

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
имени М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

КОПОРУЛИН Владимир Львович

УДК 539.3:

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ
СЖАТЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИН С ПРОДОЛЬНЫМИ РЕБРАМИ
НА ОСНОВЕ УТОЧНЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

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 - 1987

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Днепропетровском ордена Трудового Красного Знамени государственном университете имени 300-летия воссоединения Украины с Россией и в Днепропетровском ордена Трудового Красного Знамени институте инженеров железнодорожного транспорта имени М.И.Калинина

Научные руководители - доктор технических наук,
профессор ГУДРАМОВИЧ В.С.,
кандидат технических наук,
доцент КОЛОДЯЖНЫЙ А.П.

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук,
профессор ПАВЛЕНКО А.В.,
кандидат технических наук,
доцент КОНАШЕНКО С.И.

Ведущая организация - Институт проблем машиностроения
АН УССР (г.Харьков)

Защита диссертации состоится "15" октября 1987 г.
в 15 часов на заседании специализированного совета
КП4.07.02 по присуждению ученой степени кандидата техни-
ческих наук в Днепропетровском институте инженеров желез-

Поверніть книгу не пізніше зазначеного терміну.

про-
орта

НТБ
ДНУЖТ П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Тонкостенные силовые конструкции типа пластин, подкрепленных ребрами, широко используются при создании многих образцов современной техники, прежде всего таких ее отраслей как промышленное и гражданское строительство, сельскохозяйственное и транспортное машиностроение, авиа-, судо- и мостостроение. Несущая способность таких конструкций существенно определяется их устойчивостью, оценка которой имеет важное практическое значение.

Создание новых, все более сложных конструкций из современных материалов, ужесточение весовых ограничений и условий эксплуатации требуют постоянного совершенствования методов расчета и более полного, уточненного исследования потери устойчивости. Кроме того, существует ряд малоизученных вопросов, например, устойчивость нерегулярно подкрепленных пластин, которые могут служить несущими элементами реальных конструкций, сравнение по эффективности различных типов нерегулярного подкрепления с традиционным регулярным.

Особое значение полнота и точность информации о потере устойчивости приобретают в развиваемом в последние годы подходе к определению несущей способности ребристых пластин с учетом нелинейного взаимодействия различных форм выпучивания в закритической области. Большой интерес в связи с этим представляют уточненное изучение спектра критических нагрузок и форм потери устойчивости в широком диапазоне геометрических и жесткостных параметров пластины и ребер, выявление новых факторов, которые должны быть учтены при создании более совершенных моделей закритического деформирования.

Таким образом, разработка уточненных математических моделей устойчивости ребристых пластин, создание на основе этих моделей эффективных алгоритмов расчета и получение новой информации о потере устойчивости являются актуальными и имеют важное теоретическое и практическое значение.

Целью работы является анализ нижней части спектра критических нагрузок и форм потери устойчивости ребристых пластин на основе уточненной математической модели, построенной с учетом дискретности, эксцентричного расположения и нерегулярности подкрепляющего набора, условий закрепления ненагруженных кромок пластины.

Научная новизна результатов диссертации состоит в следующем:

- построена уточненная математическая модель устойчивости сжатых прямоугольных пластин с продольным подкреплением;
- разработан матричный алгоритм вычисления критических нагрузок и форм потери устойчивости;
- осуществлена программная реализация алгоритма;
- проведен численный анализ спектра критических нагрузок и соответствующих одноволновых форм потери устойчивости регулярно подкреплённых пластин с незакрепленными продольными кромками, исследовано влияние граничных условий, параметров обшивки и ребер, дан качественный анализ форм общего и местного выпучивания;
- исследована потеря устойчивости пластин с различными типами нерегулярного подкрепления, дана сравнительная оценка эффективности нерегулярного и соответствующего регулярного подкреплений в зависимости от соотношения параметров пластины и ребер;
- проведено сравнение теоретических оценок устойчивости нерегулярно подкреплённых пластин с экспериментальными данными.

Обоснованность и достоверность полученных результатов базируются на строгости математических выкладок, последовательности и логике теоретических построений, многократной проверке программы для ЭВМ на решении тестовых задач, специальном вычислительном эксперименте по оценке эффективности построенного матричного алгоритма, сравнении предложенной методики и полученных с ее помощью результатов с известными методиками и результатами, а также на удовлетворительной согласованности с данными испытаний.

Практическая ценность. Результаты диссертации могут быть использованы в расчетной практике проектных и научно-исследовательских организаций при проектировании и оценке устойчивости тонкостенных силовых конструкций, несущими элементами которых являются пластины с ребрами жесткости. Эффективность предложенного алгоритма позволяет рекомендовать его включение в системы автоматизации соответствующих расчетов. Получаемые данные могут оказаться полезными для совершенствования, оценки точности и пределов применимости существующих, а также при отработке и апробации вновь соз-

даваемых методов расчета устойчивости тонкостенных конструкций. Эти данные должны быть учтены при построении моделей закритического деформирования и определении несущей способности ребристых пластин на основе теории нелинейного взаимодействия форм потери устойчивости.

Разработанные в диссертации алгоритм и программа расчета переданы для использования Военному инженерному Краснознаменному институту им. А.Ф.Можайского (г. Ленинград).

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на научных конференциях, посвященных итогам научно-исследовательской работы ДГУ за 1979-80 гг., на республиканском научном семинаре "Прикладные методы математики и кибернетики" (под руководством академика АН УССР В.Л.Рвачева, Харьков, 1980 г.), на областной научно-практической конференции "Ученые Днепропетровщины в борьбе за повышение эффективности общественного производства" (Днепропетровск, 1980 г.), на У тематической конференции "Практическая реализация численных методов расчета инженерных конструкций" (Ленинград, 1981 г.), на Всесоюзном симпозиуме "Актуальные проблемы нелинейной теории упругости" (Ленинград, 1983 г.), на Всесоюзной конференции "Численная реализация физико-механических задач прочности" (Горький, 1983 г.), на Всесоюзной школе молодых ученых и специалистов "Актуальные проблемы механики оболочек" (Казань, 1983 г.), на Третьей национальной конференции по устойчивости и колебаниям деформируемых систем (София, Болгария, 1984 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, указателя использованных источников, приложения и изложена на 236 с., включая 141 с. машинописного текста, указатель использованных источников из 172 наименований на 23 с., 57 рисунков и 12 таблиц, приложение на 2 с.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, указывается цель проводимых исследований и формулируются основные положения, выносимые на защиту. Излагается краткое содержание диссертации по главам и приводятся сведения об ее апробации.

В первой главе описаны существующие математические модели устойчивости ребристых пластин, способы построения и методы численного исследования этих моделей. Предложена уточненная математическая модель устойчивости упругой прямоугольной пластины, подкрепленной продольными ребрами и нагруженной равномерно распределенными по торцам сжимающими усилиями. Разработан эффективный матричный алгоритм вычисления критических нагрузок и форм потери устойчивости, осуществлена его программная реализация.

В основу построения предлагаемой модели положен энергетический критерий. Учитываются дискретность, эксцентричность и нерегулярность подкрепляющего набора. Полная потенциальная энергия ребристой панели в смежном с исходным состоянием равновесия представляется в виде суммы потенциальных энергий деформаций удлинения и сдвига, изгиба и кручения срединной поверхности пластины, удлинения, изгиба в двух плоскостях и кручения ребер, рассматриваемых как нетонкостенные стержни постоянного поперечного сечения, а также потенциалов внешней нагрузки, действующей на поперечных кромках пластины и торцах ребер. Из условия стационарности указанной энергии следуют уравнения равновесия пластины и возможные граничные условия на ее контуре, а также статические условия сопряжения пластины и ребер, формулируемые как естественные граничные условия вдоль соответствующих линий стыковки. В совокупности с геометрическими условиями склейки ребер с пластиной и уравнением совместности деформаций ее срединной поверхности указанные соотношения образуют нелинейную краевую задачу. Точки бифуркации исходной формы равновесия подкрепленной пластины определяются собственными числами и соответствующими им собственными векторами однородной линейной краевой задачи, получаемой линеаризацией относительно докритического состояния полных нелинейных соотношений. После введения функции напряжений и разделения переменных при шарнирном опирании

нагруженных кромок пластины указанная задача приобретает окончательный вид:

- уравнения равновесия и совместности деформаций срединной поверхности пластины

$$\bar{X}'(\psi) - |A| \bar{X}(\psi), \quad (1)$$

- граничные условия на ее продольных ненагруженных кромках $\psi = 0$ и $\psi = b$

$$|L_1| \bar{X}(0) = \bar{0}, \quad (2)$$

$$|L_2| \bar{X}(b) = \bar{0}, \quad (3)$$

- условия сопряжения с ребрами в точках ψ_i ; прикрепления последних

$$\bar{X}^+(\psi_i) = |R_i| \bar{X}^-(\psi_i), \quad i = \overline{0, m}, \quad (4)$$

где $|A|$ - матрица 8×8 , ненулевые элементы которой определяются длиной и толщиной пластины, упругими характеристиками материала, величиной сжимающей нагрузки и параметром волнообразования; $\bar{X}(\psi)$ - вектор решения; ψ - координата в поперечном направлении; b - ширина пластины; $|L_1|$ и $|L_2|$ - матрицы 4×8 "левых" (2) и "правых" (3) граничных условий (в работе рассматриваются три варианта указанных условий, соответствующие свободной, шарнирно опертой или защемленной кромке); $|R_i|$ - матрица 8×8 перехода через i -е ребро, ненулевые элементы которой определяются параметрами ребра и пластины, константами материала, величиной нагрузки и числом продольных полуволн при выпучивании (если кромка $\psi_0 = 0$ или $\psi_m = b$ не подкреплена ребром, то соответствующая матрица обращается в единичную); индексами "+" и "-" обозначены векторы решения непосредственно слева и справа от i -го ребра; m - число пролетов пластины между ребрами.

Алгоритм вычисления критических нагрузок и форм потери устойчивости, т.е. численного решения краевой задачи (1)-(4), строится на основе матричного метода ортогональной прогонки.

Применение преобразования Лапласа дает возможность осу-

посредством матричного соотношения

$$\bar{X}(y_f) = \|P(y_f - y_s)\| \bar{X}(y_s), \quad (5)$$

что избавляет от необходимости приближенного интегрирования системы (I) методами Рунге-Кутты. Описаны результаты специально проведенного вычислительного эксперимента, который подтвердил высокую эффективность построенного матричного алгоритма и показал, что использование матричного перехода (5) по сравнению с численным интегрированием позволяет сократить время вычислений от 5 до 12 раз (в зависимости от количества точек ортогонализации, задаваемой точности интегрирования и вида решения) и получить решение с вдвое большим числом верных знаков.

Рассмотрены узловые аспекты машинной реализации алгоритма и особенности выполнения расчетов. Даны практические рекомендации по повышению точности и оценке достоверности полученных результатов.

Во второй главе рассмотрена потеря устойчивости пластин с регулярным подкреплением. Дан краткий обзор последних исследований в этой области и представлены результаты численного анализа, выполненного с помощью разработанного алгоритма.

Исследована нижняя часть спектра критических нагрузок и соответствующих одноволновых форм потери устойчивости в широком диапазоне соотношений геометрических и жесткостных параметров обшивки и ребер. На рис. I показаны кривые зависимостей от параметра расстояния между ребрами b/L относительных критических напряжений σ_{cr}/E трехпролетных ($m = 3$) пластин с эксцентричными ребрами и незакрепленными продольными кромками при $\nu = 0.3$, $L/h = 320$, $S_r/h^2 = 26.4$, $e_r/h = 7.1$, $V_r/h^4 = 31.9$, $\dot{I}_r/h^4 = 383$, $\ddot{J}_r/h^4 = 8.7$, где E и ν - модуль упругости и коэффициент Пуассона материала, L и h - длина и толщина пластины, b - шаг стрингеров, S_r , e_r , \dot{I}_r , \ddot{J}_r и V_r - характеристики поперечного сечения ребра (соответственно площадь, эксцентриситет относительно срединной поверхности пластины, моменты инерции относительно параллельной и перпендикулярной пластине центральных осей и при кручении). Кривы-

ми 1-4 представлена нижняя часть спектра критических нагрузок одноволновой потери устойчивости, каждой из которых отвечает строго определенная функция $G_i(\eta)$ ($i = \overline{1, 4}; 0 < \eta < \pi$). Данные функции, найденные из решения краевой задачи и описывающие профиль поперечного сечения пластины при соответствующих критических нагрузках, в дальнейшем для краткости будем называть формами выпучивания. Вычисленные при некоторых значениях b/L , эти формы показаны на рис.2. Кривой 5 представлена наименьшая критическая нагрузка местного выпучивания обшивки между ребрами с несколькими продольными полуволнами, пунктиром показана эйлерова критическая нагрузка. Расположение кривых 1-4 на рис.1 показывает, что в нижней части спектра критических нагрузок одноволнового выпучивания имеется обособленная область, содержащая первые три нагрузки. При этом взаимное положение кривых 1-3 свидетельствует о строгом чередовании симметричных и антисимметричных форм, отвечающих критическим нагрузкам из рассматриваемой области их спектра, а также о перестройке на обратную структуры спектра этих форм с увеличением расстояния между ребрами. Кривая 4 ограничивает снизу критические нагрузки, принадлежащие остальной части спектра.

Анализ рис.1 показывает, что с увеличением b/L ошибка в оценке общей устойчивости с помощью стержневой схемы быстро увеличивается. Соответствующие формы (рис.2), названные в работе "гибридными", далеки от эйлеровой и сочетают признаки общего и местного выпучивания даже при достаточно частом расположении ребер, причем с увеличением b/L местный изгиб обшивки становится все более ярко выраженным.

Аналогичные исследования, проведенные для пластин с большим количеством пролетов m , подтвердили справедливость обнаруженных закономерностей и показали, что обособленная область спектра всегда содержит m первых критических нагрузок. С увеличением m значения нагрузок, ограничивающих выделенные области спектра (кривые 1, 3 и 4), меняются слабо, поэтому нижняя область спектра резко сгущается.

Проанализировано влияние условий закрепления продольных кромок пластины, эксцентриситета и крутильной жесткости ребер на общую устойчивость регулярно подкрепленных пластин. Особое внимание уделено качественному анализу форм выпучивания. Дано сравнение с известными упрощенными моделями, исследована

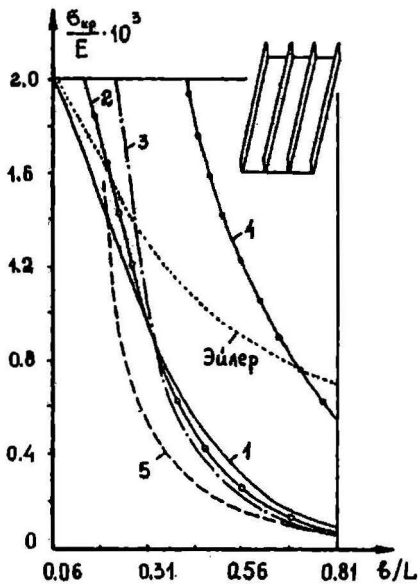
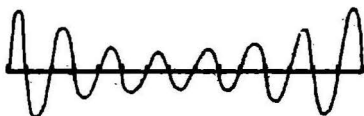
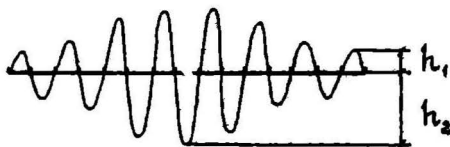


Рис. 1



а) $V_r = 0$, $\rho = 0.524$, $\frac{\sigma_{\text{ср}}}{E} = 0.14 \cdot 10^{-3}$



б) $V_r/h^4 = 122$, $\rho = 4.42$, $\frac{\sigma_{\text{ср}}}{E} = 0.24 \cdot 10^{-3}$

Рис. 3

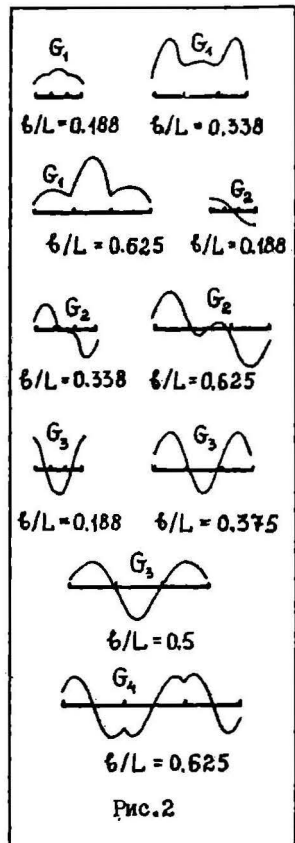


Рис. 2

$\rho = h_2/h_1$

НИИ
ДУЖТ

зависимость границ их применимости от перечисленных факторов.

Исследована местная потеря устойчивости обшивки между ребрами. Показано, что соответствующие формы выпучивания практически всегда являются нерегулярными, причем эта нерегулярность существенно возрастает при закреплении продольных кромок, увеличении крутильной жесткости ребер, уменьшении ширины пролетов или с ростом их числа. Крутильная жесткость ребер способна качественно изменить характер местного выпучивания пластины, что иллюстрируется рис.3, на котором показаны формы $\zeta(\eta)$ местной потери устойчивости пятнадцати-пролетных ($m = 15$) пластин с незакрепленными продольными кромками и имеющих параметры: $\eta = 0.3$, $l/h = 155$, $L/h = 1250$, $e_r/h = 13$, $S_r/h^2 = 62.5$, $I_r/h^4 = 3255$, $J_r/h^4 = 32.6$. Если крутильная жесткость ребер невелика (рис.3-а), то возможен такой вид локального выпучивания обшивки, при котором наибольший ее прогиб имеет место в примыкающих к продольным кромкам пролетах, а не в центре панели (показатель нерегулярности $\rho < 1$). Увеличение крутильной жесткости приводит к обратному эффекту (рис.3-б).

В третьей главе изучается потеря устойчивости пластин с нерегулярным подкреплением. Рассматриваются три типа нерегулярности: 1) ребра одинаковы, но расположены на разных расстояниях друг от друга; 2) ребра неодинаковы, но распределены равномерно; 3) неодинаковые неравноотстоящие ребра. Цель исследований состояла в выявлении основных зависимостей критических нагрузок и форм выпучивания ребристых пластин от расстановки одинаковых или неодинаковых стрингеров и условий закрепления продольных кромок. Эффективность того или иного варианта подкрепления оценивалась величиной соответствующей первой критической нагрузки общего выпучивания, как правило не превосходящей нагрузку местной потери устойчивости пластины. В каждом случае дано сравнение эффективности нерегулярного и "эквивалентного" регулярного подкреплений. Параметры последнего при втором и третьем типах нерегулярности вычислялись из условий неизменности площади и момента инерции совокупного поперечного сечения ребристой пластины, т.е. профиль поперечного сечения ребра определялся параметрами, связанными двумя условиями.

Установлено, что влияние на критические нагрузки и фор-

мы общей потери устойчивости порядка расстановки регулярно расположенных ребер различной жесткости существенным образом определяется соотношением параметров обшивки и ребер, подкрепляющих центральные и примыкающие к продольным кромкам участки пластины.

Наиболее заметно это влияние проявляется при незакрепленных продольных кромках. Наибольшая общая устойчивость обеспечивается одновременным усилением краев и, преимущественно, центра пластины более жесткими ребрами, причем в этом случае возможна реализация антисимметричной формы выпучивания. Влияние данного типа нерегулярности подкрепления возрастает при уменьшении длины или увеличении числа пролетов и может быть весьма значительным, особенно в отсутствие эксцентриситета ребер. В качестве иллюстрации на рис.4 представлены критические нагрузки (сплошные кривые) и формы общей потери устойчивости пятипролетных пластин, подкрепленных стрингерами прямоугольного профиля. Обшивка и набор ребер равновесны. В вариантах 2-4 варьируется лишь порядок расстановки ребер, расположенных на одинаковых расстояниях друг от друга симметрично относительно центра пластины. Регулярное подкрепление пластины I эквивалентно вариантам 2-4 в указанном смысле, поэтому Эйлера критическая нагрузка одинакова для всех пластин (пунктирная кривая). Штрих-пунктирной горизонтальной линией представлены наименьшие критические нагрузки местного выпучивания обшивки. Из рис.4 следует, что критическая нагрузка общей потери устойчивости пластины 4 с ослабленным центром при $L/B = 1.8$ на 30% ниже критической нагрузки пластины 2 с укрепленным центром, а при $L/B = 1.3$ она оказалась вдвое ниже вычисленной по формуле Эйлера.

Закрепление продольных кромок существенно ослабляет влияние порядка расстановки регулярно размещенных неодинаковых ребер на общую устойчивость.

Для пластин с незакрепленными продольными кромками эквивалентное регулярное подкрепление оказывается более эффективным, чем подкрепление регулярно размещенными ребрами неодинаковой жесткости независимо от порядка их расстановки (рис.4). При закреплении кромок предпочтительным может оказаться нерегулярное подкрепление.

Влияние на общую устойчивость пластин характера разме-

щения одинаковых ребер существенно зависит от соотношения геометрических и жесткостных параметров обшивки и подкрепляющего набора, а также от условий закрепления ненагруженных кромок. Оно, как правило, мало, если кромки не закреплены, но усилены стрингерами.

При закреплении кромок это влияние усиливается, причем относительная эффективность различных вариантов размещения ребер изменяется в зависимости от длины панели (рис.5). Для пластин умеренной длины ($L/B < 2.5$) сгущение ребер к центру (№ 6) эффективнее их смещения к продольным кромкам (№ 7), а у длинных ($L/B > 3$) пластин наблюдается противоположная картина. Регулярное размещение ребер (№ 5) наиболее эффективно лишь для коротких ($L/B < 0.6$) пластин, а при увеличении длины оно занимает промежуточное (между вариантами № 6 и № 7) по эффективности положение, однако заметно уступает нерегулярному (сгущение ребер к краям) только у достаточно длинных ($L/B > 4.5$) пластин. На рис.5 также показаны формы общей потери устойчивости при $L/B = 0.65$.

С увеличением жесткости ребер влияние их размещения на общую устойчивость пластины усиливается. Для данного типа нерегулярности подкрепления характерна реализация формы общего выпучивания симметричного типа.

Влияние нерегулярности размещения неодинаковых ребер зависит от соотношения их жесткостей и условий закрепления продольных кромок панели. Если эти кромки не закреплены, но усилены стрингерами, то нерегулярность размещения внутренних ребер относительно малой жесткости слабо влияет на общую устойчивость подкрепленной пластины. Влияние размещения более жестких, чем краевые, внутренних ребер может быть существенным. При этом сближение центральных ребер ведет к понижению общей устойчивости пластины. Наиболее эффективным оказывается вариант подкрепления, при котором более сильные ребра занимают промежуточное положение между центром и краями панели. Эквивалентное регулярное подкрепление как правило превосходит нерегулярное или лишь незначительно уступает ему. При закреплении кромок могут иметь место эффекты, аналогичные отмеченным для одинаковых ребер.

Исследовано влияние на общую устойчивость пластин с различным образом размещенными одинаковыми ребрами граничных условий на продольных кромках, усиленных достаточно жесткими

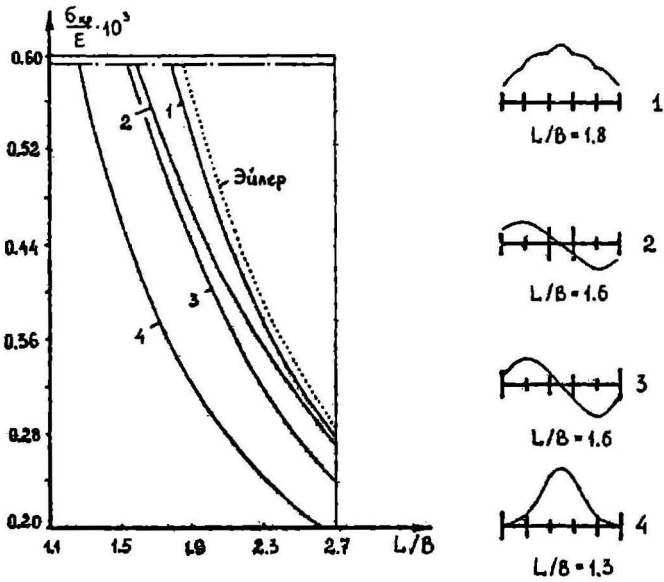


Рис. 4

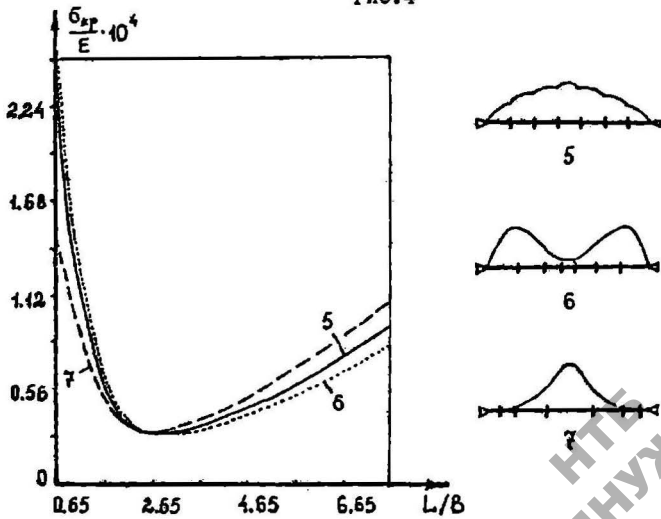


Рис. 5

стрингерами. Показан быстрый рост этого влияния с увеличением длины панели. Обнаружено, что для каждого варианта условий закрепления продольных кромок имеется диапазон размеров пластины, определяемый соотношением параметров обшивки и ребер, при которых различные варианты размещения ребер обладают примерно одинаковой эффективностью. Исследовано также влияние граничных условий на местную устойчивость пластин с нерегулярным подкреплением.

Описаны результаты испытаний пластин с неодинаковыми равноотстоящими ребрами и незакрепленными продольными кромками, подтвердившие справедливость теоретического вывода о существенном влиянии порядка расстановки ребер на величины критических нагрузок и формы общей потери устойчивости. Экспериментально доказана возможность реализации антисимметричной формы общего выпучивания при укреплении центра панели более жесткими ребрами. Проведено сравнение полученных в работе значений нагрузок общей потери устойчивости нерегулярно подкрепленных пластин с данными испытаний, отмечено их удовлетворительное совпадение (отличие не превышало 13%).

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, даны рекомендации по их практическому использованию, определены направления дальнейших исследований.

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем.

1. Построена уточненная математическая модель устойчивости сжатых прямоугольных пластин с продольными ребрами. Разработан эффективный матричный алгоритм вычисления критических нагрузок и форм потери устойчивости, осуществлена его программная реализация.

2. Для широкого диапазона геометрических и жесткостных параметров выполнен подробный анализ спектра критических нагрузок и соответствующих одноволновых форм потери устойчивости регулярно подкрепленных пластин с незакрепленными продольными кромками, усиленными стрингерами. Обнаружены качественно новые формы потери устойчивости, названные гибридными. Показано, что спектр критических нагрузок имеет локализованную нижнюю часть, которая сгущается при увеличении числа пролетов обшивки. Исследовано влияние граничных условий, эксцентриситета и крутильной жесткости ребер, дано сравнение с извест-

ными упрощенными моделями.

3. Выполнено исследование общей потери устойчивости пластин с различными типами нерегулярного подкрепления. Изучено влияние характера размещения и порядка расстановки одинаковых и неодинаковых ребер при различных граничных условиях.

4. Проведен сравнительный анализ общей устойчивости пластин с нерегулярным и соответствующим регулярным подкреплением. Обнаружено, что регулярное подкрепление по эффективности в большинстве случаев превосходит нерегулярное или лишь незначительно уступает ему. Исключение составляют длинные пластины со смещенными к закрепленным краям ребрами.

5. Изучено влияние граничных условий, геометрических и жесткостных параметров на местное выпучивание пластин с регулярным и нерегулярным подкреплениями. Показано, что формы местной потери устойчивости как правило нерегулярны.

6. Проведено сопоставление полученных в работе теоретических и экспериментальных данных для пластин с неодинаковыми равноотстоящими ребрами и незакрепленными продольными кромками. Подтверждено существенное влияние порядка расстановки ребер на нагрузки и формы общей потери устойчивости. Доказана возможность реализации антисимметричной формы при укреплении центра панели более жесткими ребрами. Отмечена удовлетворительная согласованность теоретических и экспериментальных значений критических нагрузок.

СПИСОК РАБОТ,

В КОТОРЫХ ОПУБЛИКОВАНЫ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Колодяжный А.П., Копорулин В.Л. Критические нагрузки плоских панелей с нерегулярным подкреплением//Актуальные проблемы механики деформируемых сред: Сб. науч. тр. - Днепропетровск: Днепропетр. ун-т, 1979. - С. 130-136.
2. Колодяжный А.П., Копорулин В.Л. Расчет критических нагрузок плоских подкрепленных панелей//. Алгоритмы и программы, разработанные в организациях (на предприятиях) и на вычислительных центрах г.Днепропетровска. - Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1980. - Вып. 3. - С. 33-34.
3. Колодяжный А.П., Копорулин В.Л. Исследование устойчивости подкрепленных пластин при сжатии с учетом остаточных на-

пряжений//Динамика и прочность тяжелых машин. - 1980. - Вып. 5. - С. 152-157.

4. Колодяжный А.П., Копорулин В.Л. Влияние остаточных напряжений на устойчивость подкрепленной пластины//Областная науч.-практич. конф. "Ученые Днепропетровщины в борьбе за повышение эффективности общественного производства": Тез. докл., 17-18 апр. 1980 г. - Днепропетровск, 1980. - С. 30.
5. Колодяжный А.П., Копорулин В.Л. Об одном алгоритме расчета несущей способности скатых нерегулярно подкрепленных панелей с учетом нелинейного взаимодействия форм выпучивания// Всесоюзн. конф. "Численная реализация физико-механических задач прочности": Тез. докл. - Горький, 1983. - С. 81-82.
6. Копорулин В.Л. Влияние нерегулярности подкрепления на устойчивость и закритическое поведение скатой панели//Актуальные проблемы механики оболочек: Тез. докл. Всесоюзн. школы молодых ученых и специалистов/Под ред. В.Н.Паймушина и И.Г.Терегулова. - Казань: Казан. авиац. ин-т, 1983. - С. 95-96.
7. Колодяжный А.П., Копорулин В.Л. Несущая способность ребристых панелей при скатии//Трета национална конференция по устойчивост и трептене на деформируеми системи: Резюме, 18-20 септ. 1984 г. - София: Висш ин-т по архит. и строит., 1984. - С. 13.
8. Моссаковский В.И., Колодяжный А.П., Копорулин В.Л. Применение матричного метода начальных параметров к задаче устойчивости ребристых пластин//Пробл. прочности. - 1987. - № 7. - С. 55-61.

Stichonky

НТБ
ДНУЖТ

Копорулин Владимир Львович

Численное исследование устойчивости
огнатых прямоугольных пластин с продольными ребрами
на основе уточненной математической модели

01.02.03 – Строительная механика

Подписано к печати 20.08.87. БТ 70281

Формат 60 x 84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.
Ротапринт. Усл.печ.л.1,16. Уч.-изд.л. 1,0. Тираж 100 экз.
Заказ 1354. Бесплатно.

Участок оперативной полиграфии ДПИТа
320700, ГСП, Днепропетровск, 10, ул.Акад.В.А.Лазаряна, 2

НТБ
ДНУЖТ

Сканировала Юнаковская В. В.