

А. А. ЛЯПИН, А. Н. РУМЯНЦЕВ, Т. Г. РУМЯНЦЕВА,
М. Г. СЕЛЕЗНЕВ

ОСОБЕННОСТИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МАССИВНОГО ШТАМПА НА ДВУСЛОЙНОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО С ЗАГЛУБЛЕННОЙ ПОЛОСТЬЮ

Рассматриваются задачи о нестационарном воздействии жесткого массивного штампа с плоским основанием на упругое двуслойное полупространство, содержащее заглубленную цилиндрическую или сферическую полость или упругое включение. Разработан алгоритм решения задач в плоской, осесимметричной и пространственной постановках. Используется вариант метода гармонического анализа [1], при построении решений задач об установившихся гармонических колебаниях массивного штампа на заданных гармониках реализован аналитико-численный метод [2-4].

Проведен численный анализ осесимметричной, плоской и антиплоской задач, на основе результатов которого сделаны выводы об особенностях взаимодействия массивного штампа с средой, обусловленные слоистостью и наличием заглубленной неоднородности.

1. На поверхности двуслойного полупространства, характеризуемого параметрами $h, \rho_j, \lambda_j, \mu_j, j=1,2$ (соответственно толщина слоя, плотность и параметры Ляме слоя $j=1$ и полупространства $j=2$) расположен штамп массы m , занимающий область Ω (полоса шириной $2a$ или круг радиуса a). В подстилающем упругом полупространстве расположено упругое включение в виде полого цилиндра или сферическая полость радиуса s с центром, заглубленным на величину H . Контакт штампа со средой предполагается безотрывным, трение отсутствует. Движение возбуждает импульс силы $P(t)$ длительностью t_0 , действующим на штамп. Вне отрезка времени $[0, t_0]$ силовое воздействие отсутствует.

Построение решения сформулированных краевых задач динамической теории упругости проводится по следующей схеме. Заданный импульс силы на временном интервале $[0, T]$ раскладывается в ряд по гармоническим функциям с заданной степенью точности

$$P(t) = \sum_{k=0}^N P_k \sin \omega_k t$$

Интервал времени T определяется из размеров области, в которой требуется исследовать волновые явления и учитывает число переотражений на ее границах.

Решение задачи об установившихся гармонических колебаниях массивного штампа на поверхности исследуемой области на частотах ω_k при воздействии осциллирующей силы P_k строится по следующей схеме. Рассматривается задача о вибрации невесомого штампа на поверхности среды заданной структуры методом работы [2]. В результате получаем закон распределения контактных напряжений $q_k^*(x)$ ($q_k^*(r)$ — для осесимметричной задачи), соответствующий заданной единичной амплитуде смещения подошвы штампа. Величину амплитуды смещения массивного штампа под действием силы P_k на частоте ω_k получаем в виде

$$w_k = \frac{P_k}{R_k + m\omega_k^2}, \quad R_k = \int_{-a}^a q_k^*(x) dx, \quad \left(R_k = \int_0^a q_k^*(r) r dr \right)$$

Амплитудно-временная характеристика смещения штампа при воздействии импульса силы $P(t)$ определяется соотношением

$$w(t) = - \sum_{k=0}^N \text{Im}(w_k \exp(-i\omega_k t))$$

Закон распределения контактных напряжений в различные моменты времени $t \in [0, T]$ определяется соотношением

$$q(x, t) = - \sum_{k=0}^N \text{Im}(w_k q_k^*(x) \exp(-i\omega_k t))$$

Описанный алгоритм реализован на ЭВМ прикладными программами, позволившими провести численный анализ основных характеристик нестационарного контактного взаимодействия массивного штампа с упругой слоистой многосвязной

областью. Подробно изучены амплитудно-временные характеристики движения штампа, их связь с амплитудно-частотной характеристикой массивного штампа на соответствующей упругой среде и спектром импульса силового воздействия. Изучено влияние заглубленной полости или упругого включения на закон распределения контактных напряжений под штампом как при центральном, так и несимметричном расположении неоднородности, в различные моменты времени.

2. Из результатов проведенного анализа следует, что амплитудно-временная характеристика движения штампа на поверхности упругой среды данной структуры определяется соотношением амплитудно-частотной характеристики движения штампа на поверхности области, получаемой при решении гармонической задачи [2] со спектром сигнала. Наличие АЧХ взаимодействия штампа с конкретной структурой и знание спектрального состава сигнала позволяют определить основные качественные характеристики амплитудно-временного движения штампа.

Наличие заглубленной полости или упругого включения приводят к значительному изменению (в основном в сторону уменьшения) величины резонанса на низшей частоте, особенно при наличии ограниченного резонанса в структуре, всегда имеющего место, если жесткость слоя не превышает жесткости подстилающего полупространства. При этом возникают дополнительные всплески на амплитудно-временной характеристике, обусловленные повторными отражениями волн от неоднородности. Эти всплески имеют относительно малую амплитуду, падающую с кратностью переотражений.

Анализ закона распределения контактных напряжений в различные моменты времени показал следующее. В начальный момент движения штампа (малые времена) закон распределения контактных напряжений близок к статическому. С ростом времени нарастают искажения, обусловленные, в основном, развитием волновых явлений и приходом отраженных и переотраженных от границы неоднородности волн. При близком к центральному расположению полости (включения) входящие к подошве штампа отраженная и переотраженные волны определяют изменение амплитуды возникающих контактных напряжений, но слабо влияют на закон распределения контактных напряжений. При нецентральном расположении полости по отношению к штампу с момента прихода и при прохождении отраженных и переотраженных волн происходит искажение симметрии в картине распределения контактных напряжений, причем величина асимметрии пропорциональна амплитуде входящих отраженных и переотраженных волн. В случае «широкого» штампа искажения более выражены, появляется также достаточно заметная осциллирующая составляющая в контактных напряжениях. Последнее в значительной степени связано с развивающимися в области волновыми явлениями.

Существенно влияние амплитудно-частотной характеристики движения штампа при задании режима гармонических установившихся колебаний на изменение закона распределения контактных напряжений во времени, особенно в случае, когда спектр воздействующего импульса достаточно высокочастотен или широкополосен. Последнее имеет место в случае, когда скорости распространения волн в поверхностном слое меньше, чем в подстилающем полупространстве. В этом случае амплитудно-частотная характеристика движения штампа содержит ограниченные резонансы, тем более выраженные и высокочастотные, чем контрастнее жесткости слоя и полупространства. В этом случае заметный вклад в закон движения штампа вносят высокочастотные составляющие (гармоники, для которых размер штампа превосходит длину упругих волн в среде). Закон распределения контактных напряжений в этом случае уже при относительно малых временах заметно отличается от статического и довольно быстро изменяется во времени.

В случае, когда спектр сигнала содержит относительно низкие частоты и амплитудно-частотная характеристика движения штампа при гармоническом возбуждении не имеет выраженных ограниченных резонансов (однородное полупространство, двуслойное полупространство с относительно «толстым» верхним слоем, двуслойное полупространство с «жестким» верхним слоем) квазистатический закон распределения контактных напряжений сохраняется практически во все время движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боев С. И., Селезнев М. Г. Об одном подходе в нестационарных задачах теории упругости // Изв. СКНЦ ВШ. Сев.-Кавк. науч. центра высш. шк. естеств. науки. 1989. № 2. С. 76–81.
2. Румянцева Т. Г., Селезнев М. Г., Чепиль М. В. Динамическая контактная задача для двуслойного полупространства с полостью // ПММ. 1989. Т. 53. Вып. 2. С. 348–351.
3. Колодяжная Г. Е., Селезнев М. Г., Селезнева Т. Н. Задача о воздействии равномерной движущейся осциллирующей нагрузки на упругое полупространство, содержащее заглубленную цилиндрическую полость // Изв. АН СССР. МТТ. 1987. № 6. С. 83–88.
4. Румянцева Т. Г., Селезнева Т. Н., Селезнев М. Г. Пространственная задача об установившихся колебаниях упругого полупространства со сферической полостью // ПММ. 1986. Т. 50. Вып. 4. С. 651–656.

Ростов н/Д

Поступила в редакцию
29.VIII.1990