

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ  
ОДЕССКИЙ ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи.

ШЕБАНИН Вячеслав Сергеевич

*Вид >*

ПРОЧНОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ СТАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИИ  
ПРИ УЧЕТЕ ФИЗИЧЕСКОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ  
В ОБЛАСТИ ОГРАНИЧЕННЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,  
здания и сооружения

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Работа выполнена на кафедре металлических, деревянных и пластмассовых конструкций Одесского инженерно-строительного института.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Трофимович  
Виктор Владимирович;  
доктор технических наук, профессор Сильвестров  
Анатолий Васильевич;  
доктор технических наук, профессор Яременко  
Александр Федорович.

Ведущее предприятие - УкрНИИПроектстальконструкция.

Защита диссертации состоится "8" июня 1983 г.  
в 11 часов на заседании специализированного совета  
Д 088.41.01 по присуждению ученой степени доктора техниче-  
ских наук в Одесском инженерно-строительном институте по  
адресу: 270029, Одесса-29, ул. Дидрихсона, 4, ауд. 210.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке  
института.

Направляем Вам автореферат диссертации, просим принять  
участие в защите и прислать Ваши отзывы и замечания в 2-х  
экземплярах в секретариат совета по указанному адресу.

Автореферат разослан "28" апреля 1983 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
канд. техн. наук, доцент

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

*Малахова*

Н.А. Малахова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Проблема снижения массы и стоимости металлических конструкций в настоящее время сохраняет свою актуальность в связи с высокой потребностью в металле для нужд народного хозяйства. Большая роль в выполнении этой задачи в строительстве отводится научным исследованиям по дальнейшему совершенствованию методов расчета конструкций. Важным достижением школы проектирования строительных конструкций по предельным состояниям явилось введение учета работы материала за пределом упругости. Решение проблемы расчета стальных конструкций с учетом пластических деформаций основывается на предложенном Н.С. Стрелецким переходе на деформационный вид критерия прочности.

В развитие этого научного направления автором разработаны новые методики исследования упруго-пластического напряженно-деформированного состояния стержневых изгибаемых конструкций основанные на методе переменных параметров способы их расчета при учете физической и геометрической нелинейности в области ограниченных пластических деформаций.

Наряду с проблемами расчета и проектирования новых конструкций возникают вопросы, связанные с реконструкцией зданий и сооружений. Интенсификация производств и развития промышленности на основе научно-технического прогресса предусматривают регулярную модернизацию и замену технологического оборудования, что в свою очередь связано с увеличением или изменением характера действующих на стойкие конструкции нагрузок и часто вызывает необходимость увеличения их несущей способности (усиления). Среди эксплуатируемых строительных конструкций масса стальных конструкций составляет на территории Украины свыше 25 млн. тонн.

Существующие нормы СНиП II-23-81\* рекомендуют выполнять расчет стальных конструкций, как правило, с учетом неупругих деформаций. При соответствующем технико-экономическом обосновании расчет допускается производить по деформированной схеме. При этом для статически неопределимых конструкций, методика расчета которых с учетом неупругих деформаций стали не разработана, расчетные усилия разрешается определять в предположении упругих деформаций стали по недеформированной схеме. Способ учета перераспределения усилий в нормах при-

ведется только для моностальных неразрезных балок.

Поэтому тема работы, посвященная развитию нового перспективного научного направления учета ограниченных пластических деформаций в предельном состоянии по прочности изгибаемых стальных и бистальных стержневых конструкций с учетом деформированной схемы, является весьма актуальной и имеет важное народнохозяйственное значение, поскольку направлена на повышение надежности, экономичности и качества строительных металлоконструкций.

Целью работы являются теоретическое и экспериментальное обоснование распространения учета ограниченных пластических деформаций на более широкий класс статически нагруженных конструкций, а также разработка соответствующих методов расчета первого предельного состояния моно- и бистальных статически определяемых и неопределяемых стержневых конструкций по непригодности к эксплуатации, приводящих к экономии стали.

На защиту выносятся следующие новые положения:

- новый подход к решению деформационных задач;
- находящееся напряженно-деформированное состояние стальных стержней, в том числе и усиленных, работающих как отдельно так и в составе стержневой конструкции на любом уровне нагружения, включая и предельные;

- особенности работы статически определяемых и неопределяемых стальных и бистальных стержневых конструкций с учетом физической и геометрической нелинейности в области ограниченных пластических деформаций;

- экспериментальные исследования действительной работы моделей моно- и бистальных стержней при сложном сопротивлении, усиленных моно- и бистальных разрезных и неразрезных балок, а также одноконтурных рам;

- практические методики по расчету бистальных стержней при сложном сопротивлении, усиленных моно- и бистальных балок на прочность.

Научную новизну работы составляют:

- развитие нового направления в разработке практических методов расчета статически неопределяемых стальных и бистальных стержневых конструкций, основанного на исследовании предельных состояний топкостенных стержневых элементов, работающих в области ограниченных пластических деформаций;

- методика получения теоретического напряженно деформи-

рованного состояния составных сечений -стальных и бистальных (стержней, в том числе усиленных, в области ограниченных пластических деформаций с учетом касательных напряжений при комбинациях одноосного и двухосного изгиба и продольной силы;

- методика учета физической и геометрической нелинейности на уровне отдельных стержней, основанная на методе возобновления предельных пластических деформаций, позволяющая выполнять корректировку матриц жесткости моно- и бистальных стержней, входящих в состав неразрезных балок или рамных конструкций, на каждом шаге итерационного процесса без использования обычно применяемых функций Н.В. Корноухова;

- способ нахождения величины перераспределения изгибающих моментов в статически неопределимых стержневых системах с учетом физической и геометрической нелинейности, а также наличия начальных несовершенств, основанный на методе возобновления предельной величины пластической составляющей интенсивности деформаций;

- методика разграничения областей расчета по прочности при ограничении пластических деформаций и по устойчивости;

- способ определения рациональных площадей и длин листов усиления, а также методика расчета прочности усиленных моно- и бистальных разрезных и неразрезных балок, основанная на автоматизированном расчете путем возобновления предельной величины пластических деформаций на каждом шаге итерационного процесса;

- разработанная практическая методика расчета прочности бистальных стержней, усиленных разрезных бистальных балок по критерию ограниченных пластических деформаций, реализующая принцип сохранения традиционного вида расчета с формул упругой стадии работы с дополнением предлагаемой системой коэффициентов, формулами и таблицами и обеспечивающая равнопрочность конструкции при разных силовых факторах;

- прием корректировки расчетных коэффициентов при учете взаимодействия различных комбинация изгибающих моментов и продольных усилий с проверкой условных напряжений в определенных точках сечения бистального стержня, обеспечивающий учет точных кривых взаимодействия;

- методика непосредственного расчета стержневых конструкций в системах автоматизированного проектирования по ве-

личинам предельных пластических деформации;

- выводы впервые проведенного на созданных автором установках, защищенных авторскими свидетельствами, исследования действительной работы стальных и бистальных стержней при одноосном и двухосном изгибе, в том числе с продольной силой, а также стальных и бистальных неразрезных балок в том числе усиленных, и рамных конструкции.

Обоснованность и достоверность основных научных положений определяются:

- использованием общепринятых расчетных предпосылок и допущений при формировании моделей рассматриваемых задач;

- применением апробированных методов, обеспечивающих качественное и количественное совпадение результатов работы с данными известных решений частных задач, а также с экспериментальными данными, полученными при выполнении диссертации, и опубликованными данными отечественных и зарубежных авторов;

- комплексным характером работы, в которой рассматриваются все этапы, связанные с исследованием деформации, прогибов и несущей способности как отдельных элементов, так и стержневой конструкции в целом, от обоснования расчетных предпосылок до экспериментальной проверки.

Практическая ценность работы состоит в том, что автором разработана теория работы изгибаемых стальных и бистальных стержневых конструкций с учетом физической и геометрической нелинейности в области граничных пластических деформации при статических нагрузках, позволяющая предсказать как качественные особенности поведения рассматриваемых конструкций, так и количественные значения деформации, прогибов и перераспределения усилий в условиях сложного напряженного состояния и сложного сопротивления сечений.

Полученные результаты послужили научной основой для разработки:

- рекомендаций по проектированию;

- практических методик и программ для расчета и проектирования моно- и бистальных стержней работающих как отдельно, так и в составе рамных конструкций, моно- и бистальных неразрезных балок, усиленных моно- и бистальных разрезных и неразрезных балок.

Реализация результатов работы осуществлялась в сле-

дующих формах:

Материалы исследований использованы ЦНИИПроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова:

- в развитии СНиП 11-23-81 "Стальные конструкции. Нормы проектирования", утвержденных и изданных в 1985 г. (раздел 5);

- в "Рекомендациях по проектированию бистальных балок" (приказ № 108 по объединению Совметаллостройиниипроект от 17.12.1985 г. об обязательном использовании "Рекомендаций" для всех подразделений объединения);

при выполнении НИР по госзаказу 06-02-60-88/2-7 для разработки "Рекомендаций по развитию САПР в области расчета на прочность многостажных промзданий" (ЦНИИПСК, ОПРИС, вып. 151, 1988 г.).

Разработанная методика расчета на прочность внедрена также в практику проектирования ЦПИ "Днепропроектстальконструкция" и ЦПИ "Ленпроектстальконструкция". С помощью полученных данных выполнены расчеты несущих балок большепролетных транспортных галерей для Южного горно-обогатительного комбината и Днепропетровского металлургического комбината им. Дзержинского, а также при реконструкции сооружений Котласского целлюлозно-бумажного комбината и Ленинградского металлического завода. Результаты работы использовались в учебном процессе Одесского ИСИ.

Апробация работы. Основные результаты исследований и материалы диссертации докладывались и обсуждались: на Всесоюзном семинаре "Индустриальные технические решения для реконструкции зданий и сооружений промышленных предприятий" (Магеровка, 1986); Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы метрологического обеспечения в строительстве" (Москва, 1989); IV и V Украинских конференциях по металлическим конструкциям (Киев, 1988, 1992 гг.); Республиканской научно-технической конференции "Исследование работы и применение в строительстве эффективных элементов кол. груда" (Ровно, 1990); Всесоюзном съезде "Опыт применения материалов в сельскохозяйственном машиностроении" (Киев, 1985); научных конференциях КИСИ, ОИСИ и др.

Содержание работы в целом докладывалось на научном семинаре кафедры металлических и деревянных конструкций КИСИ и заседании ассоциации заведующих кафедрами металлических кон-

струкция строительных вузов СНГ.

Публикации. Основное содержание диссертации освещено в 47 печатных работах, опубликованных в центральной, республиканской и межвузовской печати (в том числе получено 5 авторских свидетельств).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 8 разделов, заключения, списка литературы из 206 наименований и приложения. Работа изложена на 433 страницах, включающих 300 страниц основного текста, 94 страницы рисунков, 11 страниц таблиц и 25 страниц наименований литературы. В приложении содержатся материалы о внедрении полученных результатов.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, сформулирована цель и основные задачи исследования.

Первая глава посвящена анализу состояния проблемы, выявлению степени ее изученности, обоснованию основных задач исследований, а также рассмотрению характерных особенностей работы изгибаемых стальных строительных конструкций за пределом упругости при статических и подвижных нагрузках.

Объектом исследования являлись отдельные стержни и стержневые системы, выполненные из одной или двух марок стали и воспринимающие статические нагрузки: балки рабочих площадок, прогны, фахверки, колонны, эстакады, галереи, рамные каркасы промышленных цехов и др.

Создание методов расчета строительных конструкций по предельным состояниям принадлежит Н.С. Стрелецкому, Н.Д. Жудину, А.А. Лоздеву, В.А. Балдину, В.И. Трофимову и другим ученым.

Дальнейшее развитие эти методов, а также теоретические и экспериментальные исследования по проблеме учета пластических деформаций в стальных строительных конструкциях содержится в работах Н.П. Мельникова, Е.И. Беленя, А.И. Стрельбицкой, Б.М. Броуде, А.В. Гемерлига, В.Н. Шимановского, В.В. Трофимовича, В.В. Бирюлева, Б.Б. Лампси, А.Р. Сильвестрова, А.А. Поташкина, Н.Л. Чернова, Г.И. Белого, Я.Е. Бельского, Б.И. Любарова и др.

Отмечено, что для ограничения величины текучести при расчете возможно использование трех величин — полной дефор-

магии, остаточной деформации и пластической деформации. Показано, что недостатком метода ограничения полной величины упруго-пластической деформации является увеличение пластической составляющей деформации с возрастанием расчетного сопротивления, хотя пластические свойства стали, как известно, при этом уменьшаются. Величина остаточной деформации при разгрузке изгибаемых конструкций после нагружения за предел упругости зависит от формы сечения и, поэтому, не может быть надежной мерой ограничения развития текучести при расчетной нагрузке. Наиболее рационально ограничивать пластическую составляющую деформации. При рассмотрении сложного напряженного состояния предлагается использовать критерий прочности в виде ограничения интенсивности пластических деформаций  $\epsilon_{sp}$ . Формула проверки прочности получает вид

$$\epsilon_{sp} \leq \epsilon_{sp,lim} \quad (1)$$

где  $\epsilon_{sp,lim}$  - предельная интенсивность пластических деформаций.

Кроме того, при изучении распределения напряжений, деформаций и перемещения за пределом упругости в изгибаемых стержневых конструкциях используются следующие предпосылки и допущения:

1. Связь между напряжениями и деформациями при сложном напряженном состоянии за пределом упругости принимается согласно деформационной теории пластичности.

2. Условия пластичности принимаются по энергетической теории прочности.

3. Вводится предположение о сохранении за пределом упругости законов распределения деформации, а в некоторых случаях законов распределения напряжений по контуру сечения, справедливых в пределах упругости.

4. Упругая работа стали при переменных усилиях допускается как на сжатие, так и на растяжение, текучесть - только в одном из этих направлений.

5. В качестве критерия прочности принимается ограничение интенсивности пластических деформаций.

6. Расчеты прочности выполняются независимо от расчетов по другим видам предельных состояний.

7. Стержневая система на каждом шаге итерационного процесса принимается линейно-деформируемой.

Для расчета статически неопределимых стержневых систем

в неупругой области с учетом деформированной схемы применяется шаговой метод и метод упругих решения. Оба метода обладают рядом недостатков, связанных с точностью, трудоемкостью и сходимостью процесса вычисления. Автором разработан способ существенного ускорения сходимости итерационного процесса основанный на методе переменных параметров.

Так как идея этого способа состоит в приведении системы на каждом шаге итерационного процесса в состояние наиболее близкое к окончательному решению со значениями пластических деформаций равными предельным, то в дальнейшем этот способ будем называть методом возобновления предельных пластических деформаций. Для этого в каждом последовательном приближении либо величины нагрузок, либо сечения изменяются таким образом, чтобы в наиболее нагруженном сечении конструкции развивалась предельная величина пластических деформаций  $\epsilon_{ip,lim}$ .

Вторая глава посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния сечений стальных и бистальных стержней при ограниченных пластических деформациях. При расчете прочности сечения в области ограниченных пластических деформаций используются прямая и обратная задачи. Прямой задачей назовем случай, когда по заданным изгибающим моментам  $M_x$  и  $M_y$ , бимоменту  $V_\omega$ , продольному усилию  $N$ , геометрии сечения, принятым расчетным сопротивлениям материала элементов сечения ищется напряженно-деформированное состояние сечения. Обратная задача отличается от прямой тем, что при заданном отношении между усилиями  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $V_\omega$  и  $N$  ищется предельные изгибающие моменты  $M_{y,lim}$ ,  $M_{x,lim}$ , предельный бимомент  $V_{lim}$  и предельное усилие  $N_{lim}$ , когда в наиболее нагруженной точке сечения достигается предельная величина пластической деформации  $\epsilon_{ip,lim}$ .

Для упруго-пластического расчета сечения используются следующие предположения:

1. Закон секториальных площадей. При соответствующих условиях частный случай закона секториальных площадей — гипс за плоских сечений.
2. Диаграмма работы материала принимается по диаграмме Цандтля, либо задается аналитически или табличка.
3. Деформационная теория пластичности.
4. Энергетическое условие текучести.
5. Сохранение при работе сечения за пределом упругости

распределения касательных напряжений, полученного из расчета в пределах упругости.

6. Критерия прочности в виде ограничения интенсивности пластических деформаций величиной  $\epsilon_{pl,lim}$ .

7. Продольная сила в пределах и за пределом упругости приложена в центре тяжести сечения.

8. При определении изменения жесткости сечения толщиной полок двутавра пренебрегаем.

С учетом указанных предпосылок разработан алгоритм расчета составных бистальных сечений открытого и замкнутого профиля, основанный на способе наращивания фиктивных усилий. Это ориентированная на ЭВМ итерационная методика, использующая для построения искомого напряженно-деформированного состояния сечения за пределом упругости последовательную корректировку фиктивной эпюры продольных нормальных напряжений  $\sigma_F$ , получаемой расчетом в пределах упругости от фиктивных усилий  $N_{xF}$ ,  $M_{yF}$ ,  $N_F$ ,  $V_F$ . Итерационный процесс расчета строится следующим образом. Оси сечения, проходящие через центр тяжести, располагаются: ось  $x$  - горизонтально, ось  $y$  - вертикально, ось  $z$  - вдоль стержня. Сечение назначается из  $n$  листов, для которых задаются размеры и расчетные сопротивления  $R_{yk}$ . В зависимости от величины касательных напряжений  $\tau_{jk}$ , которые находятся от поперечных сил  $Q_x$ ,  $Q_y$ , момента чистого кручения  $M_{\omega P}$  и изгибно-крутящего момента  $M_{\omega}$ , вычисляются напряжения, при которых по длине каждого из листов начинается текучесть материала

$$\sigma_{\tau jk} = \sqrt{R_{yk}^2 - 3 \cdot \tau_{jk}^2} \quad (2)$$

По заданным усилиям  $N_x$ ,  $M_y$ ,  $N$ ,  $V_{\omega}$  и геометрии сечения в предположении неограниченно упругой работы материала строится эпюра фиктивных напряжений  $\sigma_F^{(1)}$  первого приближения в которой в отдельных местах напряжения  $\sigma_F^{(1)}$  оказываются большими напряжений текучести материала. В этих местах фиктивные напряжения  $\sigma_F^{(1)}$  снижаются до величины  $\sigma_{\tau jk}$  в соответствии с (2) и по полученной таким образом эпюре действительных напряжений  $\sigma_F^{(2)}$  вычисляются соответствующие усилия первой итерации  $N_x^{(1)}$ ,  $M_y^{(1)}$ ,  $N^{(1)}$ ,  $V_{\omega}^{(1)}$ . Эти усилия, естественно, отличаются от заданных  $N_x$ ,  $M_y$ ,  $N$ ,  $V_{\omega}$ , причем знак и величина этих отличий показывают в каком направлении необходимо корректировать эпюру фиктивных напряжений для решения задачи.

Для определения величины необходимых корректировок найдем разности первой итерации:

$$\begin{aligned} \Delta M_x^{(1)} &= M_x - M_x^{(1)}; & \Delta N &= N - N^{(1)}; \\ \Delta M_y^{(1)} &= M_y - M_y^{(1)}; & \Delta B_\omega &= B_\omega - B_\omega^{(1)}. \end{aligned}$$

Фиктивные усилия второй итерации вычислим по формулам:

$$\begin{aligned} M_{xF}^{(2)} &= M_{xF}^{(1)} + \Delta M_x^{(1)}; & N_F^{(2)} &= N_F^{(1)} + \Delta N^{(1)}; \\ M_{yF}^{(2)} &= M_{yF}^{(1)} + \Delta M_y^{(1)}; & B_F^{(2)} &= B_F^{(1)} + \Delta B_\omega^{(1)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Отметим, что в первой итерации роль фиктивных усилий играют усилия:

$$M_{xF}^{(1)} = M_x; \quad M_{yF}^{(1)} = M_y; \quad N_F^{(1)} = N; \quad B_F^{(1)} = B_\omega.$$

Расчет в пределах упругости по фиктивным усилиям из формул (3) строится эвора фиктивных напряжений второго приближения  $\sigma_F^{(2)}$ , по которой вновь уменьшением фиктивных напряжений  $\sigma_F^{(2)}$  до напряжения  $\sigma_{T,ik}$  получается эвора действительных напряжений второй итерации  $\sigma_F^{(2)}$  и соответствующие ей усилия  $M_x^{(2)}$ ,  $M_y^{(2)}$ ,  $N^{(2)}$ ,  $B_\omega^{(2)}$ . Фиктивные усилия  $n$ -й итерации определяются по формулам:

$$\begin{aligned} M_{xF}^{(n)} &= M_x + \Delta M_x^{(1)} + \Delta M_x^{(2)} + \dots + \Delta M_x^{(n-1)}; \\ M_{yF}^{(n)} &= M_y + \Delta M_y^{(1)} + \Delta M_y^{(2)} + \dots + \Delta M_y^{(n-1)}; \\ N_F^{(n)} &= N + \Delta N^{(1)} + \Delta N^{(2)} + \dots + \Delta N^{(n-1)}; \\ B_F^{(n)} &= B_\omega + \Delta B_\omega^{(1)} + \Delta B_\omega^{(2)} + \dots + \Delta B_\omega^{(n-1)}. \end{aligned} \quad (4)$$

В которых  $k$ -е разности равны

$$\begin{aligned} \Delta M_x^{(k)} &= M_x - M_x^{(k-1)}; & \Delta N^{(k)} &= N - N^{(k-1)}; \\ \Delta M_y^{(k)} &= M_y - M_y^{(k-1)}; & \Delta B_\omega^{(k)} &= B_\omega - B_\omega^{(k-1)}. \end{aligned}$$

Корректировка фиктивных усилий по (4) в процессе расчета накапливается, величины разностей в последующих итерациях затухают и процесс сходится при небольшом числе последовательных приближений. Найденные по промежуточным эворам напряжения усилия приближаются по своим значениям к заданным и получаемое напряженно-деформированное состояние с определенной точностью является решением задачи.

Распределение касательных напряжений по контуру сечения от поперечных сил, момента чистого кручения и изгибно-крутящего момента определяется обычным расчетом в пределах упругости. Величины напряжений, при которых начинается текучесть материала, по длине и ширине листов сечения оказываются

переменными и для каждого  $k$ -го участка длины и  $n$ -го участка ширины листа, на которые он разбивается при расчете на ЭВМ, равны:

$$\sigma_{\tau, kn} = \sqrt{R_{y_j}^2 - 3 \cdot (\tau_{kn}^x + \tau_{kn}^y + \tau_{kn}^w + \tau_{kn}^{kp})^2}$$

Следует подчеркнуть важность предположения о сохранении за пределом упругости распределения касательных напряжений  $\tau$ , полученного из расчета в пределах упругости. Во многих исследованиях исходят из предположения сохранения "упругого" характера распределения сдвигов  $\gamma$  за пределом упругости, по аналогии с гипотезой плоских сечений, предполагающей сохранение за пределом упругости распределения относительных удлинений  $\epsilon_x$ , полученного из "упругого" расчета. Однако, если гипотеза плоских сечений хорошо подтверждается экспериментально при развитии, по крайней мере, ограниченных пластических деформаций, с распределением сдвигов  $\gamma$  дело обстоит иначе. Опыт показывает резкое возрастание величин сдвигов  $\gamma$  в тех областях листов изгибаемых сечений, в которых началась текучесть. Это подтверждается и экспериментальными исследованиями других авторов.

Расчет сечения на каждом этапе производится в предположении неограниченно упругой работы материала, но не с начальными модулями упругости, а с касательными, соответствующими достигнутой деформации. Деформации  $\epsilon_x$  во всех  $k$ -тых точках сечения через действующие усилия в этом случае определяются по формуле:

$$\epsilon_{xk} = \frac{M_x \cdot y_k}{\int_A E_c \cdot y^2 \cdot dA} + \frac{M_x \cdot x_k}{\int_A E_c \cdot x^2 \cdot dA} + \frac{N}{E_c \cdot A} + \frac{B \cdot \omega_k}{\int_A E_c \cdot \omega^2 \cdot dA}$$

Это позволяет дополнительно ускорить процесс сходимости приблизительно в два раза.

При исследовании открытых и замкнутых сечений стальных профилей с учетом и без учета сварочных напряжений в области ограниченных пластических деформаций при изгибе с продольной силой, косом изгибе с продольной силой, при взаимодействии изгибающего момента и бимоента получены упруго-пластические кривые и поверхности взаимодействия. Параллельно было изучено влияние касательных напряжений при усредненном их распределении по высоте стенки двутаврового сечения на величину продольного изгибающего момента, по сравнению с распределю-

нием касательных напряжений, полученных из расчета в пределах упругости. Максимальное отличие в предельных изгибающих моментах для моностаальных сечений составляет 1,2%, для бистальных сечений это отличие не превышает и одного процента, причем в запас прочности.

Использование диаграммы Прандтля позволило разработать методику нахождения напряженно-деформированного состояния сечений двутавровых стержней при изгибе с продольной силой, основанную на аналитических зависимостях и требующую значительно меньше машинного времени по сравнению со способом наращивания фиктивных усилий. Получены аналогические зависимости для нахождения напряженно-деформированного состояния сечений усиленных моно- и бистальных стержней поясными листами в области ограниченных пластических деформаций. Радиональные площади листов, усиливающих верхнюю и нижнюю полки бистальных стержней определяются исходя из условия прохождения нейтральной линии эпюры продольных деформаций через середину стенки, чему соответствуют наибольший воспринимаемый угловым сечением изгибающий момент и полное использование прочности материала листов усиления.

Проблема расчета стальных конструкций из идеального упруго-пластического материала при повторно-переменном квазистатическом приложении внешней нагрузки рассматривались во многих работах, но с учетом одного усилия: для балок изгибающего момента, а для шарнирно-стержневых систем - продольной силы. Для решения задачи прочности стержневой системы в области ограниченных пластических деформаций необходимо ответить на вопрос: приспособится ли каждое расчетное сечение к действующим на него переменным изгибающему моменту и продольному усилию, пределы изменения которых находятся из расчета системы при воздействии всевозможных сочетаний нагрузок. В соответствии со статической теоремой о приспособляемости сечения к повторно-переменному нагружению найдено поле постоянных, самоуравновешенных остаточных напряжений, которые в сумме с напряжениями от внешней нагрузки определенными в предположении неограниченной упругости материала, дают в каждой точке сечения напряжения не превосходящие предел текучести материала. Получены эпюры самоуравновешенных остаточных напряжений и области взаимодействия изгибающих моментов и продольных усилий для симметричных и асимметричных

двухавровых сечений.

В третьей главе исследуется прочность стальных тонко-стенных стержневых элементов металлических конструкций в области ограниченных пластических деформаций с учетом деформированной схемы.

Геометрическая нелинейность в данной работе учитывается лишь как влияние сжато-изогнутости или растянуто-изогнутости на изменение величин изгибающих моментов и выражается уравнением

$$M_{\text{зд}} = M_k + N \cdot v = M_k + M_{\text{кН}}^*$$

где  $v$  — прогиб,  $M_{\text{кН}}^*$  — изгибающий момент с учетом влияния деформированной схемы.

Значения переменных жесткостей бис. стальных стержней рамных конструкций при работе материала за пределом упругости  $E \cdot I_k = E \cdot (\alpha_k \cdot I)$ . Здесь  $\alpha_k$  — коэффициент уменьшения изгибной жесткости ( $k = 0, 1, 2, \dots, m$ )

$$\alpha_k = \left| \epsilon_{\text{Нк}}^y - \epsilon_{\text{Вк}}^y \right| / \left| \epsilon_{\text{Нк}} - \epsilon_{\text{Вк}} \right| \quad (5)$$

В формуле (5)  $\epsilon_{\text{Нк}}^y$ ,  $\epsilon_{\text{Вк}}^y$  — полные деформации соответственно в нижней и верхней части  $k$ -го сечения, вычисленные в предположении неограниченно упругой работы материала и взятые со своими знаками,  $\epsilon_{\text{Нк}}$ ,  $\epsilon_{\text{Вк}}$  — то же, с учетом физической и геометрической нелинейности. С использованием найденных коэффициентов  $\alpha_k$  методом Мера, применяя для численного интегрирования формулу Симпсона, вычисляются полные прогибы  $v_k$  осей стержней рамы за пределом упругости с учетом начальных погрешностей

$$v_k = \int_0^l \bar{M}_k \cdot k \cdot dl.$$

Здесь  $\bar{M}_k$  — эпюра изгибающих моментов от единичной нагрузки, приложенной в рассматриваемом  $k$ -том сечении стержня рамы по направлению искомого прогиба. Возможность применения метода Мера обеспечивается сохранением гипотезы плоских сечений и определением кривизны, исходя из упругого ядра. Рассчитываемая рама на каждой итерации рассматривается как линейно-деформируемая система с фиксированными значениями переменных жесткостей. Для такой системы на каждом шаге последовательных приближений при ее расчете на новые нагрузки производится вычисление реактивных усилий на концах стержней с учетом физической и геометрической нелинейности. При этом физиче-

ская нелинейность учитывается коэффициентом  $\alpha_k$ . Геометрическая - введением дополнительного изгибающего момента  $M_{\text{км}}$ , возникающего от действия продольных усилия  $N$  вследствие искривления осей (прогибов)  $y_k$  стержневой рамы.

Как показали исследования работы сжато- и растянуто-изогнутых бистальных стержней по деформированной схеме, в случаях воздействия на стержень продольной и поперечных сил, концевых моментов  $M_1$  и  $M_2$ , учет деформированной схемы либо влияет на наибольшее значение момент в стержне, либо такое влияние отсутствует. В последнем случае расчетной является наибольшая величина изгибающего момента, определенно по недеформированной схеме.

Указанное изменение величин моментов учитывается путем введения корректировочного коэффициента  $\nu$ , равного отношению наибольшего изгибающего момента  $M_d^{\text{max}}$ , определенного по деформированной схеме, к соответствующему наибольшему моменту  $M^{\text{max}}$ , определенному по недеформированной схеме от той же нагрузки в виде продольной силы  $N$  и поперечных сил  $F$ .

$$\nu = M_d^{\text{max}} / M^{\text{max}}.$$

Для вычисления коэффициентов  $\nu$  решается задача нахождения величины поперечной нагрузки  $F$ , взаимодействие которой с известной продольной нагрузкой  $N$  приводит к развитию в наиболее напряженном сечении бистального стержня предельной величины пластических деформаций  $\epsilon_{\text{пр.пл}}$  при определенном усилии по деформированной схеме. В результате выполненных расчетов составлены обширные таблицы корректировочных коэффициентов  $\nu$  к формулам упруго-пластического расчета прочности по критериям ограниченных пластических деформаций, полученным ранее без учета деформированной схемы.

Изложена методика определения докритического состояния сжато-изогнутых и внецентренно-сжатых бистальных элементов рамных конструкций, а также установлены области расчета на прочность (по предлагаемой методике) и на устойчивость для сжато-изогнутых бистальных стержней. В этом случае устойчивость стержневой рамной конструкции можно исследовать энергетическим способом, который автором реализован в следующей форме.

Пусть на бистальной стержень воздействуют нагрузки в виде продольной силы  $N$ , приложенной по концам стержня, нескольких поперечных сил  $F_i$  и концевых моментов  $M_1$  и  $M_2$ .

тогда приращение внешней энергии  $\Delta W_p$  равно по величине работе внешних сил на перемещениях  $\Delta l_1$ ,  $\Delta l_F$ ,  $\Delta r_1$  и  $\Delta r_2$ , получаемых от малых приращений кривизн  $\Delta \kappa$  по всей длине стержня, входящего в состав рамы

$$\Delta W_p = F \cdot \Delta l_1 + F_1 \cdot \Delta l_F + M_1 \cdot \Delta r_1 + M_2 \cdot \Delta r_2.$$

Приращение внутренней энергии  $\Delta W$  при изгибе определяется численно при малых приращениях кривизн  $\Delta \kappa_k$  на участках стержня рамы длиной  $\Delta l_1$  по формуле

$$\Delta W = \int M_k \cdot \kappa_k \cdot d l_1 = \sum_{k=1}^m M_k \cdot \Delta \kappa_k \cdot \Delta l_1.$$

где  $M_k$  — значения изгибающих моментов на концах участков стержня рамы  $\Delta l_1$ , определенные по деформированной схеме.

Выполненные на ЭВМ расчеты показали, что в зависимости от схемы нагружения одного и того же бистального стержня рамы внешними нагрузками величины областей устойчивого состояния различны. В результате оказалось, что для наиболее распространенных в практике значений гибкостей бистальных стержней и величин продольных усилий  $N/N_{lim} = 0,1 \dots 0,3$  имеется обширная область, где расчет стержня лимитируется их прочностью, то есть достижением величины предельных пластических деформаций при определении усилий по деформированной схеме в докритическом состоянии рамной конструкции.

Также разработана методика расчета усиления разрезных балок по критерию ограниченных пластических деформаций.

Длины листов усиления определяются по теоретическим местам их обрыва. Согласно действующим нормативным документам теоретические места срыва элементов усиления рекомендуется назначать из условия работы неусиленных сечений в упругой области, допуская, таким образом, развитие предельных деформаций  $\epsilon_{sp,lim}$  лишь в одном наиболее нагруженном сечении усиленной балки. В предлагаемой методике расчета усиления обрыв листов назначается в местах развития предельных пластических деформаций  $\epsilon_{sp,lim}$  в неусиленном сечении и сечении усиленном одним листом у меньшей полки, то есть допускается развитие предельных пластических деформаций в нескольких сечениях по длине балки. В связи с этим для сравнения величин остаточных прогибов расчет выполняется с учетом обоих условий.

С учетом коэффициентов  $\alpha$  методом Мора численным интег-

ированием по формуле Симпсона находятся полные прогибы, прогибы в пределах упругой работы и остаточные прогибы.

Проведенные исследования показали, что в случае, когда развитие предельных пластических деформаций допускается в нескольких местах при усилении резрезных балок экономия стали листов усиления достигает 29...72% по сравнению со случаем, допускающим развитие предельных пластических деформаций лишь в одном наиболее напряженном сечении, как это рекомендуется СНиП II-23-81<sup>2</sup>. Величина экономии стали зависит от схем нагружения балки, асимметрии сечения, величины предельной пластической деформации  $\epsilon_{ip,lim}$  и коэффициента увеличения нагрузки  $k_R$ . При этом величины остаточных прогибов не превышают 40% от полных прогибов.

Четвертая глава посвящена исследованию перераспределения усилий в стальных и бистальных в том числе усиленных неразрезных балках в области ограниченных пластических деформаций. Отмечено, что наиболее эффективным итерационным методом расчета прочности стержневых систем за пределом упругости является метод, основанный на возобновлении предельной величины пластической деформации в наиболее нагруженном сечении.

Рассмотрим ход итерационного процесса, в котором указанным выше методом решается обратная задача определения величины компонентов вектора нагрузки  $F$  при заданных местах расположения и соотношения между их значениями. Величина предельных пластических деформаций  $\epsilon_{ip,lim}$  в наиболее деформируемом месте системы на каждом шаге последовательных приближений возобновляется изменением всех компонентов  $F$  пропорционально одному параметру  $\lambda^{(n)}$ , который определяется для  $n$  ой итерации по формуле

$$\lambda^{(n)} = | \bar{N}_{k,lim}^{(n)} | / | \bar{N}_{k,lim}^{(n-1)} |.$$

где  $\bar{N}_{k,lim}^{(n)}$  - вектор найденного предельного внутреннего усилия, под действием которого в сечении  $k^{(n)}$  развивается деформация  $\epsilon_{ip,lim}$ ;  $\bar{N}_{k,lim}^{(n-1)}$  - вектор найденного предельного внутреннего усилия, взятый из предыдущей итерации.

Предельная нагрузка  $F$ , далее используемая в последующей итерации, находится по формуле

$$F^{(n+1)} = \lambda^{(n)} \cdot F^{(n)}.$$

Одновременно учитывается изменение жесткостей сечений всей

конструкции, в которых развивается текучесть, коэффициентами ослабления

$$c_{km}^{(n)} = \frac{M_k^{(n-1)}}{E \cdot I_k \cdot x_k^{(n-1)}}$$

где  $M_k^{(n-1)}$  - изгибающий момент на участке  $k$ , взятый из предыдущей итерации;  $I_k$  - момент инерции;  $x_k^{(n-1)}$  - кривизна продольной оси, определяемая по формуле

$$x_k^{(n-1)} = \frac{e_{ep,k}^{(t)} + e_{ep,k}^{(d)}}{h}$$

здесь  $e_{ep,k}^{(t)}$ ,  $e_{ep,k}^{(d)}$  - полные деформации в верхних и нижних волокнах сечения  $k$ ;  $h$  - высота сечения. Процесс продолжается до достижения требуемой точности.

Для расчета неразрезных балок был использован метод сил, основная система которого легко формализуется путем принятия дополнительных шарниров над всеми промежуточными опорами неразрезных балок.

Перед началом итерационного процесса выполняется расчет неразрезной балки в пределах упругой работы материала на произвольную величину  $F$  заданного вида нагрузки.

Для последующих итераций с учетом упруго-пластической работы материала коэффициенты канонических уравнения определялись по методу Симпсона с учетом ослабления сечения в местах возникновения пластических деформаций. Полученная эпюра изгибающих моментов  $M^{(n)}$  в месте действия наибольшего из них возобновлялась до величины момента  $M_{x,lim}$ , вызывающего в сечении развитие деформации  $e_{ep,lim}$ . Значение момента  $M_{x,lim}$  определялось из напряженно-деформированного состояния сечения решением обратной задачи, то есть при заданной величине ограниченной пластической деформации. Далее, умножением эпюры моментов  $M^{(n)}$  на коэффициент  $\lambda$ , получали окончательную эпюру моментов этой итерации.

Аналогично процесс последовательных приближений выполнялся до достижения заданной точности.

Как известно, при развитии ограниченных пластических деформаций наибольшие значения изгибающих моментов  $M_{x,lim}$  после перераспределения получают между значениями моментов  $M_{max}$ , вычисленных в предположении неограниченно упругой работы материала, и моментов  $M_{ef}$  в предположении полного выравнивания изгибающих моментов. Это позволило при расчетах определять степень перераспределений искомых моментов путем

аппроксимации значения моментов  $M_{x,lim}$  в интервале между значениями моментов  $M_{max}$  и  $M_{ef}$ . Для этого введен параметр  $\alpha$ , определяющий степень перераспределения за пределом упругости

$$\alpha = (M_{max} - M_{x,lim}) / (M_{max} - M_{ef}).$$

Проведенные исследования перераспределения изгибающих моментов в моно- и бистальных двутавровых неразрезных балках симметричного асимметричного сечения показали, что в двухпролетных балках асимметричного сечения, по сравнению с аналогичными балками симметричного сечения коэффициент степени перераспределения  $\alpha$  (в зависимости от схемы нагружения) больше на 30...70% для отношения  $A_2/A_1 = 0,5$  и 1, что объясняется увеличением зон пластических деформаций. Для отношений  $A_2/A_1 = 2$  и 4 параметр  $\alpha$  у балок асимметричного сечения на 6...20% меньше, чем у симметричных балок ( $A_2$  - площадь стенки двутавра).

Рассмотрены особенности перераспределения усилий в моностаальных многопролетных неразрезных балках, где отмечено сохранение длины зоны развития пластических деформаций, в сравнении с двухпролетными. При этом, нагрузка необходимая для достижения пластической деформации  $\epsilon_{sp,lim}$  в зависимости от схемы нагружения, увеличилась в 1,02...1,43 раза.

В случае необходимости усиления неразрезных балок в связи с техническим перевооружением или реконструкцией известны нагрузки на конструкции. Алгоритм расчета прочности усиленных неразрезных балок с учетом перераспределения усилий строится по итерационному принципу, основанному на возобновлении величин реальных пластических деформаций на каждом шаге последовательных приближений путем соответствующего назначения рациональных площадей и длин листов усиления. Из изложенного следует универсальность метода возобновления ограниченных пластических деформаций, а именно: при расчете неразрезных балок находилась максимальная нагрузка заданного вида, вызывавшая в наиболее нагруженном сечении предельную пластическую деформацию, а при расчете усиленных балок на заданную величину нагрузки осуществлялся подбор рациональных площадей и длин листов усиления.

Расчет неразрезных балок по критерию ограниченных пластических деформаций из-за появления перераспределения усилий оставляет некоторый резерв несущей способности по сравнению с расчетом по теории предельного равновесия. Получить

выравнивание изгибающих моментов в пролете и на опоре при сохранении ограничения развития пластических деформаций можно методом предварительного напряжения балок, причем наиболее экономично это выполнить способом смещения уровня упруго податливых опор двухпролетных балок.

Выяснено, что значения изгибающих моментов, возникающих от реальных податливостей опор неразрезных балок и значения перераспределения моментов за счет развития ограниченных пластических деформаций являются величинами одного порядка. Кроме того, просадки опор из-за податливости по величине сопоставимы с искусственными изменениями уровней опор при создании необходимого предварительного напряжения.

Пятая глава посвящена проблеме учета деформированной схемы и ее влияния на перераспределение усилий в стержневых рамных конструкциях в области ограниченных пластических деформаций.

При расчете стержневых рамных конструкций с учетом физической и геометрической нелинейности в области ограниченных пластических деформаций использован метод перемещений. На каждом шаге итерационного процесса коэффициенты системы канонических уравнений корректируются за счет измененных жесткостей на упруго-пластических участках работы сечений. Применение итерационного метода возобновления ограниченных пластических деформаций позволяет произвести расчет рамных конструкций и достичь точности вычислений в 0,1% на 3...5 итерации. В результате исследования выявлено:

- перераспределение усилий увеличивается, если к стержню, в сечениях которого развиваются предельные пластические деформации, присоединяется несколько стержней рамной конструкции;
- перераспределение усилий в значительной мере происходит в одноименных частях рамной конструкции. Если предельные ограниченные пластические деформации развиваются в стойке, то большее перераспределение произойдет в стойках по сравнению с ригелями и наоборот;
- перераспределение усилий меняет характер в зависимости от возникновения дополнительного участка упруго-пластической работы материала в любом месте рамы;
- в отдаленных от упруго-пластической работы стержней местах рамной конструкции перераспределение усилий затухает;

- перераспределение изгибающих моментов значительно возрастает, когда предельных пластических деформаций достигает несколько сечений рамной конструкции, за исключением того случая, когда такие условия возникают во всех колоннах одного этажа, либо в ригелях одного яруса;

-- при использовании итерационного метода возобновления предельных пластических деформаций возможна оптимизация конструкции.

В шестой главе приведены результаты экспериментальных исследований работы статически определимых и неопределимых, в том числе усиленных, стержневых конструкций за пределом упругости, выполненных автором и его аспирантами.

На основе анализа технических характеристик существующих установок для проведения многокомпонентных испытаний и учета их недостатков была запроектирована и изготовлена установка, защищенная тремя авторскими свидетельствами (№ 1020772, № 1146572, № 1350537). На данной установке возможно создавать центральное сжатие (растяжение), изгиб, изгиб со сжатием (растяжением), косой изгиб со сжатием (растяжением), продольно-поперечный изгиб и действие сосредоточенного момента. Применение нагружающего устройства типа "винт-гайка" совместно со стабилизирующими пружинами обеспечивает свободное деформирование испытуемой модели. Установка для испытания стержней на сложное сопротивление позволяет моделировать работу как отдельного стержня так и в составе статически неопределимой системы.

Для испытания статически неопределимых систем была запроектирована и изготовлена установка, защищенная двумя авторскими свидетельствами (№ 1350536, № 1610375), позволяющая испытывать рамные конструкции и неразрезные балки на воздействие сосредоточенных горизонтальных и вертикальных сил.

Мощность экспериментальной установки позволяет испытывать конструкции из сварных составных сечений и прокатных профилей высотой до 350 мм. Известно, что если модель и реальная конструкция выполняются из одного материала, то они будут механически подобны как упругие системы. Кроме того, принимаемые модели имеют размер, настолько превышающие структурное строение стали, что и за пределами упругости их работа не должна отличаться от работы реальных конструкций. Поэтому в данном случае было принято одномасштабное модели-

рование.

Программа работ по экспериментальным исследованиям включала:

- постановку 16 опытов по определению напряженно-деформированного и предельного состояния сечения сварных бистальных двутавров, работающих в условиях одноосного изгиба, изгиба с продольной силой, двухосного изгиба и двухосного изгиба с продольной силой;

- то же, для 16 моделей на воздействие сосредоточенного момента;

- испытание 6 моделей сварных бистальных двутавров при продольно-поперечном изгибе (в том числе и внецентренно приложенной продольной силой) по изучению их прочности.

проведение 16 комплексных опытов по изучению перераспределения усилия в прокатных (№ 30) и сварных (высота стенки 300 мм) неразрезных балках и определения несущей способности при различных сочетаниях сосредоточенных нагрузок в одном и разных пролетах;

- то же, для 15 усиленных моно- и бистальных разрезных и неразрезных балок;

- комплексные испытания 28 моделей прокатных и сварных одноконтурных рам пролетом 4130 мм и высотой стоек 1930 мм с целью изучения характера деформирования, перераспределения усилия и определения несущей способности при различных сочетаниях горизонтальных и вертикальных сосредоточенных нагрузках.

Задачи экспериментального исследования:

- опытная проверка принятых в разработанных методиках расчета прочности статически определимых и неопределимых стержневых конструкциях предпосылок и допущений;

- изучение действительной работы стальных и бистальных стержневых конструкций при различных сочетаниях нагрузок;

- определение прочности исследуемых стержневых конструкций и сопоставление полученных результатов с теоретическими данными.

Сопоставление экспериментальных и теоретических данных по предельным нагрузкам показало расхождение от 5% до 11% в запас прочности.

В главе седьмой на основе полученных в диссертации теоретических результатов и проведенных экспериментальных ис-

следования автором предложена практическая методика расчета изгибаемых элементов стальных строительных конструкций по критерию предельных пластических деформаций. При этом сохраняется традиционный вид формул проверки прочности в пределах упругости, а учет развития пластических деформаций производится дополнением к геометрическим характеристикам сечений поправочных коэффициентов  $c_x$ ,  $c_y$ , для которых составлены подробные таб. цы.

В соответствии со стандартом СЭВ предлагается для расчетов на прочность установить четыре группы конструкций. В первую группу включаются конструкции, для которых в порядке исключения прочность проверяется в пределах упругости, в том числе подкрановые балки тяжелого режима работы. Вторая группа - конструкции, работающие на подвижные нагрузки,  $\epsilon_{ip,lim} = 0,1\%$ , третья группа - конструкции, работающие на статические нагрузки,  $\epsilon_{ip,lim} = 0,2\%$ . Четвертая группа - конструкции, также работающие на статические нагрузки, но находящиеся в особо благоприятных условиях для развития пластических деформаций - отсутствие местных напряжений, повышенная местная устойчивость и т.п.,  $\epsilon_{ip,lim} = 0,4\%$ .

Вышеуказанные величины  $\epsilon_{ip,lim}$  в необходимых случаях уменьшаются из условий местной устойчивости с соответствующим уменьшением коэффициентов  $c_x$ ,  $c_y$ . Для четвертой группы конструкций  $\epsilon_{ip,lim}$  фактически совпадает с осредненным значением пластической деформации, учитываемой СНиП II-23-81<sup>\*</sup>, во всем диапазоне прочностных характеристик сталей, для которых предусмотрен расчет за пределом упругости.

Расчет прочности бигальных балок следует выполнять с учетом ограниченного развития пластических деформаций по формулам:

при изгибе в одной из главных плоскостей (относительно оси  $x$ )

$$\frac{M_x}{c_x \cdot W_{x,min}} \leq R_f \cdot \gamma_c; \quad (5)$$

при изгибе в двух главных плоскостях

$$\frac{M_x}{c_{Mx} \cdot I_x} \cdot y \pm \frac{M_y}{c_y \cdot I_y} \cdot x \leq R_f \cdot \gamma_c; \quad (6)$$

при осевой силе с изгибом в одной из главных плоскостей

(относительно оси  $x$ )

$$\frac{N}{A_f + A_2 \cdot R_v \sqrt{R_f}} \pm \frac{\nu \cdot M_x}{C_{N_x} \cdot I_x} \cdot y \leq R_f \cdot \gamma_c; \quad (7)$$

при осевой силе с изгибом в двух главных плоскостях

$$\frac{N}{A_f + A_2 \cdot R_v \sqrt{R_f}} \pm \frac{M_x}{C_{MN_x} \cdot I_x} \cdot y \pm \frac{M_y}{C_{N_y} \cdot I_y} \cdot x \leq R_f \cdot \gamma_c; \quad (8)$$

где  $C_{N_x}$ ,  $C_{N_y}$ ,  $C_{MN_x}$  - коэффициенты, учитывающие физическую нелинейность, а  $\nu$  - геометрическую нелинейность;  $A_f = A_1 + A_2$ .

Вычисление корректировочных коэффициентов  $\nu$  по формулам, которые можно было бы привести в нормативных документах, не представляется возможным. В связи с этим численные значения коэффициентов  $\nu$  определены непосредственно из расчетов математических моделей бистальных стержней на ЭВМ. Коэффициенты  $\nu$  вычислены для различных схем нагружения в зависимости от величины обобщенного параметра  $\nu = 1_{ef} \cdot \sqrt{N/E \cdot A}$  (или  $\nu = \lambda \cdot \sqrt{N/E \cdot A}$ ) и для них начислены специальные таблицы.

На основе анализа кривых взаимодействия автор показывает, что степень повышения воспринимаемых сечением изгибающих моментов при предельных пластических деформациях в условиях сложного сопротивления изменяется по сравнению с одноосным изгибом как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Поэтому в формулы (6), (7) и (8) нельзя подставить непосредственно ранее найденные коэффициенты  $C_x$ , их необходимо скорректировать с учетом влияния взаимодействия усилий по формулам:

$$C_{N_x} = 1 + \epsilon_x \cdot (C_x - 1); \quad C_{N_y} = 1 + \eta_y \cdot (C_y - 1);$$

$$C_{N_x} = 1 + \eta_x \cdot (C_x - 1); \quad C_{MN_x} = 1 + \epsilon_x \cdot \eta_x \cdot (C_x - 1).$$

Здесь  $C_{N_x}$ ,  $C_{N_y}$ ,  $C_{MN_x}$  и  $C_{N_y}$  - поправочные коэффициенты приходящие, как и коэффициент  $C_x$  в формуле (5), провери предельных пластических деформаций к форме проверки условных напряжений в конкретной точке сечения.

Коэффициенты  $\epsilon$  и  $\eta$  определены по точным кривым взаимодействия с целью соответствующей корректировки значений коэффициентов в с. Численно коэффициенты  $\epsilon$  и  $\eta$  равны отношению приращения величины соответствующего изгибающего момента при взаимодействии усилий к его приращению в том же сечении при одноосном изгибе. Для коэффициентов  $\epsilon$  и  $\eta$  составлены простые таблицы в функции отношения взаимодействующих усилий и пара-

метров геометрии сечения.

Расчет на прочность двутавровых моно- и бистальных балок, усиленных поясными листами, при изгибе в одной из главных плоскостей следует выполнять по формуле

$$M_x / (C_{гх} \cdot \bar{W}_{x, \min}) \leq R_{ст} \cdot \gamma_c,$$

где  $R_{ст}$  - расчетное сопротивление стали листов усиления;  $\bar{W}_{x, \min}$  - приведенный момент сопротивления усиленного сечения. При усиленном балок асимметричных сечений, как наиболее общего случая двутавровых сечений, величина  $\bar{W}_{x, \min}$  определяется исходя из того, что приведенные площади верхней и нижней полок соответственно  $\bar{A}_1 = A_{1R} + A_1 \cdot R_f / R_{ст}$  и  $\bar{A}_2 = A_{2R} + A_2 \cdot R_f / R_{ст}$ , а площадь стенки  $A_3$ .

Расчетные коэффициенты  $C_{гх}$  определялись аналогично коэффициентам  $C_x$ . Для коэффициентов  $C_{гх}$  составлены таблицы при различных параметрах геометрии усиленного сечения с фиксированными значениями расчетных сопротивлений стали неусиленного сечения и листов усиления, а также величины предельных пластических деформаций  $\epsilon_{p, \lim}$ .

Проведенные теоретические исследования и эксперименты показали, что при работе неразрезных балок под нагрузками предельного равновесия, а тем более под нагрузками, соответствующими ограниченному пластическим деформациям, перераспределение изгибающих моментов далеко не достигает полного выравнивания, хотя и получается существенным. В работе получен простой метод учета перераспределения моментов по формуле:

$$M = \alpha \cdot M_{\max}; \quad \alpha = 1 - n \cdot (1 - M_{ef} / M_{\max}). \quad (9)$$

Обозначения в формулах (9) приняты по СНиП II-23-81\*. Коэффициент  $n$  находится по формулам:

$$\text{при статической нагрузке} \quad n = 125 \cdot \epsilon_{p, \max};$$

$$\text{при подвижной нагрузке} \quad n = 400 \cdot \epsilon_{p, \max};$$

где  $\epsilon_{p, \max}$  - наибольшая продольная пластическая деформация.

Глава восьмая посвящена применению предлагаемых методов расчета прочности в рассматриваемых конструкциях и выявлению экономической эффективности результатов исследования.

Экономическая эффективность результатов выполненных исследований в работе находится путем вычисления потенциально-го снижения расхода стали в предположении использования проектными организациями предлагаемых методов. К примеру, эко-

номический эффект от внедрения предлагаемой методики расчета может быть посчитан в виде получаемой экономии стали в бистальных балках по сравнению с моностальными из низкопрочного материала, используемого для изготовления стенки.

В этом случае экономия стали достигает 18...38%, хотя некоторая часть этой экономии получается за счет применения в полках более прочного материала. Если же сравнивать бистальные балки, посчитанные по предлагаемой методике, с моностальными из более прочной стали полков, то здесь экономии стали может не быть или она составляет не более 2%. Экономический эффект состоит в замене дорогой высокопрочной стали стенки дешевой низкопрочной сталью без снижения воспринимаемых усилия. Учитывая, что в среднем высокопрочная сталь в 40% дороже низкопрочной, и что площадь стенки составляет около половины площади сечения, возможное снижение стоимости следует ожидать около 20%.

Согласно подсчетам ЦНИИПроектстальконструкции возможный годовой объем применения бистальных конструкций, рассчитываемых по предельным пластическим деформациям в процентах к полному объему соответствующих конструктивных элементов составляет: подкрановые конструкции - 67%, балки покрытия и перекрытия - 33%, объем других типов конструкций - 80 тыс. тонн.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований доказано, что при проектировании стальных и бистальных статически определимых и неопределимых стержневых конструкций необходимо учитывать развитие ограниченных пластических деформаций и влияние физической нелинейности при статических нагрузках. Применение учета сдвинутых пластических деформации расширяет область работы стали и приводит к существенной экономии металла при одновременном увеличении равнопрочности по сравнению с расчетом в пределах упругости и обоснованному увеличению надежности.

2. Разработана теория работы стальных и бистальных статически определимых и неопределимых стержневых конструкций за пределом упругости, основанная на предложенном способе возобновления ограниченных пластических деформаций при воздействии статических нагрузения, дающая возможность вычис-

лить значения напряжений, деформаций и прогибов с учетом касательных напряжений, сложного сопротивления, перераспределения усилия и деформированной схемы.

3. Примененный для расчета прочности стальных и бистальных стержневых конструкций с учетом физической и геометрической нелинейности способ возобновления предельной величины пластических деформаций в наиболее напряженном сечении на каждом шаге последовательных приближений позволяет получить:

- напряженно-деформированное состояние сечений стержневых конструкций;
- численные значения прогибов и смещений;
- реактивные усилия, позволяющие корректировать матрицы жесткости стержней на каждом шаге итерационного процесса при расчете стержневых систем;
- рациональные площади листов усиления разрезных и неразрезных балок;
- сходимость итерационного процесса на 3...6 итерации.

4. Установлено, что допущение развития предельных пластических деформаций в нескольких местах по длине усиленной моно- и бистальной балки (разрезной или неразрезной), в том числе и у теоретических мест обрыва листов усиления, не приводит к значительному росту остаточных прогибов по сравнению со случаем, когда развитие предельных пластических деформаций допускается лишь в одном наиболее нагруженном сечении.

5. На основе предложенного метода расчета прочности обычных (усиленных) неразрезных балок при учете перераспределения изгибающих моментов разработана методика расчета предварительного напряжения стальных моно- и бистальных неразрезных балок на упруго-податливых опорах, позволяющая сократить расход материала и получить дополнительную экономию стали листов усиления. Использование учета податливости опор существенно увеличивает достоверность расчета, так как изгибающие моменты от податливости опор и значения перераспределения моментов за счет развития ограниченных пластических деформаций есть величины близкие к друг другу.

6. Использование энергетического метода дало возможность существенно увеличить точность и достоверность при разделении расчетов на прочность и устойчивость по сравнению

с расчетами по СНиП 11-23-81\*. Установлена достаточно обширная область для реальных значения продольных сжимающих усилий и реальных величин гибкостей стержней, при которых определяющим является расчет прочности моно- и бистальных стержней с учетом физической и геометрической нелинейности.

7. На специально сконструированных автором установках, защищенных пятью авторскими свидетельствами, проведены комплексные экспериментальные исследования действительной работы статически определяемых и неопределяемых (усиленных) моно- и бистальных стержневых конструкции за пределом упругости на воздействие статических нагрузок. Эксперименты подтвердили полученные теоретические результаты и предпосылки, положенные в основу разработанного метода расчета прочности.

8. Для задания вида изогнутой оси стержня при учете физической и геометрической нелинейности не используются аппроксимации, а определяется ее действительная форма при расчете математической модели стержня на ЭВМ. Определенные таким образом прогибы стержня наиболее точно соответствуют исследуемому напряженно-деформированному состоянию конструкции.

9. Разработана практическая методика расчета прочности бистальных стержней по деформированной схеме в области ограниченных пластических деформаций, выполненная в виде проверки условных напряжений при сохранении общепринятого вида формул расчета в пределах упругости. Влияние физической и геометрической нелинейности учитывается системой коэффициентов, для которых начислены специальные таблицы.

10. На основе предложенного критерия прочности и теории работы разработана практическая методика расчета прочности бистальных неразрезных балок в области ограниченных пластических деформаций при сохранении общепринятого вида формул расчета, используемые СНиП 11-23-81\*. Влияние перераспределения изгибающих моментов учитывается корректировочным коэффициентом, для которого составлены таблицы.

11. Сравнительный анализ величин предельных усилий показал, что влияние начальных напряжений от сварки или прокатки при ограниченных пластических деформациях в симметричных сечениях при малых  $m_y$  незначительно снижают величину воспринимаемых изгибающих моментов  $M_x$ . При больших  $m_y$  в симметричных и асимметричных сечениях указанное снижение

возрастает с увеличением асимметрии, что в предложениях для практических расчетов учитывается изменением соответствующих коэффициентов.

12. На основе анализа результатов опытного проектирования показано, что применение учета ограниченных пластических деформаций при статических нагрузках по предлагаемой методике приводит к уменьшению расхода стали:

от 5 до 16% при расчете прочности растянуто-изогнутых сварных стержней, по сравнению с расчетами, выполненными по недеформированной схеме;

- до 7% при расчете прочности сжато-изогнутых сварных бистальных колонн по сравнению с расчетами по СНиП 11-23-81\*;

- до 8% при расчете прочности изгибаемых моно- и бистальных неразрезных балок по сравнению с расчетами по СНиП 11-23-81\*;

- до 8% площади листов усиления при расчете прочности усиленных разрезных и неразрезных моно- и бистальных балок по сравнению с расчетами по СНиП 11-23-81\*.

13. Выполненные и приведенные в работе примеры расчета прочности стальных рам по критерию ограниченных пластических деформаций с учетом деформированной схемы позволили сделать вывод о возможном повышении воспринимаемой нагрузки рассчитанными рамами в размере 18...34%, а также увеличении перераспределения усилий в рамах до 20% по сравнению с расчетами, выполненными по недеформированной схеме при неограниченно упругой работе материала. При определенных сочетаниях нагрузки и жесткостей стержней рамы изгибающие моменты (хотя и не самые большие для этих стержней) могут поменять знак в результате перераспределения усилий.

Основные научные результаты включенные в диссертацию опубликованы в следующих работах:

1. Шебанин В.С. Учет сварочных напряжений при косом изгибе в условиях ограниченных пластических деформаций. // Труды Николаевского кораблестроительного института. - Николаев, -1980, вып. 162. - С. 88-93.

2. Шебанин В.С. Влияние сварочных напряжений при изгибе с осевой силой и весьма малых пластических деформаций. // Труды Николаевского кораблестроительного института. - Николаев, -1981, вып. 176. - С. 81-86.

3. Шебанин В.С. Изгиб стальных и бистальных балок с осевой силой при ограниченных пластических деформациях.

//Труды ОИИМФА. -М., ЦРИА "Морфлот". -1981. -С. 73-77.

4. Чернов Н.Л. Шебанин В.С. Особенности расчета бистальных двутавров по критерию предельных пластических деформаций. //Известия вузов. Строительство и архитектура. -Новосибирск. -1983, № 9. -С. 14-18.

5. Богза В.Г., Чернов Н.Л. Шебанин В.С. Установка для испытания материалов. Авторское свидетельство № 1020772, БИ № 20, 1983.

6. Шебанин В.С. Работа бистальных стержней при сложном сопротивлении в области ограниченных пластических деформаций. //Известия вузов. Строительство и архитектура. -Новосибирск, -1985, № 4. -С. 12-16.

7. Богза В.Г., Чернов Н.Л., Шебанин В.С. Веремеенко Н.А. Установка для испытания материалов. Авторское свидетельство № 1146572, БИ № 11, 1985.

8. Стрелецкий Н.Н., Леус Ю.Я., Чернов Н.Л., Шебанин В.С. Лярушенко В.И., Любаров Б.И.; и др. Рекомендации по проектированию бистальных балок. (норм. проект.) ЦНИИПроект-стальконструкция им. Мельникова. -М., -1985. - 48 с.

9. Чернов Н.Л. Шебанин В.С. Расчет прочности статически неопределимых систем при ограниченных пластических деформациях. //Известия вузов. Машиностроение. № 4. -М., -1986. -С. 3-6.

10. Шебанин В.С. Веремеенко Н.А. Испытания прочности сжато-изогнутых стальных стержней с учетом развития ограниченных пластических деформаций. //Известия вузов. Строительство и архитектура. -Новосибирск. -1986, № 11. -С. 10-12.

11. Стрелецкий Н.Н., Чернов Н.Л., Шебанин В.С. Богза В.Г. Расчет усиленных под нагрузкой элементов стальных конструкций по критериям ограниченных пластических деформаций. //Строительная механика и расчет сооружений. Стройиздат. -М., № 3, -1987. -С. 1-4.

12. Шебанин В.С. Веремеенко Н.А., Колкин Л.В. Экспериментальное исследование сжато(растянуто)-изогнутых стальных стержней двутаврового симметричного сечения в области ограниченных пластических деформаций. //Об: Динамика и прочность судовых машин. Труды НКИ. -Николаев, -1987. -С. 27-32.

13. Богза В.Г., Пастушенко С.И., Чернов Н.Л. Шебанин В.С. Установка для испытания материалов. Авторское свидетельство № 1350537. БИ, № 41, 1987.

14. Богза В.Г., Бурковский И.Д., Чернов Н.Л., Шебанин В.С. и др. Двухзонная установка для испытания на прочность. Авторское свидетельство № 1350536. БИ, № 41, 1987.

15. Чернов Н.Л. Шебанин В.С. Сложное сопротивление составных стальных сечений при ограниченных пластических деформациях. //Известия вузов. Строительство и архитектура. -Новосибирск, -1988, № 7. -С. 8-12.

16. Стрелецкий Н.Н., Чернов Н.Л., Шебанин В.С. Богза В.Г. Прочность усиленных стальных конструкций при ограниченных пластических деформациях. В кн.: Реконструкция промышленных зданий и сооружения. -М., Стройиздат, -1988. -С. 66-70.
17. Чернов Н.Л., Фридкин В.М. Шебанин В.С. Об одном алгоритме подбора сечения элементов в стержневых металлоконструкциях. //Известия вузов. Строительство и архитектура. -Новосибирск, 17, -1989. -С. 9-14.
18. Чернов Н.Л. Шебанин В.С. Бурковский И.Д., Мирошниченко Е.А. Преднапряжение бистальных неразрезных балок смещением податливых опор при ограниченных пластических деформациях. //Известия вузов. Строительство и архитектура. -Новосибирск, № 12. -1989. -С. 8-12.
19. Шебанин В.С. Экспериментальные исследования работы стальных и бистальных стержней в области ограниченных пластических деформация. //Судостроение. Киев-Одесса. "Вища школа". -1989. Вып. 38. -С. 33-38.
20. Шебанин В.С. Прочность стальных и бистальных рам при ограниченных пластических деформациях. //Известия вузов. Строительство и архитектура. -Новосибирск, -1990, № 9. -С. 16-19.
21. Чернов Н.Л., Артюшкин И.А., Купченко Ю.В. Шебанин В.С. Учет влияния стесненного кручения при сложном сопротивлении стальных открытых сечений тонкостенных стержней при ограниченных пластических деформациях. //Изв.вузов. Строительство и архитектура. -Новосибирск, -1990, № 12. -С. 5-9.
22. Бурковский И.Д., Богза В.Г., Чернов Н.Л., Шебанин В.С. Двухзонная установка для испытания на прочность. Авторское свидетельство № 1610375, БИ № 44, 1990.
23. Чернов Н.Л., Артюшкин И.А., Мещанинов А.А. Шебанин В.С. Расчет элементов пространственных стальных стержневых систем с учетом физической и геометрической нелинейности. //Известия вузов. Строительство и архитектура. -Новосибирск, -1991, № 7. -С. 18-20.
24. Чернов Н.Л., Артюшкин И.А., Купченко Ю.В. Шебанин В.С. Расчет элементов стальных стержневых систем за пределом упругости по деформированной схеме. //Изв. вузов. Строительство и архитектура. -Новосибирск. -1991, № 2. -С. 3-7.
25. Чернов Н.Л. Шебанин В.С. Прочность стальных стержней при переменных нагрузжениях. //Промышленное строит. и инжн. сооружения. -Киев, -1992, № 2. -С. 26-27.
26. Чернов Н.Л., Шебанин В.С. Тарасенко В.Л. Прочность изгибаемых элементов при ограниченных пластических деформациях. В кн.: Совершенствование металлических конструкций. Академия наук Украины. Институт электросварки им. Е.О. Патона. -Киев. Наукова думка, -1992. -С. 123-127.

Подп. к печати 28.04.93г. Формат 60x84 1/16.  
Объём 1, Зуч. изд. л. 2, Оп. л. Заказ № 804. Тираж 100 экз.  
Гортипография Одесского управления по печати, цех №3.  
Ленина 49.

11/5000





AB 27.359

**AB 27.359**