
Перспективы ультразвукового контроля отливок из чугуна



**Воронкова
Любовь
Владимировна**

Ведущий
научный
сотрудник ГНЦ
РФ ОАО НПО
«ЦНИИТМАШ»,
г. Москва.
К. т. н., III уро-
вень квалифика-
ции по акусти-
ческому виду НК

Чугунных отливок выпускается в нашей стране 500 тыс. т ежегодно. Это валки прокатных станов и бумагоделательные валки, корпуса дизелей и насосов, венцы зубчатых колес опор карусельных станков, трубопроводы, трубопроводная арматура, контейнеры для хранения и транспортировки радиационных материалов.

Разнообразие марок чугуна с широким диапазоном физико-механических свойств позволяет ему заменять сталь и алюминий (головки цилиндров дизельных двигателей), а высокая коррозионная стойкость — технические объекты, контактирующие с водой. При этом чугун дешевле стали в 3–5 раз.

По коррозионной стойкости трубы теплоцентралей, изготовленные из чугуна с шаровидным графитом, сопоставимы лишь с трубами из нержавеющей стали 12 (08) X18H10T и в 8 раз превосходят стойкость труб из низкоуглеродистых сталей. Гарантийный срок службы центробежно-литых труб из чугуна с шаровидным графитом составляет порядка 100 лет. Водопровод в Париже на основе труб из чугуна более 200 лет функционирует без аварий.

В мировой литейной промышленности выпуск чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом как прогрессивных материалов в машиностроении неизменно возрастает. Номенклатура отливок расширяется.

Сложность контроля чугунных отливок заключается в наличии сильного затухания в них ультразвука, нестабильности акустических характеристик, невозможности двустороннего доступа, сложной геометрической форме. Тем не менее, интерес к этой проблеме проявляется как в России, так и за рубежом.

Преимущество ультразвуковой дефектоскопии, контроля прочности и структуры чугунных отливок перед разрушающими методами состоит в резком сокращении времени и затрат на контроль, а также в возможности оценки качества в любом месте отливки.

Пионерами в решении этих проблем в нашей стране были Н. В. Химченко, В. Н. Приходько, Г. А. Буденков, за рубежом — Р. Циглер и Р. Герстнер.

Дефектоскопия чугуна

Отсутствие государственной и отраслевой нормативно-методической документации сдерживает применение в промышленности УЗК чугуна. Первый документ такого уровня был принят в 2003 г. Это EN 12680-3: 2003 «Отливки. Ультразвуковой контроль. Чугунные отливки с шаровидным графитом». Посвящен этот документ дефектоскопии отливок толщиной от 10 до 500 мм. Диапазон рекомендуемых частот от 0,5 до 5,0 МГц. Дефектоскопия проводится эхо-методом, чувствительность контроля настраивают по плоскостным отверстиям или боковым цилиндрическим сверлениям, расположенным в стандартных образцах предприятия (калибровочных блоках). Можно также использовать АРД-диаграммы. Приведены нормы для максимально допустимых размеров несплошностей — объемных отражателей и шлака, требования контролепригодности, оценка ультразвуковых сигналов. Подробнее об этом документе — в публикации [1].

В последние годы возникла проблема контроля сварных соединений из чугуна, ранее никем не решавшаяся.

Сварные кольцевые стыковые соединения труб из чугуна с шаровидным графитом как объект ультразвуковой дефектоскопии позволяют соединить в себе опыт, накопленный при дефектоскопии стальных сварных соединений и чугунных отливок.

Задача дефектоскопии сварных соединений чугуна возникла при сварке в плети труб из чугуна с шаровидным графитом. Сваривались трубы диаметром 150–300 мм с толщиной стенки 6–10 мм. Шаровидная форма графита создает высокую пластичность и прочность чугуна одновременно. Такой чугун имеет механические свойства, близкие к свойствам углеродистой стали.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ) относится к группе трудно свариваемых материалов из-за высокого содержания в нем кремния и углерода. При высоких скоростях плавления и кристаллизации в чугуне образуются хрупкие карбидные структуры, приводя-

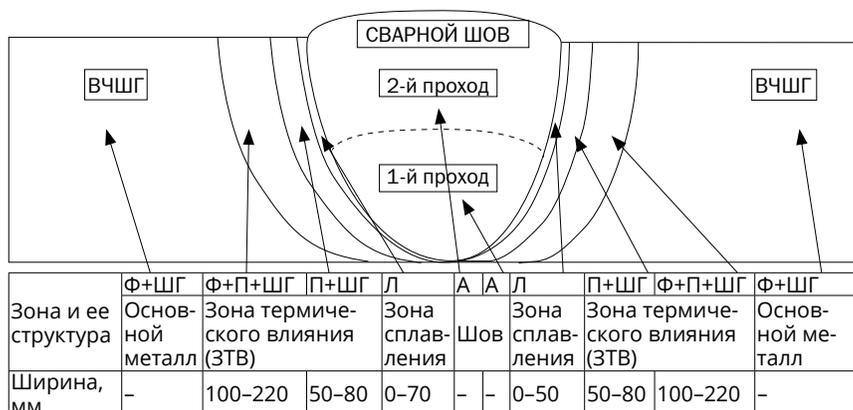


Рис. 1 Структура наплавленного металла, зоны сплавления и зоны термического влияния сварного соединения: Ф — феррит, П — перлит, Л — ледебурит, А — аустенит, ШГ — шаровидный графит

щие к трещинам сварного шва. В околошовной зоне также возможно образование хрупких структур, борьба с ними ведется применением высокотемпературного отжига сварного соединения с замедленным охлаждением. Проводилась аргодуговая сварка железо-никелевыми или никель-медными электродами. Структура стыкового сварного соединения приведена на рис. 1.

Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений со сложной структурой околошовной зоны требует проведения перед контролем наплавленного металла предварительного контроля околошовной зоны прямым или раздельно-совмещенным преобразователем с целью выявления несплошностей и структурных неоднородностей.

Акустические характеристики чугуна с шаровидным графитом отличаются от их значений для стали. Перед проведением дефектоскопии сварного соединения необходимо экспериментально определять угол ввода преобразователя и скорость поперечной волны в чугуне.

Результаты экспериментов, опубликованные в [2], подтверждают возможность ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений труб из чугуна с шаровидным графитом.

Аппаратура для контроля чугуна

Известная аппаратура для структуроскопии чугуна (ДМ-4, AUTOSCAN) использует принцип измерения времени прихода донного сигнала



Рис. 2. Внешний вид структуроскопа УС-3ЦЛ

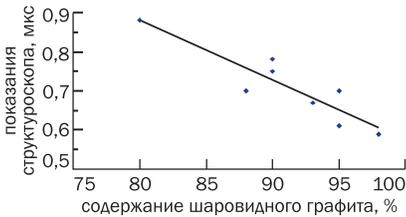


Рис. 3. Зависимость показаний структуроскопа от содержания шаровидного графита

для расчета скорости продольной волны. При этом толщина отливки в месте измерения определяется штангенциркулем. На практике не всегда осуществим двусторонний доступ к отливке. Параллельность контактной и донной поверхности может не укладываться в 2° . Криволинейность и шероховатость контактной поверхности увеличивают ошибку измерения временного интервала и толщины отливки.

Использование скорости головной волны для определения формы графита оптимально в случае контроля отливок сложной формы, не позволяющих получить донный сигнал.

Для отливок с большим затуханием ультразвука это также актуально. То, что скорость головной волны равна скорости продольной волны ультразвука, позволило предположить, что все зависимости скорости продольной волны ультразвука от структурных составляющих чугуна переносятся и на скорость головной волны ультразвука. Эксперименты это подтвердили.

Еще один плюс использования скорости головной волны — ее нечувствительность к грубой шероховатости поверхности. Достаточно обеспечить чистую поверхность только в точках ввода и приема головной волны. Эти соображения позволили с успехом применить скорость головной волны для определения формы графита в такой сложной отливке, как ступица колеса грузовика КАМАЗ. При постоянной базе (пути) прозвучивания достаточно было измерить только временной интервал прохождения головной волны в чугуне. Постоянство базы прозвучивания обеспечивалось специальной конструкцией раздельно-совмещенного преобразователя, сохраняющего неизменность расстояния между точками выхода и приема при изменяющейся кривизне поверхности.

Функциональная схема структуроскопа УС-3ЦЛ (НПО «Луч» совместно с НПО «ЦНИИТМАШ») [3] позволяет проводить измерения времени рас-

пространения продольной головной волны на базе 70 мм с погрешностью 0,2 мкс. Внешний вид структуроскопа и его технические характеристики представлены на рис. 2. Его технические характеристики:

- диапазон измерения $0 \div 99,99$ мкс;
- погрешность измерения 0,2 мкс;
- рабочие частоты 1,8; 2,5 МГц;
- диапазон рабочих температур $0 \div + 50$ °С;
- габариты $126 \times 85 \times 135$ мм;
- масса с аккумулятором 0,5 кг.

При настройке структуроскопа время прохождения головной волны через сталь (образец СО-2) принималось за уровень отсчета (0 мкс). Путь был всегда постоянен (70 мм). Цифры, приведенные на рис. 3 под обозначением «показания структуроскопа», соответствуют превышению значения временного интервала между точкой выхода и приема по сравнению с его значением для стали. Коэффициент корреляции зависимости на рис. 3 составляет 0,9, ошибка определения содержания шаровидного графита — 4,2%.

Структуроскоп позволяет проводить контроль формы графита в чугуне при одностороннем доступе к отливке и по поверхности со сложной криволинейной формой и грубой шероховатостью. Портативен, питание от аккумулятора, прочный металлический корпус.

Выделение полезного сигнала на фоне структурного шума

Высокий уровень структурного шума — основное препятствие для применения УЗК чугуна. Решение проблемы выделения полезного сигнала из шума развивалось двумя путями.

Первый — использование зависимости структурного шума от длительности зондирующего импульса. Для его реализации используется дефектоскоп с регулируемой длительностью зондирующего импульса. Получена зависимость амплитуды донного сигнала и структурного шума (соответственно кривые 1, 2 на рис. 4) от количества периодов колебаний в зондирующем импульсе при его постоянной амплитуде. Амплитуда донного сигнала остается постоянной, а амплитуда шума изменяется. Этот эффект можно использовать для определения полезного сигнала (от какого-либо отражателя) на фоне структурных шумов, когда их амплитуды сравнимы по величине. Для этого предлагается периодически менять длительность зондирующего импульса от трех до девяти

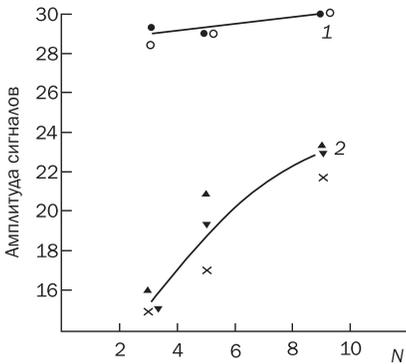


Рис. 4. Зависимость амплитуды первого донного сигнала (•) и структурного шума (▲, ×) от числа N периодов колебаний в зондирующем импульсе

ем зондирующего сигнала на структурных неоднородностях с образованием коррелированной с зондирующим сигналом структурной помехи, маскирующей информационный донный эхо-сигнал или эхо-сигнал от искомых несплошностей. Применяя специальную аппаратуру — сверхширокополосные композитные преобразователи мозаичной конструкции, сложно модулированные сигналы и адаптивную настройку параметров электроакустического тракта, можно обеспечить достоверный контроль большей части изделий из различных марок серого чугуна. Подробное описание в [4, 5].

Вначале анализируются параметры электроакустического тракта, включающего образцы серого чугуна. Используется оптимальная фильтрация эхо-сигналов, что предполагает использование в качестве зондирующих сложно модулированных сигналов и согласованного фильтра в приемном тракте.

На рис. 5 показана реализация эхо-сигналов на образце чугуна 1А6 (структура представлена на рис. 6) толщиной 60 мм. Так как затухание ультразвуковых волн в образце достаточно велико, то вследствие высокого рассеивания ультразвуковых сигналов на структуре серого чугуна донный сигнал (U_1) практически не виден на фоне низкочастотных резонансов элементов преобразователя и коррелированного с зондирующим сигналом структурного шума (рис. 5а). С целью решения этой проблемы была осуществлена операция стробирования амплитудно-частотного спектра. Основываясь на данных предварительного экспе-

риодов, тогда диапазон изменения амплитуды шума будет достигать 5 дБ, а амплитуда полезного сигнала останется практически неизменной (в пределах 2 дБ), рис. 4.

Второй путь — радиотехническая обработка акустических сигналов.

У серого чугуна коэффициент затухания ультразвука в десятки раз больше, чем у стали. Причем затухание определяется не явлением поглощения ультразвуковой волны, а, прежде всего, рассеянием

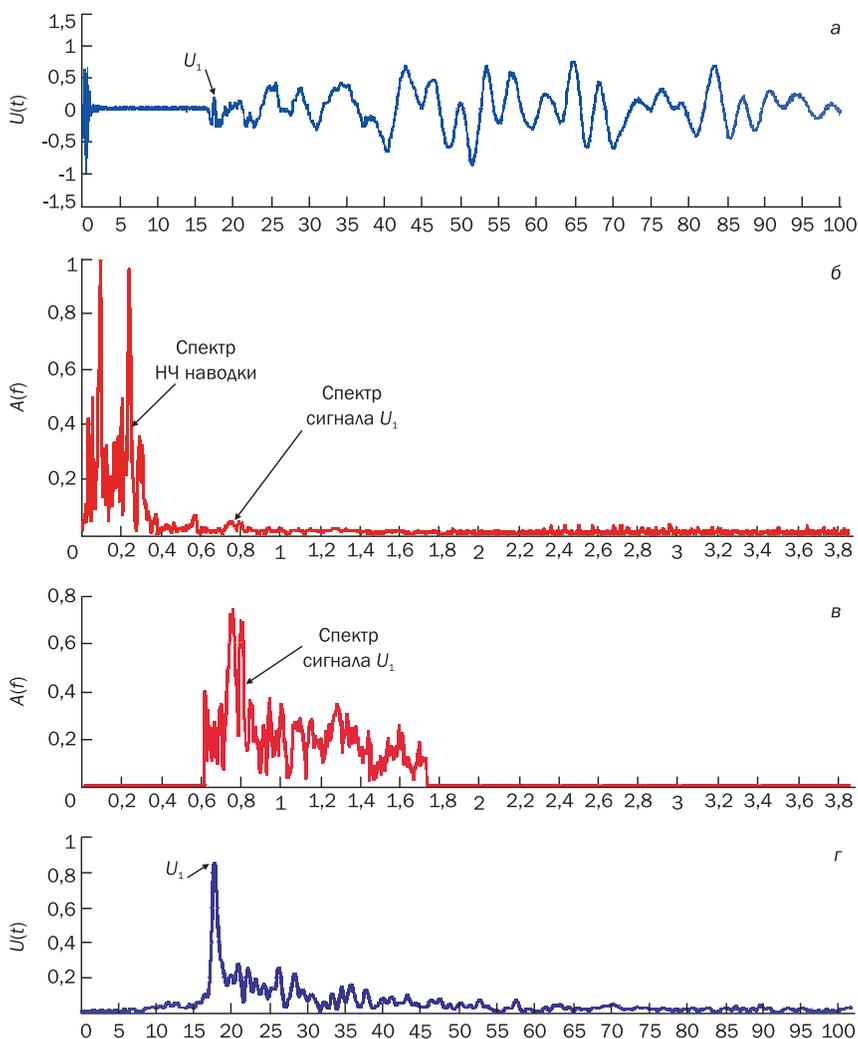


Рис. 5. Теневой тест-контроль образца 1А6 толщиной 60 мм: а — ультразвуковой сигнал при теневом тест-измерении; б — Фурье-спектр тест-сигнала; в — стробированный Фурье-спектр тест-сигнала; г — реализация тест- сигнала после частотного стробирования и синхронного детектирования

риментального исследования акустических свойств чугуна, определили значения граничных частот выделяемой области спектра — от 0,6 до 1,8 МГц, что позволило существенно улучшить отношение сигнал/шум



Рис. 6. Структура образца 1А6. Не травлено, $\times 100$

и достичь удовлетворительного результата контроля, уверенно зарегистрировав «донный» сигнал (рис. 5в).

На следующем этапе формировался сигнал электроакустической наводки, включающий в себя и шум ПЭП. Этот сигнал регистрировался в дефектоскопе при отсутствии акустического контакта ПЭП с поверхностью исследуемого образца (при работе «на воздух»). Далее сигнал помехи ПЭП и шум запоминался в компьютерном де-

фектоскопе, рис. 7.

На заключительном этапе производился собственно контроль образца чугуна. При каждом измерении ультразвуковой эхо-сигнал представлял сумму информационного эхо-сигнала и сигнала помехи, искажавшего результаты контроля. С целью исключения искажения результатов контроля сигналом помехи (наводка электроакустического тракта и шум

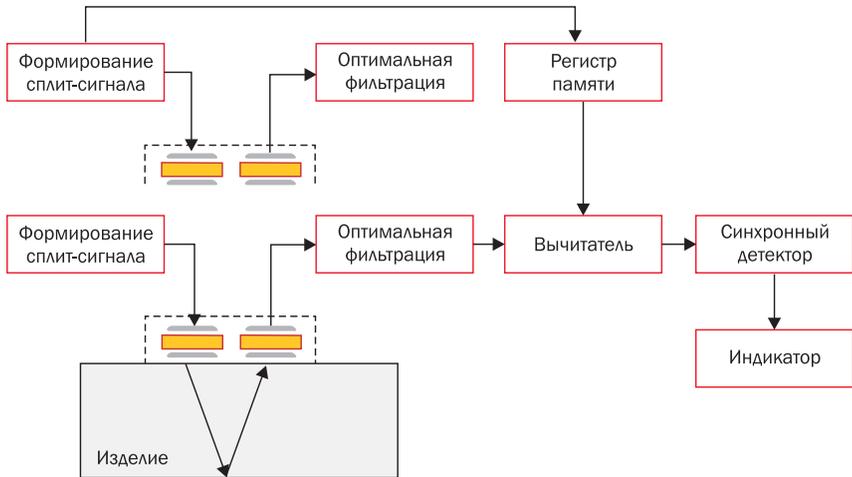


Рис. 7. Структурная схема эксперимента по контролю чугуна многофункциональным дефектоскопом (разработка МЭИ)

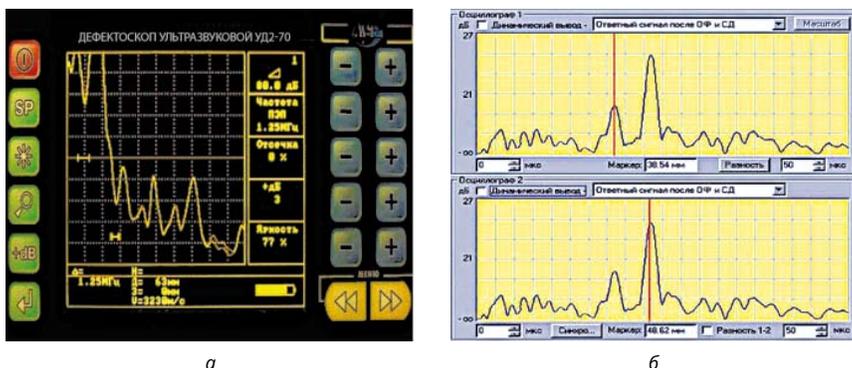


Рис. 8. Сравнительные результаты УЗК отливки из чугуна дефектоскопом УД2-70 с использованием П 111-1,0-10 (а) и многофункциональным адаптивным дефектоскопом с использованием сложномодулированного сплит-сигнала и оптимизированных широкополосных мозаичных преобразователей (б)

преобразователя) из суммарного эхо-сигнала при каждом измерении вычитался предварительно запомненный сигнал помехи.

Сравнительные результаты УЗК сложноструктурного изделия из серого чугуна проводились традиционными средствами контроля (дефектоскоп УД2-70) и многофункциональным компьютерным дефектоскопом, в котором использовались сложномодулированные сплит-сигналы и осуществлялась оптимизация амплитудно-частотной характеристики. Был проконтролирован образец из чугуна со структурой, аналогичной структуре образца 1А6 толщиной 45 мм. В нем был выполнен отражатель в виде плоскодонного отверстия глубиной 10 мм и диаметром 5 мм. Контроль проводился традиционным дефектоскопом УД2-70 с преобразователем частотой 1,0 МГц.

Результаты УЗК образца из чугуна приведены на рис. 8, показана А-развертка на экране дефектоскопа УД2-70, в котором использовался традиционный демпфированный преобразователь (рис. 8а), и на экране многофункционального адаптивного дефектоскопа с использованием сложномодулированного сплит-сигнала и широкополосного мозаичного преобразователя (рис. 8б).

В силу «жесткой» схемы формирования сигнала ударного возбуждения, присущей традиционной аппаратуре УЗК, в дефектоскопе нет возможности производить гибкую адаптацию параметров преобразователя и параметров используемого сигнала под характеристики контр-

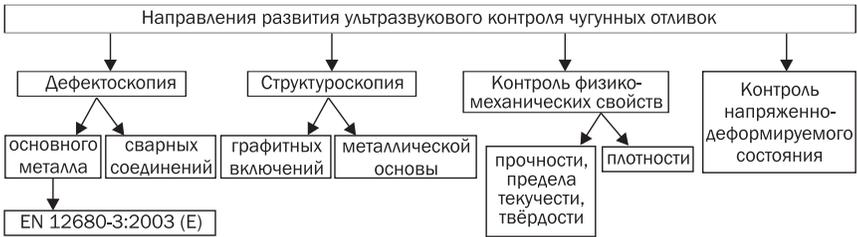


Рис. 9. Схема направлений развития УЗК чугунных отливок.

олируемого изделия; нет возможности производить радиотехническую обработку эхо-сигналов, как это производится в ультразвуковом многофункциональном измерительном комплексе.

Таким образом, результаты эксперимента обосновывают целесообразность использования при УЗК изделий из сложноструктурных материалов с большим затуханием волн параметрически гибких сложно модулированных сигналов с последующей их оптимальной фильтрацией. Также необходимо использование оптимизированных широкополосных преобразователей с П-образной амплитудно-частотной характеристикой и с полосой пропускания, соответствующей ширине амплитудно-частотного спектра регистрируемого сигнала. Кроме того, обязательным элементом такого контроля является гибкая многофункциональная адаптивная аппаратура УЗК, позволяющая производить различные радиотехнические обработки сигналов и тем самым осуществлять оптимизацию электроакустического тракта и оптимальную обработку полученных результатов контроля.

Объединение методов контроля для получения максимально полной информации о структуре чугуна — никогда не исчезающая тенденция современных разработок, проводившихся в разных странах. Последняя публикация [6] представляет работу японских ученых по объединению ультразвукового (степень шаровидности графита по скорости ультразвука) и вихретокового (определение содержания перлита в металлической матрице) методов.

В заключение для полного представления перспектив развития УЗК чугуна предлагается схема направлений, основанная на уже существующих экспериментальных зависимостях (рис. 9).

Можно заключить, что в познании структуры, акустических характеристик и создании методологии и методик контроля изделий и загото-

вок из чугуна в последнее десятилетие достигнуты заметные успехи. Над дальнейшим развитием методов и специальных средств с оптимальным функциональным решением для ультразвукового контроля объектов из чугуна продолжает работать автор и его коллеги в России и за рубежом.

Литература

1. Воронкова Л. В. EN 12680-3:2003 — первый в мире стандарт по ультразвуковой дефектоскопии чугуна с шаровидным графитом. — Контроль. Диагностика. 2006. С. 68–70.
2. Воронкова Л. В., Носов В. А. Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений чугунных труб — реальная возможность. — Контроль. Диагностика. 2010. № 3. С. 20–22.
3. Воронкова Л. В., Носов В. А. Опыт использования ультразвукового структуроскопа УС-ЗЦЛ для контроля чугунных труб. — Контроль. Диагностика. 2009. № 9. С. 60–62.
4. Качанов В. К., Карташев В. Г., Соколов И. В. и др. Проблемы и особенности пространственно-временной обработки сигналов при ультразвуковом контроле изделий из сложноструктурных материалов. — Дефектоскопия. 2010. № 4. С. 3–14.
5. Качанов В. К., Соколов И. В., Родин А. Б., Воронкова Л. В. Ультразвуковой контроль сложноструктурных изделий из чугуна с применением многофункционального программно-аппаратного измерительного комплекса. — Дефектоскопия. 2008. № 11. С. 3–20.
6. Ohtaki K., Uchimoto T., Takagi T. Nihon kikai gakkai ronbunshu. A Hen/Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. Pt. A. 2010. V. 76. No. 767. P. 968–975.