

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ИМЕНИ М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

ОСТРОВЕРХОВ Николай Петрович

УДК 624.042.8

УДАРНОЕ НАГРУЖЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
МАССИВНЫМИ ТЕЛАМИ ОСТРОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

/ 01.02.03 - Строительная механика /

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск - 1983

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена на кафедре строительной механики имени В.А.Лазаряна Днепропетровского ордена Трудового Красного Знамени института инженеров железнодорожного транспорта имени М.И.Калинина

Научный руководитель - заслуженный деятель науки УССР, академик АН УССР, доктор технических наук, профессор Н.Г.Бондарь.

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент И.Г.Барбас.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор В.В.Багреев,
доктор технических наук, профессор В.В.Абрамов.

Ведущая организация:

Днепропетровский институт технической механики АН УССР.

Защита диссертации состоится 22 апреля 1983 г. в 15 час.15 мин. на заседании специализированного совета К 114.07.02 по присуждению ученой степени кандидата технических наук в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта имени М.И.Калинина.

Посверить книгу в библиотеку в течение указанного срока.

НТБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Исследование ударных процессов относят к числу наиболее актуальных проблем прикладной механики, связанных с анализом напряженно-деформированного состояния элементов конструкций при интенсивных нагрузках импульсивного характера.

6688a

Ударные воздействия на инженерные конструкции повсеместно встречаются при производстве строительно-монтажных работ, при разработке горных пород и мерзлых грунтов, при эксплуатации транспорта и сооружений, при погрузо-разгрузочных работах и т.д. В инженерной практике весьма распространены случаи, когда по конструкции ударяют массивные тела произвольной формы. Эти тела могут ударяться как гладкой поверхностью, так и острием типа клина /удар ребром/, конуса и пирамиды. Многочисленные экспериментальные исследования ударных процессов показывают, что даже при небольших скоростях соударения в большинстве случаев в зоне контакта возникает остаточные деформации.

Среди разнообразных типов конструкций, испытывающих ударное нагружение массивными телами остроугольной формы, важное место занимает кузов транспортных средств. Практика эксплуатации промышленного транспорта в горнодобывающей и металлургической промышленности показывает, что дорогостоящие транспортные средства /вагоны, автомобили, вагонетки/ обычно не выдерживают нормативных сроков эксплуатации. При погрузке скальных пород, руды с помощью мощных экскаваторов конструкция кузова испытывает удары падающих глыб произвольной формы массой до 3 т и более. При этом наблюдаются поломки элементов наддресорного строения и, как следствие, преждевременный выход из строя конструкции в целом.

В настоящее время процессы соударения массивных тел различной конфигурации в зоне контакта изучены далеко не полностью и еще нет достаточно общей инженерной методики расчета конструкции кузовов

Днепропетровский
институт инженеров
железнодорожного транспорта
им. М. В. Кулибина
БИБЛИОТЕКА

транспортных средств на ударные нагрузки, учитывающей как упругие так и неупругие деформации в зоне контакта.

Таким образом актуальность выбранного направления исследования обусловлена широким распространением в инженерной практике ударных воздействий на различные конструкции, потребностью изучения закономерностей контактного взаимодействия тел произвольной формы и ударных процессов, связанной с исследованием напряженно-деформированного состояния элементов сооружений, машин и механизмов, а также необходимостью создания надежных методов расчета.

Цель работы. Разработать инженерную методику исследования процесса ударного нагружения различных конструкций массивными телами остроугольной формы. Решение этой задачи состоит: в установлении аналитическим путем закономерностей упругого и неупругого контактного смятия /разрушения/ острия клина, конуса и n -гранной пирамиды; в получении необходимых для инженерных расчетов аналитических выражений для определения основных параметров упругопластического удара; в применении технической теории удара и теории удара Сирса-Тимошенко к исследованию ударного нагружения элементов конструкций массивными остроугольными телами с учетом местных неупругих деформаций; в проведении экспериментальных исследований закономерностей контактного смятия и процесса удара остроугольных тел с целью проверки теоретических результатов.

Научная новизна работы заключается в постановке задачи и проведении теоретических исследований ударного нагружения элементов конструкций массивными телами остроугольной формы. Получены приближенные аналитические зависимости величины контактного смятия /разрушения/ острия клина, конуса и пирамиды от сжимающей силы, которые подтверждаются экспериментом. Проведено сопоставление величин упругих и неупругих составляющих контактного смятия острия для некоторых материалов. С помощью метода переменного масштаба получено общее

НИИ
ДНУЖТ

решение задачи о прямом центральном соударении двух массивных тел произвольной конфигурации в зоне контакта. Найдены аналитические выражения для основных параметров упругопластического удара. Дано обобщение теории удара Кокса на случай удара жесткопластическим остроугольным телом. Проведено исследование процесса ударного нагружения элементов конструкций массивными телами остроугольной формы с помощью теории поперечного удара С.П.Тимошенко, в которой принят упругопластический характер развития местных деформаций.

Практическое значение. Полученные закономерности контактного смятия /разрушения/ острия клина, конуса и пирамиды могут быть использованы при исследовании соударений упругопластических и хрупких массивных тел различной конфигурации в зоне контакта, поперечного и продольного ударов и ударного нагружения различных механических систем. Приведенные в работе расчетные формулы позволяют определить основные параметры упругопластического процесса при прямом центральном ударе массивных остроугольных тел или тел, контактное смятие которых подчиняется закону Герца /Штаермана/ или установлено экспериментально. Разработанная методика с использованием обобщения теории удара Кокса и теории поперечного удара С.П.Тимошенко позволяет провести расчеты ударного нагружения элементов конструкций падающим грузом в условиях конструкторских бюро заводов и проектно-конструкторских организаций.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены : на 33-й научно-технической конференции /г. Брянск, 1972 г./; на III, X, XI научно-технических конференциях молодежи металлургического завода "Криворожсталь" им. Ленина /г. Кривой Рог, 1976, 1979, 1980 гг./; на Всесоюзной конференции по проблемам механики наземного транспорта /г. Днепропетровск, 1977 г./; на юбилейной научно-технической конференции ДИИТа /г. Днепропетровск, 1980 г./; на Всесоюзной конференции по механике железнодорожного транспорта

НТБ
ДНУЖТ

/г. Днепропетровск, 1980 г./; на пятой тематической конференции "Практическая реализация численных методов расчета инженерных конструкций" /г. Ленинград, 1981 г./; на городском научном семинаре по общей механике /г. Днепропетровск, 1981 г./; на кафедрах сопротивления материалов ЭМСИ /г. Запорожье, 1980 г./ и строительной механики ДИИТа /г. Днепропетровск, 1981 г./ на юбилейной научно-технической конференции "Проблемы развития вагоностроения" /г. Москва, 1983 г./.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из пяти глав, включающих введение и заключение, списка использованной литературы / 242 наименования/ и содержит 149 страниц машинописного текста, 72 рисунка, 3 таблицы и 6 страниц приложений.

Основное содержание работы. Во введении приводится анализ состояния вопроса и краткий обзор литературы по теории удара и методов расчета инженерных конструкций при ударном действии нагрузки, сформулирована основная цель работы и обоснована ее актуальность, дана краткая аннотация всех глав диссертации.

Теория удара получила развитие прежде всего благодаря работам Галилея, Гюйгенса, Ньютона, Д.Бернулли, Навье, Пуассона, Инга, Кокса, Сен-Венана, Буссинеска, Герца, Сирса, Тимошенко и др.

Основные результаты исследования механического удара, изучения поведения материалов и конструкций при динамических нагрузках импульсивного характера содержатся в работах Б.В.Александрова, А.Н.Динника, Н.Н.Давиденкова, В.Гольдсмита, Н.А.Кильчевского, В.Б.Соколинского, Х.А.Рахматуллина, С.П.Тимошенко, Я.Б.Фридмана и др. Эффективные методы расчета элементов конструкций на ударные воздействия на основе отечественного и зарубежного опыта изложены в работах В.В.Багрева, В.Л.Бидермана, И.М.Рабиновича, Н.К.Считко, Е.С.Сорокина, А.П.Филиппова, Я.Г.Пановко и др.

НТБ
ДНУЖТ

Количество исследований по теории удара продолжает непрерывно расти в связи с проблемами, выдвигаемыми развитием новой техники. В этих работах широкое применение получила универсальная теория удара Сирса-Тимошенко. Однако при теоретическом изучении ударных процессов обычно рассматривались только упругие тела, имеющие простую геометрию в контакте. Например, падающий груз произвольной формы аппроксимировался упругим шаром с последующим применением закона Герца. Такой подход нашел отражение в исследованиях ударного нагружения вагонов, проводимых в МИИТе, ДИИТе и др. Основная причина такого ограничения заключается в значительных математических трудностях, возникающих при теоретическом рассмотрении удара упругопластическим /хрупким/ телом произвольной формы и некоторой неопределенности свойств материалов в условиях быстро изменяющихся напряжений.

Местные пластические деформации, возникающие при ударе шаром, рассматривались в работах Л.И.Маламента, Ж.П.Эндрюса, А.В.Крука, Д.Табора, Н.А.Кальчевского и др., в которых использован для решения контактной задачи статический закон Е.Майера.

К новым теоретико-экспериментальным исследованиям в этом направлении следует отнести полумпирическую теорию удара, разработанную Г.С.Батуевым, Д.В.Голубковым, А.А.Бедосовым, А.К.Ефремовым. Теория учитывает местные упругопластические деформации /смятие, внедрение, проникание/, возникающие в зоне контакта соударяющихся тел произвольной конфигурации, и основана на использовании эмпирической аппроксимации силовых характеристик деформированного элемента. Такой же подход используется в механике разрушения горных пород и мерзлых грунтов. Однако установление зависимости контактного смятия от величины сжимающей силы при ударе полумпирическим путем требует проведения трудоемких экспериментов в каждом отдельном случае.

Следовательно, в настоящее время проблема теоретических исследований ударных процессов остается актуальной.

Оригинальные теоретические исследования по вдавливанию шара, плоских штампов в жесткопластическое тело провели Ю.А.Ишлинский, В.В.Соколовский, Л.А.Галин, Д.Д.Ивлев, Прандтль, Мизес, Хилл, Прагер, Шильд и др. Эти исследования могут служить теоретической базой для нахождения предельного контактного давления, вызывающее пластическое течение, и закономерностей контактного смятия аналитическим путем. Соответствующая теория разрушения хрупких тел еще не разработана. Многочисленные экспериментальные исследования хрупкого разрушения в основном были посвящены изучению механических свойств материалов и механизма хрупкого разрушения горных пород при статическом и динамическом вдавливании в них индентора.

Тема настоящей работы возникла как результат многолетних наблюдений при проведении экспериментальных исследований ударного нагружения кузовов серийных и опытных образцов вагонов-самосвалов в естественных условиях их работы. Такие эксперименты проводятся более 10 лет ДИИТом совместно с ВНИИвагоностроения, МИИТом и др. Замечено, что падающие глыбы имеют произвольную форму и могут ударяться острием типа клина, конуса или пирамиды. Во время удара в зоне контакта обязательно происходит пластическое смятие или хрупкое разрушение острых углов. Эти деформации оказывают существенное влияние на характер протекания процесса удара. Таким образом, при исследовании ударного нагружения кузовов транспортных средств, соответствующего действительным условиям эксплуатации вагонов в карьерах, следует принимать во внимание местные неупругие деформации, возникающие при смятии /разрушении/ острия падающего тела.

В данной работе принят ряд упрощений при установлении закономерностей контактного смятия острия упругих, жесткопластических и хрупких тел. Это позволило получить для рассматриваемых задач приближенные инженерные зависимости $\sigma(P)$ /глава II/. Исследования процесса соударения массивных тел остроугольной формы /определение

НТБ
ДНУЖТ

основных параметров удара, см. главу III / проводились без учета волновых процессов и диссипативных сил. Здесь оставлены в силе допущения, принятые в теории удара Герца. Согласно условиям эксплуатации кузовов транспортных средств в работе рассматривались относительные скорости соударения массивных тел, не превышающие 10 м/с. В качестве расчетной схемы инженерных конструкций принимались дискретные системы с конечным числом степеней свободы и системы с распределенными параметрами /глава IV /. Принятый в работе квазистатический подход к изучению ударных процессов и достоверность исходных предположений и теоретических результатов подвергаются соответствующей экспериментальной проверке /глава V /.

ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ КОНТАКТНОГО СМЯТИЯ /РАЗРУШЕНИЯ/ ОСТРОУГОЛЬНЫХ ТЕЛ

Зависимость величины контактного смятия /разрушения/ острия α от сжимающей силы P в общем виде представим так:

$$\alpha(P) = k P^{1/n} \quad / 1 /$$

где K - коэффициент контактной податливости острия деформируемого элемента и n - параметр, которые подлежат определению аналитическим путем.

Упругие тела. Для симметрично сжатого клина приведено решение в перемещениях, выполненное в полярных и прямоугольных координатах. Здесь использованы уравнения плоской деформации теории упругости и известные решения Митчелла для упругого клина в напряжениях и Фламана для полубесконечной пластины единичной толщины, на прямолинейной границе которой приложена сосредоточенная сила. Из полученного решения найдена приближенная, но удобная для применения в задачах об ударе тела ребром зависимость $\alpha(P)$ в виде

$$\alpha(P) = \alpha_0 = \frac{2P(1-\mu^2)}{bE(2\gamma + \sin 2\gamma)} \ln \frac{R \cos \gamma}{\alpha_{пл}} \quad / 2 /$$

НТБ
ДНУЖТ

где α_{nn} - пластическая составляющая смятия /или величина крупного разрушения α_{xp} / острья клина, которая определяется по формулам, приведенным ниже; 2γ - полный угол острья; b - толщина клина.

В случае вдавливания клина острием в упругую плиту толщиной H общая их контактная податливость определяется выражением

$$k_y = \frac{2}{b} \left[\frac{(1-\mu_1^2)}{E_1(2\gamma + \mu_1 \pi 2\gamma)} b_1 \frac{R \cos \gamma}{\alpha_{nn}} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} b_2 \frac{H \operatorname{ctg} \gamma}{2 \alpha_{nn}} \right], \quad / 3 /$$

где E_1, μ_1, E_2, μ_2 - соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала клина и плиты; R - расстояние от вершины до центра тяжести клинообразного тела. Податливость плиты учитывается при условии, что $H \geq 2 \alpha_{nn} \operatorname{ctg} \gamma$, поскольку $\alpha > 0$.

Для упругого кругового конуса использован конечный результат решения Н.Я. Штермана и А.И. Лурье.

Для n -гранной правильной пирамиды и кругового конуса имеет место соотношение

$$\operatorname{ctg} \gamma_k = \sqrt{\frac{n}{2} \operatorname{tg} \frac{\pi}{n}} \operatorname{ctg} \gamma_n, \quad / 4 /$$

где γ_k и γ_n - углы наклона образующей конуса и грани пирамиды к оси. Здесь конус и пирамида такие, что их площади в поперечных сечениях, расположенные на одинаковом расстоянии от вершины, равны между собой. Заметим, что при $n \rightarrow \infty$ из /4/ следует $\gamma_n \rightarrow \gamma_k$.

Воспользовавшись соотношением /4/ и решением для конуса, получим приближенную зависимость $\alpha(P)$ при вдавливании острья n -гранной пирамиды в упругую плиту

$$\alpha_y = \left[\frac{2}{2} \sqrt{\frac{n}{2} \operatorname{tg} \frac{\pi}{n}} \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \operatorname{ctg} \gamma_n \right]^{1/2} P^{1/2} \quad / 5 /$$

Заметим, что для упругого клина, в отличие от конуса и пирамиды, контактное смятие острья не обладает локальным свойством, т.е. зависит от обоих размеров клинообразного тела. В формуле / I / для клина $n = 1$, для конуса и пирамиды $n = 2$.

НТБ
ДНУЖТ

Жесткопластические тела. Приближенные решения отыскивались путем построения возможной конфигурации пластической области, применения экстремальных принципов теории идеальной пластичности и использования условия полной пластичности /полупластичности/, предложенного Хааром и Карманом. В процессе симметричного сжатия острия жестким штампом образуется геометрически подобная пластическая область. При этом по площади контакта действует предельное среднее давление p_T , которое вызывает неустановившееся движение пластической деформации.

Для клина получено точное решение в рамках теории идеальной пластичности, вытекающее из альтернативных решений классических задач Прандтля и Хилла:

$$\alpha_{кл} = \bar{\psi} \frac{ctg \gamma}{4b p_T} P \quad / 6 /$$

где $\bar{\psi}$ - коэффициент, зависящий от угла наклона боковой поверхности пластической области ψ , который, в свою очередь, зависит от угла γ , от выбора кинематически возможного поля скоростей пластического течения и линий скольжения, а также от условия действия диссипативных сил в плоскости контакта. Величины $\bar{\psi}$ и p_T определяются по соответствующим выражениям в каждом конкретном случае. Например, для идеально шероховатого штампа, когда в плоскости контакта действует трение $\tau = k_T$, согласно построениям Прандтля имеем

$$\bar{\psi} = (1 + 2 \sin \psi) / (1 + \sin \psi); \quad p_T = 2k_T (1 + \psi),$$

где γ и ψ связаны соотношением $tg \gamma = (1 + 2 \sin \psi)^2 / 4 \cos \psi (1 + \sin \psi)$
 k_T - условная пластическая постоянная материала, которая при условии текучести Мизеса определяется выражением

$$k_T = \frac{1}{\epsilon^* \sqrt{3}} \int_0^{\epsilon^*} G(\epsilon) d\epsilon, \quad / 7 /$$

где ϵ^* - наибольшая относительная деформация при пластическом смятии деформированного элемента. При отсутствии трения /штамп идеально гладкий/ используется построение Хилла.

НТБ
ДНУЖТ

Построения Прандтля и Хилла соответствуют условиям $\operatorname{tg} \gamma > 1/4$ и $\operatorname{tg} \gamma > 1/2$. Поэтому для более острых углов клина предложено решение, в котором пластическая область принимает форму параллелепипеда /вместо усеченного клина/. Выражение /6/ и здесь остается в силе, но теперь $\bar{\psi} = 1$, так как $\psi = 0$.

Для кругового конуса найдено приближенное решение, из которого следует, что

$$\alpha_{\text{пл}} = \bar{\psi} \frac{\operatorname{ctg} \gamma}{\sqrt{1 \rho_T}} P^{1/2} \quad / 8 /$$

Если трение в плоскости контакта отсутствует, то γ и ψ связаны соотношением $\operatorname{tg} \gamma = (1 + \sin \psi) / \cos \psi (3 + 3 \sin \psi + \sin^2 \psi)$, $\bar{\psi} = (2 + 3 \sin \psi + \sin^2 \psi) / (3 + 3 \sin \psi + \sin^2 \psi)$ и $\rho_T = 2k_T (1 + 2 \sin \psi + \frac{1}{3} \sin^2 \psi)$. Пластическая область имеет вид усеченного конуса, если $\operatorname{tg} \gamma > 1/3$. Коэффициент $\bar{\psi}$ может принимать значения $2/3 \leq \bar{\psi} \leq 12/13$. Если же $\operatorname{tg} \gamma < 1/3$, то $\psi = 0$ и $\bar{\psi} = 2/3$, а пластическая область принимает форму цилиндра.

Закономерность пластического смятия острия правильной n -гранной пирамиды приближенно описывается выражением

$$\alpha_{\text{пл}} = \bar{\psi} \frac{\operatorname{ctg} \gamma}{\sqrt{n \operatorname{tg} \frac{\pi}{n} \rho_T}} P^{1/2} \quad / 9 /$$

Здесь величины $\bar{\psi}$ и ρ_T определяются с учетом соотношения /4/ так же, как и для конуса.

Хрупкие тела. Предложенные в работе механизмы хрупкого разрушения острия клина, конуса и пирамиды являются приближенными и базируются на общих представлениях механики хрупкого разрушения, критериях прочности горных пород, опытных наблюдениях характера разрушения угольных тел при статических и динамических испытаниях образцов скальных пород /кварцит, гранит, железная руда/ и образцов, изготовленных из чугуна, льда и искусственных материалов /гипса, цементного камня, бетона/. Принимается во внимание два типа разрушения острия:

НТБ
ДНУЖТ

за счет потери контактной прочности и в результате среза по поверхности наибольшего сдвига.

Для определения величины хрупкого разрушения острия при симметричном сжатии жестким штампом найдены следующие приближенные выражения: для клина

$$\alpha_{xp} = \frac{1}{2\beta} \left[\frac{\operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\beta}{2} \right)}{\rho_{xp}} + \frac{\operatorname{ctg} \beta}{2k_{xp} \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right)} \right] P, \quad /10/$$

для кругового конуса

$$\alpha_{xp} = \left[\frac{\operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\beta}{2} \right)}{\sqrt{\pi} \rho_{xp}} + \frac{\operatorname{ctg} \beta}{2 \cos^{1/2} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right) \sqrt{\pi} k_{xp}} \right] P^{1/2}, \quad /11/$$

для n -гранной пирамиды

$$\alpha_{xp} = \left[\frac{\operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\beta_n}{2} \right)}{\sqrt{\pi} \rho_{xp}} + \frac{\sqrt{\frac{n}{\pi}} \operatorname{tg} \frac{\pi}{n} \operatorname{ctg} \beta_n}{2 \cos^{1/2} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta_n}{2} \right) \sqrt{\pi} k_{xp}} \right] P^{1/2}, \quad /12/$$

где ρ_{xp} - предельное среднее давление на площади контакта, которое вызывает хрупкое разрушение материала острия из-за потери контактной прочности; k_{xp} - предельная величина сопротивления сдвигу, при которой происходит срез. За основу принята теория прочности Мора, получившая широкое применение в механике горных пород, и критерий контактной прочности по Л.И.Барону. В качестве исходных данных могут быть использованы сведения о прочностных свойствах материалов /верхняя граница/, широко представленные в справочной литературе.

В конце главы проведено сравнение величин упругих и пластических составляющих контактного смятия острия упругопластических тел и упругой деформации с величиной хрупкого разрушения острия хрупких тел. Заметим, что показатель степени $1/n$ в выражении /1/ не зависит от принятой модели материала. Тогда закономерность контактного смятия острия упругопластических тел /аналогично и для хрупких тел/ представим в виде

$$\alpha = k_{xy} (1 + \eta) P^{1/n} \quad /13/$$

НТБ
ДНУЖТ

где $K_{нв}$ - коэффициент неупругой контактной податливости острия /пластическому смятию или хрупкому разрушению/; $\varphi = K_u / K_{нв}$ - коэффициент, учитывающий величину упругой деформации.

В работе показано, что величина пластического смятия и хрупкого разрушения острия значительно превышают упругую составляющую в широком диапазоне значений угла δ' . Причем доля упругой составляющей уменьшается с уменьшением угла δ' . Все компоненты контактного смятия острия, за исключением упругого клина, имеют локальный характер. Зависимость $\alpha(P)$ для упругого, жесткопластического и хрупкого конуса можно получить из зависимости $\alpha(P)$ для n -гранной пирамиды из соответствующего материала путем предельного перехода. Полученные в работе закономерности контактного смятия /разрушения/ острия подтверждаются экспериментом и могут быть использованы в инженерных расчетах. Заметим, что для упругопластического конуса в выражении /13/ показатель степени $1/n = 0,5$. Полуэмпирическая теория удара, разработанная в МВТУ им.Баумана, для этого случая дает несколько завышенный результат, а именно $0,55 \pm 0,6$. Это можно объяснить тем, что там в опытных конических образцах имелась цилиндрическая часть.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СОУДАРЕНИЯ МАССИВНЫХ ТЕЛ

В данной главе выполнены теоретические исследования соударения массивных упругопластических /хрупких/ тел, одно из которых ударяется острием. Отдельно рассмотрены удар ребром и удар острием конуса /пирамиды/. Согласно эмпирическому закону Герстнера приняты независимое развитие упругих и пластических деформаций при нагружении /активный процесс/ и действие лишь упругих деформаций при разгрузке /пассивный процесс/. Получены аналитические выражения для определения основных параметров ударного процесса, таких как максимальное значение силы удара P_{max} , наибольшая величина контактного смятия α_{max} ,

продолжительность активного и пассивного процессов соударения

$$T = T_a + T_n, \text{ коэффициент восстановления скорости } e$$

Рассмотрен общий случай прямого центрального соударения массивных тел произвольной конфигурации в зоне контакта. Процесс соударения можно описать, с учетом выражения /13/, существенно нелинейным дифференциальным уравнением

$$\frac{d^2 \alpha(t)}{dt^2} + \frac{[\alpha(t)]^n}{m [k_{ny} (1+\eta)]^n} = 0, \quad /14/$$

где m - приведенная масса соударяющихся тел.

Решение уравнения /14/ при начальных условиях $t = 0; \alpha(0) = \alpha_0; \dot{\alpha}(0) = V_0$ выполнено с помощью метода переменного масштаба, предложенного Н.Г.Бондарем. В результате получены общие выражения для определения основных параметров ударного процесса:

$$P_{max} = \left[\frac{\alpha_0^{n+1}}{[k_{ny} (1+\eta)]^{n+1}} + \frac{(n+1)m V_0^2}{2 k_{ny} (1+\eta)} \right]^{\frac{n}{n+1}}; \quad /15/$$

$$\alpha_{max} = \left[\alpha_0^{n+1} + \frac{n+1}{2} m k_{ny}^n (1+\eta)^n V_0^2 \right]^{\frac{1}{n+1}} \quad /16/$$

$$T = \left\{ \frac{n+1}{2m [k_{ny} (1+\eta)]^n} \left[\alpha_0^{n+1} + \frac{n+1}{2} m k_{ny}^n (1+\eta)^n V_0^2 \right]^{\frac{n+1}{n+1}} \right\}^{\frac{1}{2}} \frac{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{1}{n+1}\right)}{2 \Gamma\left(\frac{n+3}{2n+2}\right)}; \quad /17/$$

$$e = \left(\frac{\eta}{1+\eta} \right)^{1/2}, \quad /18/$$

где $\Gamma(n)$ - гамма-функция.

Выражения /15/-/18/ являются решением задачи не только о соударении упругопластических и хрупких тел остроугольной формы, но и любой другой задачи типа задачи Герца. Например, при $n = 3/2$ получим решение задачи Герца, при $n = (2n+1)/2n$ находим решение задачи Штаермана. Формулы /15/-/18/ можно использовать при соударении тел, для которых зависимость $\alpha(P)$ установлена экспериментальным путем.

Длительность активного и пассивного процессов определяется одним выражением $/I7/$, для чего необходимо подставить соответствующие начальные условия, учитывающие пластический или хрупкий характер разрушения в зоне контакта. Если для конкретной задачи компоненты контактного смятия имеют одинаковую степенную зависимость, т.е. в выражении $/I/ n = const$, то отношение длительности пассивного процесса к длительности активного будет равно коэффициенту восстановления $/I8/$, который, в свою очередь, зависит от коэффициента η

Показано, что в зависимости от принятой модели материала соударяющихся тел, их формы в зоне контакта и значения η протекание ударных процессов может принимать качественно различный характер.

Сравнения теоретических и экспериментальных данных указывают на хорошее совпадение формы ударного импульса $\{t\}$. Для основных параметров удара теоретические результаты отличались от экспериментальных обычно в пределах разброса опытных данных между одинаковыми образцами. Коэффициент восстановления оказался несколько завышенным /до 12%/. Это можно объяснить тем, что в данной работе принята во внимание лишь энергия диссипации остаточных деформаций и не учтены потери энергии удара на волновые процессы, нагревание и др.

На основании энергетических соотношений жесткопластического удара получены удовлетворительные результаты для максимальной величины ударной силы и пластического смятия острия.

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА МЕСТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

В детерминированной постановке рассмотрен центральный поперечный удар падающим остроугольным телом по конструкциям, приведенным к дискретным моделям или к моделям с распределенными параметрами.

В начале главы проведено обобщение теории удара Кокса, в котором учитывается фактическая величина местных неупругих деформаций, возни-

НТБ
ДНУЖТ

кающих при ударе падающим жесткопластическим телом остроугольной формы. В результате коэффициент динамичности определяется следующим выражением:

$$k_{\text{дин}} = 1 + \sqrt{1 + V_0^2 / g f_{\text{ст}} (1 + \xi_1 + \xi_2) (1 + \beta)}, \quad /19/$$

где $f_{\text{ст}}$ - перемещение первоначальной точки контакта конструкции при статическом приложении силы тяжести груза; g - ускорение силы тяжести; V_0 - относительная скорость соударения; ξ_1 и ξ_2 - соответственно отношения местных неупругих податливостей острия вагона и конструкции к общей упругой податливости конструкции в точке удара; β - отношение приведенной массы конструкции к массе падающего тела. Из формулы /19/ следует, что местные неупругие деформации оказывают влияние на величину коэффициента динамичности подобно приведенной массе конструкции. Отмечается, что теория удара Кокса можно применить при произвольном соотношении масс β , если в зоне контакта возникает пластическое смятие /внедрение/ или хрупкое разрушение острия, которое значительно превышает величину местной упругой деформации.

Затем рассмотрены конструкции, расчетная схема которых представлена системой с конечным числом степеней свободы с линейными или нелинейными деформируемыми элементами. Исследование процесса ударного нагружения сведено к решению системы $n+1$ дифференциальных уравнений, описывающих движение элементов конструкции и ударяемого тела при их взаимодействии. При нагружении /активный процесс/ учитываются упругие деформации и пластическое смятие или хрупкое разрушение в контакте, а при разгрузке /пассивный процесс/ только упругие деформации. Дополнительное уравнение появляется за счет присоединенной массы ударяющего остроугольного тела и его контактной податливости и входит в динамическую систему при наличии контакта. При повторных ударах неупругие деформации учитываются лишь тогда, когда ударная сила превысит P_{max} из предыдущих соударений. В качестве примера рассмотрены задачи ударного нагружения кузова вагона-самосвала.

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В.Лазаряна

6688a-

НТБ
ДНУЖТ

Полученные в работе закономерности контактного смятия /глава II/ позволяют применить теории удара Сирса-Тимошенко к исследованию ударного нагружения инженерных конструкций массивными телами остроугольной формы. Основное уравнение теории поперечного удара имеет вид

$$V_0 t + \frac{1}{2} g t^2 - \frac{1}{M} \int_0^t dt \int_0^{t_1} P(t_2) dt_2 = \alpha(P) + W(x, y, P, t). \quad /20/$$

Здесь перемещение центра массы ударяющего тела /левая часть/ приравнена к местному смятию и перемещению конструкции в точке удара /правая часть/. При решении задач, в которых падающее тело ударяется острием конуса /пирамиды/ либо ребром, в функциональном уравнении /20/ слагаемое $\alpha(P)$, обычно представляющее собой закон Герца для шара $\alpha(P) = K_y P^{2/3}$, следует заменить выражением /13/, соответствующим типу острия и принятой модели материала. Рассмотрен удар падающим телом остроугольной формы по прямоугольной шарнирно опертой по контуру пластине, лежащей на упругом основании /расчетная схема пола кузова вагона/. Алгоритм, указанный С.П.Тимошенко, обобщен на случай упругопластического удара. Решение осуществлялось с помощью составленной программы, которая реализована на ЭЕМ. С помощью разработанной методики исследован процесс удара при изменении следующих параметров: скорости соударения /высоты падения груза/ $100 \leq V_0 \leq 1000 \text{ см/с}$, массы остроугольного тела от 1,0 до 7,0 т, величины полного угла в острие $6^\circ \leq 2\psi \leq 174^\circ$, толщины пластины $14 \leq \delta \leq 42 \text{ мм}$, коэффициента постели амортизирующего слоя $10 \leq k \leq 2000 \text{ Н/см}^3$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой главе представлены результаты экспериментальных исследований закономерностей контактного смятия /разрушения/ острия клина, конуса и пирамиды, а также процесса удара упругопластическим /хрупким/ остроугольным телом по упругой плите и прямоугольной пластине.

НТБ
ДНУЖТ

Опыты проводились в лаборатории динамики и прочности подвижного состава кафедры строительной механики ДИИТа. Образцы из отожженной малоуглеродистой стали, чугуна, цементного камня, гипса, бетона, железной руды и кварцита подвергались как статическому сжатию, так и ударному нагружению. В начале и в конце опытов с каждого образца снимались необходимые размеры. Наблюдаемые в опытах конфигурация пластической области при смятии острия и характер хрупкого разрушения испытуемых образцов подтверждают теоретические построения механизма разрушения острия.

В процессе статического сжатия регистрировалась зависимость величины упругопластического смятия /разрушения/ острия α от контактного усилия P с помощью самописца. Кроме того, для учета люфтов и упругих деформаций испытательной машины снимались так называемые "машинные диаграммы".

Динамические опыты проводились на специально изготовленных для этих целей установках. На одной из них проводился прямой центральный удар образца острием по гладкой закаленной поверхности массивной стальной плиты. Процесс соударения фиксировался на осциллограмме. На другой установке, имитирующей пол кузова вагона-самосвала /масштаб 1:5 /, проводились статические и ударные нагружения прямоугольной шарнирно опертой по контуру пластины, лежащей на амортизирующем слое из дерева, пенополиэтилена и пористой резины.

Совпадение результатов теоретических и экспериментальных исследований ударных процессов вполне удовлетворительное.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

I. Разработана методика исследования ударного нагружения инженерных конструкций массивными упругопластическими и хрупкими телами остроугольной формы, которая позволяет: а/ аналитическим путем найти закономерность контактного смятия острия тупого клина, кругового

НТБ
ДНУЖТ

конуса и n -гранной пирамиды; б/ определить основные параметры соударения массивных тел произвольной формы в зоне контакта; в/ применить теорию удара Сирса-Тимошенко к изучению процесса ударного нагружения конструкций остроугольными телами; г/ исследовать напряженно деформированное состояние элементов конструкций при ударных нагрузках.

2. На основании теоретических и экспериментальных исследований можно заключить, что если тело ударяется острием о поверхность другого тела из такого же или более прочного материала, то обязательно будет иметь место пластическое смятие или хрупкое разрушение острия. Поэтому при исследовании ударного нагружения конструкций остроугольными телами следует принимать во внимание местные неупругие деформации, которые оказывают существенное влияние на характер процесса удара.

3. Получены аналитические зависимости величины упругого, пластического смятия и хрупкого разрушения острия клина, конуса и пирамиды от контактного усилия, которые подтверждаются экспериментом. Показатель степени $1/n$ определяется конфигурацией тела в зоне контакта и не зависит от принятой модели материала. Предложен механизм хрупкого разрушения острия и способ определения предельного среднего контактного давления. Показано, что с уменьшением угла γ величина пластического смятия /хрупкого разрушения/ острия значительно превосходит упругую составляющую. Контактное смятие /разрушение/ острия, за исключением упругого клина, имеет локальный характер.

4. С помощью метода переменного масштаба найдено точное решение задачи о центральном прямом соударении упругопластических /хрупких/ тел произвольной конфигурации в зоне контакта, для которых справедлива зависимость $\alpha(P) = kP^{1/n}$, $n \geq 1$. Получены общие аналитические выражения для определения максимальной силы удара и величины контактного смятия, продолжительности активного и пассивного процессов удара, а также коэффициента восстановления. Установлено, что для рассматри-

НТБ
ДНУЖТ

ваемых задач отношение длительности пассивного процесса к длительности активного равно коэффициенту восстановления, который зависит от отношения коэффициентов упругой и неупругой податливостей острия контактному смятию. Приведены расчетные формулы для определения основных параметров процесса соударения упругих, жесткопластических, упругопластических и хрупких тел, когда одно из них ударяется ребром или острием конуса /пирамиды/ о поверхность другого.

5. На основании энергетических соотношений жесткопластического удара получены выражения для максимальной величины ударной силы и пластического смятия острия клина.

6. Исследование ударного нагружения инженерных конструкций массивными телами остроугольной формы можно проводить с помощью теории поперечного удара С.П.Тимошенко. Для этого необходимо заменить в функциональном уравнении слагаемое, учитывающее местное смятие по Герцу, закономерностью контактного смятия /разрушения/ острия, полученной в данной работе или найденной полуэмпирическим путем. Исследован упругопластический процесс ударного нагружения пола кузова вагона как пластины, лежащей на упругом основании. С этой целью разработан алгоритм и составлена программа для ЭВМ, в которых учтен упругопластический характер развития местных деформаций.

7. Дано обобщение теории удара Кокса. В полученном выражении для коэффициента динамичности учитываются неупругие деформации возникающие в зоне контакта.

8. Экспериментальные данные удовлетворительно подтверждают теоретические исследования ударных процессов.

9. Разработанная методика применена при исследовании процесса ударного нагружения кузовов транспортных средств и принята к использованию во Всесоюзном научно-исследовательском институте вагоностроения, а также в Калининградском и Днепропетровском вагоностроительных заводах.

НТБ
ДНУЖТ

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Барбас И.Г., Островерхов Н.П. К вопросу об учете местных деформаций при ударном нагружении вагона-самосвала /думпкара/. - В кн.: Материалы 33-й научно-технической конференции. -Врянск, БИТМ, 1972, с.26.

2. Барбас И.Г., Островерхов Н.П. О применении метода приведения к исследованию ударного нагружения инженерных конструкций. - В кн.: Исследования по динамике рельсовых экипажей: Сб.научн.тр., вып. 152. - Днепропетровск, ДИИТ, 1973, с.160-165.

3. Барбас И.Г., Курсов Ю.Г., Логинов А.И., Островерхов Н.П. Исследование напряженного состояния верхней рамы думпкара повышенной прочности для тяжелых условий работы: Труды ВНИИвагоностроения, вып.22. - М.: ВНИИВ, 1973, с.40-49.

4. Барбас И.Г., Курсов Ю.Г., Логинов А.И., Островерхов Н.П. Экспериментальное исследование напряженного состояния модели верхней рамы думпкара при ударе падающим грузом: Труды ВНИИвагоностроения, вып.24. - М.: ВНИИВ, 1974, с.96-102.

5. Барбас И.Г., Вавилов Е.Н., Курсов Ю.Г., Логинов А.И., Островерхов Н.П., Панасенко В.И. О применении физического моделирования и исследованию ударного нагружения думпкаров. - В кн.: Исследование колебаний подвижного состава: Межвуз.сб.научн.тр., вып. 190/23. - Днепропетровск, ДИИТ, 1977, с.93-95.

6. Барбас И.Г., Вавилов Е.Н., Курсов Ю.Г., Логинов А.И., Островерхов Н.П. Экспериментальные исследования опытных образцов думпкаров для тяжелых условий работы. - В кн.: Проблемы механики наземного транспорта: Межвуз.сб.научн.тр., вып. 199/25. -Днепропетровск, ДИИТ, 1978, с.97-102.

7. Барбас И.Г., Островерхов Н.П., Татарчук В.В. Исследование с помощью физической модели влияния конструкции пола думпкара на амортизацию удара. - Днепропетровск, 1978. - 7с./Рукопись представлена Днепропетр.и-том инж. ж.-д. трансп. Деп. в ЦНИИТЭИ МПС, 1978, №773-78.

НТБ
ДНУЖТ

8. Барбас И.Г., Островерхов Н.П. К вопросу о нагружении карьерного транспорта остроугольными упругопластическими телами.- В кн.: Проблемы динамики и прочности железнодорожного подвижного состава: Межвуз. сб.научн.тр., вып. 220/28.- Днепропетровск, ДИИТ, 1981, с.84-87.

9. Бадикова Л.С., Бублик Л.С., Кострица С.А., Островерхов Н.П., Таряник В.М. Об исследовании напряженного состояния грузовой вагонетки при ударе сосредоточенным грузом.- В кн.: Проблемы динамики и прочности железнодорожного подвижного состава: Межвуз.сб.научн.тр., вып. 210/27.- Днепропетровск, ДИИТ, 1980, с.102-105.

10. Островерхов Н.П. Об ударном нагружении думпбаров массивными упругопластическими телами.- В кн.: Проблемы динамики и прочности железнодорожного подвижного состава: Межвуз.сб.научн.тр., вып.210/27.- Днепропетровск, ДИИТ, с.105-113.

11. Островерхов Н.П. Об исследовании ударного нагружения думпбаров хрупкими и упругопластическими телами.- В кн.: Проблемы механики железнодорожного транспорта: Тез.докл.Всес.конф.- Киев: Наукова думка, 1980, с.104.

12. Островерхов Н.П. Статическая и динамическая контактная задача нагружения кузова вагона упругопластическими телами с острием типа клина.- В кн.: Проблемы динамики и прочности железнодорожного подвижного состава: Межвуз.сб.научн.тр., вып. 220/28.- Днепропетровск, ДИИТ, 1981, с.87-97.

Островерхов Николай Петрович



Ударное нагружение инженерных конструкций массивными телами остроугольной формы

01.02.03- Строительная механика

Подписано к печати 11.03.83. БТ 60086. Формат 60x84 1/16.

Бумага для множительных аппаратов. Ротапринт. Усл.печ.л.1,3.

Уч.-изд.л.1. Заказ № 849. Тираж 100экз. Бесплатно.

Участок оперативной полиграфии ДИИТа. 320629, ГСП, Днепропетровск, Ю, ул.Акад.В.А.Лазаряна, 2.

НТБ
ДНУЖТ