

**АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ  
ПРИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТВЕРДОЕ ТЕЛО  
НЕСТАЦИОНАРНЫМ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫМ ТЕПЛОВЫМ ПОТОКОМ**

*С. В. ГОРДЕЕВ, А. А. СЕЛИВЕРСТОВ, В. В. РАСКАЧАЕВ, В. А. НОВИКОВ*

*Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

С развитием аддитивных технологий и расширением их сферы применения, а также номенклатуры используемых материалов возникает необходимость в подборе оптимальных параметров трехмерной печати. Несмотря на многие преимущества 3D-печати, к которым относится полная автоматизация процесса, возможность изготавливать изделия практически любой формы и быстрое прототипирование, существует и ряд актуальных проблем. К ним можно отнести сложность процесса, так как такой метод изготовления изделий требует тщательного контроля за параметрами печати, особенно температурным режимом; проблемы с пористостью и однородностью; а также необходимость в дополнительной механической обработке поверхности. Все эти проблемы приводят к возрастанию стоимости конечного изделия в сравнении с традиционным производством.

Основной задачей численного конечно-элементного моделирования процессов трехмерной печати является определение температурных полей, возникающих при нестационарном высокоинтенсивном нагреве поверхности, а также анализе термонапряженного состояния деталей в процессе печати. Особенно остро эта проблема стоит при печати тонкостенных конструкций, так как при их изготовлении могут возникнуть нежелательные деформации или же вовсе разрушение конструкции.

В настоящее время для моделирования процессов 3D-печати используются известные программные комплексы, такие как ANSYS Additive, Abaqus, Comsol Multiphysics, LS-DYNA и Nastran.

Рассматривается моделирование процессов трехмерной печати на примере программного комплекса ANSYS Additive. Исследуется влияние параметров процесса на размеры ванны расплава и распределение температуры в зависимости от скорости движения лазера, толщины слоя, мощности лазера и диаметра лазерного пятна. Приводятся результаты расчетов и проводится анализ полученных результатов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 23-49-00133).*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРА ЦИКЛИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ  
В ЗОНЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИ ОБЩЕМ ЗНАКОПОСТОЯННОМ НАГРУЖЕНИИ**

*М. В. ГОРОХОВА*

*Волжский государственный университет водного транспорта,  
г. Нижний Новгород, Российская Федерация*

Некоторые конструкции и сооружения подвержены при работе статическому или динамическому нагружению, при которых в элементах конструкций возникают общие упругие напряжения в пределах действия одного знака с малой частотой циклов нагружения. К таким конструкциям, например, относятся корпуса судов или барж при операциях погрузки-выгрузки, мостовых кранов, элементы различных трубопроводов при подъеме или сбросе давления и пр.

Однако статический или динамический расчет не учитывает наличие концентраторов напряжений, так как при отсутствии циклического характера в нагружении и при достаточно высоком уровне пластических свойств металла конструкции местные концентраторы напряжений не оказы-

вают влияния на прочность. Между тем и при общем знакопостоянном циклическом нагружении в зоне концентрации могут возникнуть напряжения знакопеременного характера.

В конструкциях указанного выше типа, которые работают фактически при знакопостоянном малоцикловом нагружении, наблюдаются иногда случаи «хрупких» разрушений с очагом начала разрушения в месте расположения того или иного концентратора напряжений. Причем исследование свойств металла в зоне разрушения, как правило, не выявляет его охрупчивания. Поэтому причину таких разрушений следует, очевидно, искать не в хрупкости материала, а в специфике влияния концентраторов напряжений при общем знакопостоянном малоцикловом нагружении. Характерным примером в этом отношении могут служить магистральные нефтепроводы. Расчет напряжений в них ведется в соответствии с рекомендациями [2].

Толщина стенок труб магистральных нефтепроводов регламентируется ГОСТом на основе статического расчета по методу предельных состояний. За предельное состояние принимается разрушение нефтепроводной трубы при гидростатических испытаниях под воздействием внутреннего давления. При испытаниях определяется несущая способность трубы, которая характеризуется максимальным давлением  $p_{\max}$  при разрыве трубы. По данному давлению можно определить напряжения в стенке трубы при разрыве:

$$\sigma_{\text{разр}} = \frac{p_{\max} D_{\text{вн}}}{2\delta},$$

где  $D_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубы;  $\delta$  – толщина стенки трубы в исходном состоянии.

Номинальные кольцевые напряжения в стенках трубы должны удовлетворять условию прочности

$$\sigma_t = \frac{p_{\max} D_{\text{вн}}}{2\delta} \leq [\sigma].$$

Этот расчет будет гарантировано защищать нефтепровод от разрушения труб в результате воздействия статического внутреннего давления.

Экспериментально установлено, что разрушению трубы под воздействием гидростатического внутреннего давления предшествуют заметные пластические деформации увеличения периметра трубы в месте разрыва на 2,5–5,5 % и утонение стенок трубы у кромок разрыва примерно на 10–15 %. В результате пластической деформации перед разрывом местные концентрации напряжений сглаживаются. Трещина разрыва располагается при этом вдоль образующей трубы и может иметь размеры по длине больше метра с раскрытием кромок до 100–150 мм.

В процессе эксплуатации разрушение труб магистральных нефтепроводов вдоль образующей и с раскрытием кромок трещины также имеет место. Однако эксплуатационным разрушениям никогда не соответствуют макропластические деформации, вызывающие увеличение периметра трубы и утонение стенок у кромок трещины в месте разрыва. Эти эксплуатационные разрушения происходят, как правило, по прошествии какого-то срока службы трубопровода и при рабочих давлениях в 2–2,5 раза ниже тех, которые достигаются при экспериментальном определении несущей способности нефтепроводных труб. Разрушения носят обычно очаговый характер с расположением очага начала развития трещины в зоне влияния того или иного концентратора напряжений. Характер излома в зоне очага хрупкий, без признаков макропластической деформации. От очага трещина распространяется в обе стороны вдоль образующей с возникновением поверхности полухрупкого излома, который затем переходит в вязкий излом со скосом кромок, и далее концы трещины «вязнут» в металле.

Цикличность нагружения магистральных трубопроводов возникает в результате остановок по тем или иным причинам перекачки нефтепродукта. Число этих остановок за срок службы трубопровода сравнительно невелико. Периодичность работы нефтепроводов в ряде случаев составляет примерно один цикл за сутки. Но факт влияния концентраторов напряжений на прочность элементов магистрального нефтепровода свидетельствует о том, что учет цикличности нагружения при оценке эксплуатационной надежности магистральных нефтепроводов необходим. Влияние различных дефектов на интенсивность напряжений в магистральных трубопроводах при их статическом нагружении подробно рассмотрено в работе [3].

Как отмечено, в стенке трубы действующего нефтепровода допускается высокий уровень номинальных кольцевых напряжений (всего с двукратным запасом от временного сопротивления). Поэтому в зоне концентратора напряжения могут выходить за предел упругости. Локальный объем металла в этой зоне получает пластическую деформацию. Но этот локальный объем ограничен массивом металла, имеющего только упругие деформации. Тогда при последующей разгрузке под влиянием основного упругонапряженного массива на участке локального объема возникнут напряжения сжатия. А при повторных нагружениях трубы внутренним давлением напряжения в локальном объеме получают знакопеременный характер. Так, в зоне концентрации напряжений в локальном объеме возникает так называемое жесткое нагружение.

Важно подчеркнуть, что циклическая упругопластическая деформация в локальном объеме стенки трубы в зоне концентрации напряжений обуславливает не пульсирующий, а знакопеременный характер местных напряжений. В этом состоит специфика влияния концентраторов напряжений при общем повторно-статическом нагружении внутренним давлением элементов магистральных нефтепроводов [1].

Эксперименты по определению упругопластических деформаций в зоне концентрации напряжений натуральных элементов магистральных трубопроводов (труб, тройников, отводов) внутренним пульсирующим давлением показали, что после начальной пластической деформации в зоне концентраторов, которая, например, в тройнике может достигать 3 %, происходит приспособление конструкции к циклическому нагружению. При этом размах упругопластических деформаций значительно снижается через 5–10 циклов нагружения, устанавливается стабильная петля гистерезиса с постоянной величиной упругопластических деформаций. Тензодатчики, при помощи которых фиксируется деформация, показывают в этом случае общий размах деформаций от нового нулевого отсчета.

Таким образом, в результате влияния концентраторов напряжений при общем знакопостоянном малоцикловом нагружении возможно изменение характера циклических напряжений. В локальных объемах возникают циклические упругопластические напряжения, имеющие знакопеременный характер, и по исчерпанию ресурса концентратор напряжений может стать очагом начала развития трещины.

#### Список литературы

- 1 Практические примеры расчета на сопротивление хрупкому разрушению трубопроводов под давлением. Разрушение. Т. 5. / А. Р. Даффи [и др.]. – М. : Машиностроение, 1977. – 464 с.
- 2 Мураками, Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Ю. Мураками. – М. : Мир, 1990. – 448 с.
- 3 Горохова, М. В. Исследование влияния сквозных осевых дефектов на статическую прочность трубопроводов / М. В. Горохова // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Бел. ж. д. : в 2 ч., Гомель, 24–25 нояб. 2022 г. / под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – Ч. 2. – С. 177–179.

УДК 51+004

## ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГЕОДАНЫХ

*М. А. ГУНДИНА, О. В. ЮХНОВСКАЯ*

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

При автоматическом сборе показаний прибора необходимо автоматическое определение значений, которые сильно отличаются от всей совокупности исследуемых данных (аномальных значений). Сейчас в современных компьютерных пакетах инженерных расчетов и компьютерных системах появилась возможность реализовать алгоритмы обнаружения аномальных значений выборки [1]. Часто это осуществляется с помощью поиска и анализа закономерностей исходных эмпирических данных при использовании встроенных критериев проверки на аномальность.

Например, в компьютерной системе Wolfram Mathematica используется функция FindFormula. Она позволяет найти аппроксимирующую функцию, которая достаточно хорошо описывает исходный набор данных.