

The terms of the cylinders block head working are examined. The choice of optimal structure of cast iron is proved on the basis of comparative investigations on thermocycling.

А. Н. КРУТИЛИН, В. А. РОЗУМ, В. С. ЛОСЬ, Ю. Г. ПАНАРАД, А. Н. КУЗЬМИЧ, БНТУ,
А. Н. КАРАСЬ, ПО «МТЗ»

УДК 621.746.628:669.13

ЧУГУН С ВЕРМИКУЛЯРНЫМ ГРАФИТОМ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОСМЕН

Для повышения долговечности и безотказности двигателя требуется обеспечить надежную работу его наиболее ответственных и высоконагруженных в тепловом и механическом отношении деталей, к числу которых относится головка блока цилиндров.

Анализ работы двигателей показывает, что наиболее высокие напряжения в головках блока цилиндров возникают во внутренней стенке, которая, с одной стороны, нагревается продуктами сгорания топлива до температур порядка 500–550 °С, с другой – охлаждается водой. Повторяющиеся колебания температуры способствуют образованию в деталях трещин вследствие термической усталости и деформаций. На термоциклическую стойкость материала оказывают влияние время действия и максимальная температура цикла. Увеличение градиента температур цикла, а также концентрация напряжений около неметаллических включений, пор, раковин и т.д. ускоряют появление трещин и снижают долговечность деталей. Температурный градиент по толщине стенки зависит главным образом от теплопроводности материала и в процессе работы двигателя остается примерно постоянным. Возникающие напряжения пропорциональны разности температур, уровню модуля упругости и коэффициенту термического расширения. Температурные напряжения складываются с механическими напряжениями, возникающими в процессе эксплуатации в связи с затруднением термического расширения и сжатия. На практике головка блока цилиндров подвергается воздействию высоких температур длительное время, напряжения в зонах концентрации могут превысить предел усталости, в результате чего образуются микротрещины.

На величину напряжений существенное влияние оказывает рост чугуна, который может быть вызван как внутренним окислением, так и структурными изменениями, происходящими под действием высоких температур.

Форсирование двигателей привело к снижению эксплуатационной стойкости головок блока цилиндров, изготовленных из серых, легированных Mo, Cr, Ni, Cu, Sn, V чугунов с пластинчатой формой графита. Для обеспечения безаварийной работы высоконагруженных деталей дизелей потребовался чугун с пределом прочности более 300 МПа и удлинением не менее 2%. В качестве оптимального варианта для изготовления головок блока цилиндров предложено использовать ферритный чугун с вермикулярной формой графита [1]. Первые отливки из чугуна с вермикулярным графитом применительно к головкам цилиндров крупных судовых дизелей были изготовлены в 1970 г. Использование ферритного чугуна с вермикулярной формой графита позволило значительно повысить эксплуатационные характеристики детали.

Высокие эксплуатационные характеристики чугуна с вермикулярной формой графита обусловлены тем, что:

- чугун с вермикулярной формой графита обладает прочностью 300–500 МПа, ударной вязкостью более 30 Дж/см, относительным удлинением 2–5%, модулем упругости 75–155 кН/мм;
- по сравнению с чугуном с пластинчатой формой графита чугун с вермикулярной формой графита имеет меньшую склонность к окислению и росту, короблению при повышенных температурах;
- литейные свойства чугуна с вермикулярной формой графита (ЧВГ) сравнимы с литейными свойствами серого чугуна, для него характерна минимальная склонность к образованию сосредоточенных усадочных раковин;
- при обработке соответствующими модификаторами чувствительность микроструктуры к изменению толщины сечения отливки минимальна;
- теплопроводность ферритного ЧВГ и величина коэффициента теплового расширения соизмеримы с их величиной для серого чугуна;

требования к исходным материалам для получения ЧВГ аналогичны требованиям для чугуна с шаровидной формой графита (ЧШГ).

Основная причина выхода из строя при эксплуатации головок цилиндров – появление усталостных трещин под действием термоциклических нагрузок. В связи с этим особую значимость приобретают сравнительные исследования термочиклической стойкости различных чугунов.

Характер разрушения чугунов при термоциклировании зависит от формы, величины и распределения графита, неметаллических включений, литейных дефектов. Исследованию особенностей зарождения и развития микротрещин при термоциклировании в чугунах с различной формой графита посвящена работа [2]. Результаты исследований свидетельствуют о том, что в образцах из серого чугуна появление микротрещин обнаружено через 10–30 циклов нагрева–охлаждения, причем их распространение происходило от микротрещин в пластинках графита в матрицу в направлении к металлическим включениям и раковинам. Неметаллические включения, газовые раковины и усадочная пористость, включения графита в виде точек являются зародышами микротрещин, ускоряют их развитие независимо от типа графита и существенно снижают сопротивление разрушению при термической усталости. Точечный графит способствует образованию сложной разветвленной сетки микротрещин древовидного типа.

В высокопрочном чугуне сернистые включения магния и оксиды являются основными инициаторами разрушения, в их зонах трещины развиваются быстрее. При развитии разрушения микротрещины приобретают вид сетки, объединяющей сфероиды. Разрушение чугунов с шаровидным графитом ускоряется присутствием свободного цементита. Первые микротрещины появляются в крупных включениях цементита или на границе раздела цементита с перлитом. Отмечается, что отрицательное влияние свободного цементита (в количестве 10–30%) превосходит влияние выродившихся сфероидов или черных пятен.

Поведение при термической усталости чугунов с вермикулярным графитом сравнимо с поведением чугунов с шаровидным графитом. Микротрещины во включениях графита вермикулярной формы появляются тем позднее, чем выше коэффициент их формы. При низком коэффициенте формы трещины образуются на концах включений (как в пластинчатом графите) и иницируют развитие трещин в матрицу с максимальной скоростью. Максимальная длина микротрещин для чугунов с пластинчатым, вермикулярным и шаровидным графитом подчиняется соотношению 5:3:1, а сопротивление термической усталости соответственно 1:1,25–1,4:1,6–1,8. По сравнению с чугунами с пластинчатым графитом

чугуны с вермикулярным графитом имеют сопротивление термической усталости на 25–40% выше, а чугуны с шаровидным графитом – на 60–80% выше.

Сравнительные исследования кратковременной и длительной прочности при повышенных температурах, а также термостойкости различных чугунов приведены в работах [3, 4]. Изменение свойств чугунов с вермикулярным графитом подобно изменению свойств чугунов с шаровидным графитом с той лишь разницей, что абсолютная величина изменения слабее. Предел прочности чугунов ЧВГ и ЧШГ при увеличении температуры снижается, относительное удлинение растет. Значения предела прочности ЧВГ и ЧШГ медленно падают при увеличении температуры до 450 °С, затем разупрочнение ускоряется. При высоких температурах различие в прочности чугунов менее выражено. Значения предела выносливости немного снижаются при увеличении температуры до 300 °С, затем начинают увеличиваться, достигая максимальных значений при 600 °С.

С точки зрения обеспечения конструкционной жесткости деталей ферритные нелегированные чугуны с шаровидной и вермикулярной формами графита и серый легированный чугун с перлитной структурой практически равноценны. Большая толщина и закругленность графитовых пластин в ЧВГ уменьшают концентрацию внутренних напряжений по границам "графит–матрица", что обуславливает более высокие прочностные свойства, чем у серого чугуна, при одинаковой металлической основе. Высокие пластические свойства ЧШГ и ЧВГ позволяют при кратковременных механических нагрузках предохранить деталь от аварийного разрушения за счет пластической деформации. С повышением температуры длительная прочность перлитного чугуна с вермикулярной формой графита остается несколько выше, чем ферритного, хотя эта разница уменьшается за счет постепенного распада перлита. Применение легированного ЧВГ с перлитной структурой вместо нелегированного ферритного ЧВГ для деталей, работающих длительное время при повышенных температурах, ввиду его более высокой стоимости может оказаться нецелесообразным. По длительной прочности ЧВГ почти в 1,5 раза превосходит показатели серого чугуна, но несколько уступает чугуну с шаровидным графитом.

При исследовании влияния количества теплоем на возникновение и развитие трещин было установлено, что трещины быстрее зарождаются и распространяются в ЧВГ с перлитной металлической основой. В перлитном ЧШГ также наблюдается раннее появление трещин, но их рост вначале замедлен, а затем ускоряется, приводя к концу испытаний к наибольшей длине образовавшихся трещин. Позже возникают и медленнее распростра-

няются трещины в ферритном ЧВГ, что обусловлено как температурной стабильностью ферритной матрицы, так и высокой ее пластичностью. Серый чугун в этих условиях из-за более быстрого внутреннего окисления вдоль пластин графита менее стоек в сопротивлении к зарождению и развитию термоусталостных трещин.

S.R.Lopez, M.I.Lalich и др. [5] выявили существование зависимости между энергией динамического разрушения и температурой для чугунов с ВГ и ШГ с различным содержанием перлита, а также корреляцию между комплексным параметром, включающим сопротивление разрушению и твердость, и сопротивлением усталостному разрушению для ЧВГ, имеющих перлитную и ферритную структуру.

Установлено, что для ЧВГ с преимущественно ферритной структурой (20% перлита) предел усталости составляет 173 МПа, а относительный предел усталости — около 0,45. При перлитной структуре (97% перлита) эти величины составляют соответственно 194 МПа и 0,37. Можно отметить, что эти свойства близки к аналогичным показателям для высокопрочного чугуна [5].

Рост чугуна, который большей частью является результатом изменения структуры, может быть существенным фактором, влияющим на величину термических напряжений. В результате происходит снижение механических свойств чугуна и, как следствие, значительное сокращение срока службы детали.

Распад перлита приводит к увеличению размеров до 1,5% и значительно ускоряется с ростом температуры под воздействием динамических нагрузок. Наличие в структуре цементита необходимо исключить, так как теоретически 0,1% связанного в цементит углерода вызывает при распаде увеличение объема ~0,18%.

Внутреннему окислению особенно подвержены серые чугуны, что связано с разветвленностью структуры графитовых включений, по которым кислород проникает в чугун. Распад перлита в нелегированных ВЧ происходит уже при 450 °С, а при 500 °С ускоряется так резко, что после 500–700 ч большая часть перлита распадается. Перлитный высокопрочный чугун растет за счет распада перлита на 0,4–0,5%. Ферритный чугун практически ростоустойчив.

Устойчивость к внутреннему окислению ЧВГ почти такая же благоприятная, как и в чугуне с ШГ, так как частички графита не взаимосвязаны друг с другом.

Высокопрочный чугун вследствие своей высокой прочности и большой пластичности при комнатной температуре хорошо противостоит трещинообразованию. Поведение высокопрочного чугуна зависит от вида температурных нагрузок. При большой скорости охлаждения из-за меньшей в сравнении с СЧ теплопроводности и

высокого модуля упругости возникают высокие напряжения растяжения на охлаждаемой поверхности. Эти растягивающие напряжения обычно так высоки, что, несмотря на высокую прочность и пластичность, приводят к быстрому возникновению трещин и термостойкость ВЧ оказывается меньше, чем у серого чугуна.

Специфические свойства чугуна с вермикулярной формой графита в значительной степени способствуют его широкому распространению в качестве материала для изготовления блоков и головок цилиндров дизелей большой мощности. Фирма "International Tract & Corp" является крупнейшим поставщиком отливок блоков и головок цилиндров из ферритного чугуна с вермикулярной формой графита для дизельных моторов средней мощности. Примером широкого использования ЧВГ служит производство головок цилиндров для крупных морских дизельных двигателей внутреннего сгорания фирмами "Крупп — Мак", "Будерус" (ФРГ). Согласно данным фирмы SINTER CAST, использование ферритного чугуна с вермикулярной формой графита в качестве материала для головок и блоков цилиндров двигателей различных фирм-изготовителей автомобилей позволяет уменьшить вес двигателя на 22–29% (для двигателей объемом 1,6–1,8 л), при этом удельная мощность двигателя увеличивается на 18–42%.

В Америке в течение 2003–2005 гг. практически все крупные автомобильные производители планируют поставить на серийное производство двигатели с блоками из ЧВГ. По прогнозам, к 2010 г. доля ЧВГ составит 50% объема производимых автомобильных двигателей [6].

Конфигурация головки блока цилиндров создает значительные трудности при ее изготовлении, резкие переходы от толстых сечений к тонким, значительно усложняет процесс получения годной отливки. Необходимо учесть, что в процессе изготовления возникают значительные внутренние напряжения из-за температурных перепадов, сопротивления формы и стержней усадки отливки, объемных фазовых превращений металла в различных частях отливки.

Перспективно использование чугуна с вермикулярной формой графита для изготовления выхлопных и впускных коллекторов, тормозных барабанов, корпусов турбокомпрессора и картера рулевого управления, крышек подшипников, дисков тормозов и т.д.

Для создания технологичных отливок необходима тесная связь между конструкторами, металлургами, литейщиками. Комплексное, оптимальное решение конструкторских и технологических задач в процессе подготовки производства оказывает решающее влияние на качество и эффективность технологического процесса изготовления отливок.

Литература

1. Riposan T., Sofroni L., Chisamera Si. Comportement au choc thermique des fontes a differentes formes de graphite. Исследование чугунов с различной формой графита в условиях термоусталости // 48^{ème} Congr. Int. Fonderie, Varna, 4–7 Oct., 1981. P. 17.

2. Nechtelberger E., Pühr H., Von Nesselrode J.B., Nakayasu A.S. Cast iron with Vennicuiar. Чугун с вермикулярным графитом // Compacted graphite – State of the Art. Development, Production, Properties, Applications. 49th Int. Foundry Congress, Chicago, 14–17 April, 1982. P. 17.

3. Dincscu L., Graciunescu C., Benescu G., Haltrich K., Bozocsa E.S.I. Caracteristiques mechaniques a chaud des fontes a graphite vermiculaire. Механические свойства при высоких температурах чугунов с вермикулярным гра-

фитом // 48^{ème} Congr. Int. Fonderie, Varna, Bulgaria, 1981, 4–7 Oct., s.a. 17 p.

4. Андреев В.В., Ильичева Л.В., Платонов В.И. Длительная прочность и термостойкость чугуна с вермикулярным графитом // Литейное производство. 1984. №4.

5. Loper C.R., Lalich M.T., Park H.K., Gyarmaty F.M. Microstructure – mechanical property relationship in compacted (vermicular) graphite cast iron. Соотношение между микроструктурой и механическими свойствами для чугунов с компактным (вермикулярным) графитом // 46th International Foundry Congress, 1979. N. 35.

6. Nechtelberger E., Pühr H., Nesselrode I.B., Nakayasu A. Cast Iron with vermicular/compacted graphite – State of the Art. Development, Production, Properties, Applications // 49th International Foundry Congress Chicago, 1982, April, P. 14–17.

Репозиторий БНТУ