

УДК 621.791.01

Жидков А. Б., Сысоев В. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ВИБРООБРАБОТКЕ НА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ

Сварка является распространенным технологическим процессом, который используется в различных отраслях промышленности и строительства. Однако, в большинстве случаев, сварка приводит к изменению свойств металла в зоне термического влияния (ЗТВ) и снижению эксплуатационных характеристик конструкции в целом. На эксплуатационные свойства сварных конструкций существенно влияют остаточные напряжения первого, второго и третьего рода, абсолютные значения и градиенты которых достигают величин, сопоставимых с пределами текучести основного металла. Кроме того, термомеханический цикл сварки приводит к неравномерному распределению плотности дислокаций, неоднородности механических свойств, структурных составляющих и т. д. Приложение внешних эксплуатационных нагрузжений в сочетании с вышеупомянутыми неоднородностями сопровождается высокой концентрацией напряжений и неравномерным протеканием пластической деформации. А высокая степень и скорость деформации являются причиной возникновения повреждений, вследствие исчерпания пластичности. Поэтому изготовление сварных конструкций с минимальными напряжениями и неоднородностями является актуальной задачей.

Вибрационная обработка длительное время используется для улучшения эксплуатационных характеристик не только сварных, а литых, кованных, лито-сварных и других конструкций. Результаты исследований не позволяют однозначно определить характер процессов, происходящих в сварном соединении при наложении вибрационных напряжений. Исследователи отмечают снижение напряжений 1 рода [1], 2 рода [2], повышение таких характеристик, как трещиностойкость и размерная стабильность при неизменном уровне остаточных напряжений [3]. Эти результаты свидетельствуют об отсутствии единого теоретического представления о процессах, происходящих в сварном соединении при виброобработке. Изучение процессов, происходящих в сварных соединениях под действием вибрации, осложняется отсутствием явных внешних проявлений, происходящих изменений. Большинство исследователей вынуждены сравнивать свойства участков сварного соединения до, и после обработки, без отслеживания динамики изменений или использовать математические модели, адекватность которых сложно оценить. Особенный интерес представляет исследование дислокационных структур ЗТВ, изменение которых в динамике зафиксировать невозможно.

Целью данной работы является обоснование использования имитационных физических моделей для исследования процессов, происходящих в сварных соединениях при виброобработке.

Известно, что процесс пластической деформации может осуществляться с помощью различных механизмов, основным из которых для низких температур является дислокационное скольжение. Плотность дислокаций в разных участках сварного соединения различна, однако обычно высока и достигает значений порядка $10^{12} \div 10^{15}$ шт/мм². Кроме того, дислокационная структура имеет ярко выраженную неравномерность, т. к. большинство дислокаций образуют клубки или лес дислокаций вдоль границ зерен и фаз. Инициация скольжения дислокаций в этих условиях затруднена их взаимным влиянием. Очевидно, что «длина пробега» дислокации в таких условиях является малой. Следовательно, для получения необходимой степени пластической деформации количество скользящих дислокаций должно быть

велико, чтобы при малой «длине пробега» суммарная деформация была значительной. При этом необходимо учитывать тот факт, что дислокация является ловушкой для разнообразных примесей, которые образуют вокруг нее «шубу» и являются стопорами. Также необходимо принимать во внимание, что дислокация с большим вектором Бюргера энергетически менее подвижна, следовательно – менее способна к скольжению при некотором фиксированном уровне напряжений, чем мелкая дислокация.

Таким образом, для эффективной виброобработки необходимо обеспечить массовый срыв дислокаций с примесных стопоров, скольжение их вдоль плоскостей скольжения, а при необходимости и смену направления скольжения, прохождение стопоров в виде дислокационных клубков и леса, и дробление больших дислокаций на мелкие, обладающие большей подвижностью. Во всех случаях эти процессы сводятся к сдвигу атомов основного металла или примесей на межатомное расстояние. Определение условий, при которых возможен такой сдвиг, является основной задачей моделирования.

В качестве модели кристалла используется объем сыпучей среды (СС) с неоднородностями в ней. Т. к. дислокация является неоднородностью, то ее можно рассматривать, как элемент СС с ярко выраженными отличиями свойств. Такими свойствами могут быть плотность, шероховатость поверхности, размеры и пр. Применение подобной модели дает определенные преимущества, поскольку существует множество математических моделей, описывающих поведение СС при вибрации. Кроме того, имеется определенное сходство в поведении СС и атомов кристаллической решетки.

Обозначим основные особенности поведения СС при вибрационном воздействии. СС под вибрационным воздействием по совокупности физико-механических свойств занимает промежуточное положение между твердыми телами и вязкими жидкостями [4]. Каждая частица сыпучей среды, взятая сама по себе, обладает всеми свойствами твердого тела, но совокупность множества частиц – гранул, особенно под воздействием вибрационного поля, проявляет способность к течению, подобно жидкостям, но с ограниченной подвижностью, обусловленной значительной вязкостью, величина которой существенно зависит от параметров вибрационного поля [4]. Аналогичные свойства наблюдаются у металла под действием напряжений.

С твердым телом СС связывает еще одно важное свойство – под нагрузкой в ней возникают напряжения [5]. Это свойство сохраняется и в вибрационном поле. СС не обладает идеальной упругостью и, следовательно, при ее описании должны учитываться ее упруговосстанавливающие свойства. Несмотря на наличие разделяющих промежутков во множественной СС совокупность перечисленных признаков позволяет считать модели сыпучих сред сплошными. Это дает возможность использовать понятия о напряженном состоянии как о способе оценки величины внутренних сил, а, следовательно, воспользоваться математическим аппаратом теории упругости и пластичности, как и при описании кристаллических твердых тел [6].

В поведении сыпучей среды также есть ряд особенностей, обусловленных характером взаимодействия ее элементов – гранул, и проявляется это, в первую очередь, в процессах диссипации энергии [7]. В металлических материалах также наблюдается диссипация энергии за счет перемещения магнитных доменов, пластической деформации и пр.

При виброобработке вибровозбудитель создает колебательные движения, в результате которых находящейся в контейнере СС сообщаются силовые импульсы, и под их воздействием в ней распространяются прямые и отраженные волны. Вся СС постепенно проходит определенные стадии, характеризующиеся устойчивым соотношением позонно различных уплотненных и разрыхленных объемов этой массы, т. е. сжатием и растяжением соответственно. Аналогичная картина наблюдается и в твердом теле, однако в отличие от СС в твердом теле могут присутствовать не только продольные, а и поперечные волны.

При небольших амплитудах отдельные гранулы СС движутся безотрывно и связаны между собой силами сухого трения (трение покоя равно трению скольжения), пропорциональными нормальным реакциям соприкасающихся гранул.

При колебаниях гранулы СС движутся по двум, чередующимся этапам [8]. Это либо этап совместного движения соседних гранул, либо этап проскальзывания, когда гранулы перемещаются друг относительно друга, преодолевая силу трения. Учитывая, что трение в модели сухое, этап совместного движения длится до тех пор, пока сила трения превосходит силу инерции, после этого среда начинает проскальзывать.

Рассмотрим силы, действующие на единичную гранулу при вибрации со стороны СС. Ранее мы оговаривали, что единичная дислокация может рассматриваться как элемент СС (гранула) с резко отличными от основной среды свойствами. Здесь и далее будем рассматривать плоскую задачу. При плотной укладке единичная гранула в форме шара (в плоскости круг) соприкасается с соседними. При наложении вибрации в гравитационном поле между ними действуют силы, показанные на рис. 1.

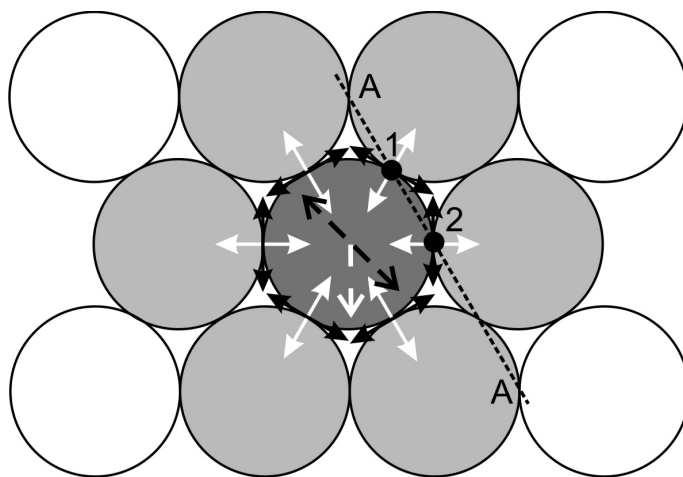


Рис. 1. Силы, действующие на единичную гранулу в гравитационном поле под действием вибрации

В общем случае между гранулами возникают силы реакции F_R (белые сплошные стрелки), силы трения F_{TR} (черные сплошные стрелки) инерционная сила F_I (черная пунктирная стрелка) и сила тяжести F_T (белая пунктирная стрелка). Реакции возникают вследствие давления верхних слоев СС и воздействия вибратора с учетом демпфирования колебаний слоями гранул, расположенными между вибратором и исследуемой гранулой. Отметим, что величина реакций и сил трения пропорциональны соответственно скорости и перемещению соседних гранул.

Рассмотрим условие проскальзывания по линии А–А. Для проскальзывания сумма моментов сил F_I и F_T должна превышать сумму моментов сил F_R и F_{TR} в точках 1 и 2.

Ранее мы рассмотрели природу реакций и сил трения, а теперь необходимо рассмотреть особенность F_I для случая наложения колебаний. Значение F_I пропорционально величине виброускорений и массе гранулы. Для гранул одинаковой плотности и размера, находящихся в непосредственном контакте друг с другом (разностью демпфирования колебаний можно пренебречь) величина и направление F_I практически совпадают. Следовательно, они движутся совместно, и влияние F_I является нулевым. Разность F_I для соседних гранул тем больше, чем больше разность их масс. При одинаковых размерах гранул разность F_I определяется разностью плотностей материалов гранул. Поскольку нас интересуют только силы, возникающие между рассматриваемой гранулой и соседними, далее будем рассматривать только разность F_I без изменения обозначений.

Перед выводом условия проскальзывания необходимо отметить еще одну особенность. Расположение гранул, показанное на рис. 1 имеет место только для плотной упаковки СС. При вибрации плотность упаковки может нарушаться (разуплотнение) и расположение гранул нарушается. Поэтому углы действия сил могут изменяться. В векторной форме условие проскальзывания примет вид:

$$\bar{F}_I \cdot t + \bar{F}_T \cdot t > \sum \bar{F}_{TR} \cdot t + \sum \bar{F}_R \cdot t. \quad (1)$$

Время t в выражении (1) необходимо учитывать, поскольку большинство сил (кроме F_T) связаны с вибрационным нагружением и являются периодическими. Поскольку проскальзывание должно произойти в течение одного полупериода или быстрее, нас интересуют только периоды времени, которые меньше половины периода колебаний, т. е. $t \leq \frac{T}{2}$.

Для доказательства подобия рассмотрим условие проскальзывания точечного дефекта (краевой дислокации с поперечным размером в одно межатомное расстояние) из одного узла решетки в другой. Очевидно, что при наложении вибрации выражение примет вид:

$$\bar{F}_V \cdot t + \bar{F}_N \cdot t > \sum \bar{F}_{SV} \cdot t, \quad (2)$$

где \bar{F}_V – сила, возникающая под действием вибрационных напряжений; \bar{F}_N – сила, возникающая под действием внутренних напряжений; \bar{F}_{SV} – силы, обусловленные межатомными связями.

Подобие выражений (1) и (2), несмотря на разную природу сил, позволяет использовать выбранную физическую модель для исследований процесса скольжения дислокаций при виброобработке сварных конструкций.

Созданные модели показаны на рис. 2.

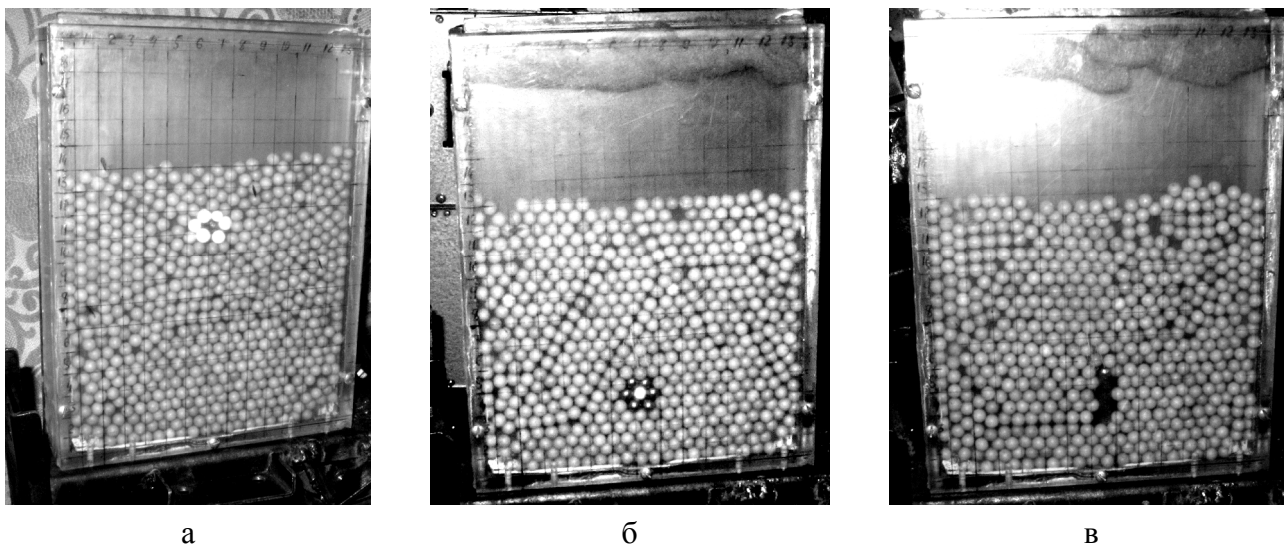


Рис. 2. Физические имитационные модели для исследования скольжения дислокаций при виброобработке сварных соединений

В зависимости от расположения модели дислокации изменяется значения F_R и F_{TR} . Модель позволяет вводить колебания под углом 0, 45 и 90° по отношению к вертикали, изменять частоту и амплитуду колебаний. Величину F_I можно изменять за счет использования гранул разной плотности. На рис. 2, а, показана стальная гранула, в окружении полистирольных; рис. 2, б – полистирольная в окружении стальных; рис. 2, в – стальной стержень.

Во всех случаях в качестве СС используются пластиковые шарики диаметром 6 мм. Таким образом, изменяя плотность моделей дислокации и примесей можно моделировать различные случаи: дислокация окруженная легкими примесями, дислокация, окруженная тяжелыми примесями, дислокация в кристалле без примесей, дислокация сложной формы и пр.

Исследования с использованием подобных моделей позволили установить, что, несмотря на стохастичность, процесс скольжения дислокаций является детерминированным и зависит от разности свойств дислокации, примесей и основного объема СС, формы, расположения дислокации, направления колебаний, их частоты и амплитуды. Во всех случаях модели дислокаций перемещаются в точку модели, которая характеризуется наименьшим уровнем потенциальной энергии. Перемещение происходит только при выполнении условия (1), а траектория перемещения зависит от возмущений в СС, что позволяет в дальнейшем исследовать взаимодействие двух и более дислокаций. На данный момент исследованы процессы в СС толщиной в 1 слой, хотя модель позволяет исследовать СС с учетом межслойного проскальзывания. После накопления статистического материала планируется создание математической модели, описывающей условие начала скольжения единичной дислокации.

Еще одним направлением работы, является исследование распределения вибрационных напряжений с использованием фигур Хладни. Известно, что при колебаниях на резонансных частотах в теле формируется система стоячих волн. Нулевые линии – зоны с амплитудами колебаний близкими к нулю могут быть выявлены с использованием сыпучих материалов, которые собираются на них с других точек тела. Эти линии и называют фигурами Хладни.

Известно, что остаточные напряжения изменяют собственную частоту изделия и соответственно, картину фигур Хладни. Однако оценка таких изменений не проводилась и влияние остаточных напряжений на распределение стоячих волн, а соответственно вибрационных напряжений не изучено.

Поскольку создание остаточных напряжений в металлоконструкциях обычно сопровождается и изменением и многих свойств металла околошовной зоны, а получение одинаковых полей напряжений в нескольких образцах затруднительно, исследования на натуральных образцах сложны и малоинформативны.

Для проведения исследований использовали модель в виде пластикового диска, напряжения в котором создавали натяжением по 8 радиальным направлениям (рис. 3).

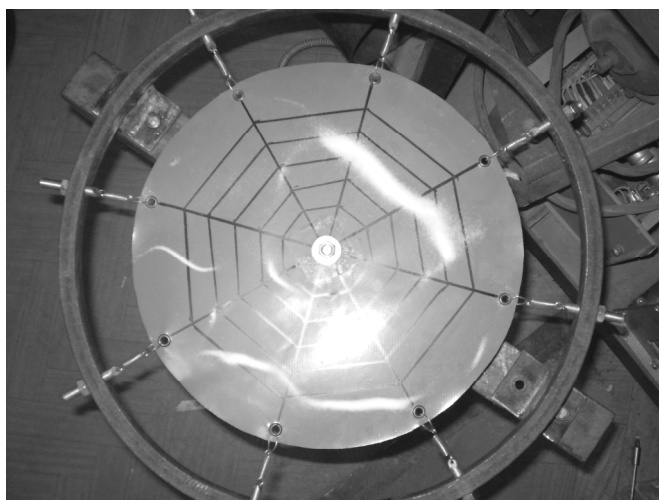


Рис. 3. Фигуры Хладни при неравномерном натяжении диска

Фирма модели обеспечивает при одинаковом усилии натяжения во всех зонах формирование центрально симметричных фигур Хладни, что упрощает исследования. В исследуемой

зоне (или нескольких зонах) диска возможно создание как растягивающих, так и сжимающих напряжений. Для создания растягивающих напряжений в исследуемой зоне сила натяжения должна превышать силу натяжения в остальных зонах (фоновые напряжения), а при создании сжимающих – быть ниже фоновых напряжений.

Исследования с использованием данной модели позволило установить, что изменение усилия натяжения в одной зоне приводит к изменению фигур Хладни во всей модели. Установлено, что при изменении натяжения изменяется длина стоячей полуволны и зависимость между усилием и длиной полуволны линейная. Зависимость сохраняет свой вид как в области растягивающих, так и в области сжимающих напряжений. Погрешность при расчетах по полученному выражению для исследованного диапазона усилий не более 5 %. Также отмечено изменение ширины нулевых линий, что свидетельствует о зависимости размеров нулевых зон от величины напряжений. Однако характер зависимости установить не удалось, требуются дополнительные исследования. Установлен также характер изменения фигур Хладни при изменении напряжений. Эти результаты могут быть использованы для мониторинга процесса виброобработки.

ВЫВОДЫ

1. Использование имитационных физических моделей позволяет расширить спектр исследований процессов, которые имеют место при вибрационной обработке сварных конструкций.
2. Использование сыпучей среды для моделирования дислокационного скольжения обеспечивает достаточное подобие.
3. Установлен характер зависимости, описывающей условие начала дислокационного скольжения и факторы, влияющие на этот процесс.
4. Остаточные напряжения существенно изменяют характер распределения стоячих волн, а, следовательно, и вибрационных напряжений.
5. Существует линейная связь между величиной напряжений и длиной стоячей волны.
6. Полученные результаты могут быть использованы для мониторинга процесса виброобработки и разработки теоретических основ виброобработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние вибрации низкой частоты на величину остаточных напряжений и деформаций при сварке / Г. В. Сутырин, Н. Э. Банцерж, В. С. Белосельский, В. Г. Смирнов, В. Г. Лобицкий // Сварочное производство. – 1973. – № 6 – С. 31–32.
2. Лащенко Г. И. Виброобработка сварных машиностроительных конструкций / Г. И. Лащенко // Сварочное производство. – 1992. – № 12. – С. 3–4.
3. Шнее Ф. З. Вибрационная обработка сварных крупногабаритных конструкций с целью уменьшения деформаций и склонности к образованию трещин / Ф. З. Шнее, В. И. Панов // Сварочное производство. – 1983. – № 5. – С. 13–15.
4. Вибрации в технике : справочник в 6-и т. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э. Э. Лавендела. – М. : Машиностроение, 1981. – 509 с.
5. Сивко В. И. Основы механики вибрируемой бетонной смеси / В. И. Сивко. – Киев : Вища школа, 1980. – 408 с.
6. Седов Л. И. Механика сплошной среды. В 2-х т. Т. 2 / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1981. – 528 с.
7. Лубенская Л. М. Результаты экспериментальных исследований рабочих сред / Л. М. Лубенская, В. А. Медяник, И. В. Малков // Совершенствование механосборочного производства и пути развития технологии. – М. : Оргстанкинпром, 1991. – С. 139–140.
8. Калмыков М. А. Математическая модель циркуляционного движения рабочей среды / М. А. Калмыков // Високі технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2005. – № 2. – С. 182–187.