решения, не снимая полностью экологических проблем, приводят к снижению топливной экономичности. Более перспективным и целесообразным является совершенствование топливоподачи и рабочего процесса двигателя.

Формулирование проблемы

Одним из направлений совершенствования топливоподачи с целью обеспечения экологических требований является повышение энергетики впрыска. Это подразумевает увеличение давления впры-

ска топлива с целью сокращения топливоподачи и улучшения смесеобразования.

Многочисленные исследования показывают, что для улучшения процесса сгорания требуется увеличение давления впрыска топлива до 120-150 МПа и более. Такие давления впрыска могут быть обеспечены лишь топливными насосами высокого давления (ТНВД) нового поколения. Замена на уже выпускающихся двигателях старых ТНВД на новые с повышенной энергией впрыска требует замены и привода ТНВД, так как увеличение усилий, действующих в зубчатых зацеплениях, приводит к снижению ресурса зубчатых колес (ЗК) и может послужить причиной выхода механизма привода из строя.

Общие положения

подавляющая часть разрушений зубчатых колес начинается на поверхности и в поверхностных слоях. Такой характер разрушений вызывается только одним – превышением действующими напряжениями прочностных характеристик материала в этих зонах.

Поскольку рабочие напряжения при эксплуатации зубчатых колес имеют максимальные значения на поверхности и в поверхностных слоях, поэтому основное внимание необходимо уделять вопросам совершенствования технологии формирования структуры и свойств материала поверхностных слоев. В настоящее время для достижения и обеспечения стабильно высоких показателей свойств поверхностных слоев используют различные способы химико-термической обработки (цементация, азотирование, нитроцементация).

Помимо повышения прочности зубчатых колес требуется подобрать марки материалов и режимы термообработки, обеспечивающие минимальное корrobление и отклонение от заданной геометрии. В настоящее время установлено, что структура, фазовый состав, свойства и напряженное состояние гото-

вых зубчатых колес являются следствием кинетики сложных структурных и фазовых превращений на всех стадиях их изготовления.

Во время работы нагруженной зубчатой передачи на колеса действует нормальная к профилю зуба и распределенная по контактной линии сила, под действием которой в зубьях возникают напряжения изгиба и контактные напряжения. Максимальные напряжения изгиба возникают в тот момент, когда вся нагрузка воспринимается одной парой зубьев, а точка её приложения максимально удалена от основания зуба. Наибольшие напряжения изгиба сосредотачиваются у основания зуба. Под действием контактных напряжений на рабочих поверхностях зубьев колес происходит выкрашивание.

Решение проблемы

Для двигателей, удовлетворяющим нормам «Евро-2», применяется топливная аппаратура «Компакт-40». Для прокручивания кулачкового вала привода ТНВД нужен крутящий момент, достигающий 400 Н·м (44 кгс·м). При частотах вращения коленчатого вала 1700 – 1820 мин⁻¹ эти упругие колебания переходят в резонанс. При этом амплитуда крутящего момента достигает 1600 Н·м (163 кгс·м). Это приводит к разрушению элементов привода ТНВД (валы, шестерни, муфты).

Расчет напряженного состояния зубчатых колес

Анализ напряженного состояния зубчатых колес производился с использованием специализированных расчетных программ. В качестве исходных данных задавались тип передачи, крутящий момент на колесе, частота вращения колеса, геометрия зуба и прочностные свойства применяемого конструкционного материала.

По результатам проведенных расчетов сделаны следующие выводы:

В зацеплении «ведущая шестерня коленчатого вала – промежуточная шестерня» запас прочности по контактным напряжениям составляет 1,5; максимальные изгибные напряжения при перегрузке превосходят допустимые на 2 %.

В зацеплении «промежуточная шестерня – шестерня распределительного вала» запас прочности по контактным напряжениям составляет 1,15-1,20, максимальные изгибные напряжения при перегрузках превышают допустимые на 15 %.

В зацеплении «шестерня распределительного вала – шестерня привода ТНВД» запас прочности по контактным напряжениям составляет 1,4-1,5, максимальные изгибные напряжения при перегрузках превышают допустимые на 15 %.

Дальнейшее форсирование двигателей, повышение энергетики впрыска с целью достижения требуемых экологических показателей, приведет к дальнейшему ужесточению условий работы зубчатых колес. В связи с этим задача рационального выбора материала и назначение наилучших режимов химико-термической обработки является актуальной.

Рекомендации по применению традиционных материалов

Выбор марки стали, а также способы и режимы химико-термической и термической обработки определяются условиями службы зубчатых колес. Для средне – и тяжелонагруженных деталей, наряду с хорошей износостойкостью, сталь должна обладать более высокими механическими свойствами, чтобы обеспечить требуемую прочность при статических и повторно-переменных нагрузках, а также высокое сопротивление большим давлениям. Для тяжелонагруженных деталей применяют хромоникелевые и хромоникельвольфрамовые стали 12ХНЗА, 12Х2Н4А, 20Х2Н4А и 18Х2Н4МА. Разработаны новые марки сталей с меньшим содержанием никеля и без никеля. К таким сталям относятся 15ХГНР и

20ХГНР, рекомендуемые взамен стали 20ХНЗА и 20Х2Н4А для зубчатых колес, валов, осей и других деталей, стали 14ХГ2НР и 14ХГ2СР (вместо сталей 12Х2Н4А и 20Х2Н4А) для особо ответственных тяжелонагруженных деталей, стали 15ХНГ2ВА и 15Х2Г2СВА (вместо сталей 20Х2Н4А и 18Х2Н4МА) для зубчатых колес, работающих в очень тяжелых условиях.

В результате анализа и обобщения литературных и производственных данных выявлены некоторые общие рекомендации по выбору оптимальных значений основных показателей качества материала для зубчатых колес. Так, например, установлено, что оптимальное содержание углерода в поверхностном упрочненном слое цементованных и нитроцементованных зубчатых колес для различных марок сталей находится в пределах от 0,75 до 1,10%. При уменьшении содержания углерода механические свойства снижаются.

Повышение содержания углерода сверх оптимальных значений также не желательно, т.к. это приводит к образованию немартенситных структур. Это связано с тем, что при повышенном содержании углерода образуются карбиды, в результате чего происходит обеднение твердого раствора углеродом и карбидообразующими элементами, что и способствует формированию немартенситных структур. Очевидно, что снижение доли мартенсита, и повышение карбидной фазы в структуре стали, обуславливает снижение механических свойств и особенно характеристик усталостной прочности.

Для нитроцементуемых сталей, при оптимальной содержании углерода, максимальная прочность может быть получена при содержании азота от 0,25 до 0,35%. Учитывая, что азот существенно влияет на прокаливаемость нитроцементованных легированных сталей установлено, что при содержании углерода более 0,7% даже небольшое содержание азота (~ 0,05%) снижает прокаливаемость. Таким образом,

азот в нитроцементованном слое не всегда обеспечивает наилучшие прочностные свойства.

Влияние качества остаточного аустенита на механические и эксплуатационные свойства зубчатых колес неоднозначно. В большинстве случаев считается, что в поверхностном слое цементованных зубчатых колес содержание остаточного аустенита не должно превышать 25...30 %, для особо ответственных зубчатых колес 15%. Повышенное содержание остаточного аустенита (до 50%) допускается для зубчатых колес, работающих при высоких контактных нагрузках, для которых предусматривается поверхностное упрочнение дробеструйной обработкой или накатной в результате наклепа.

Для большинства марок цементованных и нитроцементованных сталей максимальные значения ударной вязкости, усталостной выносливости, статической прочности при изгибе достигаются при 35...50% остаточного аустенита, который должен равномерно распределяться по толщине упрочненного слоя.

Толщина упрочненного слоя оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства зубчатых колес. Оптимальная толщина цементованного слоя определяется либо из условия контактной выносливости, либо из условия прочности на изгиб. Для цементованных зубчатых колес наиболее широко применяется рекомендации формы Глиссон: для колес с модулем $m=1...5$ мм, $h=(0,22...0,27)m$, а для колес с $m=7...10$ мм, $h=(0,18...0,20)m$. Для нитроцементованных колес согласно ГОСТ 21354-87 толщину упрочненного слоя рекомендуется определять по соотношению $h=(0,13...0,2)m$.

Для цементованных и нитроцементованных сталей для обеспечения контактной выносливости толщина упрочненного слоя равна $h=0,13m-0,2m^2$. Предел выносливости для цементованных зубчатых колес определяется для толщины упрочненного слоя $h=0,28m-0,007m^2$, для нитроцементованных колес для

$$h=0,13m-0,2m^2.$$

Твердость поверхности цементованных и нитроцементованных зубчатых колес находится в пределах 58...63HRC иногда допускается твердость 56...57HRC. При снижении твердости наблюдается уменьшение контактной выносливости и износостойкости, а при более высокой твердости происходит хрупкое разрушение.

Согласно ГОСТ 21354-87 для цементованных и нитроцементованных зубчатых колес предел контактной выносливости определяется выражением: $\sigma^k=23$ HRC. Однако во многих случаях это соотношение не подтверждается. Таким образом, для большинства марок цементуемых и нитроцементуемых сталей не установлено надежной взаимосвязи между твердостью поверхности зуба и показателями эксплуатационной надежности.

Твердость сердцевины зубьев должна находиться в пределах от 20 до 44 HRC. При дальнейшем повышении твердости наблюдается снижение ударной вязкости. Наибольшее влияние, твердость сердцевины зуба оказывает на прочность при изгибе и допустимые контактные напряжения. Установлено, что при повышении твердости сердцевины зуба более 35HRC допустимые контактные напряжения возрастают с 1750МПа до 1900МПа.

Очевидно, что широкий интервал 14 HRC рекомендуемой твердости сердцевины зуба обуславливает нестабильность эксплуатационных свойств. По результатам эксплуатационных исследований установлено, что при снижении твердости сердцевины зуба от 40 до 32 HRC предел выносливости цементованных зубчатых колес снижается в 1,5...2 раза с 500 МПа до 250...300 МПа. Следовательно, для обеспечения стабильного качества зубчатых колес рекомендуется уменьшить допустимый интервал твердости сердцевины зуба в пределах 38...44HRC.

Выполненный сравнительный анализ используемых в настоящее время показателей качества ма-

териала показал, что они не всегда дают достаточно надежные результаты по оценке и прогнозу окончательной долговечности зубчатых колес. Поэтому необходимо проведение дальнейших дополнительных исследований направленных на определения новых более надежных показателей и на разработку более эффективных методов и средств измерения этих показателей. Наряду с этими направлениями вполне целесообразно и актуально проведение исследований по разработке и использованию новых материалов и совершенствованию технологических процессов, изготовления зубчатых колес.

Бейнитный чугун – перспективный материал для изготовления зубчатых колес

В настоящее время в России и за рубежом большое внимание уделяется внедрению прогрессивных конструкционных материалов в машиностроении, которые позволяют значительно повысить надежность и долговечность машиностроительной продукции, снизить ее металл – и энергоёмкость.

Одним из таких материалов является бейнитный высокопрочный чугун с шаровидным графитом (БВЧШГ), отличающийся от других типов чугунов высокой прочностью (до 1500 МПа), пластичностью (6 до 10 %) износостойкостью, усталостной прочностью. Это позволяет успешно применять БВЧШГ для ответственных и высоконагруженных деталей взамен заготовок из прокатной и кованой стали, в той числе легированных и цементированных.

Бейнитная структура в высокопрочных чугунах с шаровидным графитом (ВЧШГ) образуется при изотермической закалке.

Изотермическая закалка ВЧШГ состоит из нагрева до аустенитного состояния (850...925 °С), выдержки в течение 1-2 ч и последующей закалки в средах с температурой 220...450 °С с выдержкой в течение 0,5...6 ч. Формирование бейнитной структуры проходит через три стадии. На стадии I происходит выделение ферритных игл или пластин и их рост,

а также обогащение углеродом аустенита. Скорость превращения на этой стадии максимальная. Стадия II характеризуется очень низкой скоростью; происходит рост участков феррита. Концентрация углерода в аустените достигает максимума. На стадии III после насыщения аустенита углеродом происходит его распад на феррит и карбиды. Эта стадия превращения реализуется только после длительной изотермической выдержки.

Оптимальная структура бейнита формируется на первых двух стадиях превращения, обеспечивая сочетание высоких показателей прочности и пластичности чугуна.

Несмотря на весьма высокие показатели механических и эксплуатационных свойств бейнитного чугуна и осуществление больших программ его исследования в ряде промышленно развитых стран, практическое применение литых деталей из этого материала остаётся весьма ограниченным. Это может быть связано с очень жёсткими требованиями к базовым отливкам, включающим высокую плотность, отсутствие скрытых дефектов, минимальные допуски по структуре и химическому составу, ограничения по массе и толщине отливок из-за прокаливаемости. Тем не менее, бейнитный чугун является перспективным материалом и обладает неограниченными возможностями для получения различных литых изделий высокого качества.

Заключение

В связи с модернизацией двигателей семейства ЯМЗ-840, а также учитывая современные научно-технические достижения в области технологии изготовления зубчатых колес для повышения и обеспечения стабильного качества, работоспособности и эксплуатационной надежности зубчатых колес механизма привода агрегатов целесообразным является совершенствование химико-термической обработки стальных колес и постепенный переход на изготовление зубчатых колес из бейнитного чугуна.