



АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ ДЕФЕКТНОСТИ КОНТАКТОВ В ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ

Ю. Г. БЕЗЫМЯННЫЙ, О. В. ТАЛКО

На основании анализа физических моделей распространения упругой волны на различных стадиях производства порошковых материалов предложено использовать для оценки дефектности контактов в этих материалах методы измерений относительных изменений коэффициента затухания и скорости распространения упругих волн в зависимости от растяжения–сжатия материала. Экспериментально на примере полидисперсного порошкового железа и модельного эксперимента показана перспективность использования этих методов для решения задач контроля дефектности контактов между исходными частицами порошка при их спекании и спеченного материала.

Based on the analysis of the physical models of elastic wave propagation at different stages of producing powder materials, it has been suggested to apply the methods for measuring relative changes in an attenuation coefficient and elastic wave velocity depending on the tension–compression of a material in order to evaluate defects of contacts in the above materials. The outlook of applying these methods for solving problems on the control over quality of contacts between the initial particles in a powder in their sintering and sintered materials has been demonstrated experimentally by the examples of polydispersed powder iron and a model experiment.

Введение. Порошковая металлургия — одно из перспективных направлений создания современных материалов с наперед заданными свойствами. В связи со сложностью строения порошковых материалов для них характерны большие по сравнению с традиционными материалами разброс свойств и уровень дефектности [1], что предполагает необходимость сплошного контроля качества изделий из них. Формирование структуры и свойств порошковых материалов связано с процессами уплотнения и консолидации исходных компонентов [2], поэтому степень совершенства связей между этими элементами во многом определяет свойства материала. Одной из важных проблем порошковой металлургии, актуальной и сегодня, является разработка эффективных неразрушающих методов численной оценки качества контактов в порошковых материалах [3].

В настоящее время для численной оценки качества контактов в порошковых материалах используют методы, основанные на измерении электропроводимости порошкового тела [2] и скорости распространения упругой волны [3]. Все они связаны с одновременным использованием экспериментальных и рассчитанных в соответствие с той или иной моделью численных характеристик материала. Строгий учет параметров структуры при их модельном представлении возможен далеко не всегда [4], поэтому предложенные количественные оценки дают удовлетворительные результаты только в случаях сравнительно простой структуры и состава пористого тела. Известны [5, 6] чувствительность к процессам структурообразования в порошковых материалах коэффициента затухания и декремента колебаний [7], однако их использование находится на уровне качественного отражения процессов структурообразования. Поэтому

проблему использования акустических методов для выявления дефектности контактообразования порошковых материалов нельзя считать решенной.

Настоящая работа посвящена анализу возможностей использования акустических неразрушающих методов, основанных на прозвучивании материала бегущей упругой волной, для оценки дефектности контактообразования порошковых материалов.

Анализ будем проводить по разработанной нами методике [8], которая в данном случае включает исследование объекта контроля, моделирование задачи для выявления существенных факторов, определяющих ее возможные решения, экспериментальное подтверждение связи контактных явлений в материале с параметрами акустического поля, формулировку основных принципов предлагаемых методов контроля и рекомендации для развития работ в рассматриваемом направлении.

Анализ объекта контроля. Структурные модели. Рассмотрим особенности консолидации порошковых материалов, связанные с контактообразованием и построим структурные модели различных стадий технологического процесса, которые позволяют отобразить основные закономерности формирования акустических полей в таких материалах. Особое внимание будем уделять дефектности контактов. Поскольку свойства порошкового тела формируются преимущественно структурой мезоуровня, то структурные модели материала целесообразно синтезировать именно на этом уровне. Для понимания основных закономерностей формирования акустического поля модели будем строить в предельно упрощенном виде, абстрагируясь от не существенных в каждом случае деталей, но с учетом всех элементов, формирующих свойства материала. Для этого, учитывая, что уп-



ругая волна интегрально отражает свойства материала, по возможности будем отображать его элементы структуры эквивалентными однородными средами, которые имеют те же эффективные свойства, что и репрезентативный объем этих элементов структуры.

Контакты между элементами порошкового материала формируются постепенно в течение технологического процесса его создания [1]. Так, на стадии свободно насыпанного порошка [2] еще не существует консолидированного твердого тела. Каждая частица представляет собой отдельное упругое твердое тело, которое соприкасается с определенным количеством соседних частиц. Количество контактов (координационное число), т. е. количество соприкосновений частицы с соседними, определяется плотностью упаковки. Установившиеся контакты в такой среде отсутствуют, и, следовательно, отсутствуют дефекты в контактах. Поэтому такую среду с точки зрения дефектности контактообразования мы рассматривать не будем.

На стадии прессования [1] между элементами формируются механические связи — несовершенные в смысле упругости контакты. Эта система остается неравновесной. Появление и развитие механической связи приводит к постепенному уменьшению вязкости системы и появлению слабо выраженной упругости формы. Пористость материала остается на сравнительно высоком уровне и влияет на свойства всей системы. Упрощенную структурную модель материала на этой стадии удобно описать как трехфазную систему (рис. 1, а). Первая фаза представляет собой вязкую однородную матрицу, внутри которой равномерно расположены упругие сферические частицы исходного порошка одинаковых размеров и сферические поры тоже одинаковых размеров. Дефектность контактов в такой модели будет отражаться вязкой фазой. В предельном идеализированном случае при полном отсутствии контактного взаимодействия между частицами вязкая фаза вырождается в воздушную среду, т. е. сливается с порами.

В процессе спекания механические (несовершенные) связи между частицами постепенно переходят в химические (совершенные) и система становится равновесной [3]. Качество консолидации спеченных порошковых материалов на этой стадии определяется относительными размерами химических и механических контактов и наличием свободных поверхностей частиц. Такая переходная структура наиболее сложная при моделировании. Упрощенная структурная модель такой системы представляет собой смешанную матричнокаркасную конструкцию (рис. 1, б) и отличается от

предыдущей наличием упругих связей между частицами. Эти связи на ранних стадиях спекания можно представить тонкими стержнями, а на поздних — перешейками, соизмеримыми по толщине с размерами частиц. Дефектность контактов в такой модели будет определяться вязкой фазой и относительными размерами упругих переемычек.

Структуру спеченного порошкового материала на мезоуровне можно представить [3] как некий объем, заполненный частицами исходного порошка, соединенными между собой надежными химическими связями и порами. Все контакты характеризуются как геометрически несовершенные, так как охватывают не всю поверхность соприкасающихся частиц, что приводит к сильному искажению физических полей в зоне контактов и, следовательно, нелинейным эффектам. Возможно существование дефектных контактов, в которых механическая связь не трансформировалась в химическую. Пory можно разбить на две группы: изомерные, определяющие физико-механические свойства материала, и двумерные (линзообразные), снижающие эти свойства. В этом смысле двумерные поры можно рассматривать как дефекты структуры. Эти дефекты есть и на стадии спекания, однако, там их роль в дефектности материала существенно меньше. Качество консолидации спеченных порошковых материалов, в которых установились химические связи между частицами, определяется относительными размерами химических контактов по сравнению со свободными поверхностями частиц (геометрическим совершенством) и наличием дефектных контактов.

Упрощенную структурную модель такого материала (рис. 1, в) можно представить как матричную основу, внутри которой равномерно распределены поры и дефекты различного характера. Матрица представляет собой квазиоднородную твердую среду из спеченных между собой частиц исходного порошка, в каждом элементарном объеме которого свойства материала статистически одинаковы и соответствуют свойствам исходных частиц. Объемные поры представлены идеализированными сферическими частицами, а плоские поры — дисками, имеющими произвольную ориентацию (в модели произвольность ориентации отражена тремя характерными направлениями дисков). Объемные поры определяют плотность материала, а плоские — его дефектность. В общем случае спеченный материал обладает анизотропией свойств за счет преимущественной ориентации плоских дефектов [1]. В предельном случае при максимальной анизотропии материала для модели (рис. 1, в) можно считать, что все плоские дефекты ориентированы перпендикулярно направлению прессования.

Акустическая модель. Рассмотрим тенденции формирования монохроматического поля плоской бегущей упругой волны в предложенных структурных моделях. Для этого примем следующие общие допущения. *Во-первых*, чтобы абстрагироваться от граничных условий изделия, среду рассматриваем как безграничную. *Во-вторых*, считаем справедливым предположение для пористой

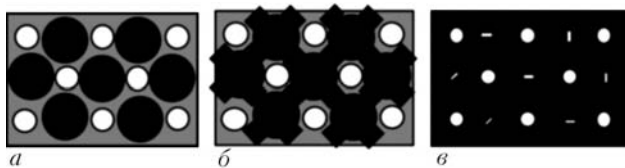


Рис. 1. Структурные модели прессовки (а), материала в процессе спекания (б), спеченного порошкового материала с дефектными контактами (в)



среды, что волновое сопротивление газообразной фазы намного меньше, чем твердой. В этом случае коэффициент прозрачности границы раздела этих фаз равен нулю и упругая волна не проникает из твердой фазы в жидкую. Однако, при существенно малой волновой толщине газообразного слоя коэффициент прохождения через него отличен от нуля и может быть определен известными методами [9]. В-третьих, предположим, что в материале исходных частиц коэффициент затухания упругой волны α незначительно изменяется по ее длине λ : $\lambda\alpha \ll 1$. Это позволяет рассматривать фазу, сформированную частицами исходного порошка, как квазилинейную относительно потерь для бесконечно малых амплитуд упругой волны. В-четвертых, будем считать, что наличие неоднородностей в материале не изменяет направление переноса основной части энергии упругой волны. Это позволяет рассматривать задачу как пространственно одномерную. И, в-пятых, рассмотрим случай малых волновых размеров элементов структуры материала, т. е. будем считать, что для длины упругой волны и наибольших размеров элементов структуры A справедливо соотношение $\lambda \gg A$. Тогда материал, с одной стороны, можно считать статистически однородным и распространение упругой волны в материале можно описывать с позиции механики сплошных сред, а скорость распространения и коэффициент затухания упругой волны, являясь интегральной характеристикой материала по своей сути, будут отражать его эффективные свойства. С другой стороны, параметры упругой волны в этом диапазоне длин волн обладают чувствительностью к эквивалентным параметрам структуры пористого материала [10].

Акустическое поле в рассматриваемых моделях сред будет формироваться параметрами зондирующего сигнала и свойствами элементов прозвучиваемой среды. Параметрами зондирующего сигнала мы можем управлять таким образом, чтобы удовлетворить принятым допущениям. Поскольку структура порошкового материала и свойства его элементов на каждой стадии технологического процесса существенно отличаются, то будут отличаться и закономерности формирования акустического поля. Рассмотрим эти закономерности для каждого случая в связи с возможностью контроля качества контактообразования.

В прессовках (рис. 1, а) наличие трех фаз, существенно отличающихся по своим акустическим свойствам, приводит к значительному искажению распределения смещений на длине упругой волны. Поэтому в акустическом поле будут возникать нелинейные эффекты тем более существенные, чем больше длина волны будет соответствовать размерам структурных элементов. Акустические характеристики такой системы будут определяться вязкой малоупругой фазой, характеризующей качество механических контактов и пористостью. Поэтому в прессовках коэффициент затухания и скорость распространения упругой волны можно использовать для контроля качества механических

контактов и пористости. Причем, акустические характеристики материала будут одновременно реагировать и на изменение пористости и качества контактов.

Процесс уплотнения порошков при прессовании имеет достаточно сложный характер [2]. Он состоит не только в компактировании материала, но и сопровождается консолидацией материала. Известно [1], что пористость служит мерой компактности материала. Мерой консолидации служит качество контактов. Выделить влияние на измеренные параметры каждого из механизмов представляется достаточно сложной задачей. Анализ модели (рис. 1, а) позволяет считать, что качество контактов при прессовании играет, по крайней мере, не меньшую роль в этом процессе. Очевидно, что соотношение между вкладом этих механизмов может существенно меняться в зависимости от свойств порошка, усилия и условий прессования. Поэтому, не выделяя каждый из механизмов, проанализируем общие закономерности изменения рассматриваемых параметров.

Появление и развитие упругой связи между частицами в процессе спекания материала (рис. 1, б) существенно меняет картину формирования акустического поля. В этой системе неоднородность, а следовательно, и отклонение от упругости материала исходных частиц, и нелинейность акустического поля будут определяться размерами перемычек, т. е. относительными размерами совершенных контактов и пористостью. Третья фаза здесь играет несущественную роль. Поэтому коэффициент затухания и скорость распространения упругой волны можно использовать для контроля относительных размеров совершенных контактов и пористости. В такой системе приближение длины волны к размерам структурных элементов может привести к резонансным явлениям в каркасе материала. Как и в предыдущей модели, акустические характеристики материала будут одновременно реагировать и на изменение пористости и качества контактов.

Самым ответственным этапом, с точки зрения контроля дефектности, является последняя стадия спеченного материала (рис. 1, в). На этой стадии эффективные скорость распространения и коэффициент затухания упругой волны будут зависеть от свойств матрицы, порового пространства и качества контактов [9]. При этом эффективное значение скорости распространения для любой упругой волны (V_e) как функцию свойств материала и его компонентов удобно искать в мультипликативной, а коэффициента затухания (α_s) — аддитивной форме. Для рассматриваемой модели можем записать

$$V_e = V_0 K_{п} K_{д}, \quad (1)$$

где V_0 — скорость распространения упругой волны в материале матрицы (беспористом); $K_{п}$, $K_{д}$ — коэффициенты, учитывающие пористость и качество контактов между отдельными элементами мезоструктуры.



Формула (1) хорошо согласуется с известной [1] формулой для оценки качества контактов спеченного пористого материала:

$$V_e = V_o(1 - \theta)^m(1 - \theta_d)^k, \quad (2)$$

где θ — изомерная пористость материала; m, k — эмпирические коэффициенты, зависящие от особенностей материала; θ_d — кажущееся увеличение пористости из-за дефектности межчастичных контактов.

Автор [11] критически относится к формуле (2). Следует с ним согласиться по следующим причинам. Эта формула получена по аналогии с методом проводимости. В соответствии с классификацией физических свойств материалов, его электрические свойства описываются тензором второго порядка, тогда как скорость распространения упругих волн определяется характеристиками упругости, которые описываются тензорами четвертого порядка, и скалярным полем массовой плотности. Как известно [4], при определении эффективных свойств композита по свойствам его компонентов не скалярные свойства не подчиняются аддитивному закону. Очевидно, следует пойти дальше и предположить, что свойства, описываемые тензорами более высокого ранга, в том числе и скорость распространения упругой волны, будет иметь более сложную функциональную зависимость от рассматриваемых свойств материала, чем свойство, описываемое тензором второго ранга, в частности, проводимостью. Поэтому использование этой формулы в широком диапазоне пористостей вряд ли имеет смысл. Однако, оценка относительного изменения величины θ_p в процессе роста площадок металлической связи в межчастичных контактах при постоянной $\theta \approx 26\%$ вполне оправдана.

В случае коэффициента затухания упругой волны каждый из рассматриваемых механизмов вносит дополнительное рассеивание энергии упругой волны, традиционно описываемое аддитивно:

$$\alpha_3 = \alpha_o + \alpha_p + \alpha_k, \quad (3)$$

где $\alpha_o, \alpha_p, \alpha_k$ — коэффициенты затухания упругой волны, обусловленные поглощением в матрице, рассеиванием на порах качеством контактов между частицами соответственно.

В формулах (1)–(3) V_o и α_o определяются свойствами исходного порошка. Численные значения величин K_p и α_p были оценены нами в работе [7]. Следует отметить, что увеличение волнового размера элементов структуры до значений $\lambda \approx 10A$ (в некоторых материалах и более), т.е. переход из области релеевского в область стохастического рассеивания приводит к увеличению чувствительности акустического поля к неоднородностям материала [10], сохраняя при этом статистическую однородность самого поля. Необходимый волновой размер можно задать выбором соответствующей частоты зондирующего сигнала.

Оценим величины K_d и α_k . Отметим, что формулы (1) и (3) остаются справедливыми и в случае неспеченного материала (прессовок). На этой

стадии технологического процесса свойства материала, в том числе и акустические, существенно зависят от качества контакта [1]. Экспериментальные данные [1, 3–7, 11] показывают, что у неспеченного или недостаточно спеченного материала величины K_d и α_k могут быть определяющими при формировании V_3 и α_3 . Однако, для спеченного материала на основании данных работы [1] можно сказать, что при сформировавшихся химических контактах между исходными частицами материала влияние величины K_d на V_3 , на порядок меньше, чем K_p . Поскольку дефектность материала рассчитывается с учетом его пористости, то даже небольшая ошибка в оценке влияния последней на эффективное значение скорости распространения упругих волн приведет к существенной погрешности оценки дефектности материала. К аналогичному выводу приводит анализ в соответствии с предложенной нами [7] зависимостью скорости от пористости, в которой малым изменениям пористости соответствуют малые изменения скорости, а большим — большие. В виду малости θ_d по сравнению с θ и величина K_d будет существенно меньше отличаться от единицы, чем K_p .

Для предложенной структурной модели особенности формирования акустического поля при наличии дискообразных дефектов связаны с двумя механизмами: отражением от дефекта и прохождении части энергии упругой волны через воздушный слой. Учитывая независимость (по постановке задачи) вклада каждого дефекта в формирование акустического поля, будем рассматривать каждый дискообразный дефект как отдельный источник неоднородности. Тогда суммарный вклад всех дискообразных дефектов будет определяться их объемным содержанием θ_d . Экспериментальные и теоретические исследования последних лет [12] показали, что амплитуда отраженной полым диском волны при малых волновых размерах диска, как и для сферической поры прямо пропорциональна кубу волнового размера. Поэтому и в случае коэффициента затухания оценку величины α_k можно проводить аналогично α_p .

Учитывая, что размеры дискообразных пор не превосходят размеры сферических, их объемная концентрация существенно меньше, можно и для коэффициента затухания упругой волны сделать вывод аналогичный скорости распространения: вклад α_k в эффективный коэффициент затухания существенно меньше, чем α_p . Если волновая высота диска мала ($< 0,002$ [12]), то через него может проходить часть энергии упругой волны — тогда величина α_k становится еще меньше. Такая ситуация может возникнуть, если механический контакт при спекании не превратился в химический, или при релаксации напряжений в результате упругого последствия возник разрыв химической связи между частицами материала.

Таким образом, в спеченном материале количественная оценка макродефектности материала по скорости распространения и коэффициенту затухания упругой волны существенно осложнена вви-



ду сравнительной слабости эффектов, вызываемых ими при распространении упругой волны.

Для всех трех моделей вопрос численной оценки дефектности контактов с помощью акустических методов сводится к разделению влияния на акустические характеристики материала пористости и дефектности. В известных методах применения скорости распространения упругих волн для контроля одного из этих свойств материала необходимо знать или оценить влияние на скорость другого. Разделение этих двух задач, как уже говорилось выше, далеко не всегда возможно. Полученный результат анализа предполагает использование других по сравнению с существующими методиками подходов при решении поставленной задачи.

Принципиально другой подход состоит в использовании методов контроля, более чувствительных к контактообразованию, чем к пористости. Одно из таких возможных направлений связано с реализацией для порошковых материалов известного [13] способа контроля дефектности материала. В способе используется измерение коэффициента затухания и скорости распространения упругих волн при статическом нагружении материала при разных усилиях в пределах упругости. Использование статического нагружения с небольшими усилиями позволяет, не изменяя общей пористости материала повысить чувствительность акустических параметров к несовершенным контактам за счет усиления проявления нелинейных эффектов, связанных с величиной раскрытия плоского дефекта (особенно с малым раскрытием без нагрузки) и заменой абсолютных измерений относительными.

Следует отметить, что, поскольку исследуемые явления имеют сложный характер, то возможность использования предложенных методов решения требует экспериментального подтверждения.

Экспериментальные исследования. Проверку возможностей акустических методов проводили на полидисперсном порошковом железе и с помощью модельного эксперимента на беспористом образце, позволяющем выделить влияние самого дефекта на акустические свойства материала.

Для исследований контактных явлений в полидисперсном порошковом железе были изготовлены при разных усилиях прессования образцы цилиндрической формы. Экспериментальные измерения скорости распространения продольной упругой волны проводили методом радиоимпульса с дискретной задержкой, а коэффициента затухания — методом импульса сравнения [3] на частоте 0,6 МГц со сквозным прозвучиванием исследуемых образцов материалов по высоте. Методики измерений перечисленных параметров и использованная аппаратура описаны в работе [5].

При измерениях в прессовках порошковых материалов было дополнительно учтено, что они имеют различную жесткость образцов, зависящую от пористости. Поэтому для обеспечения постоянного усилия прижатия преобразователя к поверхности, обеспечения контроля за расстоянием между преобразователями и параллельности их рабочих по-

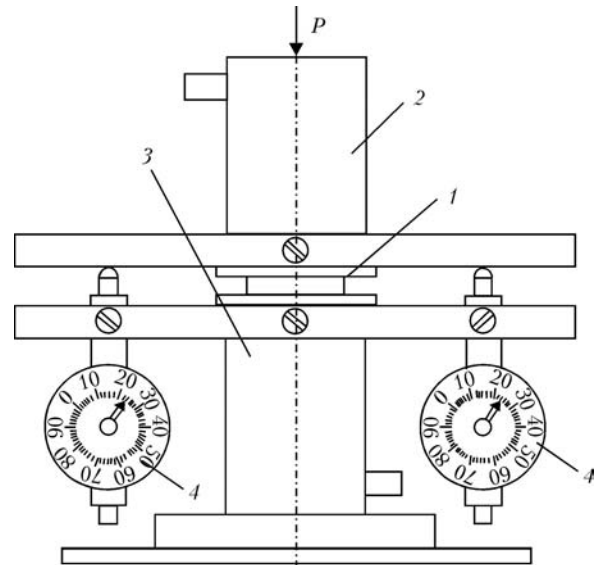


Рис. 2. Акустическая измерительная камера для контроля прессовок с регулировкой статической нагрузки на образец

верхностей разработана оригинальная конструкция акустической измерительной камеры (рис. 2). В этой камере исследуемый образец 1 зажимают между излучающим 2 и приемным 3 электроакустическими преобразователями. Усилие прижима регулировали с помощью груза в пределах 10...50 Н (на рисунке не показан). Толщина образца и параллельность рабочих поверхностей преобразователей контролируется с помощью индикаторов 4 часового типа. На обе плоскости образца наклеена пленка типа «Скотч» толщиной 0,02 мм. Она улучшает акустический контакт образца с преобразователями: липкий слой пленки увеличивает суммарную площадь контакта на границе пленка-образец и позволяет использовать контактную жидкость (воду) на границе преобразователь-пленка, предохраняя пористый материал образца от проникновения в него жидкости.

Результаты измерений скорости распространения и коэффициента затухания упругих волн как функции статической нагрузки в порошковом железе представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что процесс компактирования полидисперсного материала проходит немонотонно. Такая немонотонность характерна для многих физико-механических характеристик порошковых

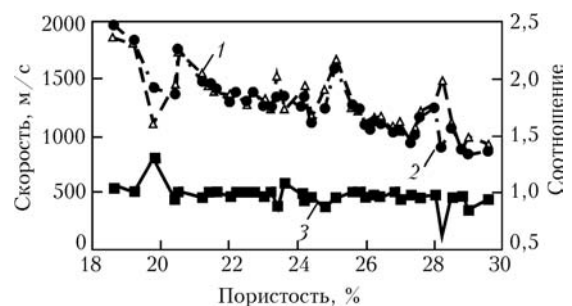


Рис. 3. Экспериментальные зависимости скоростей распространения продольной упругой волны при наибольшей и наименьшей статической нагрузке на образцы прессовок из полидисперсного порошкового железа и отношения этих скоростей от пористости материала: 1 — v_{max} ; 2 — v_{min} ; 3 — v_{min}/v_{max}

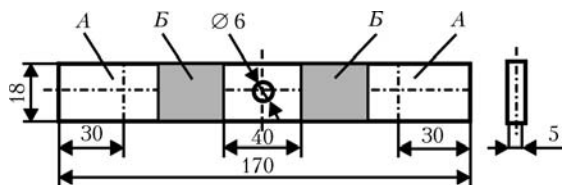


Рис. 4. Образец для измерений скорости распространения и коэффициента затухания упругой волны при статическом и циклическом нагружении

материалов [14–16]. В результате металлографических исследований структуры прессовок полидисперсного порошкового железа этого же состава [17] установлено, что при уплотнении исходного порошка при разных уровнях давлений наблюдаются за счет особенностей контактообразования периодические с шагом пористости порядка 2 % изменения в структуре спрессованного материала. Именно такие периодические возмущения с точностью до указанных значений пористостей наблюдаются и на зависимостях скоростей распространения упругих волн и их соотношений. Причем, для абсолютных значений скоростей распространения упругих волн наблюдается общая тенденция к уменьшению с увеличением пористости, а аномалии скорости, обусловленные контактообразованием, проявляются на фоне этой тенденции. Как и предполагалось при анализе моделей, отношение скоростей не зависит от пористости, но остаются аномалии, обусловленные, надо полагать, контактообразованием. Из этого следует, что предложенный подход позволил разделить механизмы, влияющие на изменение скорости распространения упругих волн, обусловленные уплотнением и контактообразованием.

Дополнительно был проведен модельный эксперимент по выявлению зависимости коэффициента затухания и скорости распространения упругой волны от статической нагрузки при разных степенях дефектности образца. Измерения проводили на образце из алюминиевого сплава Д16чАТ (рис. 4). Литой материал можно рассматривать как идеально спеченный порошковый материал, т. е. беспористый с идеальными контактами. Дефектные контакты в материале моделировалась усталостными трещинами разного раскрытия, развивающимися в результате циклического деформирования образца. Для формирования усталостной трещины в требуемом месте в образец был введен концентратор напряжений в виде сквозного отверстия. Для проведения циклического и статического нагружения образец зажимался на установке Amsler по площадкам А. На площадках Б к образцу были приклеены по методике [18], обеспечивающей стабильность акустического контакта в процессе испытаний, стандартные наклонные электроакустические преобразователи на 5 МГц, позволяющие возбуждать в материале упругую волну Лемба симметричного типа. Объем озвучиваемой области составлял примерно 3600 мм³. Образец подвергали циклическому симметричному растяжению – сжатию по методике [19]. Под действием циклической нагрузки в образце от концентратора напряжения в обе стороны развивались

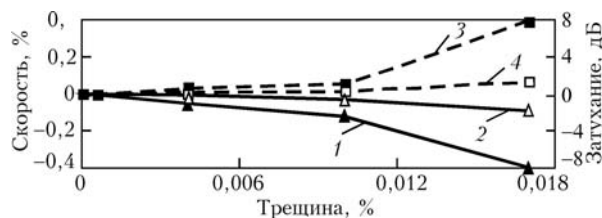


Рис. 5. Зависимости изменения затухания и скорости распространения упругих волн от относительного объема усталостной трещины в образцах из сплава Д16чАТ при статическом растяжении 10 и 40 МПа: 1, 2 – скорость 40 и 10 соответственно; 3, 4 – затухание 40 и 10 соответственно

усталостные трещины, площадью раскрыва ориентированные перпендикулярно приложению нагрузки. Размеры трещины контролировали с поверхностей образца с помощью микроскопа МБС-9. До нагружения в образце были проведены измерения зависимостей скорости распространения и коэффициента затухания упругой волны от статической нагрузки, не превышающей предела упругости материала. Волновые размеры концентратора велики, поэтому он воспринимался акустической волной как макроэлемент и не влиял на измерения относительных значений акустических характеристик материала. Погрешность относительных измерений в данном эксперименте составляла для скорости распространения упругой волны – не более 0,01 %, а для затухания – 0,1 дБ. При различных размерах трещины нагружение образца приостанавливали и проводили повторные измерения скорости распространения и коэффициента затухания упругой волны. Результаты относительных изменений скорости распространения и коэффициента затухания упругой волны от относительного (по сравнению с озвучиваемым объемом материала) размера трещины для двух уровней статического растяжения представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что изменения скорости распространения и коэффициента затухания имеют взаимно обратную зависимость и от статического нагружения материала и от размера дефекта. При этом, если скорость на рассмотренных интервалах величин нагрузки и дефекта изменяется несущественно, то коэффициент затухания – более, чем в два раза. Как видно, и в этом случае коэффициент затухания обладает существенно большей чувствительностью, однако, скорость можно измерять с существенно большей точностью.

Проведенные измерения подтвердили чувствительность указанных характеристик к наличию плоских дефектов в материале. Следует отметить, что в реальных порошковых материалах концентрация плоских дефектов на несколько порядков превышает исследованную в эксперименте. Из рис. 5 видно, что изменение обеих акустических характеристик материала резко возрастает при увеличении объемной доли дефекта или уровня нагружения. Поэтому следует предположить, что в реальных порошковых материалах чувствительность их к дефектности материала существенно возрастет. Поскольку всегда можно выбрать такой уровень статического нагружения, чтобы поры не



вливали на изменения акустических характеристик, то, очевидно, и в случае спеченного материала, их относительные изменения позволят отделить задачу контроля контактов от контроля изомерной пористости.

Последний эксперимент носил достаточно условный характер, но принципиально отразил возможность решения задачи и наглядно показал наличие численной связи изменений акустических характеристик с дефектностью спеченного материала при приложении к нему статической нагрузки.

Выводы

В результате анализа физических моделей порошковых материалов на различных стадиях их изготовления выявлены основные закономерности формирования акустических полей в соответствующих случаях. Отмечено, что основной проблемой при контроле дефектности контактообразования с помощью акустических методов является необходимость разделения влияния на акустические характеристики материала процессов компактирования и контактообразования. Предложены оригинальные акустические методы контроля качества контактообразования, основанные на относительных измерениях скорости распространения и коэффициента затухания упругой волны при статическом нагружении материала.

В результате экспериментальной проверки предложенных методов на прессовках из полидисперсного порошкового железа и модельном эксперименте подтверждена возможность использования относительных изменений коэффициента затухания и скорости распространения упругих волн для контроля дефектности контактов на стадии прессования, при спекании материала и в спеченном материале.

Для решения рассматриваемой задачи дальнейшие работы целесообразно вести в направлении получения статистических данных для разработки численных методов оценки качества контактообразования по результатам измерения акустических характеристик материала.

1. Скорород В. В., Солонин С. М. Физико-механические основы спекания порошков. — М.: Металлургия, 1984. — 159 с.

2. Косторнов А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. В 2 т. — Т.1. — Киев: Наук. думка, 2002. — 572 с.
3. Роман О. В., Скорород В. В., Фридман Г. Р. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. — Минск: Вышэйш. шк., 1989. — 182 с.
4. Скорород В. В. Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах // Порошк. металлургия. — 1995. — № 1. — С. 53–71.
5. Безьямный Ю. Г., Вдовиченко А. В., Кузьменко В. А. Некоторые результаты акустических исследований материалов, изготавливаемых методами порошковой металлургии / Препринт. — Киев: НАН Украины, ИПМ, 1994. — 63 с.
6. Исследование межчастичных контактов в пористых волоконных материалах из меди на ранних этапах спекания / А. Г. Косторнов, В. Н. Клименко, Ю. Г. Безьямный, А. Г. Боровик // Порошк. металлургия. — 1999. — № 9–10. — С. 13–17.
7. Безьямный Ю. Г. Использование акустических характеристик для контроля структуры пористых материалов // Электронная микроскопия и прочность материалов / Сб. науч. трудов, Киев, 1999. — С. 93–105.
8. Безьямный Ю. Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошк. металлургия. — 2001. — № 5–6. — С. 23–33.
9. Неразрушающий контроль и диагностика: Справ. / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2003. — 656 с.
10. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. — М: Мир, 1972. — 238 с.
11. Косторнов А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. — В 2 т. — Т.2. — Киев: Наук. думка, 2003. — 552 с.
12. Ермолов И. Н. Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии, задачи и перспективы // Дефектоскопия. — 2004. — № 10. — С. 13–48.
13. А. с. СССР № 1397823. Способ контроля дефектности изделия / Безьямный Ю. Г. — Б. И. № 19, 1988.
14. Особенности уплотнения металлических порошков при прессовании / И. М. Федорченко, А. Е. Кушевский, Т. Ф. Мозоль, В. Ф. Чудовский // Порошк. металлургия. — 1987. — № 3. — С. 13–17.
15. Дискретная зависимость свойств порошковых сталей от пористости / В. Н. Анциферов, С. Н. Боброва, С. А. Оглезнева, Ю. И. Рогозин // Перспективные материалы. — 1999. — № 4. — С. 51–57.
16. Особенности деформации высокопористых металлических материалов / В. В. Скорород, А. Н. Леонов, С. М. Солонин и др. // Порошк. металлургия. — 2002. — № 5/6. — С. 32–40.
17. Исследование структуры порошкового железа с различной пористостью методом растровой электронной микроскопии / А. Е. Кушевский, В. Т. Бондарь, Н. А. Крылова и др. // Там же. — 1990. — № 9. — С. 91–95.
18. А. с. СССР № 1335866. Способ контроля качества акустического контакта / Безьямный Ю. Г. — Б. И. № 33, 1987.
19. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / Под ред. В. А. Кузьменко. — Киев: Наук. думка, 1979. — 336 с.