

Памяти Георгия Дмитриевича Белова, золотыми руками которого изготовлены все датчики, представленные в данной статье, посвящается.

О ДИАГНОСТИКЕ ПОЛЗУЧЕСТИ ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ.

I. ДАТЧИКИ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА

В.С. Пермикин

Описаны конструкции датчиков для измерения времени распространения объемных и поверхностных ультразвуковых волн и примеры применения их для диагностики процесса ползучести металла. Приведены результаты измерения скорости поверхностных волн при нагружении образцов в упругой и пластических областях. Показано, что в упругой области (вплоть до предела текучести металла) изменение скорости поверхностных волн не превышает 0,02 %. Наблюдается уменьшение скорости поверхностных волн в пластической области, и величина уменьшения линейно зависит от скорости приложения нагрузки.

При эксплуатации тепловых электростанций в металле узлов основного тепломеханического оборудования (котлы, паропроводы, турбины), работающего при высоких температурах (450—600 °С), наблюдается процесс ползучести, то есть с течением времени накапливается остаточная деформация деталей и узлов. Величина остаточной деформации (от начала эксплуатации до разрушения детали) не превышает нескольких процентов, а скорость ее накопления составляет величину (10^{-6} — 10^{-5}) %/ч. Наиболее интенсивно ползучесть протекает в металле гнутых элементов (гибов) и сварных стыках паропроводов и является причиной их разрушения.

При изучении высокотемпературной ползучести металла ($T, K > 0,4 T_{пл} = T_{рекр}$) различают три ее стадии (в координатах время — остаточная деформация). На последней стадии, когда деформация нарастает ускоренно, на границах зерен металла возникают микропоры или (и) клиновидные микротрещины. Со временем количество микропор растет, они сливаются друг с другом, возникают микротрещины, далее образуются одна или несколько макротрещин, что в итоге и приводит к разрушению детали. Размеры микропор не превышают нескольких микрон, что значительно меньше порога чувствительности классических методов дефектоскопии — ультразвуковой (в ее амплитудном варианте), вихретоковой, капиллярной, магнитопорошковой и др., но микропоры видны в оптический микроскоп при увеличении в 500—1000 раз при металлографическом исследовании.

Длительность третьей стадии ползучести в наиболее распространенных теплостойких сталях (12X1MФ и 15X1M1Ф) может достигать половины общего времени эксплуатации, которое составляет величину $(1—3) \cdot 10^5$ ч (в среднем за год энергооборудование нарабатывает 7—8 тыс. ч), и информация о степени пораженности структуры металла микропорами позволяет оценить остаточный ресурс деталей и предотвратить их аварийное разрушение.

В настоящее время диагностика процесса ползучести теплостойких сталей проводится металлографическим методом: при исследовании

шлифов, приготовленных непосредственно на оборудовании, определяется степень поврежденности микроструктуры металла микропорами — одиночные поры, множественные поры, цепочки пор по границам зерен, микротрещины [1]. Микроструктура исследуется на шлифе с помощью портативного микроскопа или на оттиске со шлифа (на реплике) на стационарном металлографическом микроскопе.

Высокая трудоемкость приготовления шлифов (для выявления микропор ползучести шлиф подвергается многократной переполровке и травлению) ограничивает применение металлографического метода.

В 80-х и начале 90-х годов перспективным методом для диагностики ползучести считался метод измерения скорости у. з. волн, однако из-за малости эффекта исследования в данном направлении были приостановлены [2]. В этой же работе дан обзор различных методов исследования металла с целью выяснения возможности создания на основе одного из них неразрушающего метода определения степени микроповрежденности при ползучести и сделан вывод, что в настоящее время такого метода не существует.

Скорость у. з. волн в конструкционных материалах зависит от многих факторов, таких как наклеп, твердость, соотношение структурных составляющих, пористость, напряжение. Однако ввиду малой зависимости скорости от перечисленных факторов неразрушающий контроль и диагностика изменений свойств материалов в процессе эксплуатации по величине скорости ультразвука не получили широкого распространения.

Немногие существующие технологии контроля свойств материалов по скорости ультразвука позволяют решать в основном задачи контроля качества на стадии выпуска продукции. К таким технологиям относятся:

определение доли шаровидного графита в чугунах [3, 4];

определение остаточной пористости в фарфоре и деталях, изготовленных методом порошковой металлургии [4];

оценка несущей способности бетона [4, 5].

Задача определения количества микропор ползучести по изменению скорости у. з. волн в диапазоне частот 1—10 МГц, согласно волновой теории, относится к области рассеяния Релея, так как длина у. з. волн значительно больше (~ в 10^3 раз) размеров микропор. В результате интерференции основной волны и волн рассеяния наблюдается сдвиг фазы и уменьшение скорости результирующей волны по отношению к основной [6].

Вклад в рассеяние дают два механизма: во-первых, рассеяние происходит уже просто по той причине, что микропора служит препятствием, хоть и малым, по сравнению с длиной волны; во-вторых, микропора является осциллятором со своей собственной частотой свободных колебаний, которые возникают под действием падающей волны, в результате происходит переизлучение осциллятором энергии падающей волны. Амплитуда и частота рассеянных волн в данном случае зависят от степени демпфирования осциллятора окружающей средой и соотношения частот падающей волны и собственных колебаний осциллятора.

В отличие от классического релеевского рассеяния, когда расстояние между препятствиями больше длины волны, расстояние между микропорами ползучести соизмеримо с величиной зерна в металле, которая в теплостойких сталях равна нескольким десяткам микрон, то есть значительно меньше длины волны (~ в 10^2 раз). При таких условиях происходит рассеяние на порах и первичных волн рассеяния, что увеличивает величину изменения (уменьшения) скорости основной волны.

Существенным положительным обстоятельством, позволяющим применить метод оценки состояния по изменению скорости у. з. волн при ди-

агностике ползучести, является и тот факт, что ползучесть, если она не происходит на концентраторах напряжений, обычно поражает в деталях области, соизмеримые с размерами самих деталей. Это дает возможность увеличивать расстояние между у. з. датчиками, а значит, повышать точность оценки изменения скорости.

К факторам, которые влияют на результаты измерений скорости ультразвука непосредственно на оборудовании, следует отнести:

наличие остаточных (после эксплуатации) напряжений в конструкциях;

непостоянство температуры окружающей среды в отличие от лабораторных условий и неравномерность распределения температуры в самой детали;

часто односторонний доступ к детали, а значит, невозможность измерения пути, проходимого у. з. волной;

состояние поверхности, через которую вводится ультразвук: шероховатость, кривизна, наличие окалины;

геометрическая дисперсия из-за дифракционных явлений и близости размеров деталей к ширине пучка у. з. волны (волноводные эффекты) [7].

Однако применяя специальные датчики и устройства, а также методически учитывая влияние этих факторов, во многих случаях удается измерить не саму скорость, а ее изменение относительно эталона, или отношение скоростей различных типов волн и по этим величинам оценить изменения, возникшие в структуре металла при его эксплуатации.

ДАТЧИКИ ОБЪЕМНЫХ ВОЛН

При невозможности измерения расстояния, проходимого ультразвуком, для определения изменения скорости по изменению времени распространения волны можно применить прямые совмещенные датчики (рис. 1), в которых две и более пьезопластины установлены друг за другом [4], как показано на рис. 2.

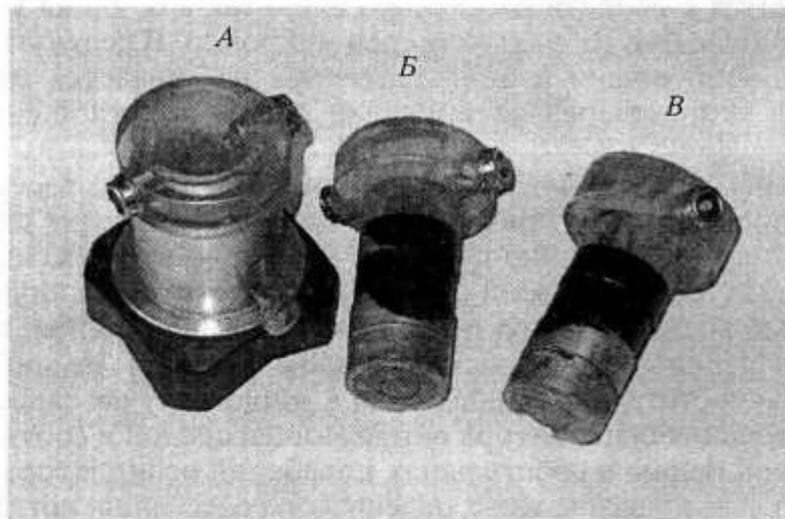


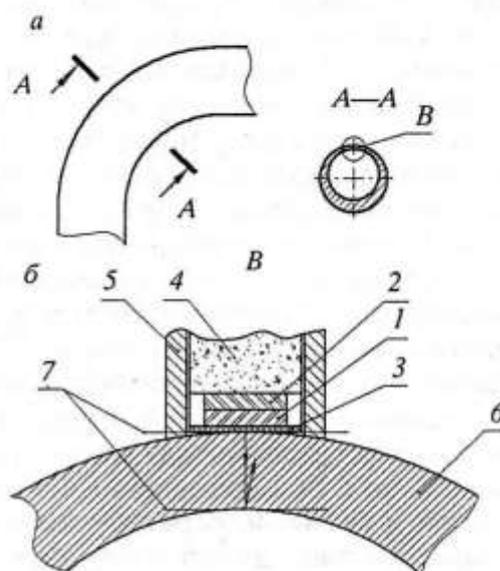
Рис. 1. Прямые датчики объемных волн (один из них в оправке с магнитным прижимом).

Особенностью таких датчиков является то, что у. з. волны от обеих пластин распространяются по одному пути, при этом исключается влияние на отношение скоростей многих из перечисленных выше факторов (температуры и состояния поверхности).

С помощью этих датчиков изучалась возможность оценки состояния металла гнутых элементов паропроводов, изготовленных из сталей 12Х1МФ и 15Х1М1Ф, эксплуатирующихся при температуре 540—560 °С.

Рис. 2. Гнутый элемент (гиб) трубопровода (а) и датчик на его растянутой зоне (б):

1, 2 — пьезопластины; 3 — протектор; 4 — демпфер; 5 — центрирующая оправка; 6 — изделие (растянутая зона поперечного сечения гнутого элемента трубы); 7 — касательные плоскости (в точке ввода волны и в точке отражения от внутренней стенки).



В зависимости от типа поляризации и собственной частоты у. з. волны были реализованы следующие варианты измерений отношения скоростей волн различных типов или волн с различной частотой.

А. Обе пьезопластины излучают сдвиговые волны, и плоскости поляризации волн взаимно перпендикулярны. Такой датчик применен для определения текстуры по отношению скоростей сдвиговых волн. Микропоры, возникающие в теплоустойчивых сталях, в начале третьей стадии ползучести имеют округлую форму, а по мере роста размеров и количества пор их форма к концу этой стадии становится ближе к приплюснутому эллипсоиду вращения, малая ось которого совпадает с направлением максимальных растягивающих напряжений, действовавших при экс-

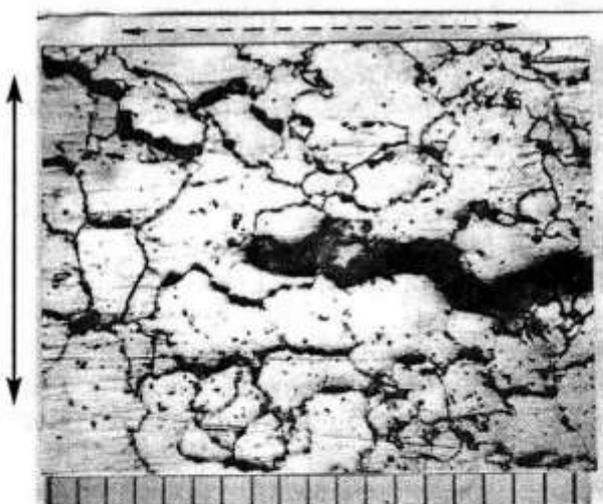


Рис. 3. Микропоры ползучести и микротрещина в структуре стали 12Х1МФ. Фотография ($\times 500$) со шлифа, приготовленного на гнбе 133 \times 17. Внизу часть линейки — изображение ($\times 500$) объекта-микрометра, расстояние между штрихами которого равно 0,01 мм:

← - - → Направление, параллельное оси трубы;
 ← — — — — — → Направление максимальных растягивающих напряжений, действовавших при эксплуатации гнба.

плуатации (рис. 3), поэтому в металле с микропорами ползучести скорости сдвиговых у. з. волн с поляризацией вдоль направления максимальных напряжений и перпендикулярно напряжениям различаются.

Б. Пьезопластина 1 излучает сдвиговую волну, а пьезопластина 2 — продольную, и длины волн равны друг другу. С помощью такого датчика

определялось изменение коэффициента Пуассона, так как он функционально связан с отношением скоростей этих волн. Ожидалось, что модуль Юнга и модуль сдвига могут в различной степени изменяться по мере увеличения количества микропор в упругой среде, а значит, и коэффициент Пуассона металла на третьей стадии ползучести также будет изменяться.

В. Обе пьезопластины излучают волны одинакового типа, но разной частоты. С помощью такого датчика определялась степень частотной дисперсии фазовой скорости у. з. волны.

В металле с микропорами ползучести, как и в жидкости с пузырьками [8], может наблюдаться частотная дисперсия фазовой скорости звука. Это связано с возникновением волн рассеяния на микропорах в результате возбуждения собственных колебаний микропор.

Собственная частота колебаний микропор значительно выше частоты вынуждающей силы (частоты у. з. волн в диапазоне первых МГц), так как размеры микропор примерно в 10^3 меньше длины волны ультразвука. Это значит, что амплитуда возбуждения микропоры как осциллятора мала по сравнению с амплитудой основной волны, но поскольку пор достаточно много (расстояние между микропорами примерно в 10^2 меньше, чем длина волны), то и при небольшом перераспределении энергии между основной волной и волнами, переизлученными осцилляторами, дисперсия фазовой скорости может давать различный вклад в значение скорости (или времени распространения ультразвука) при измерениях на различных частотах. Форма поперечного сечения гибо высокотемпературного паропровода (как и форма поперечного сечения толстостенной трубы) позволяет провести эти измерения и использовать в расчетах отношений скоростей значения времени распространения волн различных частот, поскольку при прозвучивании по толщине таких объектов пренебрежимо мала геометрическая дисперсия, обусловленная волноводным эффектом.

Измерения сдвиговыми волнами проводились датчиком А (рис. 1) на частотах 1,25 и 2,5 МГц, измерение отношения скоростей продольных и сдвиговых волн датчиком В, у которого сдвиговые волны излучались на частоте 2,5 МГц, а продольные — на частоте 5 МГц, а оценка дисперсии с помощью датчиков В продольных волн — на частотах 1,25 и 10 МГц.

Измерения этими датчиками проводились в местах приготовления металлографических шлифов на наружной поверхности растянутой зоны (наиболее повреждаемой при ползучести) зоны гибо (см. рис. 2).

На шлифах с помощью портативного микроскопа [9] при увеличении в 500 раз определялось количество микропор на единицу площади шлифа, среднее — в 5—6 полях зрения микроскопа. Для выявления микропор шлифы на последнем этапе подготовки подвергались десятикратной полировке и травлению азотной кислотой (4 % HNO_3 в этиловом спирте). Результаты металлографических исследований сравнивались с результатами у. з. измерений.

Измерения времени распространения у. з. волн проводились с точностью $\pm 0,01$ мкс дефектоскопом УД2-12. Были обследованы 23 гибо из стали 12Х1МФ и 14 гибов из стали 15Х1М1Ф из труб следующих типоразмеров: $\varnothing 273 \times 32$, $\varnothing 219 \times 24$.

Металл гибов имел различную поврежденность микропорами ползучести до максимальной, при которой в микроструктуре образуются микротрещины из-за слияния микропор.

На рис. 4¹ видно, что наблюдается почти линейная зависимость изменения отношения скоростей поперечных волн со взаимно перпендику-

¹ R² — достоверность аппроксимации (Microsoft Excel).

лярными поляризациями от количества микропор. Скорость волны, плоскость поляризации которой параллельна направлению максимальных растягивающих напряжений, действовавших при эксплуатации (ось, в направлении которой поры приплюснуты, — направление, перпендикулярное оси трубы), уменьшается по отношению к значению скорости волны, плоскость поляризации которой параллельна оси трубы.



Рис. 4. Зависимость изменения отношения скоростей сдвиговых волн с взаимно-перпендикулярными плоскостями поляризации от количества микропор ползучести на наружной поверхности гйба:

× — сталь 15X1M1Ф; ○ — сталь 12X1MФ.

Слишком большой разброс точек в основном связан с тем обстоятельством, что устанавливалась корреляция изменения отношения скоростей волн с количеством пор на единице площади наружной поверхности гйба. Тогда как количество микропор в единице объема с глубиной (от наружной поверхности к внутренней) уменьшается нелинейно и в разных гйбах с одинаковым количеством микропор на единице площади наружной поверхности, эффективное значение этой величины различно.

Опыт использования датчиков, излучающих две сдвиговые волны со взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации, показал, что их можно применять при обследовании паропроводов только для выявления гйбов, находящихся в состоянии предразрушения. В стали 12X1MФ они позволяют разделять состояния: “цепочки пор” и “микротрещины”, а в стали 15X1MФ — определять состояние, когда количество микропор близко к максимальному.

На этих же гйбах проводились измерения датчиками типа *Б* и *В*. Изменений коэффициента Пуассона, превышающих 0,5 %, если не учитывать анизотропию скорости сдвиговых волн, связанную с отклонением формы пор от сферичности, не обнаружено. Это говорит о том, что скорости продольных и сдвиговых волн в среде с микропорами изменяются в равной степени.

Не обнаружено и зависимости групповой скорости продольных волн от частоты, по всей видимости, дисперсия фазовой скорости в интервале 1—10 МГц невелика.

На рис. 5 приведен другой вариант измерения скорости (времени распространения) объемных у. з. волн [10]. В этом тандеме из двух одинаковых датчиков с переменными углами ввода расстояние между точками ввода ультразвука при прозвучивании цилиндрического изделия по хор-

де после фиксации ползунов (поз. 3) остается постоянным. В данной конструкции ось цилиндрической поверхности датчика, по которой передвигаются каретки с пьезопластинами (поз. 1 и 2) при настройке углов ввода, совпадает с осью цилиндрической поверхности ползуна, которой ползун прижимает датчик к поверхности изделия, и проходит через точку ввода волн.

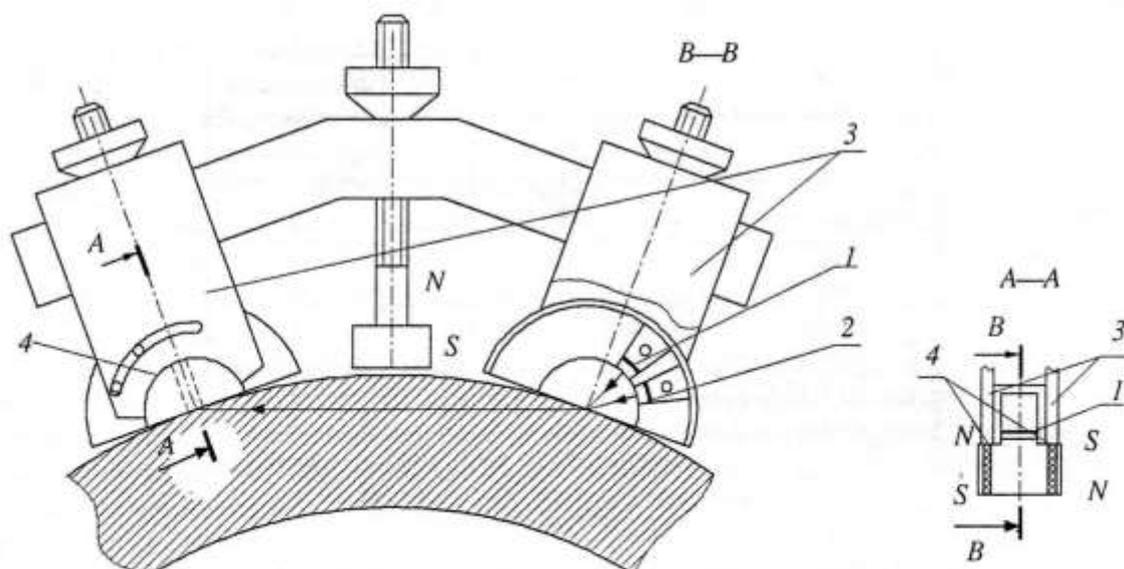


Рис. 5. Тандем датчиков для измерения времени распространения объемных у. з. волн, когда волны в трубе проходят по хорде поперечного сечения.

1, 2 — пьезопластины; 3 — ползуны; 4 — места контакта ползунов с призмами датчиков.

Необходимо отметить, что при измерениях по такой схеме, когда ультразвук распространяется по хорде, существенное значение на скорость оказывает геометрическая дисперсия, вызванная волноводными эффектами из-за близости к оси распространения ультразвука наружной поверхности трубы и сравнимости ширины пучка у. з. волны с толщиной стенки трубы.

При измерениях этим тандемом на гibaх, кривизна поверхности которых переменна, влияние геометрической дисперсии сравнимо с изменением скорости, вызванным микропорами ползучести.

Тандемом из таких датчиков можно измерять время распространения продольных или поперечных волн или их отношение в прямых трубах с одинаковыми диаметрами и толщиной стенки и сравнивать значения времени, измеренное в эталоне, изготовленном из трубы того же типоразмера, тогда вклад в изменение скорости от волноводного эффекта и геометрической дисперсии будет постоянным.

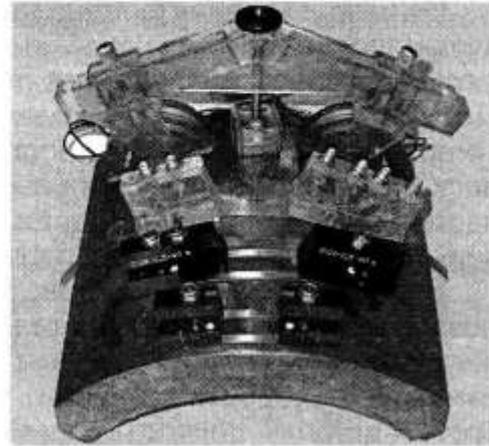
ДАТЧИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Поскольку зоны с наибольшей плотностью микропор ползучести расположены на наружной поверхности паропроводных труб, были разработаны конструкции тандемов датчиков поверхностных волн (рис. 6 и 7а—в) [11].

В первых двух вариантах такого тандема датчики скреплены между собой двумя гибкими металлическими пластинами, как показано на рис. 7а. Такие пластины позволяют измерять время распространения поверхностной волны на плоских и выпуклых поверхностях, при этом путь по изделию сохраняется постоянным. Толщина паропроводных труб значительно превышает глубину слоя, по которому переносится основная доля энергии поверхностной волны, и дисперсия скорости из-за волно-

волновых эффектов в данном случае не оказывает существенного влияния на результаты.

Рис. 6. Тандемы датчиков поверхностных волн и объемных (прозвучивание по хорде) на вырезке изгиба (труба диаметром 273×32).



Расстояния между пьезопластинами и соответствующими точками ввода в обеих призмах (в вариантах 7а, в) равны между собой и, измеряя

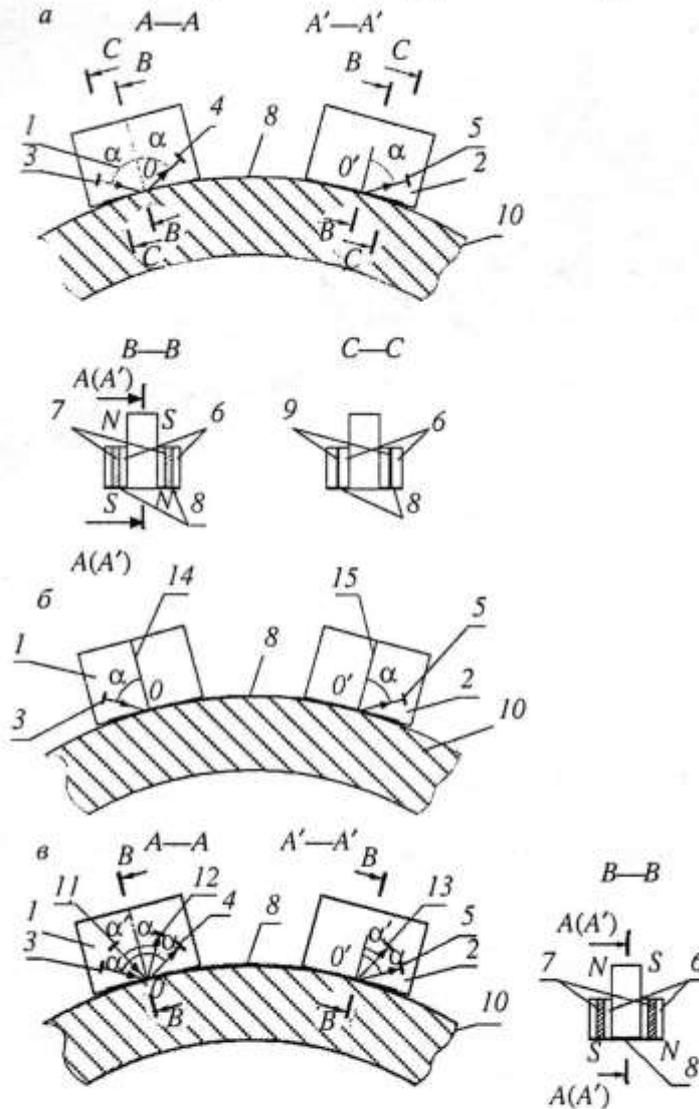


Рис. 7. Тандемы датчиков поверхностных волн (а—в):
 1, 2 — призмы; 3, 4, 5 — пьезопластины; 6 — боковые щетки; 7 — магниты; 8 — гибкие металлические пластины; 9 — штифты; 10 — деталь (труба); 11, 12, 13 — пьезопластины; 14, 15 — плоскости склейки.

время распространения, например в тандеме “а”, между пьезопластинами (поз. 3, 4) и вычитая его из времени распространения между пьезопла-

стинами (поз. 3, 5) получаем время, необходимое поверхностной волне, чтобы преодолеть путь по изделию между точками ввода.

Во втором варианте тандема (рис. 4б) каждая призма изготовлена из двух половин, которые склеены между собой по плоскости, перпендикулярной рабочей поверхности призмы и проходящей через точку ввода. Полупрозрачные (для ультразвука) плоскости склейки позволяют более точно измерять время распространения ультразвука в каждой из призм, поскольку при подключении пьезопластины в режим излучения и приема часть энергии у. з. волны отражается от угла, образованного рабочей поверхностью призмы и плоскостью склейки.

В третьем варианте датчиков (рис. 7в) пьезопластины (поз. 11, 12, 13) позволяют возбуждать в металлической пластине (поз. 8), которая служит эталоном скорости, волны Лэмба. Этот тандем позволяет измерять изменение скорости (времени) поверхностных волн в неравномерно нагретых деталях, поскольку из-за малой толщины в пластинке достаточно быстро устанавливается такое же распределение температур, как и в поверхностном слое детали.

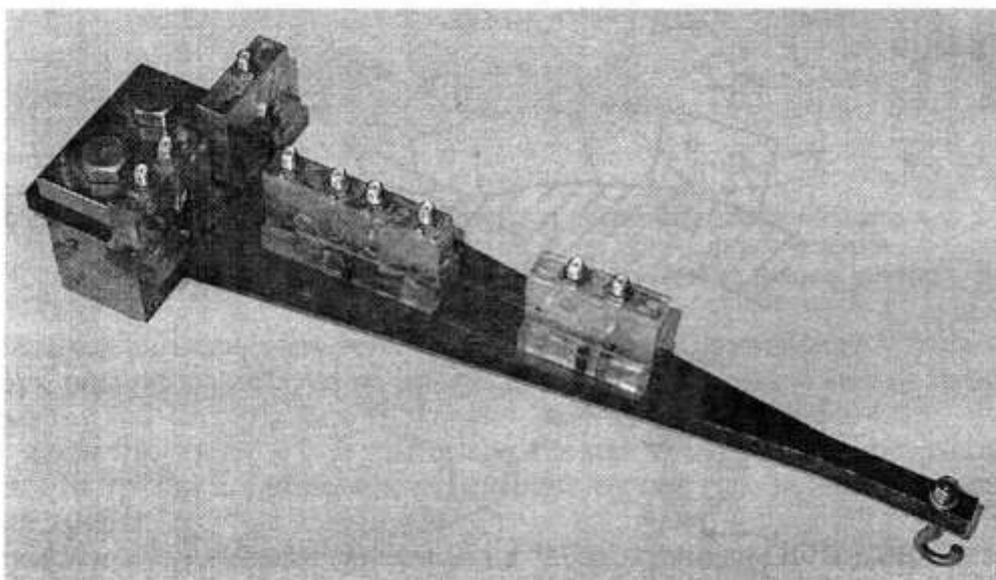


Рис. 8. Тандемы датчиков головных продольных и поверхностных волн на балке равного сопротивления.

Такая схема соединения датчиков в тандем позволяет измерять на плоской поверхности время распространения головных продольных волн или отношение скоростей этих волн и поверхностных волн (рис. 8).

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ НА СКОРОСТЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

Поскольку при ползучести происходит релаксация напряжений и их перераспределение, то после снятия нагрузки и остывания в деталях возникают значительные остаточные напряжения, обратные по знаку напряжениям, действовавшим при эксплуатации. Поэтому при разработке методики определения микропористости, возникающей при ползучести, по изменению скорости у. з. волн изучалось влияние упругих напряжений на скорость поверхностных волн.

Эксперименты проводились на разрывной машине и при нагружении консольной балки равного сопротивления постоянной толщины. Время распространения у. з. волн измерялось с помощью дефектоскопа УД2-12 с точностью $\pm 0,01$ мс.

Балка из стали 12Х1МФ, показанная на рис. 9, нагружалась до напряжений в поверхностном слое ± 30 кг/мм², то есть почти до предела упругости стали 12Х1МФ, и одновременно измерялось время распространения поверхностной волны с помощью тандемов, представленных на рис. 7а, б. Расчет напряжений проводился по формуле [12]:

$$\sigma = \frac{M(x)}{W(x)} = \frac{M_{\max}}{W_0} = 0,329P,$$

где $M(x)$ и $W(x)$ — изгибающий момент и момент сопротивления в сечении x ; W_0 — момент сопротивления балки в сечении с наибольшим изгибающим моментом M_{\max} ; P — изгибающая сила.

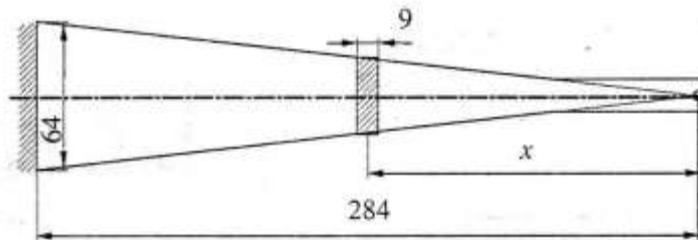


Рис. 9. Балка равного сопротивления равной толщины (вид сверху).

Измерения проводились вдоль и поперек оси балки со стороны растянутой и сжатой поверхности¹ на частотах 2,5 и 5 МГц. Расстояние между точками ввода волн датчиков было равно при измерениях вдоль балки 150 мм, а при измерениях поперек — 50 мм.

В этих экспериментах не обнаружено изменений, превышающих точность измерения $2 \cdot 10^{-4}$ (0,02 %) времени (скорости) распространения поверхностной волны от величины упругих напряжений в интервале от -30 до $+30$ кг/мм².

Распределение напряжений по толщине балки при ее изгибе неоднородно, а толщина балки, представленной на рис. 9, значительно меньше толщины большинства паропроводных труб (17, 24, 32, 36 мм и более), эксплуатирующихся в условиях ползучести, поэтому эксперименты были продолжены на 30-тонной разрывной машине.

Для проведения этих экспериментов дефектоскоп УД2-12 был доработан — введена дополнительная плата АРУ (автоматическая регулировка усиления) для поддержания на постоянном уровне амплитуды принимаемого сигнала независимо от качества контакта, что позволяет проводить измерения времени распространения у. з. волны в режиме сканирования.

Время распространения поверхностной волны измерялось при испытаниях плоских образцов сталей 20 и 12Х1МФ, длиной 250 мм и сечением 5×40 мм. Тандем (рис. 7а) из датчиков поверхностных волн с частотой 5 МГц и расстоянием между точками ввода волн 150 мм устанавливался вдоль образца.

На рис. 10 для примера представлены результаты измерений на четырех образцах из стали 20:

образец № 1 нагружался со скоростью приложения нагрузки $0,225$ кг/мм²·с;

¹ Чтобы избежать появления зазора между датчиком и поверхностью балки в точке ввода у.з. волн при измерениях на сжатой стороне балки, рабочие поверхности датчиков скруглялись.

образец № 2 — со скоростью 0,10 кг/мм²·с;

образец № 3 нагружался в пластической области ступенчато — после каждого приращения нагрузки делалась выдержка до завершения деформации, а затем измерялось время распространения поверхностной волны;

образец № 4 нагружался по следующей схеме: после приращения нагрузки в пластической области и выдержки для окончания деформации поверхность образца шлифовалась и полировалась, после этого прикладывался тандем и измерялось время распространения поверхностной волны; затем образец полностью разгружался и вновь нагружался до более высокого уровня напряжений, и далее — все операции повторялись.

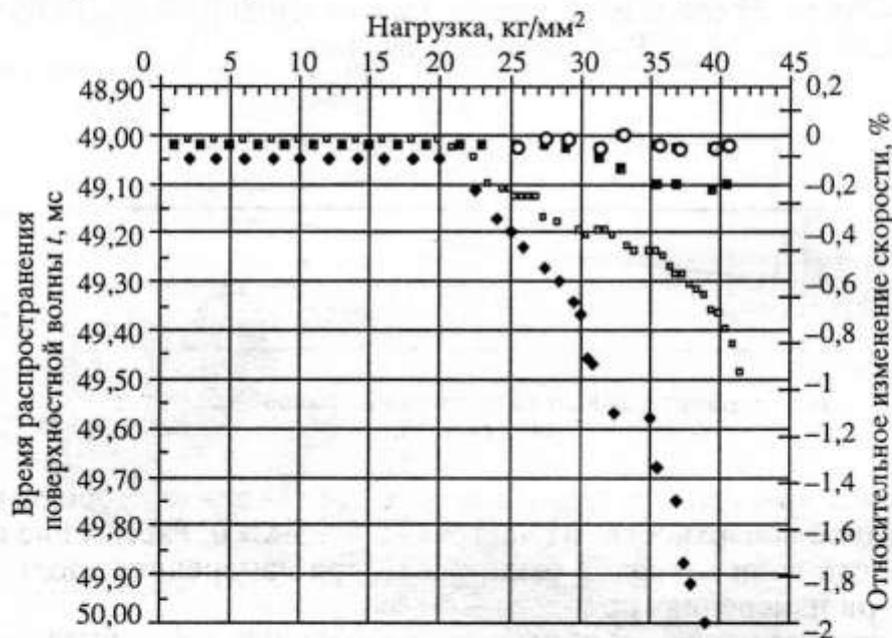


Рис. 10. Зависимость относительного изменения скорости поверхностных волн при испытаниях на растяжение образцов стали 20:

◆ — образец № 1 (скорость приложения нагрузки 0,225 кг/мм²·с); □ — № 2 (скорость приложения нагрузки 0,1 кг/мм²·с); ■ — № 3 (ступенчатое нагружение); ○ — № 4 (ступенчатое нагружение с полировкой поверхности).

Испытания образцов продолжались до начала образования шейки. На рис. 10 видно, что до предела текучести (для стали 20 $\sigma_{0,2} \approx 20$ кг/мм²) изменений скорости поверхностных волн, превышающих точность измерения (0,02 %), не наблюдалось. Изменение скорости (уменьшение) возникает при превышении предела текучести, причем величина изменения скорости волн возрастает с увеличением скорости приложения нагрузки.

Изменения времени распространения поверхностных волн на образцах, испытанных при ступенчатом нагружении, связаны с появлением неровностей (ступенек сдвига) на поверхности образца. После полировки поверхности эти изменения не наблюдаются. Вклад в изменение времени дает увеличение толщины слоя контактной смазки и уменьшение скорости волн, связанное со сдвигом фазы первичной волны в результате интерференции со вторичными волнами рассеяния на неровностях поверхности.

Если считать, что зависимость уменьшения скорости поверхностных волн в пластической области при постоянной скорости приложения нагрузки линейна, то можно вычислить тангенс угла наклона прямой K [%·мм² с/кг].

На рис. 11 представлена зависимость этой величины от скорости нагружения, полученная на серии плоских образцов из стали 12Х1МФ (частота ультразвука 5 МГц). Видно, что и эта зависимость в исследованной

области скоростей нагружения носит линейный характер. При построении графика, представленного на рис. 11, учтено влияние появляющихся неровностей на поверхности образцов во время пластической деформации.

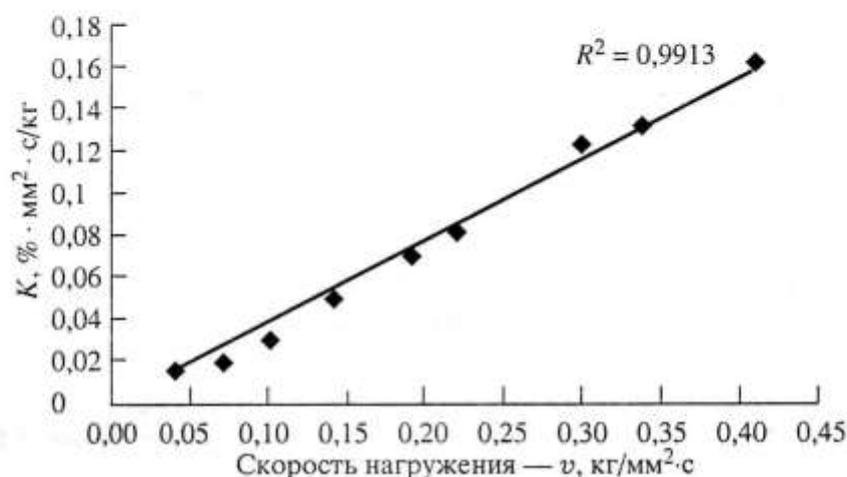


Рис. 11. Зависимость тангенса угла наклона прямой изменения скорости поверхностных волн от скорости приложения нагрузки (в пластической области нагружения).

Объяснить возрастающее уменьшение скорости поверхностных волн с увеличением скорости пластической деформации одним только увеличением количества дислокаций, принимающих участие в деформации, по всей видимости, невозможно. В данном случае, вклад в рассеяние дает и возбуждение собственных колебаний дислокаций: при возрастании скорости деформации уменьшается степень демпфирования дислокаций окружающей средой — возрастает доля энергии основной волны, расходуемая на возбуждение собственных колебаний дислокаций. Дислокации хоть и являются линейными дефектами, но длина отдельной дислокации не превышает размера зерна металла. Поэтому уменьшение скорости ультразвука может быть объяснено с помощью того же механизма рассеяния, что при и на микропорах, — релейского рассеяния.

Таким образом, подводя итоги данной работы, можно сделать следующие выводы.

В металле с микропорами ползучести существенных (более 0,5 %) изменений коэффициента Пуассона не наблюдается; не обнаружено и зависимости скорости (групповой) продольных волн от частоты в интервале частот 1—10 МГц; наблюдается различие скорости поперечных волн со взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации, и это различие достигает 1 %;

Влияние упругих напряжений в металле на скорость распространения у. з. поверхностных волн менее 0,02 % и может не учитываться при оценке степени пораженности структуры металла микропорами ползучести по изменению времени распространения поверхностных у. з. волн.

В пластической области нагружения наблюдается уменьшение скорости поверхностных волн, и величина уменьшения линейно возрастает с увеличением скорости приложения нагрузки.

Результаты экспериментов по оценке количества микропор ползучести с помощью поверхностных волн будут приведены в продолжении этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. ОСТ 34—70—690—96 Металл паросилового оборудования электростанций. Методы металлографического анализа в условиях эксплуатации.— М.: ВТИ, 1997.
2. Толксдорф Е., Хальд Дж. Экспериментальные методы определения характеристик ползучести и усталости элементов оборудования электростанций. В кн. Продление ресурса ТЭС.— М.: ВТИ, 1994.
3. Алешин Н.П., Белый В.Е. и др. Методы акустического контроля металлов.— М.: Машиностроение, 1989.
4. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник. Пер. с нем.— М.: Metallurgiya, 1991.
5. ГОСТ 17624—78. Бетон. Ультразвуковой метод определения прочности.
6. Поль Р.В. Оптика и атомная физика. Пер с нем.— М.: Наука, 1966.
7. Колесников А.Е. Акустические измерения.— Л.: Судостроение, 1983.
8. Физика. Большой энциклопедический словарь. Дисперсия звука.— М., Большая Российская энциклопедия, 1998.
9. Пермикин В.С. Микроскоп металлографический портативный упрощенный. Методы и технические средства оперативной оценки структурно-механического состояния металла элементов конструкций и машин. Всероссийская научно-технич. конф. Сб. докл.— М.: МЭИ(ТУ), 2002, с. 169—171.
10. Бархатов Б.В., Пермикин В.С., Перевалов С.П., Кирсанов Ю.Я. Акустический блок для ультразвукового контроля.— Патент РФ № 1810819 от 12.08.1993 (SU 1810819A1, G01 №29/24).
11. Бархатов Б.В., Пермикин В.С. Способ ультразвукового контроля состояния металла, работающего в условиях ползучести, прогнозирование его остаточного ресурса и акустический блок для его осуществления (варианты).— Патент РФ на изобретение № 2177612 от 01.09.1999 (RU 2177612, C2, G01 № 29/18).
12. Беляев Н.М. Сопротивление материалов.— М.: Гостехиздат, 1956.