

*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 термоциклической 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 инициируют 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 тепломен 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 Track & 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 двигателя 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<sup>ème</sup> 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 Vermicular. Чугун с вермикулярным графитом // Compacted graphite – State of the Art. Development, Production, Properties, Applications. 49<sup>th</sup> Int. Foundry Congress, Chicago, 14–17 April, 1982. P. 17.

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

фитом // 48<sup>ème</sup> 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 // 46<sup>th</sup> 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 // 49<sup>th</sup> International Foundry Congress Chicago, 1982, April, P. 14–17.