

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ВОЛКОВ ГРИГОРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РАЗРУШЕНИЕ СПЛОШНЫХ СРЕД ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ
ВИБРАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2010

Работа выполнена на кафедре теории упругости математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН,
профессор ПЕТРОВ Юрий Викторович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ доктор физико-математических наук,
профессор МЕЩЕРЯКОВ Юрий Иванович
(Институт проблем машиноведения РАН)

Кандидат технических наук,
доцент ПОЛЯНСКИЙ Владимир Анатольевич
(Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет)

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ Петербургский государственный университет путей
и сообщения

Защита состоится «__» _____ 2010 г. в ____ часов на заседании совета Д 212.232.30 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

Автореферат разослан «____» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Кустова Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Известно, что некоторые материалы, выдерживающие большие статические нагрузки, при высокоскоростном воздействии могут уступать в прочности материалам не столь устойчивым к статическому воздействию. Поэтому знание такого рода особенностей поведения материалов позволяет оптимизировать некоторые производственные и строительные технологии. Однако часто при расчете прочности конструкций или разработке технологических процессов, например, различных способов обработки материалов, пользуются статическими критериями прочности, применение которых в принципе не позволяет учесть вышеуказанные свойства материалов. Подход, базирующийся на критерии инкубационного времени, позволяет достаточно хорошо предсказывать поведение сплошной среды, как при статическом, так и динамическом нагружении. Кроме того, этот подход даёт возможность вычислять прочностные свойства сплошных сред для различных способов нагружения.

С помощью метода конечных элементов можно получить решения для широкого класса задач, однако знание аналитического решения, позволяющего предсказать качественное поведения материала, даёт возможность проверить достоверность результатов, полученных численно. Стоит отметить, что обычно методом конечных элементов решается прямая задача механики сплошной среды. То есть задаются поле перемещений и поле скоростей некоторого процесса деформирования материала, в ходе которого вычисляются поля напряжений и деформаций. Такого вида решения не дают возможности осмысленно выбирать параметры режима нагружения, в целях оптимизации технологического процесса.

Обычно при изучении явления кавитации в жидкостях для описания нарушения сплошности жидкости рассматривается поведение отдельно взятого газового пузырька, поэтому в критерий разрушения часто входят микропараметры среды, такие как давление внутри пузырька или его радиус.

Подход, основанный на понятии инкубационного времени, позволяет записать условие наступления кавитации с помощью макропараметров, которые являются интегральными характеристиками прочности, зависящими от микроструктуры жидкости, и их значения могут быть получены из эксперимента.

Широкую популярность в промышленности получили методы вибрационной обработки материалов, когда на кромку режущего инструмента дополнительно подают ультразвуковые колебания килогерцового диапазона. Такой вид обработки применяется в совершенно различных областях: при точении металлов и сплавов, обработке древесины, резке тканей, существуют также «ультразвуковые» скальпели и даже ножи для пищевых продуктов. Для изучения подобных технологических процессов широко применяется метод конечных элементов или используются модели, основанные на явлении резонанса. Однако правильное, обладающее также предсказательной силой описание влияния ультразвуковых колебаний на процесс резания может быть дано только при учёте временных характеристик процессов разрушения. В данной работе делается попытка описать эффекты вибрационного разрушения с этих позиций.

Целью работы является объяснение эффектов разрыва сред, наблюдаемых в экспериментах по акустической кавитации и вибрационному резанию, в рамках структурно-временного подхода.

Научная новизна. Предложена модификация критерия инкубационного времени при разрушении сплошных сред вибрационной нагрузкой.

Разработана расчётная схема для определения температурной зависимости порога акустической кавитации в криогенных жидкостях.

Выведена зависимость энергии, затрачиваемой при контактном взаимодействии на создание разрушающего воздействия от его длительности. Дано энергетическое объяснение уменьшению величины силы резания при вибрационной обработке материалов.

Достоверность результатов и методы исследования. Достоверность результатов обеспечивается использованием апробированных физических моделей, а также применением строгих математических методов. Полученные результаты сравниваются с экспериментальными данными, а также с результатами исследований других авторов

Для описания условий разрушения в работе используются различные модификации критерия разрушения, основанного на понятии инкубационного времени. При вычислениях используются аналитические (схема Герца и др.) и численные методы решения задач механики сплошных сред.

Практическая ценность. Знание частотных зависимостей порога акустической кавитации позволяет определять предельные мощности гидролокаторов на заданном частотном диапазоне.

Возможность выбора энергетически выгодных длительностей воздействия позволяет оптимизировать режим нагружения в различных сферах производства, связанных с разрушением сплошных сред при ударном контактном взаимодействии. Этот подход реализован на примере задачи о вибрационной резке металлов.

Результаты, выносимые на защиту

- Частотная зависимость порога акустической кавитации дегазированной воды.
- Объяснение температурной зависимости порога кавитации для криогенных жидкостей.
- Зависимость энергии, затрачиваемой на разрушение, от длительности воздействия при контактном взаимодействии.
- Модель вибрационного резания, дающая энергетическое объяснение падению силы резания.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Всероссийской конференции «Проблемы механики сплошных сред и физики взрыва», посвящённой 50-летию института гидродинамики им

М.А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск 2007); научном семинаре секции прочности и пластичности им. Н.Н. Давиденкова в Доме Учёных; научных семинарах кафедры теории упругости мат.-мех. ф-та СПбГУ под руководством академика РАН проф. Н.Ф. Морозова (Санкт-Петербург); научных семинарах Института Проблем Машиноведения Российской Академии Наук под руководством чл.- корр. РАН проф. Ю.В. Петрова.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ, в том числе две статьи [1,2] в журналах рекомендованных ВАК.

В работах [3,4,6] использована модификация критерия инкубационного времени, предложенная Петровым Ю.В. и Груздковым А.А.. Волков Г.А. производил расчёты частотной зависимости порога кавитации для дегазированной и морской воды.

В статье [1] Зильбершмит В.В. и Митрофанов А.В. проводили экспериментальные исследования по вибрационной резке сплава Inconel 718, Груздков А.А., Братов В.А., Петров Ю.В. и Волков Г.А. разрабатывали схему по оценки энергии, затрачиваемой на разрушение при контактном взаимодействии. Критерий инкубационного времени, используемый в качестве условия разрушения, предложен Петровым Ю.В.. Волков Г.А. производил расчёты энергии, затрачиваемой на разрушение при контактном взаимодействии, строил диаграммы и проводил сравнение с экспериментальными данными.

В работах [2,5] использована модификация критерия инкубационного времени, предложенная Петровым Ю.В. и Груздковым А.А.. Волков Г.А. производил расчёты температурной зависимости порога акустической кавитации для жидкого водорода и азота, строил диаграммы и производил сравнение с экспериментальными данными. Волков Г.А. предложил способ определения температурной зависимости статического порога кавитации.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из __ наименований. Работа содержит __ страниц и __ рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** описываются существующие подходы решения задач по определению прочности сплошных сред при высокоскоростном вибрационном нагружении. Обосновывается актуальность темы диссертации, описывается ее структура, и формулируются основные задачи исследования.

В **первой главе** рассматриваются задачи по определению прочности различных жидкостей при акустической кавитации с использованием критерия инкубационного времени, предложенного Ю.В. Петровым и Н.Ф. Морозовым. Для механики разрушения жидкостей критерий выглядит

следующим образом: $\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \text{sign}(P(t')) \left| \frac{P(t')}{P_c} \right|^\alpha dt' \geq 1$, где $P(t)$ - растягивающее

давление, P_c - статическое значение порога кавитации (т.е. порог кавитации при низких частотах), τ - инкубационное время, безразмерный параметр α характеризует чувствительность жидкости к истории нагружения.

В первой части решается задача по определению частотной зависимости порога акустической кавитации. Полученная зависимость сравнивается с экспериментальными результатами В.А. Акуличева по измерению порога кавитации морской воды и кривыми Р. Эше (R. Esche) для дегазированной воды. Общий характер экспериментальных данных по кавитации показывает, что несмотря на значительный разброс наблюдается тенденция к возрастанию пороговой амплитуды акустической волны с увеличением частоты излучения. В области низких частот величина порога кавитации практически не изменяется, и его значение называют статическим порогом кавитации. В данной работе этот параметр, характеризующий прочность жидкости при медленном воздействии, дополнен ещё одним прочностным параметром – инкубационным временем, учитывающим временные характеристики нагружающего воздействия. Введение этого дополнительного параметра позволяет прогнозировать акустическую прочность жидкости в широком диапазоне частот звуковой волны.

В силу периодичности нагружающего воздействия при некоторых частотах звуковой волны величина порога кавитации, предсказанная с помощью критерия инкубационного времени, принимает бесконечно большое значение. Поэтому в работе делается предположение, что прочностные свойства жидкости для различных микрообъёмов незначительно отличаются друг от друга из-за её пространственной неоднородности. В результате анализа окончательное значение порога кавитации будет определяться следующим соотношением:

$$A_* = \min_{\tau_0 \leq \tau \leq \tau_0 + \delta} P_c \left(\frac{\omega \tau}{2} \cdot \left(\int_0^{\frac{\omega \tau}{2}} \psi(z) dz \right)^{-1} \right)^\alpha,$$

где ω - частота акустической волны. На рис 1 показано сравнение расчётных зависимостей с экспериментальными данными.

Статический порог кавитации, характеризующий акустическую прочность жидкости при относительно низких частотах воздействия, был дополнен ещё одним прочностным параметром – инкубационным временем, который характеризует прочность жидкости при импульсном и высокочастотном нагружении. В результате удалось объяснить экспериментально наблюдаемое поведение порога акустической кавитации в широком диапазоне частот воздействия.

Для вычисления порога кавитации при акустическом высокочастотном воздействии брались такие же значения инкубационного времени, что и при импульсном нагружении. Это подтверждает инвариантность прочностных характеристик жидкости относительно формы нагружающего воздействия. Соотношение временных параметров прочности жидкости и нагружающего воздействия позволяет объяснить экспериментально наблюдаемый разброс данных при измерении частотной зависимости порога кавитации.

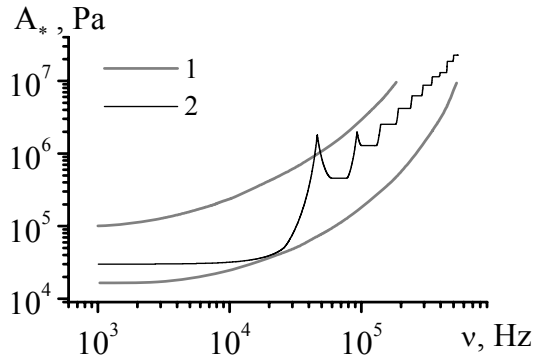


Рис. 1.а. Зависимость пороговой амплитуды давления от частоты звуковой волны для дегазированной воды (кривая 1 – расчётная зависимость) и диапазон экспериментальных значений из работы Эше (кривые 2);

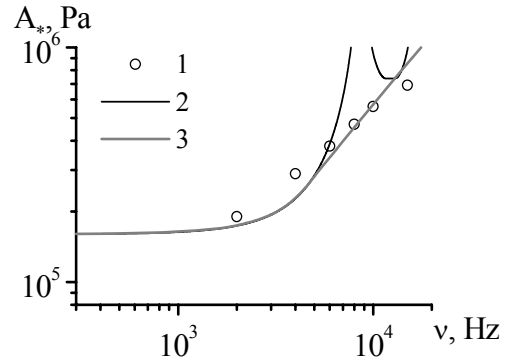


Рис. 1.б. Зависимость пороговой амплитуды давления от частоты звуковой волны для морской воды 1 – эксперимент В.А. Акуличева; 2 – расчётная зависимость; 3 – нижняя огибающая кривой 2.

Во второй части первой главы исследуется температурная зависимость порога кавитации криогенных жидкостей: водорода и азота. Поскольку температура является характеристикой равновесного состояния среды, ее предлагается вводить в критерий через температурные зависимости величин, не зависящих от времени: инкубационное время и статическое значение порога кавитации. Зависимость инкубационного времени от температуры

вводится в следующем виде $\tau = \tau_0 \frac{G}{kT}$ ($k = 1.3807 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная

Больцмана, T – абсолютная температура, $\tau_0 = 10^{-13} \text{ с}$ – характерный период колебаний молекул, G – элементарная порция энергии, необходимая для разрушения представительного объёма жидкости), зависимость такого вида использовалась в работе Ю.В. Петрова и Е.В. Ситниковой.

Процесс кавитации можно воспринимать как вскипание жидкости при резком понижении давления, поэтому предполагается, что значение статического порога кавитации равно разнице величин P_0 – давления жидкости и $P(T)$ – давления кипящей жидкости при заданной температуре: $P_c(T) = P_0 - P(T)$ Таким образом, температурная зависимость статического

порога определяется при использовании фазовой диаграммы или интерполяционного уравнения состояния Ван-дер-Ваальса, приближенно описывающего как газообразное, так и жидкое состояние вещества. В случае исследования кавитационной прочности водорода используются оба способа, а для азота расчет производится только с помощью интерполяционного уравнения Ван-дер-Ваальса. Результаты полученных зависимостей сравниваются с данными, полученными В.А. Акуличевым (рис. 2).

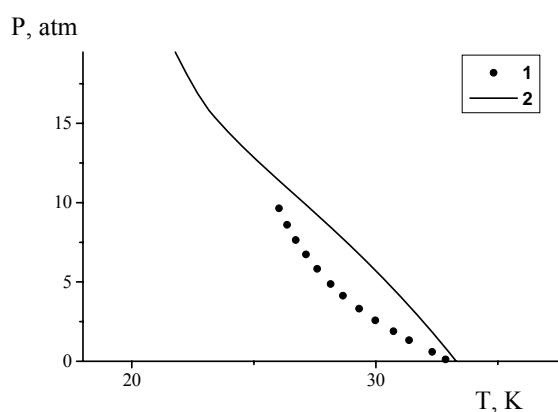


Рис. 2.а. Зависимость пороговой амплитуды давления от температуры для жидкого водорода (1 – данные В.А. Акуличева; кривая 2 – расчётная зависимость с использованием фазовой диаграммы)

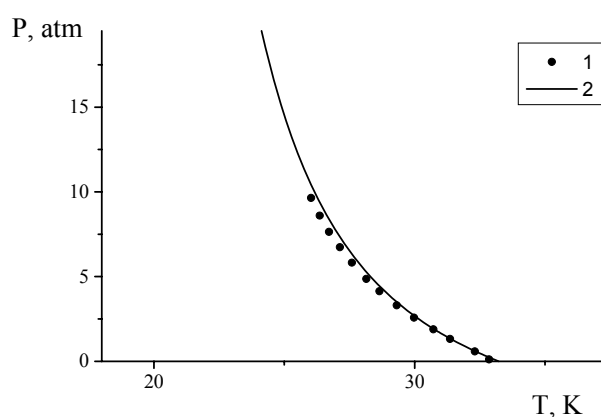


Рис. 2.б. Зависимость пороговой амплитуды давления от температуры для жидкого водорода (1 – данные В.А. Акуличева; кривая 2 – расчётная зависимость с использованием интерполяционного уравнения Ван-дер-Ваальса)

Окончательное значение порога кавитации является результатом конкуренции двух процессов: уменьшения статического порога кавитации и уменьшения инкубационного времени с ростом температуры. Температурная зависимость порога кавитации, полученная при использовании интерполяционного уравнения Ван-дер-Ваальса, даёт лучшее соответствие с данными В.А. Акуличева, чем при использовании фазовой диаграммы. Однако делать выводы о неприменимости того или иного подхода нельзя, так как данные В.А. Акуличева являются результатом теоретической обработки эксперимента.

Во **второй главе** рассматриваются энергетические аспекты динамического разрушения при контактном взаимодействии. Делается попытка оценки энергии, затрачиваемой на создание в сплошной среде разрушающего импульса при контактном взаимодействии.

Рассматривается задача о контактном взаимодействии по схеме Герца. Абсолютно твёрдая сферическая частица сталкивается с упругим полупространством. В результате взаимодействия в упругой среде возникает импульс растягивающего напряжения с длительностью t_0 и максимальным напряжением σ_{\max} . Для оценки энергии, затрачиваемой на создание этого импульса, вычисляется кинетическая энергия падающей частицы (α - безразмерный коэффициент, ρ - плотность частицы, E - модуль Юнга сплошной среды):

$$\varepsilon = \alpha \cdot \frac{t_0^3 \sigma_{\max}^{\frac{13}{2}}}{\rho^{\frac{3}{2}} E^4}.$$

С помощью критерия инкубационного времени определяется зависимость амплитуды порогового разрушающего импульса σ_{\max}^* от его длительности t_0 на примере сплава Inconel 718. Так как в различных прикладных задачах по ударному разрушению при контактном взаимодействии форма импульса нагружения может изменяться, и известен лишь общий характер её поведения, то при расчёте она принималась в виде гладкой ω - функции («шапочки»). Таким образом, зависимость пороговой амплитуды от длительности нагружения будет определяться следующим соотношением:

$$\sigma^* = \frac{\sigma_c \cdot \tau}{\max_{t \in [0; t_0]} \int_{t-\tau}^t \omega(s) ds}.$$

Затем оценивается энергия, необходимая для создания в сплошной среде порогового разрушающего импульса с параметрами σ_{\max}^* и t_0 . Оказалось, что величина этой энергии существенно зависит от длительности разрушающего импульса. Эта зависимость имеет характерный минимум при длительностях импульса порядка 2~3 значений инкубационного времени (рис 3). Таким образом, была показана возможность оптимизации затрат энергии на разрушение.

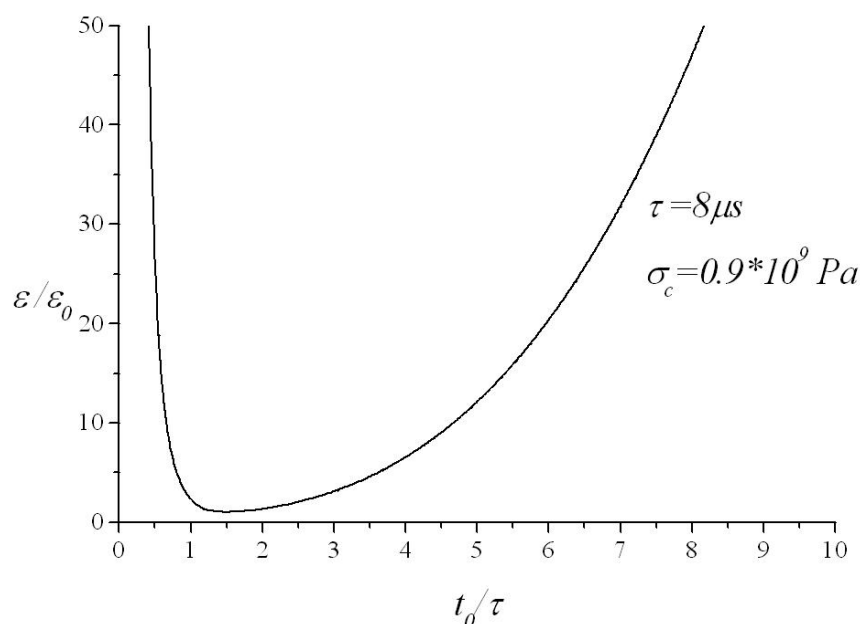


Рис. 3 Зависимость энергии разрушающего импульса от длительности удара

В результате использования структурно-временного подхода, в котором учитываются временные параметры механизма разрушения, удалось объяснить экспериментально наблюдаемый эффект оптимизации энергии, затрачиваемой на разрушение материалов импульсными динамическими воздействиями.

На примере простейшей задачи о контактном соударении произведена оценка энергии, необходимой для создания разрушающего импульса в упругой среде. Выяснилось, что эта энергия существенно зависит от длительности воздействия и имеет характерное минимальное значение.

Третья глава посвящена объяснению эффектов вибрационного резания материалов с точки зрения структурно-временного подхода

механики разрушения. Технология резки труднообрабатываемых металлов и сплавов, когда на резец накладываются дополнительные ультразвуковые колебания в направлении резания, используется на практике с середины прошлого века, частота колебаний обычно около 20 кГц , амплитуда порядка десятка микрон. Наиболее существенными преимуществами вибрационного резания по сравнению с традиционными способами резки являются значительное понижение силы резания и улучшение качества обрабатываемой поверхности. Однако при увеличении скорости обработки материала до некоторого определённого значения все отличия между этими двумя способами обработки исчезают. Эта критическая скорость приблизительно равна минимальному значению скорости подачи материала, при которой резец перестаёт отрываться от образца.

Учитывая описанные во второй главе результаты, предполагается, что наложение ультразвуковых колебаний меняет режим воздействия с постоянного на виброударный, который является более выгодным с точки зрения затрачиваемой энергии. А при увеличении скорости обработки длительность нагружающего импульса возрастает, в конечном счёте переводя процесс резания в традиционный режим.

Для сравнения с результатами серии экспериментов Д. Кумабэ и с данными по резке сплава Inconel 718 (В.И. Бабицкий, В.В. Зильбершмидт и др.) строится скоростная зависимость силы резания. Равенство работы силы резания по пути разрушения с энергией, расходуемой на создание разрушающего воздействия, позволяет оценить величину самой силы резания. Как было показано во второй главе, величина этой энергии зависит от параметра ρ , имеющего размерность плотности. Было показано, что величина этого параметра зависит от толщины срезаемого слоя (глубины резания).

Для соотношения скорости резания и длительности разрушающего импульса берётся простая линейная экстраполяция экспериментальных

данных. На рис. 4 показаны зависимости силы резания от скорости обработки, полученные на основании выше обозначенных закономерностей.

Таким образом, с помощью методов динамической механики разрушения удалось качественно объяснить поведение режущей силы при вибрационной обработке материалов. Применяя критерий инкубационного времени, удалось показать существование наиболее энергетически выгодных режимов разрушения металлов, которые определяются временными характеристиками процесса разрушения данного материала.

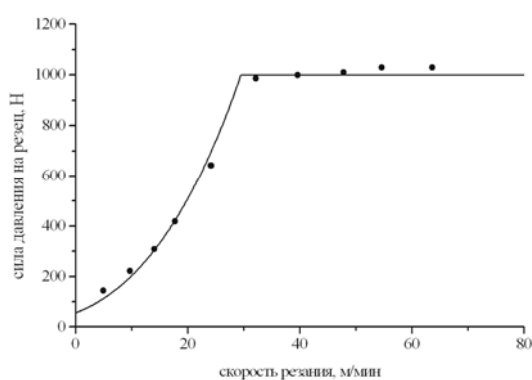


Рис. 4.а. Зависимость силы резания от скорости при вибрационной резке Inconel 718: (точки – данные В.И. Бабицкого, сплошные линии – расчетные кривые).

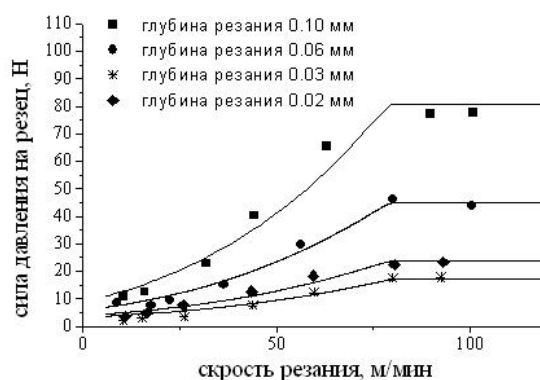


Рис. 4.б. Зависимость силы резания от скорости при вибрационной резке алюминия: (точки – данные Д. Кумабэ, сплошные линии – расчетные кривые).

Наличие энергетически оптимальных длительностей порогового импульсного воздействия позволяет объяснить значительное падение режущей силы в случае вибрационной обработки металлов, а также ее зависимость от скорости подачи материала. Отсутствие излишков подведённой энергии косвенно подтверждает улучшение качества обрабатываемой поверхности, так как не происходит различных процессов, поглощающих избытки энергии, например, нежелательной пластической деформации или чрезмерного нагрева резца и зоны резания.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Построена частотная зависимость порога акустической кавитации дегазированной и морской воды. Полученная зависимость позволяет объяснить экспериментально наблюдаемый рост порога акустической кавитации при увеличении частоты звуковой волны. Характер полученной зависимости показывает, что разброс экспериментальных значений обусловлен не только погрешностью измерений, но и соотношением временных параметров прочности и нагружающего воздействия.
2. Дано объяснение температурной зависимости порога кавитации для криогенных жидкостей, водорода и азота как результата конкуренции двух процессов: изменения с температурой двух прочностных свойств среды – статического порога и инкубационного времени.
3. Получена зависимость энергии, затрачиваемой на создание разрушающего воздействия при контактном взаимодействии, от его длительности. Обнаружено, что эта зависимость имеет характерный минимум при длительностях, превышающих инкубационное время примерно в три раза. Следовательно, знание величины инкубационного времени разрушения позволяет оптимизировать режимы нагружения.
4. Применение структурно-временного подхода позволило качественно объяснить поведение силы резания при вибрационной обработке металлов. Дано энергетическое объяснение уменьшению режущей силы при обработке с ультразвуковыми колебаниями по сравнению с силой, возникающей при традиционном способе резания. Построена модель, объясняющая зависимость силы резания от скорости подачи материала.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Г. А. Волков, В. В. Зильбершмит, А. В. Митрофанов, А. А. Груздков, В. А. Братов, Ю. В. Петров. Минимизация энергии разрушающего импульса при контактном взаимодействии // Доклады РАН т. 427, № 1, 2009, с. 41-43.
2. Г. А. Волков, А. А. Груздков, Ю. В. Петров. Кавитационная прочность криогенных жидкостей, критерий инкубационного времени // Физика твердого тела т. 79, Вып. 11, 2009, с. 147-149.

Другие публикации

3. А.А. Груздков, Г.А. Волков, Ю.В. Петров. Анализ акустической кавитации на основе понятия инкубационного времени // Гидродинамика больших скоростей и численное моделирование: материалы третьей международной летней научной школы.- Кемерово: ИНТ, 2006. – с. 341-344.
4. Г.А. Волков, А.А. Груздков, Ю.В. Петров\ . Критерий инкубационного времени и акустическая прочность морской воды // Акустический журнал, 2007, том 53, № 2, С.149-152.
5. Г. А. Волков, А. А. Груздков, Ю. В. Петров. Кавитационная прочность криогенных жидкостей, критерий инкубационного времени // Всероссийская конференция «Проблемы механики сплошных сред и физики взрыва», Тезисы докладов, Новосибирск 2007, С. 56.
6. А.А. Груздков, Г.А. Волков, Ю.В. Петров. Инкубационное время в задачах динамической прочности // 6-ой Российский симпозиум «Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновесных средах, Новый Афон 23 июля-2 августа 2008. Тезисы докладов, ОИФТ, 2008, с. 1.