



*The results of researches of an ultrasonic quality testing of pistons of diesel engines in casting are submitted. It is shown, that special focusing transducers should carry out for the testing. Accuracy of the testing is not worse than 0,5 % from the area of niresist insert.*

А. Л. МАЙОРОВ, Н. Н. ГИЛЬ, ГНУ «ИПФ НАН Беларуси»

УДК 620.179

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СЦЕПЛЕНИЯ НИРЕЗИСТОВОЙ ВСТАВКИ В ОТЛИВКАХ ПОРШНЕЙ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Использование в дизельных двигателях поршней с нирезистовой вставкой под первое кольцо потребовало усложнения технологического цикла изготовления поршней. Качество такого поршня во многом определяется качеством сцепления нирезистовой вставки с основным материалом поршня [1]. В процессе изготовления отливки поршня для достижения хорошего сцепления необходима специальная подготовка поверхности вставки. Плохая очистка, некачественное алетирование, появление оксидных пленок приводит к некачественному спаю. Визуальный контроль не позволяет обнаружить некачественные поршни. Разрушающие испытания позволяют осуществлять только выборочный контроль. Кроме того, результаты разрушающих испытаний могут иметь значительный разброс, так как области с различным качеством сцепления могут располагаться непредсказуемым образом. Все эти факторы заставляют искать неразрушающие методы контроля качества сцепления нирезистовой вставки с основным материалом поршня, позволяющие производить стопроцентный контроль. Традиционно поршни контролируются на окончательной стадии производства после обработки поверхности и изготовления канавок под кольца. Контроль при этом осуществляется теньвым ультразвуковым методом продольными волнами.

Так как коэффициент прохождения продольной ультразвуковой волны через границу вставка — основной материал поршня определяется качеством сцепления, то о дефектности поршня можно судить по изменению количества прошедшей ультразвуковой энергии. Поскольку методы ультразвукового контроля основаны на относительных измерениях, методика контроля базируется на сопоставлении амплитуды ультразвукового импульса, проходящего через контролируемый поршень, с импульсами, проходящими через поршень с модельными дефектами [2].

Однако наиболее выгодным является контроль поршней на ранних стадиях производства, непосредственно после отливки либо после обдирки и вскрытия вставки. Контроль в таких условиях затруднителен из-за низкого качества поверхности и трудностей с вводом и приемом ультразвуковых сигналов. Особенно трудно это осуществить в автоматическом режиме. В то же время в ручном режиме сложно оценить площадь несцепления. Известны устройства для оценки качества поршней после предварительной обработки. Такие установки были разработаны нами и эксплуатируются, например, на Минском моторном заводе. Однако на производстве все время возникает вопрос, является плохая адгезия вставки металлургическим дефектом или срыв происходит во время механической обработки. Поэтому интерес представляет возможность проследить весь путь изготовления поршня, т.е. проверить его после отливки, предварительной обработки и вскрытия вставки и после окончательного изготовления. Как решать последние две задачи известно, остается контролировать поршень в состоянии отливки [3].

На рис. 1 показаны характерные дефекты соединения основного материала поршня с нирезистовой вставкой. Из рисунка видно, что толщина альфин-слоя (слоя между нирезистом и основным материалом поршня) может составлять от 0 до десятков микрон. Причем дефект соединения (трещина) может быть как в самом альфин-слое, так и на поверхностях вставки и материала поршня. Толщина альфин-слоя определяется на этапе предварительного погружения вставки в ванну с расплавом (алетированием) и зависит от качества подготовки поверхности.

Неоднородность адгезионных сил в плоскости соединения независимо от природы приводит к изменению модулей Юнга (в направлении по нормали к поверхности) и модуля сдвига (когда сдвиг производится в плоскости соединения).

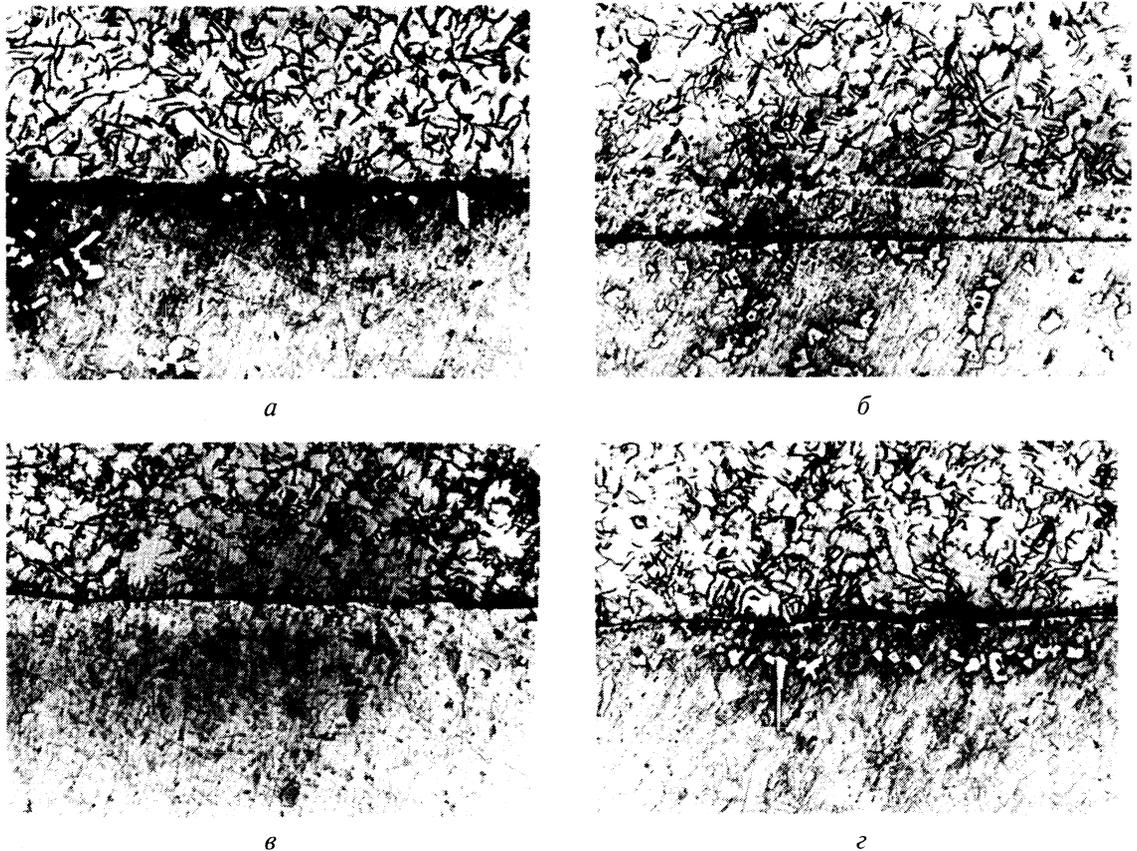


Рис. 1. Шлифы соединения основной материал поршня – нирезистовая вставка: *а* – толщина альфин-слоя (0–15)μm, непрерывная трещина в альфин-слое по верхней границе; *б* – толщина альфин-слоя (18–25)μm, непрерывная трещина на границе альфин-слоя и материала поршня снизу; *в* – толщина альфин-слоя (22–25)μm, непрерывная трещина на поверхности нирезистовой вставки по верхней границе; *г* – толщина альфин-слоя (20–25)μm, непрерывная трещина в альфин-слое

Анализ коэффициента отражения для продольной волны, падающей нормально плоскости соединения, показывает, что на его величину оказывает влияние несколько факторов. Во-первых, он меняется при изменении толщины слоя соединения. Кроме того, может происходить «просачивание» акустической энергии через расслоение, что вносит дополнительную погрешность. В рассматриваемом случае граница раздела может содержать дефекты типа «kissing bonds». Под этим термином понимаются дефекты, при которых произошло плотное слипание поверхностей, но отсутствует молекулярное сцепление, взаимная диффузия материалов. Изменяя угол ввода продольных волн, можно изменить направление колебательного смещения частиц относительно границы раздела. В предельном случае замена продольной волны в материале на сдвиговую приводит к отсутствию передачи энергии в локальных областях с отсутствием адгезионной связи, так как при этом происходит «проскальзывание» поверхностей относительно друг друга. Таким образом, задача измерения прочности адгезионного соединения сводится к поиску корреляционных зависимостей между измеря-

емыми акустическими параметрами и величиной адгезионной прочности. В свою очередь проблема оптимизации решается выбором типа волн, способом их излучения-приема, конкретными углами падения фронтов ультразвуковых волн.

Геометрия задачи представлена на рис. 2. Как показывает опыт, достаточно определить наличие дефектов со стороны «юбки» и «головки» поршня.

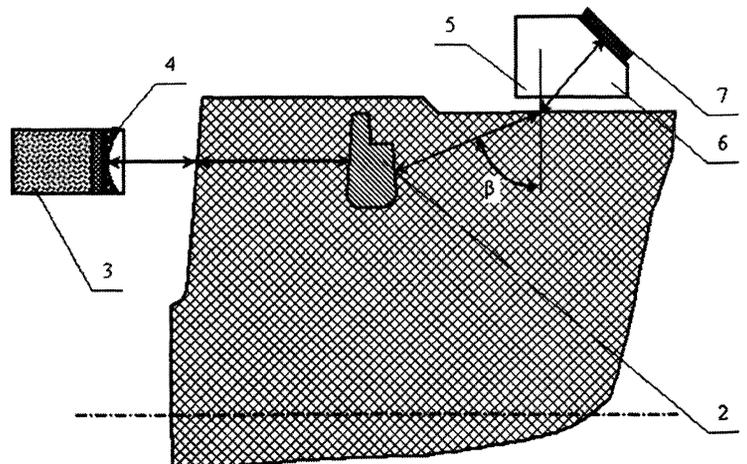


Рис. 2. Геометрия задачи контроля отливки поршня: 1 – материал поршня; 2 – нирезистовая вставка; 3 – прямой сфокусированный преобразователь для контроля торца поршня; 4 – линза; 5 – наклонный преобразователь для контроля со стороны «юбки» поршня; 6 – линия задержки; 7 – пьезоэлемент

При контроле поверхности со стороны головки наиболее подходящим является возбуждение продольной волны прямым преобразователем, расположенным у торца поршня. Такое прозвучивание можно осуществить в контактном варианте при наличии контактной смазки густой консистенции. Основное требование при этом — малая величина мертвой зоны. Однако такой способ не подходит для автоматического режима, так как из-за низкого качества поверхности будет происходить потеря акустического контакта и большой износ поверхности преобразователя.

При подъеме преобразователя над поверхностью и осуществлении контакта через слой иммерсионной жидкости появляется дополнительный сигнал, отраженный от поверхности поршня. По величине этот сигнал значительно превосходит отраженный от поверхности раздела материал поршня—вставка. Анализ коэффициентов отражения показывает, что на границе вода—алюминий коэффициент отражения составляет  $R_1=0,84$ . В свою очередь на границе алюминий—нирезистовая вставка в случае хорошей адгезии коэффициент отражения равен  $R_{2,1}=0,49$ , в случае плохой спая  $R_{2,2}\approx 1$ . Отраженный от нирезистовой вставки сигнал распространяется в материале поршня и отражается от границы алюминий—вода, где коэффициент отражения составляет  $R_3=-0,84$  («—» говорит об изменении фазы в отраженной волне и в наших расчетах его можно опустить). Таким образом, общий коэффициент отражения в случае хорошей адгезии составит  $R=0,012$ , в то время как сигнал, отраженный от поверхности поршня, составляет 0,84 от первоначального. Разница между сигналами равна 37 дБ. В случае плохой адгезии  $R=0,026$ . Разница между сигналами при плохой и хорошей адгезии составляет всего 6 дБ.

Вторым фактором, мешающим проведению контроля данным методом, является размазывание отраженного от торца поршня импульса во времени из-за непараллельности поверхностей поршня и преобразователя. Угол наклона поверхности торца отливки составляет 5%. Глубина неровностей поверхности доходит до 1 мм. Даже при ширине основного лепестка диаграммы направленности в  $\theta=4^\circ$ , расположении преобразователя на расстоянии  $\approx 40$  мм от торца поршня и использовании пьезокерамики диаметром 10 мм на частоте 2,5 МГц ширина звукового пятна на поверхности поршня в диаметре составляет 12 мм. Учет геометрии поршня и качества поверхности увеличивают длительность импульса по сравнению с зондирующим примерно в 2 раза до  $\tau=3,2\cdot 10^{-6}$  с. В то же время дополнительная разность хода за счет прохождения сигнала в алюминии составляет  $\tau=7,2\cdot 10^{-6}$  с, задержка отраженного эхо-сигнала от поверхности поршня  $\tau\approx 54\cdot 10^{-6}$  с. Таким образом, время прихода сиг-

нала, отраженного от торца с учетом расширения сигнала, составляет  $\tau_{mn}=57\cdot 10^{-6}$  с. Время прихода сигнала от поверхности вставки  $\tau_{mn}\approx 61\cdot 10^{-6}$  с. Как видно из приведенного, величины очень близкие. Если еще учесть разницу в величинах сигналов в 70 раз в случае хорошей адгезии и в 32 раза в случае плохой, то получается, что полезный сигнал будет маскироваться на фоне отраженного от торца поршня.

Выходом из данной ситуации является использование фокусировки. Фокусировка позволяет концентрировать энергию поля в определенной области. Деформацию пучка можно рассчитать по законам геометрической акустики. Необходимо рассчитать характеристики первичного преобразователя исходя из положения фокуса и размера фокального пятна, определяемого нужной чувствительностью.

Такие расчеты были проведены для линзы из эпоксидной композиции и радиуса фокального пятна  $\rho=3,5\cdot 10^{-3}$  м.

Наиболее сложным является контроль спая вставки со стороны «юбки» поршня. Для получения акустического сигнала, отраженного от этой поверхности, необходимо использовать наклонный ввод ультразвука в изделие через твердотельную линию задержки. Анализ нескольких конструкций отливок поршней показал, что можно возбуждать акустическую волну с поверхности под углом  $\beta\approx 70^\circ$ . При этом для настройки на конкретную отливку достаточно слегка (в пределах  $\pm 1,5^\circ$ ) скорректировать угол  $\beta$  и перемещать преобразователь вдоль образующей на расстояние  $\pm 10$  мм.

Было установлено, что для того чтобы получить равномерную чувствительность по поверхности вставки, радиус пьезоэлемента должен составлять  $\approx 7$  мм при поршневом режиме возбуждения. Кроме того, была выполнена дополнительная цилиндрическая фокусировка для устранения влияния качества литой поверхности на стабильность акустического контакта.

С целью проверки достоверности проведенного анализа были изготовлены преобразователи, соответствующие выполненным расчетам. На рис. 3 показаны зависимости чувствительности контроля. Из рисунка видно, что полученной чувствительности вполне достаточно, чтобы контролировать поршни с точностью 0,5% к поверхности вставки (1% это  $\approx (16-20)$  мм<sup>2</sup>). Данной точности соответствует отличие эхо-сигналов для дефектной и качественной областей со стороны «юбки» поршня не менее 10 дБ. Следует отметить, что существуют три области на отливке, в которых контроль в предложенном режиме затруднителен. Это те точки, на которых вставка базируется при заливке. Данные области в сумме не превышают 6% всей длины окружности. Для их контроля необходимо поднять уровень срабатывания на регистраторе

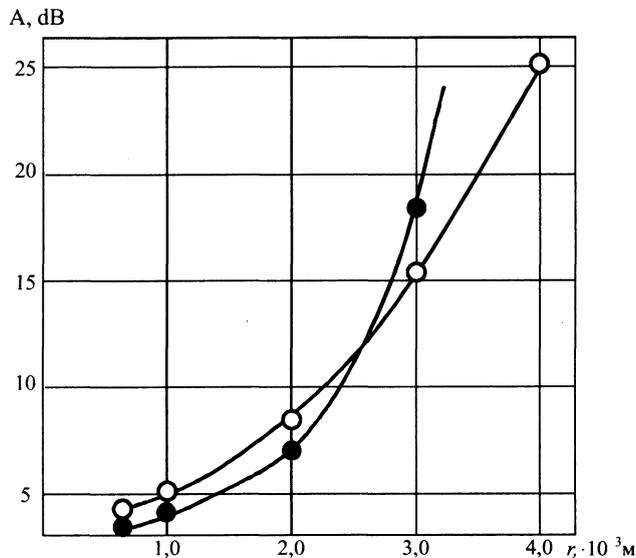


Рис. 3. Зависимость амплитуды сигнала, отраженного от плоскостного отверстия, расположенного симметрично относительно вставки:  $r$  – радиус отверстия; ● – со стороны «юбки» поршня; ○ – со стороны «головки» поршня

дефектов. Можно с большой степенью уверенности говорить о том, что если в этих областях будут дефекты, то они обязательно будут и в соседних областях. Поэтому ошибки, связанные с их контролем, можно учесть программно. При контроле верхней поверхности вставки фокусированными преобразователями было установлено, что данной точности измерений соответствует разница в эхосигналах не менее 8 дБ.

Результаты проведенных теоретических изысканий и экспериментальных исследований позволяют

сделать вывод о принципиальной возможности контроля несвая нирезистовой вставки с основным материалом поршня в состоянии отливки.

Установлено, что контроль поверхности вставки со стороны головки должен осуществляться продольной волной с использованием фокусированных преобразователей. Контроль вставки со стороны «юбки» необходимо проводить поперечной волной наклонным преобразователем.

Необходимо учитывать, что перебраковка при контроле поршней на ранних стадиях производства недопустима. При разработке конкретного оборудования должна быть достигнута оптимальная чувствительность для конкретной геометрии отливки поршня. При общем принципиальном подходе, описанном в данной работе, вопросы чувствительности решаются путем выбора размеров излучателей, условиями фокусировки, степени демпфирования, условиями возбуждения пьезопластин.

### Литература

1. Гиль Н.Н., Коновалов Г.Е., Майоров А.Л. Оборудование для неразрушающего контроля поршней и гильз дизельных двигателей // Механика машин на пороге III тысячелетия: Материалы МНТК НИРУП «Белавтотракторостроение», Мн., 2001.
2. Konovalov G., Mayorov A., Prokhorenko P., Gil N. The testing of the perpendicular to the free surface adhesion boundary // 14-th World Conference on NDT. New Delhi, India, 1996.
3. Konovalov G., Mayorov A. Devices for non-destructive testing of adhesion quality of a ni-resist cast iron insert in diesel engine piston // 8-th European Conference on Non-Destructive Testing, Barcelona, 2002.