

На правах рукописи

Хамудисова (Лузенина) Ирина Борисовна

ОЦЕНКА РЕЗЕРВОВ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ  
СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ СТАЛЬНЫХ ФЕРМ,  
РАБОТАЮЩИХ ЗА ПРЕДЕЛАМИ УПРУГОСТИ

Специальность 05.23.01 – «Строительные конструкции,  
здания и сооружения»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург-2002

Работа выполнена на кафедре «Строительные конструкции» Уральского государственного технического университета - УПИ.

Научный руководитель: академик РААСН, Заслуженный строитель РФ,  
доктор технических наук, профессор  
Ольков Я.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Холопов И.С.;  
кандидат технических наук, доцент  
Антипин А.А.

Ведущая организация: ЗАО «Институт Проектстальконструкция»,  
г.Екатеринбург.

Защита состоится 19 декабря 2002 г., в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д-212.285.06 при Уральском государственном техническом университете по адресу: Россия, 620002, Екатеринбург, ул.Мира, 19, УГТУ-УПИ, ауд. С-203.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского государственного технического университета - УПИ.

Автореферат разослан «14» ноября 2002 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук,  
доцент

В.Н.Алехин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Техническая и экономическая эффективность и, в конечном счете, конкурентная способность стальных конструкций может быть обеспечена, с одной стороны, разработкой и внедрением прогрессивных методов расчета наиболее близких к действительному напряженному и деформированному состоянию конструкции, с другой – регулярным анализом качественных характеристик разнородного металлопроката.

Следует отметить, что на сегодняшний день, одним из наиболее существенных способов экономии строительной стали и соответственно, снижения стоимости металлических конструкций является учет их работы за пределом упругости. Так при расчете конструкций по уже существующим нормам экономия строительной стали достигает 12%. Кроме обоснованной экономии металла расчет с учетом пластических деформаций имеет ряд преимуществ, такие как - соответствие действительной работе, достижение равнопрочности при проектировании, упрощение статического расчета для ряда конструкций и т.д.

В связи с этим исследование работы статически неопределимых ферм с предельно растянутыми стержнями, работающими за пределами упругости, являются весьма актуальными, а совершенствование методов расчета металлических конструкций основанных на всесторонних исследованиях и анализ качественных характеристик материала - представляют большой практический и научный интерес.

**Цель работы,** заключается в оценке резервов несущей способности статически неопределимых ферм с предельно растянутыми стержнями, работающими за пределом упругости.

Поставленная цель достигнута решением следующих **задач**:

1. Провести экспериментально-теоретическое исследование работы статически неопределимых ферм за пределами упругости.

2. Разработать математическую модель деформирования наиболее растянутого стержня и обосновать количественный критерий, ограничивающий пластические деформации исследуемого стержня.
3. Сформулировать рекомендации к расчету ферм с учетом пластических деформаций.
4. Проанализировать максимально допустимую нагрузку на ферму при ограничении пластических деформаций в наиболее растянутом стержне.
5. Сформировать и исследовать вероятностно-статистическими методами выборочные совокупности показателей основных механических характеристик строительной стали.
6. Произвести фактическую оценку обеспеченности показателей основных механических характеристик стали.

**Научную новизну** работы составляют:

- результаты исследований напряженно-деформированного состояния наиболее растянутых стержней статически неопределимых ферм, работающих за пределами упругости;
- функция, моделирующая напряженно-деформированное состояние наиболее растянутого стержня и позволяющая произвести количественную оценку относительного напряжения при заданной интенсивности пластических деформаций;
- количественный критерий (интенсивность) ограниченных пластических деформаций  $\varepsilon_{ip,lim}$  наиболее растянутого стержня статически неопределимых ферм;
- рекомендации к расчету трехпоясных ферм, работающих за пределами упругости, в том числе оптимальные параметры модуля деформаций на обозначенных этапах работы фермы;
- принцип и алгоритм оценки максимально допустимой нагрузки  $P_{max}$  в нормируемых границах интенсивности пластических деформаций с учетом качественных характеристик строительной стали, позволяющие определить резервы несущей способности ферм, работающих за пре-

делами упругости;

- методика систематизации, контроля и оценки механических свойств металлопроката объединенных по принципу «заменяемых»;
- математическая модель для описания распределений сводной совокупности показателей основных механических характеристик и результаты статистического анализа строительных сталей, объединенных по принципу «заменяемых».

**Практическая значимость** исследований, представленных в диссертации, заключается в следующем:

- сформулированные рекомендации к расчету трехпоясных ферм, работающих с учетом пластических деформаций, дают возможность определить максимально допустимую (увеличенную) нагрузку с учетом фактического состояния конструкции, снизить расход металла за счет перераспределения усилий и полного использования несущей способности стержней;
- предложенная методика оценки механических свойств металлопроката статистическими методами позволяет определять реальные значения исследуемых величин, учитывая особенности распределения;
- определен фактический резерв несущей способности трехпоясных ферм, работающих за пределами упругости, при учете качественных характеристик материала;

**На защиту выносятся** следующие вопросы:

- результаты экспериментально-теоретических исследований напряженно-деформированного состояния наиболее растянутых стержней статически неопределимых ферм, работающих за пределами упругости;
- функция, моделирующая напряженно-деформированное состояние наиболее растянутого стержня статически неопределимых ферм;
- предельное значение интенсивности пластических деформаций  $\varepsilon_{ip,lim}$  наиболее растянутого стержня статически неопределимых ферм;

- рекомендации к расчету трехпоясных ферм, работающих за пределами упругости,
- оценка максимально допустимой нагрузки  $P_{max}$  в нормируемых границах интенсивности пластических деформаций  $\varepsilon_{ip,lim}$  с учетом качественных характеристик строительной стали;
- методика систематизации и контроля механических свойств металлопроката; результаты статистических исследований строительных сталей, объединенных по принципу «заменяемых»;
- функция, моделирующая распределения сводных совокупностей и оценка обеспеченности гарантируемых минимумов показателей механических свойств металлопроката.

**Апробация работы.** Основные результаты экспериментально-теоретических исследований и положения диссертации были представлены на следующих конференциях:

- Межвузовской конференции «Строительство и образование», Екатеринбург, 1999г;
- Межвузовской конференции «Проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений», Пермь, 1999г;
- Межвузовской конференции «Строительство и образование», Екатеринбург, 2000г;
- Второй международной конференции «На передовых рубежах науки и инженерного творчества», Екатеринбург, 2000г;
- Международной научно-практической конференции «Информационные технологии в обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений», Новочеркасск, 2001г;
- Четвертой Всероссийской Internet–конференции «Компьютерное и математическое моделирование в естественных науках», Тамбов, 2002г.

По материалам исследования опубликовано 8 научных работ.

**Объем и структура работы.** Работа состоит из введения, четырех глав, выводов, библиографии и приложений, изложенных на 196 страницах машинописного текста, содержит 70 рисунков, 45 таблиц, библиографический список состоит из 142 наименований.

**Реализация научных исследований.** Материалы для исследования были собраны во время работы на заводе металлоконструкций г.Н.Тагила, научная обработка выполнена в период преподавательской деятельности в НИИ УГТУ, непосредственно реализация научных исследований произведена в период работы автора в строительной фирме. Методика систематизации, контроля и оценки механических свойств металлопроката; рекомендации к расчету ферм, работающих за пределами упругости; принципы оценки резервов несущей способности ферм предложены для практического применения при оценке характеристик металлопроката, планирования проектирования и обследований стропильных конструкций в ОАО «Нижнетагильский завод металлоконструкций», АО «Нижнетагильский металлургический комбинат», ЗАО «Институт Проектстальконструкция». Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности «Промышленное и гражданское строительство».

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отмечена актуальность темы, сформулирована цель и задачи исследования, дана краткая характеристика работы.

**В первой главе** дается краткий обзор работ, выполненных по тематике проведенных исследований.

В последнее время в теории расчета стальных конструкций четко обозначилась тенденция перехода от упругого расчета к расчету с учетом пластических свойств материала. Основоположниками развития пластических расчетов стальных конструкций являлись: Б.Е.Абрикосов, Е.О.Патон, В.Н.Горбунов (1934), Н.Д.Жудин (1935-1936), Н.И.Безухов

(1936) и их последователи в послевоенные годы - А.Р.Ржаницын, А.А.Ильюшин, А.М.Качанов, А.И.Стрельбицкая, А.В.Геммерлинг, Б.М.Броуде, А.А.Гвоздев и др. Следует отметить выдающегося ученого Н.С.Стрелецкого, предложившего критерий ограниченных пластических деформаций при расчете конструкций на прочность по первой группе предельных состояний.

Непосредственно анализом работы статически неопределимых систем, в том числе ферм, в предельном состоянии занимались К.С.Завриев, М.Gruning, И.М.Рабинович, Е.Chwalla, А.А.Гвоздев, К.Jezek, С.А.Бернштейн, А.А. Ильюшин, Б.Н. Горбунов, В.С. Туркин, А.Г. Назаров, Н.М.Беляев, Н.Д.Жудин, J.Fritsche, Н.Bleich, К.Г.Протасов, Н.Н.Стрелецкий, А.L.Baker, P.G.Hadge, Greenberg и W.Prager и другие.

С 70-го года в работе по реализации критерия ограниченных пластических деформаций участвовали Н.П.Мельников, Г.Е.Бельский, Н.Н.Стрелецкий, В.А.Балдин, А.А. Гвоздев, В.А.Трофимов, Н.Л.Чернов, Б.И.Любаров, В.С.Шебанин, С.Д.Кудрявцев, С.А.Ильясевич, Б.М.Броуде, А.А.Фадеев, А.А.Потапкин, В.Д.Насонкин, В.И.Сердюков и многие другие.

С конца 70-х годов началось внедрение в нормативные и инструктивные документы на проектирование критерия ограниченных пластических деформаций. Составлены «Рекомендации по расчету стальных конструкций на прочность по критериям ограниченных пластических деформаций», выпущены «Рекомендации по проектированию бистальных балок», подготовлены «Изменения и дополнения главы СНиП II-23-81\* в части расчетов стальных конструкций на прочность», заменяющие критерий краевой текучести на критерий ограниченных пластических деформаций.

Определение запасов прочности металлических конструкций, учитывая специфику металлургического производства, и назначение нормативных сопротивлений строительных сталей остаются самостоятельными направлениями вероятностно-статистических



исследований, которые впервые проведены в 20-х годах.

Широкое развитие вероятностные методы в строительной механике получили благодаря работам советских ученых Н.С.Стрелецкого, А.Р.Ржаницына, В.В.Болотина, Б.И.Снарскиса, А.В.Геммерлинга, Б.И.Беляева. Большой вклад в проблему изучения статистических свойств строительных сталей внесли В.В.Кураев, В.Г.Чернашкин, Я.М.Лихтарников, Е.Е.Дорнбуш, В.А.Балдин, Б.И.Беляев, А.А.Ойхер и другие.

Из исследований 50-60-х годов по статистическому изучению свойств стального проката, кроме указанных, следует отметить работы П.П.Култыгина, М.М.Сахновского А.А.Абарина и М.П.Черновой, П.И.Соколовского, А.И.Кикина, А.А.Васильева, В.Н.Валя, Н.М.Мулина и А.И.Кочетова, Д.А.Смоляренко, В.А.Черникова, Е.В.Горохова.

С 70-го года по обозначенной проблеме опубликованы результаты исследований М.Р.Урицкого, А.Ф.Графа, Б.Ю.Уварова, К.К.Муханова, П.И.Соколовского, П.Д.Одесского, Л.Н.Ишменёвой, И.С.Немковой.

Обзор исследований показывает, что, несмотря на существенные достижения в области расчета конструкций с учетом пластических деформаций, работа статически неопределимых ферм в упругопластической стадии с учетом качественных характеристик материала изучена не полностью. Рекомендации к расчету ферм с предельно растянутыми стержнями не сформулированы.

На основании проведенного анализа публикаций, нормативных и инструктивных документов сформулированы цели и задачи работы.

**Во второй главе** по отчетам и опубликованным результатам экспериментальных исследований стальных ферм Ф1 и Ф2 (рис.1), произведен анализ НДС наиболее растянутых («пластических») стержней за пределами упругой работы. Источником для аналитической работы послужили экспериментально полученные зависимости «нагрузка - прогиб» и «нагрузка - усилие».

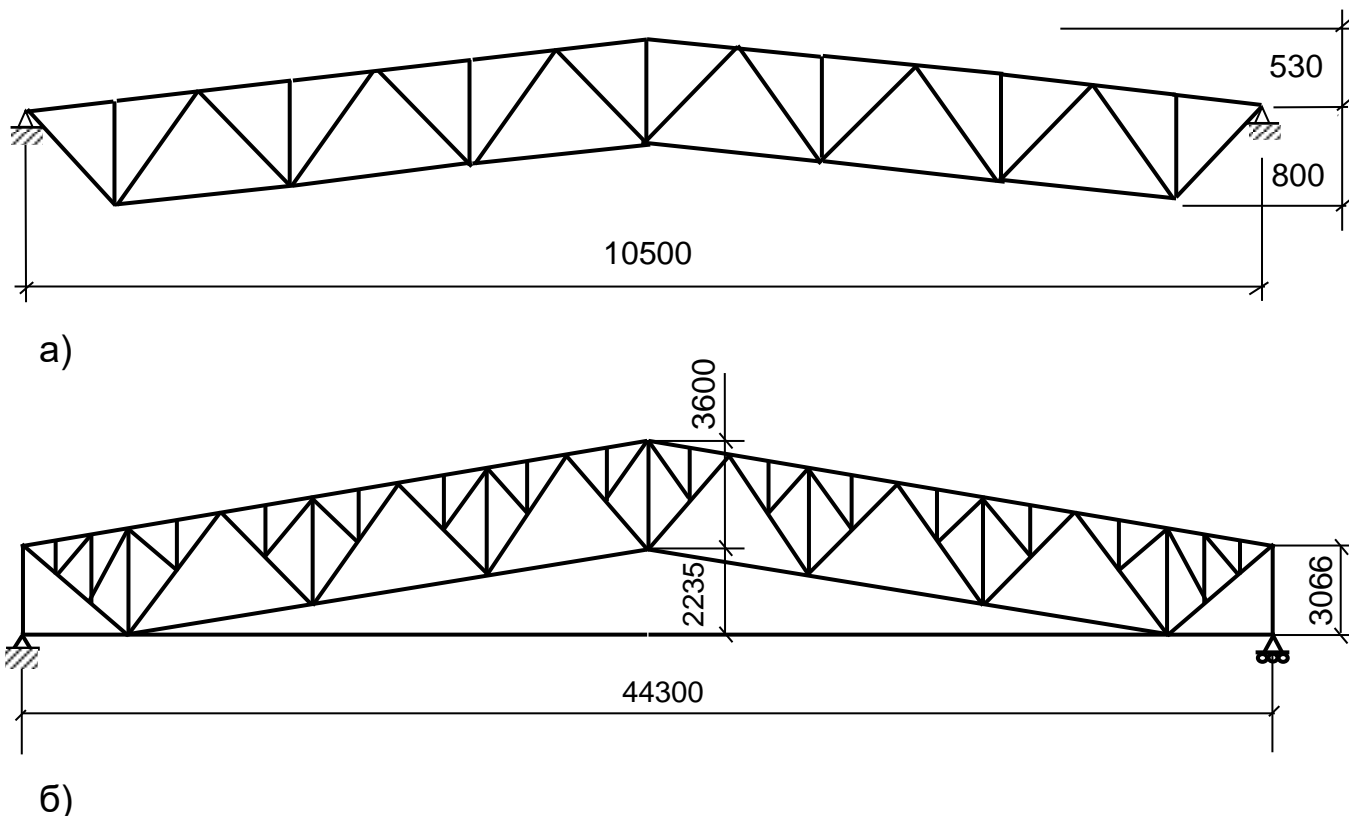


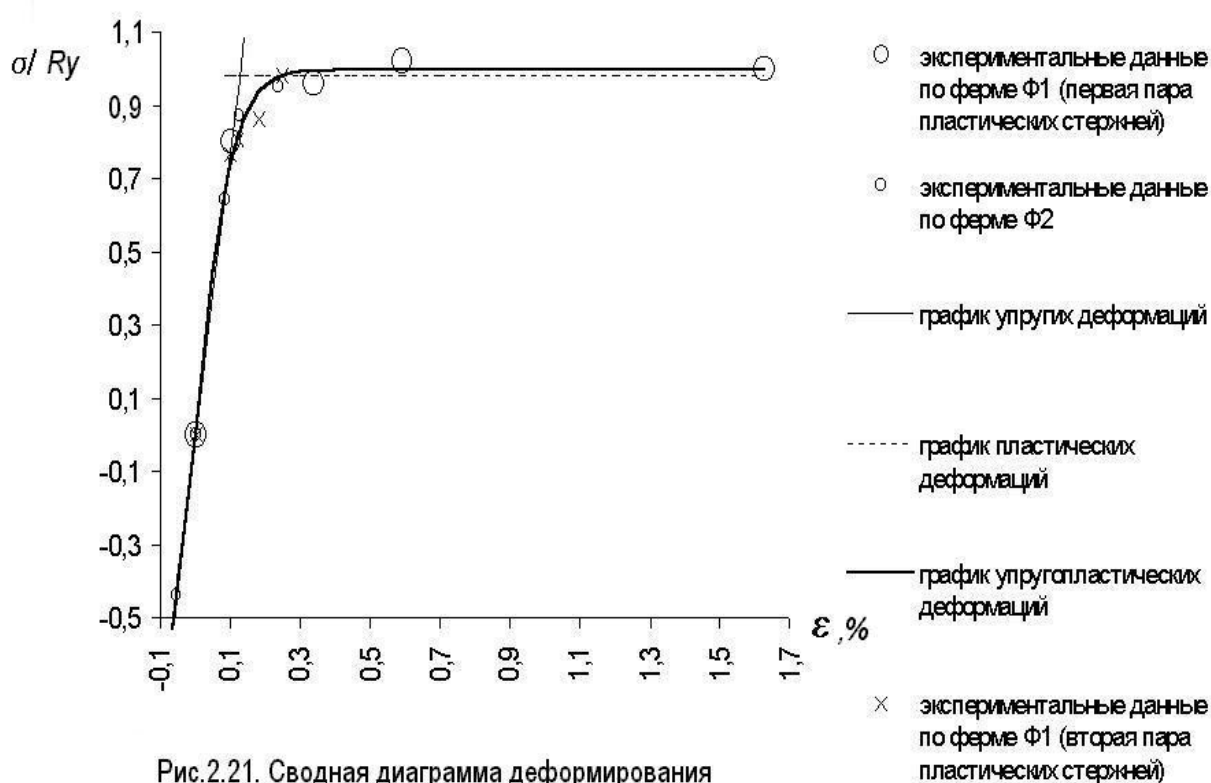
Рис.1. Схемы опытных ферм: а - Ф1; б - Ф2

В процессе расчета поэтапно в узлы фермы прикладывали нагрузку  $P_i$  и назначали жесткость стержней в соответствии со стадией работы. В пределах упругой стадии расчета жесткость стержней фермы определена модулем упругости ( $E=2100000$  кг/см<sup>2</sup>). В упругопластической стадии жесткости «упругих» стержней остались неизменными, жесткости «пластических» стержней были уточнены в соответствии с величиной пластического (секущего) модуля  $E_s$  на каждом  $i$ -м этапе нагружения. По результатам машинного расчета определены параметры НДС исследуемых стержней - относительное напряжение ( $\sigma_i/R_y$ ), относительное удлинение  $\varepsilon_i$ , (рис. 2) и построены диаграммы деформирования.

Принятые расчетные модели позволили получить распределение внутренних усилий с учетом реальной жесткости элементов и провести анализ НДС с минимальными расхождениями фактических и расчетных результатов (до 5%). Доля нагрузки в упругой стадии работы  $P_i$  составила  $(0,72 \div 0,75)$  от полной нагрузки  $P_{lim}$ ; относительное «упругое» удли-

нение  $\varepsilon_i$  исследуемых стержней находилось в области 0,1%; полное удлинение  $\varepsilon_{lim}$  для наиболее растянутого стержня фермы Ф1 достигло 1,64%, фермы Ф2 - 0,3%, отмечена хорошая сходимость диаграмм.

Все экспериментально установленные деформации описываются идеальной единой упругопластической моделью, которая представлена как билинейная и в виде функции гиперболической амплитуды с тремя параметрами (рис.2).



В отличие от билинейной модели, искусственно разрывающей процесс упругопластических деформаций на обособленные этапы с игнорированием переходной стадии, функция гиперболической амплитуды, рассмотренная как трехпараметрический гудерманиан (1), отображает явление в целом и достаточно детально. По своим математическим свойствам и благодаря трем параметрам, кривая гудерманиана обеспечивает достаточную гладкость приближения, в том числе на криволинейном участке упругопластических деформаций, (рис.2)

$$(\sigma_i/R_y) = 5,76 \arctg(0,175 \operatorname{th}(9,30 \varepsilon_{lim})). \quad (1)$$

Предложенная функция позволяет произвести количественную оценку допустимого напряжения ( $\sigma_i/R_y$ ) при заданном (предельном) удлинении  $\varepsilon_{lim}$  и наоборот. В расчетах на прочность стало возможным установить количественный критерий предельных состояний по непригодности к эксплуатации – интенсивность пластических деформаций в наиболее растянутом стержне  $\varepsilon_{ip,lim} = 0,01(1\%)$ .

**В третьей главе**, основываясь на инженерной методике учета пластических деформаций в наиболее нагруженных стержнях, были исследованы пять моделей ферм с целью – определить резерв несущей способности при условии работы наиболее растянутого стержня за пределами упругости, с учетом качественных характеристик сталей.

При создании математических моделей учтены схемы ферм, нашедшие заметное применение в строительстве (рис.3). Все фермы стальные, разрезные, однопролетные, с затяжками из профильной стали.

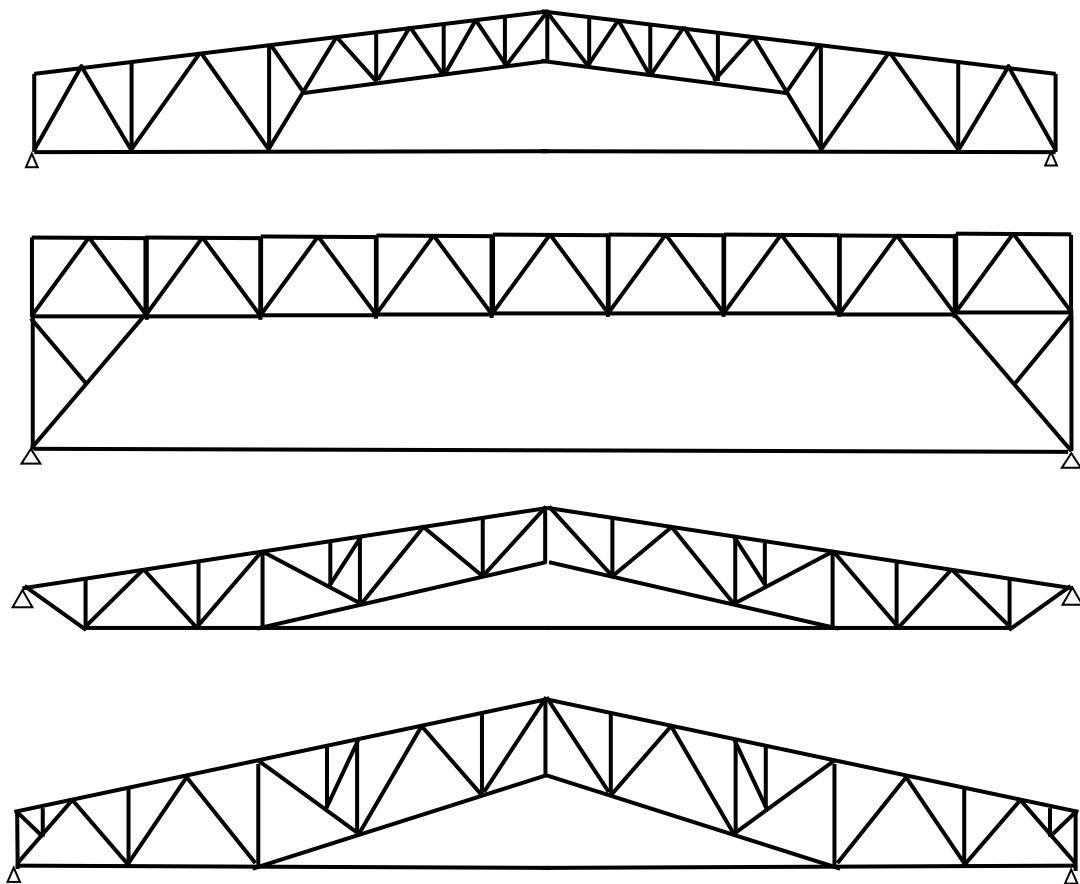


Рис.3. Схемы исследуемых ферм

Работа предельно растянутых стержней условно разделена на «упругую» и «пластическую», (рис.4).

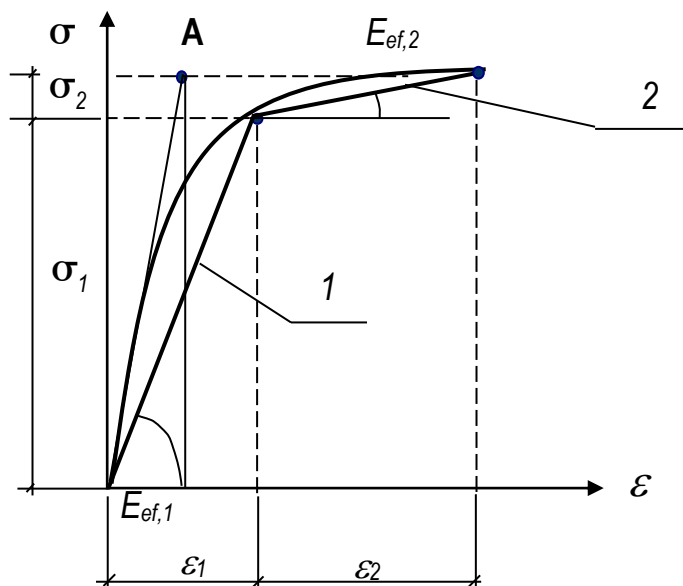


Рис.4. Этапы работы «пластического» стержня:  
1 – упругий; 2 – пластический

В результате расчета  $n$ -раз статически неопределимых ферм получены:

- на первом «упругом» этапе нагружения, при узловой нагрузке  $P_l = X P_{lim}$  ( $X=0,7 \div 0,95$ ) - относительные напряжения  $(\sigma_{i1}/R_y)$  и относительные удлинения  $\varepsilon_{i1}$  наиболее растянутого «пластического» стержня с модулем деформаций  $E_{ef,1} = Y E$  ( $Y=0,6; 0,7; 0,8$ ) и  $E$  у других стержней;
- на втором, «пластическом» этапе догрузки системы до максимальной величины узловой нагрузкой  $P_{lp} = (1-X) P_{lim}$  - приращения относительного напряжения  $\delta(\sigma_{i2}/R_y)$  и относительного удлинения  $\delta\varepsilon_{i2}$  «пластического» стержня с модулем деформаций  $E_{ef,1} = 0,001 E$  и  $E_{t,2} = Y E$  ( $Y=0,6; 0,7; 0,8; 1,0$ ) у следующего предельно растянутого стержня.

Расчетные относительные напряжения и удлинения на «упругом» этапе нагружения предположительно аддитивны с их расчетными приращениями на «пластическом» этапе догрузки. Следовательно, полные относительные напряжения  $(\sigma_i/R_y)$  и относительные деформации  $\varepsilon_i$ :

$$(\sigma_i/R_y) = (\sigma_{i1}/R_y) + \delta(\sigma_{i2}/R_y), \quad (2)$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i1} + \delta\varepsilon_{i2}. \quad (3)$$

Результаты выборочного моделирования статически неопределимых ферм на обозначенных этапах работы позволили оценить максимально допустимую нагрузку  $P_{max}$  в границах указанной интенсивности пластических деформаций  $\varepsilon_{ip,lim}$  и сформулировать рекомендации по расчету ферм, работающих за пределами упругости.

Так, для наиболее характерной модели фермы Ф6 (опуская математические выводы) максимальная нагрузка  $P_{max}$  является суммой нагрузок на упругом  $P_{i1max}$  и пластическом  $P_{i2max}$  этапах:

$$P_{max} = P_{i1max} + \delta P_{i2max} = 0,9 / (0,1555 Y + 0,8543) + 0,508705 (\varepsilon_{lim} - 0,137147 / Y). \quad (4)$$

Решение уравнения (4) на максимум показывает, что он достигается при  $Y = 0,678$ . В этом случае на ферму Ф6 максимально допустимая нагрузка  $P_{max}$  в зависимости от  $\varepsilon_{lim}$  описывается линейным уравнением

$$P_{max} = 0,5087 \varepsilon_{lim} + 0,8268. \quad (5)$$

Выборочная проверка максимально допустимой нагрузки  $P_{max}$  (при  $\varepsilon_{p,lim} = 1$ ) показала превышение над предельной  $P_{lim}$  не менее 35%.

Расчет ферм с учетом пластических деформаций рекомендуем производить в следующей последовательности:

- 1). На начальном этапе следует приложить полную (предельную)  $P_{lim}$  вертикальную нагрузку в узлы фермы, в предположении упругой работы конструкции. Произвести статический расчет фермы. По условию  $\sigma = R_y$  определить «пластический(ие)» стержень(и).
- 2). На первом упругом этапе расчета приложить вертикальную узловую нагрузку  $P_l$ , составляющую 0,9 от  $P_{lim}$ . Значение модуля деформаций  $E_{ef,1}$  «пластического» стержня принять равным 0,7E. Пересчитать все усилия и перемещения пропорционально установленной доле упругой нагрузки.

3). На втором пластическом этапе расчета приложить часть вертикальной нагрузки  $P_{lp}=0,1P_{lim}$ . Значение модуля деформаций  $E_{ef,2}$  «пластического» стержня принять равным  $0,001E$ . По результатам расчета определить «предельно растянутый» стержень. Значение модуля деформаций  $E_{t,2}$  «предельно растянутого» стержня принять равным  $0,7E$ . Пересчитать все усилия и перемещения пропорционально установленной доле пластической нагрузки.

4). По результатам выполненных расчетов определить полные (суммарные) напряжения (2), продольные деформации (3) в «пластических» стержнях и составить заключение о НДС конструкции.

Итак, в третьей главе разработаны принцип и алгоритм оценки максимально допустимой нагрузки  $P_{max}$  в нормируемых границах интенсивности пластических деформаций  $\varepsilon_{ip,lim}$ ; найдены оптимальные параметры модуля «пластических» и предельно растянутых стержней на обозначенных «упругом» и «пластическом» этапах работы фермы; сформулированы рекомендации к расчету статически неопределимых ферм с предельно растянутыми стержнями за пределами упругости. Расчет ферм с учетом пластических деформаций адекватен действительному НДС конструкций. Перераспределение усилий в системе обусловило устойчивое превышение расчетной нагрузки и фактически определило резерв несущей способности исследуемых ферм.

В работе показано, что при изменении расчетного сопротивления на величину  $\Delta R_y$  максимально допустимая нагрузка получает приращение  $\Delta P$ , и тогда величина предельно допустимой нагрузки

$$P_{max} + \Delta P = P_{max} (R_y + \Delta R_y) / R_y. \quad (6)$$

Таким образом, оценка предельной нагрузки статически неопределимых ферм, работающих за пределами упругости, была бы неполной без анализа качественных характеристик материала.

**В четвертой главе** изложены методика и результаты систематизации и статистической обработки показателей основных механических характеристик стального проката. Проанализирован ГОСТ 27772-88 на строительные стали и дана оценка корректности объединения сталей по принципу «заменяемых».

В результате обработки 26488 показателей сдаточных и контрольных испытаний предела текучести  $\sigma_y$ , временного сопротивления разрыву  $\sigma_u$  и относительного удлинение при разрыве  $\varepsilon$  образцов фасонного и листового проката были сформированы 45 репрезентативных выборочных совокупностей объемом от десятка до нескольких сот вариантов. Определяющими признаками объединения служили: вид проката, диапазон толщины, марка (класс прочности). Объединяемые выборки протестированы на неизменность их функций распределения по  $\lambda$ -критерию Колмогорова-Смирнова и удовлетворяют гипотезе неизменности распределений. Подтверждена корректность объединения сталей по принципу «заменяемых».

Для сформированных совокупностей значений механических характеристик в программной среде STATISTICA выполнена описательная статистика с выводом гистограмм и накопительных кривых (рис.5,6); выборочных параметров, аппроксимирующих стандартных встроенных моделей и оценок их согласия.

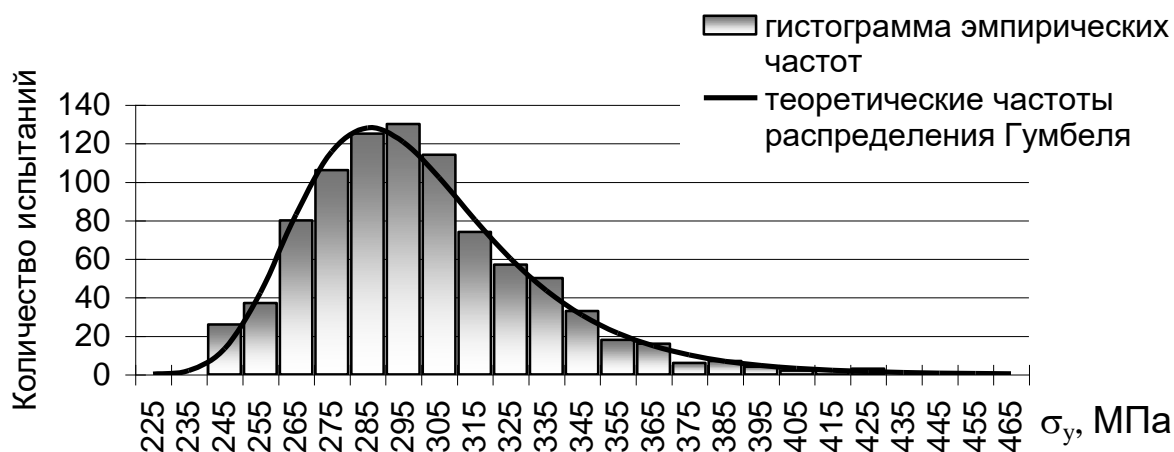


Рис.5. Распределение  $\sigma_y$ , фасон, С245 (0-20 мм)



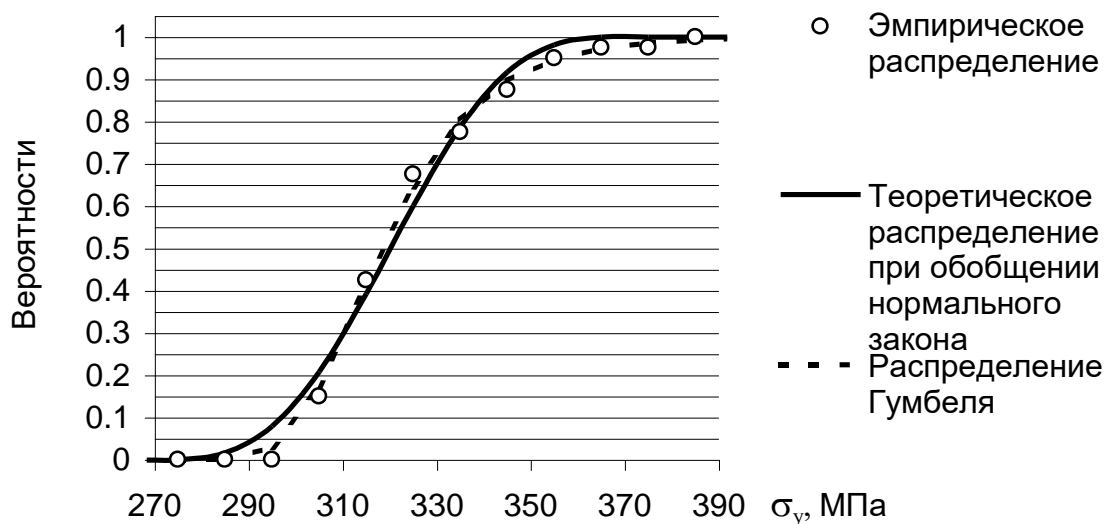


Рис.6. Накопительные частоты  $\sigma_y$ , фасон, С255 (21-40 мм)

Рассматриваемые механические свойства по своей сущности являются предельными, и их распределение должно подчиняться закону вероятностей экстремальных значений Гумбеля. Но при объединении примерно одинаковых по объему выборок независимо от типов их распределений в силу центральной предельной теоремы теории вероятностей проявляется сходимость к нормальному закону. Специфика такой сходимости определяется ограниченностью области рассеяния, соотношением объемов объединяемых выборок и их количеством, что моделировалось выполненным нами обобщением нормального закона в виде решения дифференциального уравнения Колмогорова.

При обобщении нормального закона рассеяние исследуемых значений механических свойств, представляется как конечное состояние стохастического процесса броуновского типа, для которого общее выражение второго дифференциального уравнения Колмогорова сводится к дифференциальному уравнению теплопроводности. В случае ограниченной области рассеяния функция плотности вероятностей на интервале положительной полуоси адекватна распределению температур в стержне, ограниченном с обоих концов.

Решение представляет собой ряд Фурье, коэффициенты которого  $a_k$  и

$b_k$  можно найти из конечного состояния процесса, т.е. эмпирического распределения частот. При суммировании ряда Фурье по Фейеру эмпирическая функция плотности вероятностей  $F'_x(x)$  совокупности случайных величин  $x$  с размахом  $x_{max}-x_{min}$  записывается в виде:

$$F'_x(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n \left\{ \left(1 - \frac{k}{n+1}\right) \left[ a_k \cos\left(2\pi k \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}\right) + b_k \sin\left(2\pi k \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}\right) \right] \right\} \quad (9)$$

Интегральная функция распределения  $F(x)$  также является рядом Фурье с дополнительным линейным членом:

$$F(x) = \frac{a_0}{2} (x - x_{min}) + \frac{x_{max} - x_{min}}{2\pi} \sum_{k=1}^n \left\{ \left( \frac{1}{k} - \frac{1}{n+1} \right) \left[ a_k \sin\left(2\pi k \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}\right) - b_k \cos\left(2\pi k \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}\right) \right] \right\} \quad (10)$$

Практически достаточное приближение достигается с гармониками  $k=1, 2, 3$ , т.е. при  $n=3$ , полагаемое оптимальным.

Объединенные эмпирические совокупности с близкими параметрами или доминированием одной из выборок описывались распределением Гумбеля для экстремальных значений.

Основная сложность использования распределения Гумбеля заключается в его чувствительности к погрешностям оценок параметров по эмпирическим данным. Для регуляризации подбираемой модели распределения Гумбеля выполнялась оптимизация приближенных оценок параметров (в пределах утроенных погрешностей) при подгонке аппроксимирующей накопительной кривой к эмпирическим накопительным частотам.

Расхождение эмпирических и теоретических накопительных частот по распределению Гумбеля не превосходит 0,03 и вероятность ошибки отклонения теоретической модели по  $\lambda$ -критерию Колмогорова практиче-

ски равно 1. При этом заимствуется всего две степени свободы, что позволяет считать модель не только адекватной эмпирическому распределению, но и предпочтительной. По результатам моделирования решались вероятностные задачи для пределов текучести  $\sigma_y$ , временного сопротивления разрыву  $\sigma_u$  и относительного удлинения при разрыве. Обеспеченность нормируемых показателей предела текучести  $R_{ly}$ , предела прочности  $R_{lu}$ , относительного удлинения  $\varepsilon$  находится в интервале от 1 до 0,95, при этом менее стабильными являются характеристики относительного удлинения.

Таким образом, систематизированы разрозненные показатели механических характеристик строительных сталей, подтверждена корректность объединения по принципу «заменяемых», найдены математические модели для описания разнородных распределений, произведена оценка установленных нормативными документами гарантируемых минимумов. Статистический анализ механических характеристик, в частности исследуемой величины предела текучести  $\sigma_y$ , не подтвердил существенного запаса прочности. Вероятнее всего этот факт обусловлен разнородностью выборочных совокупностей. Положительным моментом анализа считаем соответствие всех исследуемых характеристик нормируемой величине браковочного минимума.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Экспериментально-теоретическим исследованием статически неопределимых ферм подтверждено, что несущая способность при относительном удлинении наиболее растянутого стержня 1,64% сохраняется.
2. Выполнять прикладные расчеты упругопластических деформаций наиболее растянутого стержня, производить оценку напряженно-деформированного состояния и, в частности, количественную оценку относительного напряжения при заданной интенсивности пластических

деформаций рекомендуем с помощью математической модели в виде трехпараметрического гудерманиана.

3. В расчетах на прочность по критериям ограниченных пластических деформаций предельное значение интенсивности пластических деформаций наиболее растянутого стержня статически неопределимой фермы  $\varepsilon_{ip,lim}$  принимать равным 0,01(1%).

4. Для статически неопределимых ферм, работающих за пределами упругости предложены принцип и алгоритм оценки максимально допустимой узловой нагрузки  $P_{max}$  на ферму в нормируемых границах интенсивности пластических деформаций  $\varepsilon_{ip,lim}$  при учете качественных характеристик стали.

5. Расчет вновь проектируемых и существующих трехпоясных ферм с учетом неупругих деформаций рекомендуем выполнять по разработанным рекомендациям расчета. Параметры модуля деформаций «пластических» стержней на обозначенных «упругом» и «пластическом» этапах работы фермы принимать в соответствии с полученным оптимальным значением, равным  $0,7E$ .

6. Математический анализ результатов расчета трехпоясных ферм при ограничении развития пластических деформаций подтвердил резерв несущей способности ферм в размере 35%, в сравнении с традиционным, упругим расчетом.

7. Результатом оценки однородности и неизменности функции распределения объединенных совокупностей показателей основных механических характеристик сталей стала достаточно высокая сходимость частных выборок поставщиков. Уверенно можно говорить о корректности объединений и подтверждении принципа «заменяемой» стали по ГОСТ 27772-88.

8. Экстремальный (предельный) характер значений механических свойств и предварительное изъятие бракованных партий металлопроката обусловили статистически значимую положительную асимметрию

выборочных совокупностей. Исследуемые эмпирические распределения не согласуются с нормальным законом.

9. Сводные совокупности показателей механических свойств стали рекомендуем моделировать распределением вероятностей экстремальных значений Гумбеля, обеспечивающим минимальное расхождение эмпирических и теоретических накопительных частот.

10. Обработка вероятностно-статистическими методами результатов сдаточных испытаний основных механических характеристик показала, что обеспеченность нормируемых величин по пределу текучести, временному сопротивлению и относительному удлинению находится в пределах от 0,95 до 1.

11. В стальных конструкциях используется разнородный материал. Исследования не подтвердили устойчивого превышения обеспеченности основных механических характеристик строительных сталей относительно нормируемой величины 0,95. Менее стабильные показатели соответствуют относительному удлинению.

***Основные положения диссертации опубликованы в работах:***

1. Хамудисова И.Б. Анализ пластических деформаций растянутых стержней стальных ферм//Проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений. Пермь, 1999. – С.93-98.
2. Хамудисова И.Б. Анализ работы стальной предварительно напряженной фермы за пределами упругой работы//Строительство и образование. Екатеринбург, 1999. – С.26-27.
3. Хамудисова И.Б. Статистический анализ показателей текучести листовой стали//Строительство и образование. Екатеринбург, 2000. – С.73-74.
4. Хамудисова И.Б., Каплан В.Е. К оценке предельных нагрузок статически неопределимых ферм с учетом пластических деформаций наиболее растянутого стержня //Компьютерное и математическое моделирование в естественных и технических науках: IV Всеросс.

науч. Internet-конф. Тамбов: ИМФИ ТГУ, 2002. – Вып.21. – С.10-12.

5. Хамудисова И.Б., Каплан В.Е. Математическая модель упругопластических деформаций наиболее растянутого стержня статически неопределимой фермы//Компьютерное и математическое моделирование в естественных и технических науках: IV Всеросс. науч. Internet-конф. Тамбов: ИМФИ ТГУ, 2002.– Вып.21. – С.8-9.
6. Хамудисова И.Б., Каплан В.Е. Статистические модели механических свойств металлопроката, используемого в строительных конструкциях//Моделирование. Теория, методы и средства: Междунар. научно-практ. конф. Новочеркасск, 2001. – С.43-48.
7. Хамудисова И.Б., Сушенцев Б.М. О возможностях учета пластических деформаций в растянутых стержнях стальных ферм //На передовых рубежах науки и инженерного творчества: II Междунар. науч. конф. Екатеринбург, 2000. – С.360-363.
8. Хамудисова И.Б., Чернова Е.В. Анализ пластических деформаций растянутых поясов стальных ферм//Строительство и образование. Екатеринбург, 1998. – С.26-27.