

На правах рукописи



ЕГОРОВА АННА АНДРЕЕВНА

**ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ В БОЛЬШИХ  
СЕЧЕНИЯХ ДЛЯ УНИКАЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность: 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание степени кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Центральном научно-исследовательском институте строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко – ОАО «Научно-исследовательский центр «Строительство»

**Научный руководитель:** профессор, доктор технических наук  
**Одесский Павел Дмитриевич**

**Официальные оппоненты:** профессор, доктор технических наук  
**Добаткин Сергей Владимирович**  
ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова

доцент, кандидат технических наук  
**Прокошкина Вера Георгиевна**  
НИТУ «МИСиС»

**Ведущая организация:** **ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина»**

Защита состоится 26 декабря 2013 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д. 212.132.08 при ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, ауд. Б-607.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Автореферат разослан « 25 » ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
проф., д.ф.-м.н.



С.И. Мухин

## Общая характеристика работы

Актуальность работы. В последние 15 лет в России возводятся крупные уникальные строительные объекты: стальные конструкции стадионов, большепролетные покрытия общественных и высотных зданий и т.п. Стальные конструкции для таких сооружений изготавливаются из проката повышенной и высокой прочности больших толщин от 30 до 230 мм. В таких конструкциях как элементы также применяются крупные поковки высокой прочности диаметром свыше 0,5 м.

В настоящее время в России более 85% стальных конструкций изготавливаются из проката толщиной не более 20 мм и в них используются поковки небольшого размера из сталей обычной прочности.

Работа стальных элементов с большими сечениями в конструкциях существенно отличается от работы элементов с относительно небольшими толщинами до 20 мм за счет существенного влияния масштабного фактора. Вместе с тем в действующих нормах на проектирование строительных металлических конструкций, в первую очередь в СП 16.13330.2011 «Актуализированная редакция главы СНиП II-23-81\*», не предусмотрены специальные требования для оценки влияния больших сечений на работоспособность стальных конструкций. Например, не учитывается влияние неоднородности свойств по сечению, склонность к хрупкому разрушению материалов оценивается на небольших образцах сечением 10x10 мм и т.п. В действующих нормах не регламентируется фасонный прокат сечений с толщиной полок более 40 мм, в то время как в современных сооружениях такой прокат применяется в толщинах вплоть до 125 мм. СП 16.13330.2011 не включает в себя поковки, тем более диаметром более 500 мм, хотя их использование эффективно и перспективно в современных строительных конструкциях.

Для обеспечения надежной работы элементов больших толщин в уникальных стальных конструкциях необходимо рассмотреть особенности их работы в сооружениях, научно обосновать требования к эксплуатационным свойствам сталей и разработать основы нормативной базы для составления специальных технических условий при применении новых видов проката и поволоков в новых уникальных строительных конструкциях.

Актуальность темы диссертации обосновывается необходимостью обеспечения эксплуатационной надежности уникальных стальных конструкций из новых сталей высокой прочности в больших сечениях и разработки предложений по требованиям к сталям для строительных конструкций большого сечения и внесения их в нормативную документацию.

### Цель и задачи работы.

Исследование работоспособности элементов больших толщин, из новых материалов высокой прочности в уникальных стальных конструкциях и разработка требований к материалам, обеспечивающим эксплуатационную надежность деталей больших сечений.

В связи с этим в работе решались следующие задачи:

- 1) Анализ аварий элементов стальных конструкций большого сечения.
- 2) Выбор методик испытаний элементов стальных конструкций больших толщин и определение их эффективности при оценки эксплуатационных свойств.
- 3) Проведение исследований эксплуатационных свойств элементов конструкций больших сечений из новых материалов и выявление определяющих их факторов.
- 4) Разработка требований к материалам для элементов больших толщин.
- 5) Подготовка материалов для внесения в нормативные документы по оценке эксплуатационной надежности элементов стальных конструкций большого сечения.

### Научная новизна работы.

1) Научно обоснованы требования к сталям для обеспечения высоких эксплуатационных свойств в элементах металлических конструкций высокой прочности и большого сечения, применяемых в уникальных строительных объектах: двутавровых балок с параллельными гранями полок с толщиной до 125 мм включительно с  $R_{un} = 450 \text{ Н/мм}^2$  и цилиндрических осей из поковок диаметром свыше 500 мм с  $R_{un} = 700 \text{ Н/мм}^2$ .

2) Показано, что современный фасонный прокат высокой прочности с  $\sigma_T \geq 450 \text{ Н/мм}^2$  с толщиной полок до 125 мм и с высокой эксплуатационной надежностью имеет неоднородность строения по сечению, обусловленную формированием слоистой структуры при термомеханической обработке. Такая неоднородность улучшает работоспособность профиля в конструкциях за счет формирования в поверхностных более прочных слоях остаточных напряжений сжатия на  $\sigma_{ост} \approx 0,2\sigma_T$ , повышающих сопротивление профилей хрупким разрушениям, переменным нагрузкам и коррозионным воздействиям.

3) С учетом современных технологических возможностей для элементов строительных конструкций из крупных поковок с  $\sigma_T = 685$

Н/мм<sup>2</sup> предложен комплекс требований к материалам, отличных от стандартных, и исключающих разрушения, связанные с недостаточной пластичностью и хладостойкостью:  $\delta_5 = 12\%$ ;  $\psi = 50\%$ ;  $KCV^{-40} = 27 \text{ Дж/см}^2$  при условии отбора проб для образцов на расстоянии 2/3 радиуса от поверхности и пониженное содержание вредных примесей (S и P  $\leq 0,010\%$  каждого; N  $< 0,0002\%$ ).

4) Разработана методика оценки эксплуатационных свойств элементов стальных конструкций больших сечений, заключающаяся в сочетании испытаний стандартных малогабаритных образцов, вырезанных из различных зон конструкций на растяжение и ударный изгиб в интервале различных температур и крупных интегральных образцов.

Практическое значение работы состоит в том, что её результаты использованы: при применении проката больших сечений класса прочности С440 при возведении несущего каркаса высотных зданий; при разработке марки стали Histar 460 Russia с  $KCV^{-40} \geq 34 \text{ Дж/см}^2$  для применения ее в конструкциях с большим сечением, которые эксплуатируются в климатических условиях РФ; при разработке нормативной документации в части назначения этих сталей в конструкции.

Разработана нормативная документация на оси диаметром более 500 мм из поковок с  $\sigma_T = 700 \text{ Н/мм}^2$  с высокой эксплуатационной надежностью для применения в большепролетных уникальных зданиях.

#### Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты исследования крупных двутавровых профилей с толщиной полки до 125 мм с  $\sigma_T \geq 450 \text{ Н/мм}^2$ , при котором установлена их высокая эксплуатационная надежность, обеспечиваемая формированием слоистой по сечению микроструктуры и неоднородностью механических свойств.

2. Условия получения в неоднородных по прочности больших сечениях высокой и достаточной для строительных конструкций северного исполнения ударной вязкости  $KCV^{-40} = 34 \text{ Дж/см}^2$ .

3. Результаты анализа аварийного разрушения элемента конструкции – крупной оси диаметром 528 мм из термически упроченной среднеуглеродистой стали с  $\sigma_{0,2} = 700 \text{ Н/мм}^2$ , произошедшего из-за сильной неоднородности свойств по сечению, не учитываемой методикой стандартных приемо-сдаточных испытаний.

4. Разработанные с учетом современных технологических возможностей заводов новые требования по механическим свойствам, месту отбора проб и химическому составу к элементам стальных конструкций из поковок диаметром более 500 мм из поковок с  $\sigma_{0,2} \geq 700$  Н/мм<sup>2</sup>.

5. Результаты исследований эксплуатационных свойств поковок с  $\sigma_{0,2} \geq 700$  Н/мм<sup>2</sup>, изготовленных в промышленных условиях в соответствии с разработанными новыми требованиями.

#### Внедрение результатов.

Результаты работы использованы при изготовлении стальных несущих каркасов высотных зданий «Москва Сити» из широкополочных двутавров с параллельными гранями полок с  $\sigma_T = 450$  Н/мм<sup>2</sup> и толщиной полки до 125 мм.

Оси диаметром 528 мм из поковок высокой прочности нового поколения производства завода «Уралмаш», отличающиеся высокими эксплуатационными свойствами, установлены в подвесных конструкциях покрытия уникального здания «Крытый Конькобежный центр» в Крылатском, г. Москва.

Достоверность результатов исследования обеспечена проведением комплексных экспериментов по определению эксплуатационных свойств сталей с применением современных методов исследования, механических испытаний и статистической обработкой полученных результатов и их соответствие с экспериментальными данными других исследований.

Личный вклад автора. Основные положения и результаты диссертационной работы основываются на исследованиях, выполненных лично, или с непосредственным участием автора. В работах, выполненных в соавторстве, личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, непосредственном участии в получении экспериментальных данных, анализе и обобщении полученных результатов. Опробование и постановка в конструкции новых видов проката и элементов из поковок осуществлялись при непосредственном участии автора.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих международных конференциях:

– «XIV международной научно-технической конференции «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций» (г. Санкт-Петербург);

- Третьей и Четвертой международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Москва, ИМЕТРАН, 2009г., 2011г.); Чтениях, посвященных проф. М.Л. Бернштейну по термомеханической обработке металлических материалов (Москва, МИСиС, 2009г., 2011г.);
- V-ой и VI-ой Евразийской научно-практической конференциях «Прочность неоднородных структур» (Москва, 2010г., 2012г.);
- Симпозиумах SHMD'2010 и 2012, Symposium of Croatian metallurgical Society Sibenik (Croatia 2010 и 2012).
- IX INTERNATIONAL CONGRESS «Machines, Technologies, Materials», Varna, Bulgaria, 2012.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК для публикации результатов по кандидатским диссертациям.

Состав и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и библиографии. Список использованной литературы содержит 122 наименования, в том числе 15 зарубежных. Работа изложена на 152 страницах и включает 58 рисунков и 21 таблицу.

### **Основное содержание работы**

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, отмечена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе на основе анализа отечественных и зарубежных источников изучено состояние вопроса, проведен краткий анализ и обобщены результаты исследований в области разработки и применения сталей для строительных конструкций.

Анализируется потребность в сталях для строительных конструкций в большепролетных сооружениях, в высотных зданиях, в металлических конструкциях, в которых эффективно применение проката больших толщин и крупных поковок, в том числе высокой прочности. Показано, что их применение в настоящее время не регламентируется действующими строительными нормами.

Современное развитие металлургической и машиностроительной промышленности позволяет обеспечивать нужды строительства прокатом больших толщин (например крупными фасонными профилями с толщиной полки вплоть до 125мм), а также крупными поковками диаметром свыше 500 мм (например, для шарнирных опор и соединений). Однако служебные характеристики этих изделий не всегда обеспечивают эксплуатационную надежность сооружений в климатических условиях России.

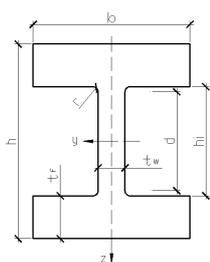
Для обеспечения эксплуатационной надежности металлических конструкций большепролетных сооружений и высотных зданий, прежде всего необходимо разработать и научно обосновать требования к материалам для элементов больших толщин, учитывающих специфику работы таких элементов в строительных объектах.

Во второй главе рассматриваются материалы и методики исследования эксплуатационных свойств двутавровых профилей для конструкций несущего каркаса высотных зданий.

Исследовались широкополочные двутавровые профили из стали класса прочности С 440 с толщиной полок 81, 106 и 125 мм (таблица 1) и  $\sigma_T = 450$  Н/мм<sup>2</sup>. Исследовался прокат двух вариантов поставки:  $S \leq 0,035\%$  (№ 1-3 таблицы 1 и 2) и  $S \leq 0,025\%$  (№3 таблицы 1 и №4 таблицы 2). Размеры сечений и прочность рассматриваемых профилей существенно отличается от представленных в отечественных стандартах и строительных нормах.

Таблица 1

Размеры сечений исследованных профилей



Размеры						Конструкционные размеры	
h, мм	b, мм	t <sub>w</sub> , мм	t <sub>f</sub> , мм	r, мм	A, мм <sup>2</sup>	h <sub>i</sub> , мм	d, мм
483	428	51.2	81.5	15	863.4	320.0	290.0
531	442	65.9	106	15	1149	319.0	289.0
569	454	78.0	125	15	1386	319.0	289.0

Таблица 2

Химический состав стали Histar 460 Russia (С 440) исследуемых двутавров

№ п/п	Толщина полки, мм	Содержание элементов, %													
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Al	Ti	Nb	Mo	Ca
1	81	0,1	0,21	1,55	0,015	0,026	0,14	0,14	0,2	0,06	0,01	0,02	0,002	0,028	0,001
2	106	0,09	0,19	1,56	0,022	0,027	0,18	0,12	0,23	0,057	0,04	-	0,002	0,03	0,001
3	125	0,1	0,18	1,55	0,019	0,031	0,17	0,13	0,22	0,06	0,01	0,02	0,03	0,042	0,001
4	125	0,09	0,19	1,58	0,015	0,024	0,15	0,12	0,17	0,056	0,02	0,03	0,002	0,047	0,001

Требуемые профили изготавливаются на заводе «Arcelor Mittal» в Люксембурге по современной схеме: электропечь – технологии ковшевой металлургии - машина производства непрерывнолитых заготовок в форме балок – прокатка по режимам термомеханической обработки с интенсивным охлаждением водой ( $V_{\text{охл}} = 100^\circ\text{C}/\text{с}$ ) в конце процесса (рисунок 1).

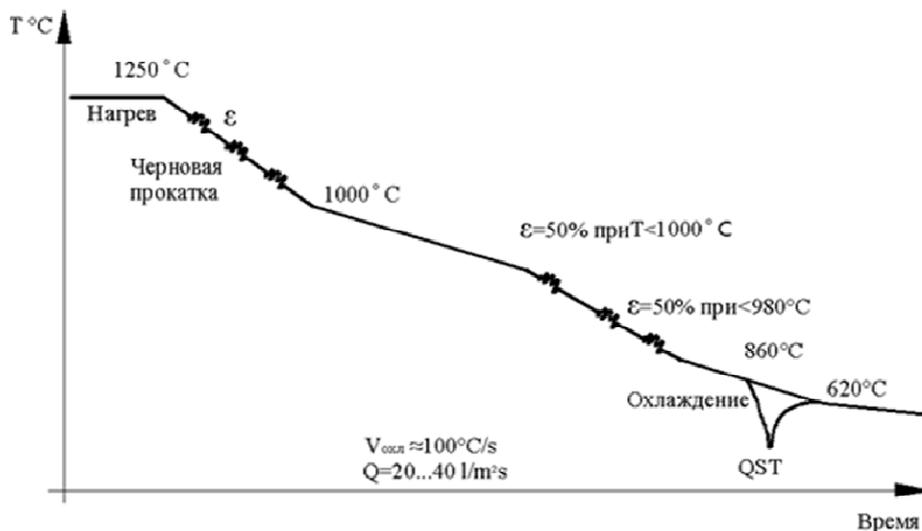


Рис. 1 . Схема термомеханической обработки двутавров в потоке стана

Охлаждение на заключительной стадии термомеханического процесса осуществляется с достаточно высоких температур ( $860^\circ\text{C}$ ), гарантирующих рекристаллизацию аустенита перед превращением  $\gamma\text{Fe} \rightarrow \alpha\text{Fe}$ , такая термомеханическая обработка классифицируется как рекристаллизационная. На заключительной стадии производства проката в профиле формируется неоднородная по сечению слоистая феррито-перлитная структура.

Основными причинами неоднородности структуры и свойств стали является уменьшение скорости охлаждения проката по толщине профиля, и сохранение тепла прокатного нагрева в осевых частях проката при сквозной непрерывной технологии производства в потоке стана.

Проводились исследования микроструктуры проката методами оптической металлографии. Исследования велись на оптическом микроскопе Axiovert 40 (KarlZeiss). На полированных нетравленных шлифах изучались распределения неметаллических включений при увеличениях  $\times 50$ ,  $\times 100$ ,  $\times 1000$  (масштаб 200 и 100 и 20 мкм). На протравленных в 4%-ом спиртовом растворе азотной кислоты шлифах изучалась действительная микроструктура при увеличениях  $\times 100$ ,  $\times 500$  и  $\times 1000$  (масштабы 100, 50 и 20 мкм). А так же исследовали микроструктуру методом просвечивающей микроскопии на фольгах, приготовленных электролитической полировкой. Применяли электронный микроскоп JEM-7A с ускоряющим напряжением 100кВ и разрешением 3А.

Для оценки работоспособности профилей проведены испытания по определению их прочности, пластичности, склонности к хрупким разрушениям и свариваемости. О качестве проката судили по свойствам полок двутавров.

Определены прочностные характеристики (предел текучести  $\sigma_T$ , временное сопротивление разрыву  $\sigma_B$ ) и пластические (относительное удлинение  $\delta_5$  и относительное сужение  $\psi$ ), по результатам механических испытаний на одноосное растяжение в соответствии с ГОСТ 1497-84. Анализировалось, как изменение механических свойств по сечению профилей вследствие неравномерности структуры (послойные и локальные свойства), так и механические свойства всего сечения (интегральные свойства). Схема вырезки образцов из полки представлена на рисунке 2.

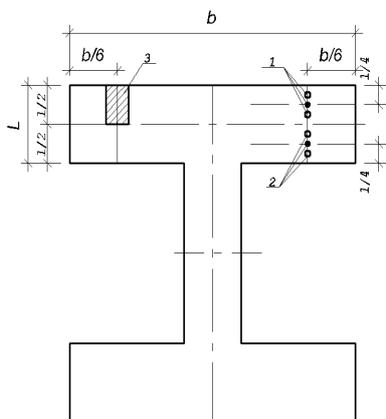


Рис.2. Схема вырезки образцов из широкополочных двутавровых балок с параллельными гранями. 1 – локальные цилиндрические пятикратные образцы с рабочим диаметром 6 мм для испытаний на растяжение; 2 – образцы для испытаний в интервале температур на ударный изгиб размерами брутто 55x10x10 мм; 3 – сечение интегрального образца на растяжение из двутавровой балки  $t/2 \times 12 \times 450$  мм.

Испытания на растяжение проводились на цилиндрических образцах диаметром 6 мм типа IV по ГОСТ 1497-84. Образцы вырезались из поверхности проката, на расстоянии  $1/3$  между поверхностью и осью сечения, а также из середины высоты полки по оси. Испытания проводились на машине Shopper 10. Испытания интегральных образцов проводили на машине «Losengaus 30».

Для выявления неоднородности прочности по сечению полок проводились измерения твердости (HV) по всей толщине сечения.

Твердость оценивалась методом Виккерса (ГОСТ 2999-75), замеры проводились через 0,5...2 мм. Измерения проводились на твердомере

Wilson Wolpert универсал – тестер 930, при нагрузке 30 кгс.

Сопротивление стального проката хрупкому разрушению оценивали по результатам испытаний на ударный изгиб образцов (размер 10x10x55 мм) в интервале климатических температур. Для испытаний использовались образцы типа 11 по ГОСТ 9454-78 «Металлы. Метод испытаний на ударный изгиб при пониженных и повышенных температурах» с острым V-образным надрезом, вырезанные вдоль длины профиля и «послойно». Образцы испытывались на ударном копре МК-30. При этом определялись энергетические характеристики

разрушения стали: работа разрушения образцов КС, Дж и ударная вязкость КСV, Дж/см<sup>2</sup>.

Ввиду неоднородности свойств по сечению двутавров проведена оценка свойств металла по толщине образцов (z-свойства). Испытания проводились при одноосном растяжении цилиндрических образцов, ось которых нормальна к плоскости проката (граням полок) на машине Shopper 10, в соответствии с ГОСТ 28870-90. Z - свойства в стандартах и строительных нормах оцениваются по величине относительного сужения  $\Psi_z$ . Согласно ГОСТ 28870-90 и актуализированной главе СНиП II-23-81\* максимально высокое гарантированное значение по этому показателю соответствует  $\Psi_z = 35\%$ . Прокат с такой высокой величиной  $\Psi_z$  может применяться в наиболее ответственных металлических конструкциях, при этом гарантируется отсутствие слоистых трещин в сварных соединениях.

Для определения температуры нулевой пластичности ( $T_{нп}$ ) проводили испытания на универсальной машине ГМС-50 по Кинцелю, модернизированные в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Образец и схема испытаний представлены на рисунке 3. Важность этих испытаний заключается в том, что температура нулевой пластичности  $T_{нп}$  определяет минимальную температуру эксплуатации  $t_3$ .

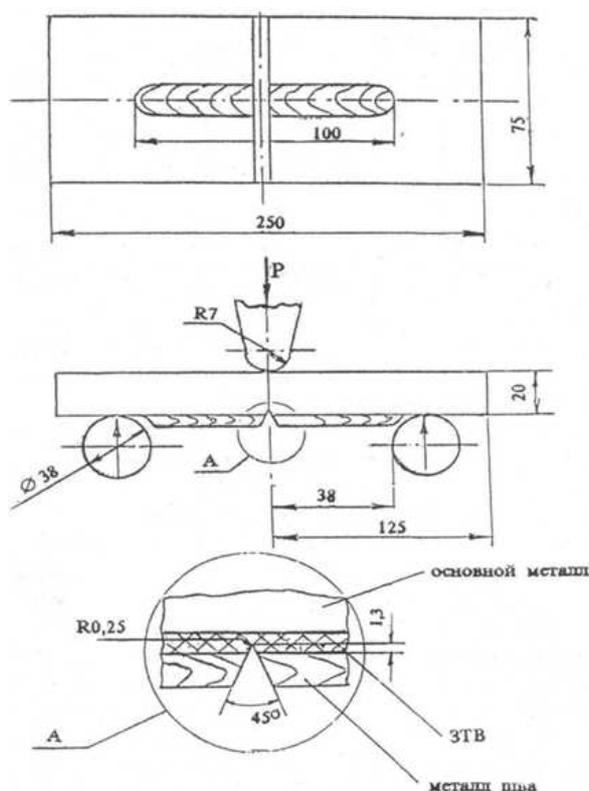


Рис. 3. Образец Кинцеля с наплавкой.

Образцы отбирали из поверхностных зон полок в зоне с наибольшей твердостью металла. Образцы с наплавленным металлом испытывали на трехточечный статический изгиб в интервале климатических температур. В

качестве основного критерия для оценки критической температуры вязко-хрупкого перехода использовали величину утяжки у дна надреза  $\psi = 1\%$  ( $T_{\psi=1\%}$ ).

Для оценки склонности металла к замедленному хрупкому разрушению проводились испытания по методике ЦНИИЧермет. Испытывались образцы типа 11 по ГОСТ 9454 с острым V-образным надрезом в условиях трехточечного статического изгиба со скоростью деформации 0,005 см/мин в коррозионной среде. Коррозионная среда представляла собой 0,1 нормальный раствор серной кислоты с добавкой тиомочевины. Катодные насыщение водородом производилось при плотности тока 1 МА/см<sup>2</sup>.

В третьей главе изложены результаты испытаний эксплуатационных свойств двутавровых профилей из стали класса прочности С440.

Установлено, что исследованные крупные двутавровые профили с параллельными гранями полок толщиной 81...125 мм имеют  $\sigma_T \geq 450$  Н/мм<sup>2</sup> (таблица 3) и полностью соответствуют требованиям по прочности и пластичности, предъявляемым к стали С440 отечественными нормативными документами (СП.16.13330.2011 актуализированная глава СНиП II-23-81\*, ГОСТ 27772-88):  $\sigma_T = 440$  Н/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_B = 570...750$  Н/мм<sup>2</sup>;  $\delta_5 = 20\%$ . При этом существующие нормативные показатели распространяются лишь на толстолистовой прокат толщины не выше 40 мм.

Высокая прочность достигается за счет технологии термомеханической прокатки профилей с последующим охлаждением проката непосредственно на стане турбулентными потоками воды.

Таблица 3

Результаты испытаний на растяжение агрегатных образцов вырезанных из полок двутавровых профилей (сталь класса прочности С440).

Толщина полки, мм	$\sigma_{0,2}$ Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %
81	510	630	23
106	512	634	24
125	490	625	22
125	456	592	25,5

Примечание: в таблице представлено минимальное значение величины характеристик по испытаниям образцов сечением  $t/2 \times 12$  мм, где  $t$  – полная толщина полки; обсуждаемый вид фасонного проката на отечественных заводах выпускается с толщиной полки не выше 40 мм, при этом наибольшей прочной сталью является С345 ( $\sigma_T = 315$  Н/мм<sup>2</sup>).

При испытаниях на растяжение образцов вырезанных послойно установлено, что в сечении профилей в соответствии с сформированной неоднородной слоистой структурой формируются неоднородные механические

свойства: в поверхностных зонах толщиной 10...12 мм прочность повышена вплоть до  $\sigma_B = 720 \text{ Н/мм}^2$ , по мере перехода к центральным зонам наблюдается плавное понижение  $\sigma_B$  на 100...150 Н/мм<sup>2</sup> (таблица 4).

Таблица 4

Результаты испытаний на растяжение цилиндрических образцов, вырезанных из полки двутавра с толщиной полки 125 мм (сталь класса прочности С440)

Место вырезки	$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\delta_5$	$\psi$
	Н/мм <sup>2</sup>		%	
Поверхность	670...671	730...740	20,5...21	68...69
22 мм от поверхности	488...505	623...627	24...26	73...73,5
Осевая часть	409...414	568...570	26,5...27,5	75...77

Установлено что механические свойства при растяжении, полученные при испытаниях агрегатных образцов (таблица 3), достаточно хорошо соответствуют свойствам, определенным при испытании локальных образцов (таблица 4), вырезанных из сечения стандартным образом (ось контрольных образцов расположена на 1/3 расстояния от поверхности до середины сечения).

В результате принятой термомеханической обработки профилей в поверхностных твердых слоях формируются остаточные напряжения сжатия  $\sigma_{ост} \approx 0,2\sigma_T$ , увеличивающие сопротивление изделий переменным нагрузкам, хрупким разрушениям и коррозионным воздействиям.

Подробное распределение прочностных свойств по сечению мы получили при изучении распределения твердости по сечению. Исследования показали, что поверхностные слои с повышенной твердостью (прочностью) имеют толщину до 10...12 мм, показатели твердости понижаются по мере перехода к центральным зонам (рисунок 4). Это связано с низкой прокаливаемостью рассматриваемой малоуглеродистой стали. В поверхностных слоях твердость < 300HV, что гарантирует отсутствие склонности металла к образованию холодных трещин при сварке.. В центральных зонах твердость составляет 170...190 HV.



Рис.4. Распределение твердости по толщине полки двутавровой балки (толщина полки в шлифе 125 мм)

Результаты испытаний на твердость хорошо соотносятся с данными микроструктурного анализа.

Послойное исследование изменения микроструктуры в полках профилей на оптическом микроскопе показало, что микроструктура неоднородна по сечению (рисунок.5)

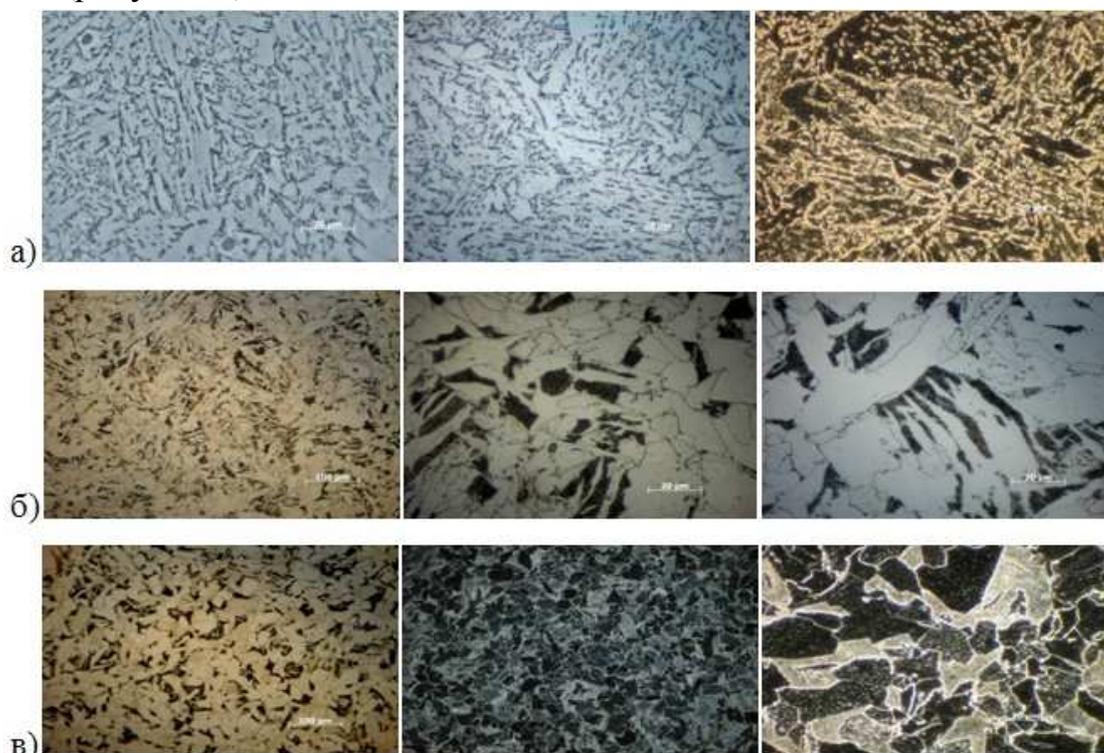


Рис. 5. Изменение микроструктуры стали с  $\sigma_T = 450 \text{ Н/мм}^2$  по сечению полки толщиной 125 мм двутавровой балки. а - поверхностный слой; б – 1/3 от поверхности профиля; в – осевая зона.

В поверхностных слоях профилей стали сформировалась дисперсная игольчатая структура (с твердостью 230HV), достаточно полно распавшаяся при самоотпуске под влиянием тепла прокатного нагрева (рисунок 3а).

На расстоянии 1/3 от поверхности имеет место ферритная структура с размером зерна ~ 15 мкм (балл №9) в смеси с видманштеттовым ферритом с твердостью 190 HV(рисунок 3б).

В осевой зоне профилей наблюдается феррито-перлитная структура с размером зерна  $\leq 20$  мкм (балл №8) и твердостью 170 HV (рисунок 3в).

Ввиду неоднородности структуры и свойств по сечению исследуемого проката и наличию наиболее грубых структур и низких механических свойств в осевых зонах, необходима оценка свойства проката при воздействии растягивающих усилий, нормальных к поверхности проката. Такие нагрузки возникают под действием остаточных растягивающих напряжений, при сварке. Проверяется склонность проката к расслоению, формированию слоистых трещин в сварных соединениях. Показано, что примененные при изготовлении профилей технологии обеспечили во всем исследованном прокате значение относительного сужения  $\Psi_z \geq 55\%$  (таблица 5).

Таблица 5

Результаты испытаний двутаврового проката  
на склонность к расслоению (z – свойства)

Толщина полки, мм	$\sigma_{tz}$ Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{bz}$ Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_{5z}$ %	$\Psi_z$ %
80	442...443	597...598	23...23,5	58...60
105	444...445	595...600	19...20	54...57
125	415...420	570...575	19...20	58...60
125	424...425	572...575	24...27	55...61

Сопротивление профилей хрупким разрушениям оценивали по результатам испытаний на ударный изгиб при отрицательных температурах. Согласно новым унифицированным требованиям к ударной вязкости СП.16.13330.2011 для фасонных профилей стали С440 необходимо иметь ударную вязкость с V-образным надрезом при минус 40°С ( $KCV^{-40} \geq 34$  Дж/см<sup>2</sup>).

В работе исследовали ударную вязкость профилей на образцах, вырезанных послойно из полок (рисунок 3.). Показано, что при снижении содержания серы (S и P  $\leq 0.025\%$ ) и определенной корректировки режимов ускоренного охлаждения таким образом, чтобы в осевой части полок формировалась феррито-перлитная структура с размером зерна не более 20

мкм, металл полка по всему сечению имеет требуемую ударную вязкость:  $KCV^{-40} \geq 34$  Дж/см<sup>2</sup> (таблица 6).

Таблица 6

Ударная вязкость профилей с толщиной полки 125 мм  
из стали Histar 460 Russia с  $\sigma_T = 450$  Н/мм<sup>2</sup>.

Место отбора проб	Ударная вязкость при температуре, Дж/см <sup>2</sup>					
	+20°C	0°C	-20°C	-40°C	-60°C	-70°C
Поверхность	156...174	63...141	77...100	45...48	6,7...38,7	5,0...56
1/3 от поверхности	118...139	100...117	93...110	50...51	5,0...37,5	32...72,5
Осевая зона	157...173	121...136	52...87	48...55	8,7...41,2	25...51,2

Для определения значений температуры нулевой пластичности  $T_{нп}$  проводили испытания по Кинцелю. При эксперименте установлено, что  $T_{\psi=1\%} = -40^\circ\text{C}$  достигается в толщине полки 125 мм лишь в случае варианта 4 (таблица 2), т.е. при условии содержания вредных примесей S и P  $\leq 0,025\%$ .

Температура нулевой пластичности  $T_{нп} = T_{\psi=1\%} = -40^\circ\text{C}$  означает, что прокат можно применять при температурах до  $-70^\circ\text{C}$ , наиболее отрицательных температурах эксплуатации, так как допустимая минимальная температура эксплуатации составляет  $t_3 = T_{нп} - 30^\circ\text{C}$ .

Показано, что исследованный прокат с  $\sigma_T \geq 450$  Н/мм<sup>2</sup> обладает хорошей свариваемостью: сталь не склонна к образованию холодных трещин (эквивалентный углерод  $C_3 \leq 0,45\%$ , максимальная твердость в сварном соединении при провоцирующих режимах сварки  $< 300\text{HV}$ ); сталь не склонна к образованию слоистых трещин (прокат обладает высокими свойствами по толщине:  $\psi_z > 35\%$ ); сварные соединения обладают высокой хладостойкостью (при испытаниях на статический изгиб крупных сварных образцов температура нулевой пластичности  $T_{нп} = -40^\circ\text{C}$ , что обеспечивает надежную эксплуатацию сварных конструкций вплоть до минус  $70^\circ\text{C}$ ).

В целом двутавровые балки с параллельными гранями полков больших толщин до 81...125мм имеют высокую прочность ( $\sigma_T \geq 450$  Н/мм<sup>2</sup>) и при предложенных в работе ограничениях по содержанию вредных примесей (S и P  $\leq 0,025\%$ ) и обеспечении микроструктуры в осевых зонах полков (феррито-перлитная смесь с величиной зерна не более 20 мкм) обеспечивают надежную работу при эксплуатации уникальных строительных объектов в климатических условиях России.

В четвертой главе приведены результаты анализа аварийных разрушений крупных деталей строительных металлических конструкций, изготовленных из поковок конструкционной улучшаемой стали.

При эксплуатации ванто-ферменного покрытия Крытого Конькобежного Центра (ККЦ) в Крылатском (г. Москва) произошло разрушение детали оттяжечного системы – крупной стальной оси диаметром 528,5 мм и длиной 1082 мм, изготовленной из поковки по ГОСТ 8479-70\* «Поковки из конструкционной углеродистой и легированной стали. Общие технические условия» категории прочности КП 685. Согласно стандарта  $\sigma_{0,2} \geq 685 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\sigma_b \geq 835 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\delta_5 \geq 10\%$ ;  $\psi \geq 30\%$ ;  $\text{КСУ} \geq 39 \text{ Дж/см}^2$ . Ось была изготовлена из стали 38ХНЗМА по ГОСТ 4543-71 в 2003г. В 2007 г. ось хрупко разрушилась примерно на расстоянии 1/4 своей длины от торца при нормальных условиях эксплуатации (рисунок 6).



Рис. 6. Излом стальной оси

Разрушение оси произошло при температуре  $-4^\circ\text{C}$ , при скорости юго-западного ветра 3-6 м/сек и отсутствии снегового покров на покрытии. В работе установлено, что металл разрушившейся оси по механическим свойствам полностью соответствовал требованиям ГОСТ 8479-70\* к поковкам класса прочности КП 685.

При исследовании поверхности излома было установлено, что разрушение, зародившееся в центральной зоне оси, произошло из-за развития процессов замедленного хрупкого разрушения по водородному механизму, на что прямо указывают результаты электронно-фрактографического анализа. В изломе выявлен межзеренный характер разрушения (рисунок 7). Аналогичный излом наблюдается при лабораторных испытаниях образцов, вырезанных из аварийной оси на замедленное разрушение (рисунок 8).

В структуре поковок выявлены участки литой структуры, флокены, скопление неметаллических включений и другие дефекты структуры, которые отрицательно повлияли на работоспособность оси.

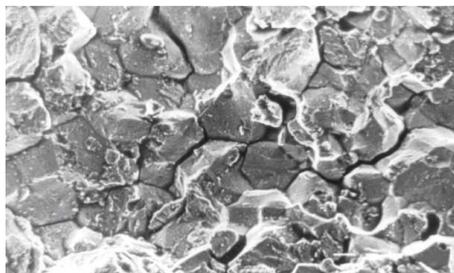


Рис.7.Электроннофрактографическое исследование аварийного излома. Разрушение по границам аустенитного зерна, x500

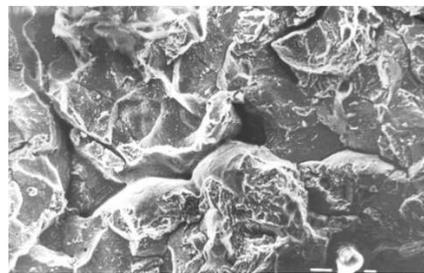


Рис.8. Электроннофрактографическое исследование излома. Разрушение образца при лабораторных испытаниях на замедленное хрупкое разрушение по водородному механизму, x 500

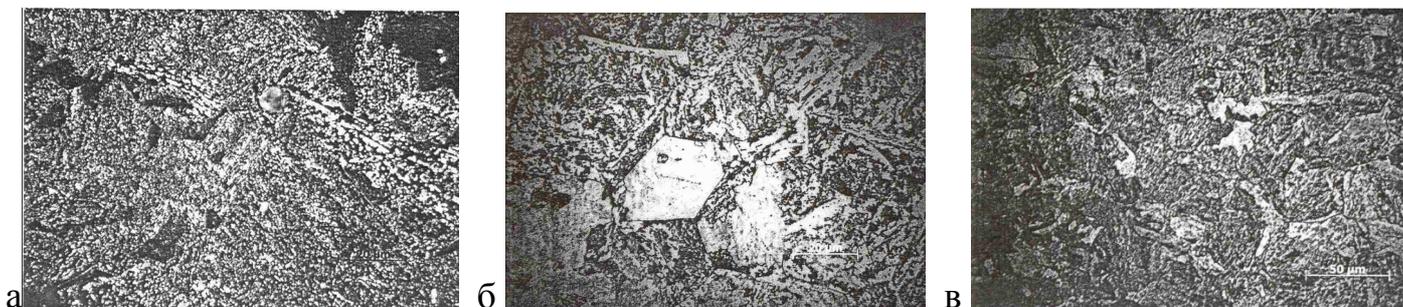


Рис. 9. Микроструктура разрушенной оси (сталь 38ХН3МА). а- поверхностная зона, б- центральная зона, в- 1/3 диаметра от поверхности.

Присутствие в металле водорода подтверждается обнаруженными в центральной зоне детали флокенами. Кроме того, в центральной зоне обнаружен технологический дефект типа усадочной литейной рыхлости, возникшей из-за недостаточной степени пластической деформации (укова) при изготовлении оси (здесь, как и в случае наличия флокенов имеет место нарушение п. 1.15 ГОСТ 8479-70\*). Обнаружено наличие крупных скоплений неметаллических включений в центральной зоне оси, служащих «ловушками» для диффундирующего водорода, и провоцирующих зарождение трещин. В центральной зоне оси также наблюдались структуры нераспавшегося бейнита, поэтому в металле центральных зон при нормальных механических свойствах полученных при испытаниях на растяжение наблюдалась низкая ударная вязкость (ниже стандартных значений) рисунок 10.

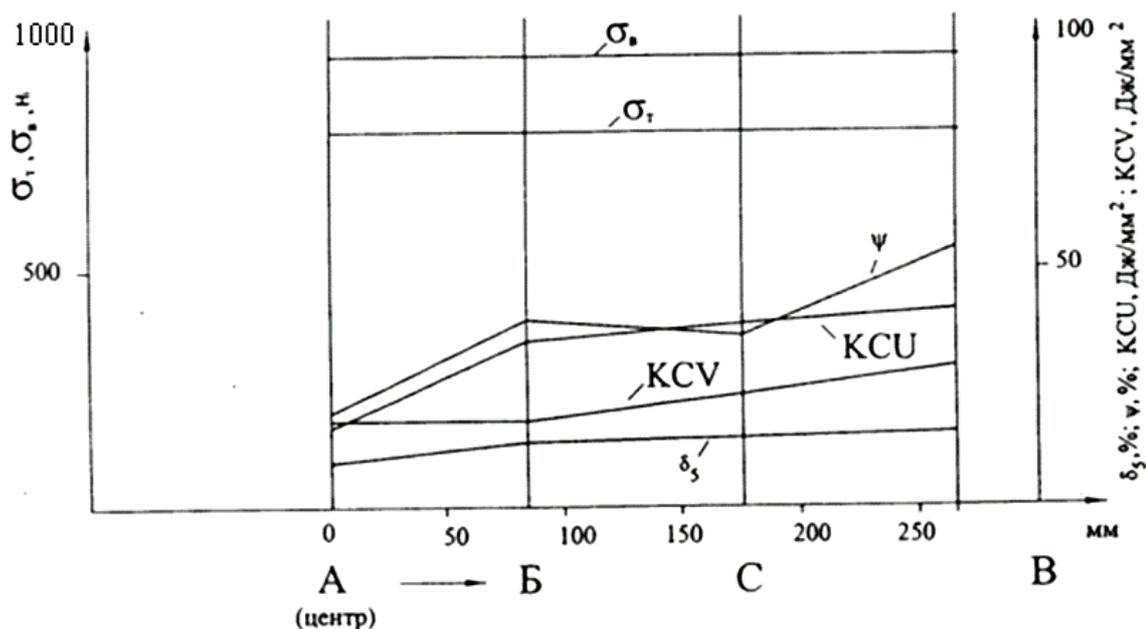


Рис. 10. Изменение механических свойств по сечению оси. KCU и KCV – минимальные значения;  $\sigma_{в}$ ,  $\sigma_{т}$ ,  $\delta_5$ ,  $\psi$  - средние значения.

Таким образом, крупные поковки из стали 38ХНЗМА, полностью соответствующие требованиям стандарта по механическим свойствам (образцы отбирались на 1/3R от поверхности, рис.10), не обеспечили надежную работу конструкций в условиях эксплуатации ответственного строительного объекта в связи с сильной неоднородностью и дефектностью структуры и чувствительностью к замедленному хрупкому разрушению.

В пятой главе обсуждается разработка технических требований и рекомендаций к осям большого диаметра для уникальных строительных объектов.

Разработаны и предложены следующие требования к механическим свойствам поковок для крупных осей диаметром свыше 500 мм из конструкционных сталей с прочностью  $\sigma_{т} \geq 685$  Н/мм<sup>2</sup> для ответственных строительных металлических конструкций, обеспечивающие эксплуатационную надежность изделий:  $\sigma_{т} = 685$  Н/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_{в} = 850$  Н/мм<sup>2</sup>,  $KCV^{40} = 27$  Дж/см<sup>2</sup>;  $\delta_5 = 12\%$ ;  $\psi = 40\%$ . При этом образцы для приемо-сдаточных испытаний необходимо отбирать на расстоянии 2/3 радиуса от поверхности, а не на расстоянии 1/3 радиуса, как предусмотрено действующим стандартом.

С учетом разработанных требований к новым осям был выбран завод – изготовитель «Уралмашзавод» (УЗТМ, г. Екатеринбург), где существуют технологии, позволяющие реализовать эти требования в готовых изделиях.

В качестве базовой стали по согласованию с заводом была выбрана марка стали 38ХНЗМФА. Эта сталь соответствует новым разработанным требованиям

по чистоте (неметаллическим включениям), по содержанию вредных примесей и газов, химическому составу (в %): С 0,33...0,40; Мп 0,25...0,50; Si 0,17...0,37; Cr 0,80...1,2; Ni 2,95...3,45; Mo 0,2...0,3; V 0,10...0,20; P≤0,015; S≤0,010; H≤0,0002. Она отличается от стали аварийной оси не только повышенной чистотой, но и более высоким содержанием никеля, обеспечивающим полную сквозную прокаливаемость оси в сечении 528 мм.

В работе показано, что новые высокие гарантированные свойства поковок больших диаметров выполняются лишь при применении современных технологий на всех этапах изготовления.

Выплавка стали производилась в электропечах с последующей внепечной обработкой жидкого металла в агрегате «печь-ковш», что обеспечивает точный химический состав металла, очистку стали от вредных примесей. Отливка слитков под поковку производилась в вакууме, что необходимо для обеспечения требуемого низкого содержания фосфора и газов, прежде всего водорода на флокенобезопасном уровне ( $H \leq 0,0002\%$ ).

Как было отмечено выше, одной из причин аварийного разрушения явилось наличие центральной литейной рыхлости в оси как следствие недостаточного укова слитков (порядка 1,5...2,0). Поэтому при изготовлении осей на УЗМК при ковке слитков (на 4 заготовки) предусматривается большая степень деформации (уков) не менее 3,0...4,0 (фактический уков равен 7).

Для гарантированного обеспечения новых требований к поковкам, проводилась специальная термическая обработка (рисунок 11). Для обеспечения удаления водорода предусматривалось разливание слитка в вакууме и медленное охлаждение поковок послековки. Проводился специальный отжиг – нормализация заготовок с целью перекристаллизации для удаления остаточных растягивающих напряжений, также отрицательно повлиявших при аварийном разрушении.

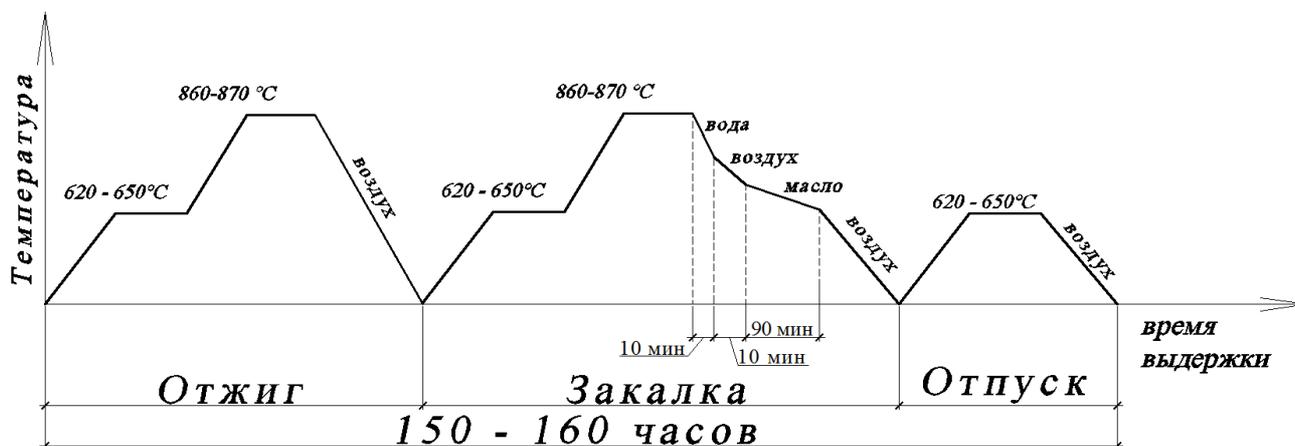


Рис. 11. Схема термической обработки оси из стали 38ХНЗМФА

Микроструктура новых осей изучалась вблизи поверхности, на расстоянии  $1/3$  диаметра от поверхности и в центральной зоне оси. Она представляет собой феррито - карбидную смесь (рисунок 12) как продукт распада при высокотемпературном отпуске смеси мартенсита с размером пакета 20-50мкм и нижнего бейнита. Объемная доля нижнего бейнита несколько увеличивается по мере удаления от поверхности в глубь поковки. На расстоянии  $1/3$  радиуса процессы распада мартенсита при отпуске прошли в полной мере (рисунок 12а), на расстоянии  $2/3$  радиуса элементы игольчатости сохранились лишь на отдельных участках (рисунок 20б), в центре оси игольчатость структуры ещё заметнее (рисунок 12в).

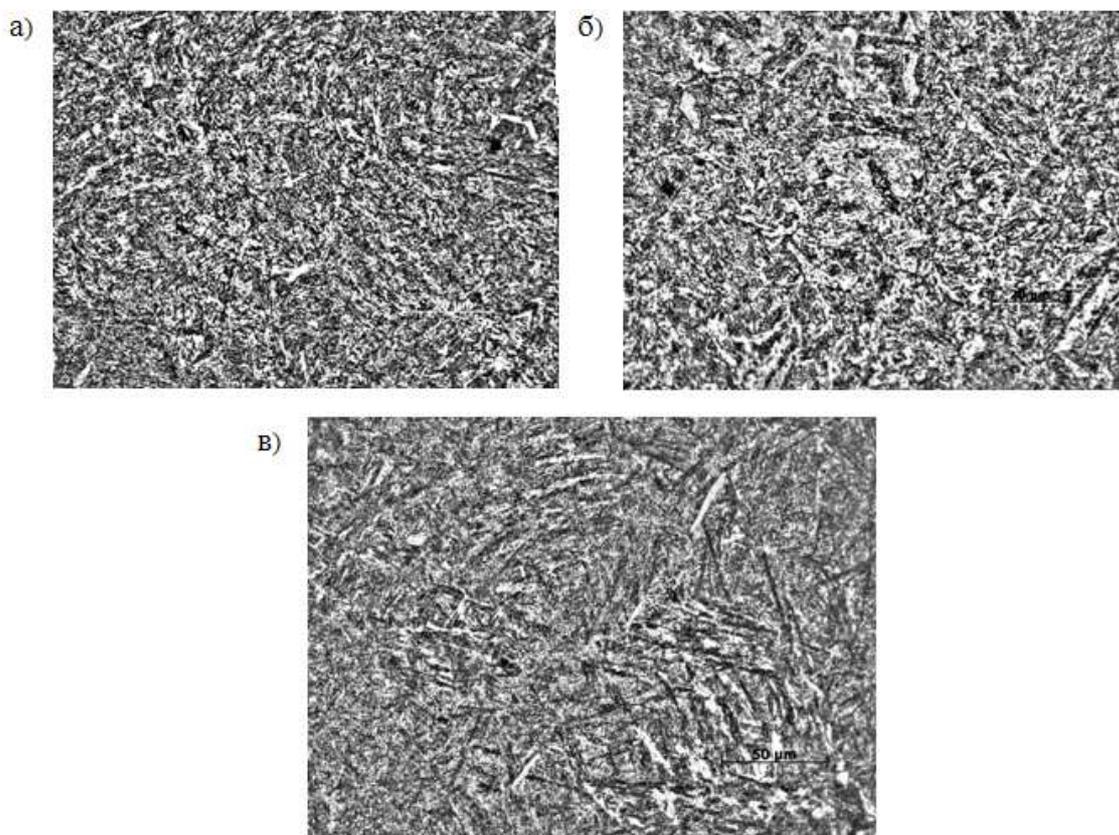


Рисунок 12. Микроструктура исследуемой оси:

а –  $1/3$  радиуса от поверхности оси; б –  $2/3$  радиуса от поверхности оси; в – центр оси

Выполнимость новых требований была доказана при анализе свойств 20 осей большого диаметра, изготовленных для ремонта покрытия ККЦ на УЗМК (г. Екатеринбург) и испытаний на растяжение и ударный изгиб (таблица 7).

Таблица 7

Результаты механических испытаний двадцати осей из стали 38ХНЗМФА  
на растяжение и ударный изгиб

Показатель свойств	Минимум $X_{min}$		Максимум $X_{max}$		Среднее $X$		Среднее квадратическое отклонение $S$		Козф. вариации $V$		Значения с обеспеченностью 0,95	
	1/3	2/3	1/3	2/3	1/3	2/3	1/3	2/3	1/3	2/3	1/3	2/3
$\sigma_{т}$ , Н/мм <sup>2</sup>	690	690	850	850	770	770	113.1	113.1	0.15	0.15	584.52	584.52
$\sigma_{в}$ , Н/мм <sup>2</sup>	850	850	980	990	915	920	70	70	0.08	0.08	800.20	805.20
$\delta_5$ , %	16	15.4	19.2	19.5	17.6	17.45	2.5	2.05	0.14	0.12	13.50	14.09
$\psi$ , %	58	54	64.4	64	61.2	59	3.2	5	0.05	0.08	55.95	50.80
$KCV^{40}$ , Дж/см <sup>2</sup>	32	27	159	139	95.5	83	63.5	56	0.66	0.67		

Примечание: Образцы отбирались на 1/3R и 2/3R от поверхности оси.

Механические свойства находятся на уровне разработанных нами требований и существенно превосходят требования стандарта ГОСТ 8479-70, а именно  $\sigma_{0,2} \geq 700$  Н/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_{в} \geq 850$  Н/мм<sup>2</sup>;  $\delta_5 \geq 15\%$ ;  $\psi \geq 50\%$ ;  $KCV^{40} \geq 27$  Дж/см<sup>2</sup>.

Результаты статистической обработки полученных данных показывают, что значения прочностных характеристик с обеспеченностью 0,95 полученные на образцах вырезанных из осей на расстоянии 1/3R и 2/3R от поверхности совпадают и превышают назначенные в проекте расчетные величины.

Проводились испытания для оценки склонности металла осей к замедленному хрупкому разрушению на образцах, вырезанных как на расстоянии 1/3 радиуса от поверхности, так и непосредственно из центра оси. По результатам испытаний оценивались следующие параметры:  $A_{\Sigma}$ , Дж – суммарная работа разрушения;  $A_p$ , Дж – работа распространения трещины (таблица 8).

Таблица 8

Результаты испытаний металла разрушенной оси (сталь 38ХНЗМА) и новых осей (сталь 38ХНЗМФА) на замедленное разрушение в присутствии коррозионной среды и водорода

Объект исследования	Место отбора проб	Работа распространения трещины, $A_p$	Работа разрушения образца, $A_{\Sigma}$
		Дж	
Разрушенная ось (сталь 38ХНЗМА)	1/3 радиуса	14,7 ± 0,7	20,8 ± 1,0
	Центр оси	10,8 ± 0,5	17,3 ± 0,9
Новая ось (сталь 38ХНЗМФА)	1/3 радиуса	43,7 ± 2,2	48,4 ± 2,4
	Центр оси	46,0 ± 2,3	51,2 ± 2,6

Из таблицы 8 видно, что величина работы разрушения металла новой оси в 2,5-3 раза больше, чем в аварийной, особенно для образцов вырезанных из центральной части оси. Таким образом установлено, что новые оси обладают существенно большим сопротивлением замедленному разрушению, чем аварийные.

### Основные результаты и выводы

В работе решена научная задача обеспечения высоких эксплуатационных свойств элементов металлических конструкций высокой прочности и большого сечения, применяемых в уникальных строительных объектах: двутавровых балок с параллельными гранями с толщиной полок до 125 мм включительно с  $R_{un} = 450 \text{ Н/мм}^2$  и цилиндрических осей из поковок диаметром свыше 500 мм с  $R_{un} = 700 \text{ Н/мм}^2$ , а именно:

1. Показано, что двутавровые профили производства «Arcelor Mittal» с параллельными гранями полок с толщиной полки до 125 мм включительно могут применяться как элементы стального каркаса высотных зданий из стали высокой прочности с нормативными механическими свойствами  $R_{yn} = 440 \text{ Н/мм}^2$ ;  $R_{un} = 570...720 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\delta_5 = 20\%$ ;  $KCV^{40} = 34 \text{ Дж/см}^2$ ;  $\psi_z = 35\%$ , что превосходит как гарантированные свойства завода «Arcelor Mittal» в части величины пластических характеристик и ударной вязкости ( $\delta_5 = 17\%$ ;  $KCV^{20}$ ), так и требования отечественных стандартов (фасонный прокат поставляется с толщиной полок не свыше 40 мм и  $R_{yn} = 305 \text{ Н/мм}^2$ ). Сталь с новыми требованиями выпускается под маркой стали Histar 460 Russia.

2. Высокий комплекс эксплуатационных свойств в профилях достигается за счет формирования в процессе рекристаллизационной термомеханической обработки слоистой структуры с высокими остаточными напряжениями сжатия в поверхностных слоях, что обеспечивает повышение сопротивления хрупким разрушениям, переменным нагрузкам, коррозионным воздействиям.

Установлено, что в таких неоднородных по прочности сечениях профилей обеспечивается ударная вязкость:  $KCV^{40} \geq 34 \text{ Дж/см}^2$  по всему сечению (125 мм), при условии формирования в осевых зонах профиля феррито-перлитной структуры с размером зерна не более 20 мкм (балла №8). При этом сталь не склонна к образованию слоистых трещин за счет достижения величины относительного сужения  $\psi_z > 35\%$ .

Материал профилей при содержании химических элементов в стали  $C \leq 0,1\%$ ,  $Mn \sim 1,5\%$ ,  $V < 0,05\%$ ,  $Ni, Cr, Cu \approx 0,2\%$  обладает хорошей свариваемостью, не склонна к образованию холодных трещин (эквивалентный углерод  $C_3 < 0,45\%$ , максимальная твердость в свариваемом соединении при провоцирующих

режимах сварки  $<300\text{HV}$  при норме  $\leq 350\text{HV}$ ). Сварные соединения обладают высокой хладостойкостью: при испытаниях на статический изгиб крупных сварных образцов температура нулевой пластичности  $T_{\text{нп}} = -40^{\circ}\text{C}$ , что обеспечивает надежную эксплуатацию сварных конструкций вплоть до  $-70^{\circ}\text{C}$ .

3. Предложен минимальный комплекс необходимых характеристик и определены их величины, характеризующие эксплуатационную надежность профилей в конструкциях и чувствительных к неблагоприятным изменениям микроструктуры: химический состав; ударная вязкость при температуре минус  $40^{\circ}\text{C}$  (KCV-40); прочностные и пластические свойства, определяемые при испытаниях на растяжение; относительное сужение ( $\psi_z$ ), определяемое при испытаниях на растяжение по толщине проката ( $z$  – свойства), которые включены в нормативную документацию.

4. На основе анализа причин разрушения крупной стальной оси диаметром свыше 500 мм из стандартной поковки с  $\sigma_{\text{T}} = 700\text{Н/мм}^2$  из среднеуглеродистой термически упрочненной стали 38ХНЗМА – детали оттяжечной системы вантового покрытия. Впервые предложены требования к механическим свойствам поволоков для крупных осей диаметром свыше 500 мм из конструкционных сталей с прочностью  $\sigma_{\text{T}} \geq 685\text{ Н/мм}^2$  для ответственных строительных металлических конструкций, обеспечивающих эксплуатационную надежность изделий:  $\sigma_{\text{T}} = 685\text{ Н/мм}^2$ ,  $\sigma_{\text{в}} = 850\text{ Н/мм}^2$ ,  $\text{KCV}^{-40} = 27\text{ Дж/см}^2$ ;  $\delta_5 = 12\%$ ;  $\psi = 40\%$ . При этом образцы для приемо-сдаточных испытаний мы предложили отбирать на расстоянии  $2/3$  радиуса от поверхности, а не на расстоянии  $1/3$  радиуса, как предусмотрено действующим стандартом.

Данные требования выполняются при использовании для изготовления поволоков из стали 38ХНЗМФА с содержанием вредных примесей и газов на уровне  $S \leq 0,010\%$ ,  $P \leq 0,015\%$ ,  $N \leq 2\text{ppm}$ ; и применением технологии деформационной термической обработки исключаящей флокенообразование и неоднородное распределение неметаллических включений и обеспечивающей получение мелкозернистой структуры по всему сечению поволока. Выполнимость требований доказана при анализе свойств 20 осей большого диаметра, изготовленных для ремонта покрытия ККЦ на УЗМК (г. Екатеринбург). Показано, что оси большого диаметра, отвечающие разработанным требованиям, не склонны к разрушению по механизму замедленного хрупкого разрушения.

5. Результаты работы внедрены:

- В подвесных конструкциях покрытия уникального здания «Крытый Конькобежный центр» в Крылатском, г. Москва установлены оси диаметром 528 мм из поволоков высокой прочности нового поколения, отличающихся высокими эксплуатационными свойствами, производства завода «Уралмаш».

- В стальных каркасах высотных зданий «Москва Сити» из широкополочных двутавров с параллельными гранями использован рекомендованный нами прокат с  $\sigma_T = 450 \text{ Н/мм}^2$  и толщиной полки до 125 мм производства Arcelor (Люксембург).

### Публикации по теме диссертации

Основные результаты работы опубликованы в следующих статьях (\* - рекомендуемые ВАК издания):

1\*. Егорова А.А., Одесский П.Д. О развитие методов оценки z-свойств проката больших толщин // Деформация и разрушение материалов. -2009. - №10. – с. 36-48.

2\*. Егорова А.А., Одесский П.Д., Тодорова Е.В. Анализ аварийного излома элемента стальной конструкции // Деформация и разрушение материалов. – 2010 - №7 – с. 45-48.

3\*. Егорова А.А., Одесский П.Д., Филлипов Г.А., Ливанов О.В., Кулик В.Ю. Анализ эксплуатационного разрушения крупной стальной оси и разработка мер для его предотвращения // Сталь – 2010 - №11 – с. 82-91.

4\*. Егорова А.А., Одесский П.Д. О прочности стали для уникальных строительных конструкций. // Деформация и разрушение материалов – 2011. - №12. – с. 35-41\*.

5.Егорова А.А., Одесский П.Д. Об одном разрушении сварного соединения // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2010 - №6. – с. 2-6\*.

Egorova A.A., Odesskiy P.D. Application insteel frameworks of highrise buildings of large I-brams with parallel basils of shelves // Metalurgija – 2010 - №3 – vol.49 – s/213 (Zagreb).

6.Егорова А.А., Одесский П.Д. Филлипов Г.А., Кулик В.Ю., Кузнецов А.Л. Применение цилиндрических поковок большого диаметра в уникальных строительных конструкциях. // Промышленное и гражданское строительство\*. 2012. – №3. – с. 21-26.

7. Egorova A.A., Odesskiy P.D., Vedyakov I.I. Strength of structural steels in large sections, used as the elements of unique construction projects // Metalurgija – 2012 - №3 – vol. 51 – s.404 (Zagreb).

8. Егорова А.А., Одесский П.Д, Филиппов Г.А., Ливанова О.В. Прочность современных сталей для осей большого диаметра, применяемых в уникальных инженерных сооружениях. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2012. - №2. – с. 3138.

9. Егорова А.А., Одесский П.Д. Влияние однородности свойств по сечению на работоспособность крупных элементов в уникальных стальных строительных конструкциях. // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2012. - №8. – с. 2-9.