

УДК 69.059.3:624.014.2.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ СО СТАЛЬНЫМ КАРКАСОМ ИЗ КИПЯЩЕЙ СТАЛИ

Шахова Елизавета Эдуардовна,

студентка, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),
195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул.

Политехническая, д. 29 литера Б,

shahovaya.ee@edu.spbstu.ru

Аннотация

В статье поднимается острая проблема реновации индустриального фонда, сформированного в середине XX века с массовым применением кипящих сталей. Актуальность исследования продиктована необходимостью модернизации производственных мощностей в условиях, когда несущие каркасы зданий, которые выработали нормативный ресурс, обладают скрытыми дефектами – склонностью к хладноломкости, деформационному старению. Цель – обосновать стратегию безопасного усиления таких конструкций, исключая риск лавинообразного разрушения. Вскрывается ключевое противоречие инженерной практики: стандартные методы реконструкции, где предполагаются сварочные работы, вступают в конфликт с металловедческими особенностями «старой» стали, которая критически теряет пластичность в зонах термического влияния. Автор приходит к выводу, что традиционный подход к ремонту подобных объектов опасен. Обосновывается необходимость перехода на «сухие» технологии монтажа и предварительно напряженные системы. Вкладом в предметную область служат сформулированные рекомендации по диагностике ликвационных зон и введению понижающих коэффициентов условий работы для элементов из кипящей стали. Материал представляет практическую ценность для инженеров-конструкторов, экспертов по обследованию зданий, технических заказчиков, сталкивающихся с рисками восстановления советского промышленного наследия.

Ключевые слова: деформационное старение, кипящая сталь, производственные здания, реконструкция, сварка, усиление конструкций, хладноломкость, хрупкое разрушение

RECONSTRUCTION OF INDUSTRIAL BUILDINGS WITH STEEL FRAMES MADE OF RIMMED STEEL

Shakhovaya Elizaveta Eduardovna,

Student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)

29B Polytechnicheskaya Street, Municipal District Akademicheskii, St. Petersburg, 195251,

shahovaya.ee@edu.spbstu.ru

ABSTRACT

The article addresses the urgent problem of renovating industrial facilities built in the mid-20th century, when rimmed steels were widely used. The relevance of the study is driven by the need to modernise production capacity under conditions where structural frames that have exceeded their design service life possess hidden defects, including susceptibility to brittle fracture and strain ageing. The aim is to substantiate a safe reinforcement strategy that eliminates the risk of progressive collapse. The paper highlights a key contradiction in engineering practice: standard reconstruction methods involving welding conflict with the metallurgical characteristics of aged rimmed steel, which experiences critical loss of ductility within heat-affected zones. The author concludes that the conventional approach to repairing such structures is hazardous and justifies the transition to “dry” assembly technologies and prestressed systems. The contribution to the field lies in formulating recommendations for diagnosing segregation zones and applying reduction coefficients for load-bearing capacity in elements made of rimmed steel. The material is of practical value to structural engineers, building survey specialists, and project owners dealing with risks associated with restoring Soviet industrial assets.

Keywords: strain ageing, rimmed steel, industrial buildings, reconstruction, welding, structural reinforcement, cold brittleness, brittle fracture

Введение

Наследие советской промышленной архитектуры 1950-1980-х годов формирует значительную часть эксплуатируемого фонда производственных зданий России. На фоне дефицита свободных площадей в индустриальных зонах и необходимости оптимизации капитальных затрат реконструкция существующих объектов зачастую становится более привлекательной альтернативой новому строительству. Между тем, данный процесс сопряжен со специфическими рисками. Они обусловлены материаловедческими особенностями несущих конструкций того периода. Одной из наиболее острых проблем является широкое распространение стальных каркасов, выполненных из кипящей стали, которая массово применялась в строительстве вплоть до ужесточения нормативных требований в конце XX века.

В данной статье рассматривается специфика работы с каркасами из неё при реконструкции производственных зданий. Важно систематизировать риски, связанные с изменением напряженно-деформированного состояния таких конструкций, и предложить обоснованные методы их усиления, помогающие снизить вероятность аварийных отказов. Особое внимание уделяется проблеме свариваемости «старого» металла и выбору щадящих технологий усиления.

Методы

Методологическую основу исследования составил системный анализ архивных материалов по проектированию промышленных объектов середины XX века и современных научных публикаций в области металловедения строительных сталей. Для оценки рисков, которые сопряжены с эксплуатацией рассматриваемых конструкций, применялся метод сравнительного анализа физико-механических характеристик кипящих и спокойных сталей (с учетом кинетики деформационного старения). Разработка рекомендаций по усилению базировалась на обобщении инженерной практики реконструкции и моделировании напряженно-деформированного состояния узлов при различных сценариях термического и механического воздействия.

Результаты и обсуждение

Кипящая сталь, будучи экономически эффективной в производстве за счет неполного раскисления, обладает рядом критических недостатков. Они проявляются в процессе длительной эксплуатации. Ключевыми факторами риска служат высокая склонность к механическому старению и хладноломкость – резкое падение ударной вязкости при отрицательных температурах. При реконструкции, где предполагается изменение нагрузок, конструктивных схем либо температурных режимов, игнорирование этих свойств подчас приводит к катастрофическим последствиям, вплоть до хрупкого разрушения элементов [2, 5].

Фундаментальная проблема кипящей стали проявляется в ее химической неоднородности. В отличие от спокойных сталей, кипящая содержит повышенное количество растворенных газов (азота и кислорода). Она также характеризуется выраженной ликвацией серы и фосфора в центральной зоне сечения проката. В процессе многолетней эксплуатации под воздействием циклических нагрузок и перепадов температур в металле протекают процессы деформационного старения. Это приводит к блокированию дислокаций атомами внедрения (азотом и углеродом). В итоге повышается предел текучести, но критически снижается пластичность, ударная вязкость [2].

При диагностике зданий перед реконструкцией инженеры часто сталкиваются с тем, что проектная документация утрачена, а марка стали неизвестна. По-видимому, визуальный осмотр не дает полной картины. Отсутствие видимых коррозионных повреждений не гарантирует сохранения механических свойств. В таблице 1 представлены ключевые индикаторы, которые требуют лабораторной проверки при подозрении на использование кипящей стали.

Таблица 1.

Сравнительные характеристики и индикаторы риска для сталей старых каркасов (составлено на основе [1-3, 5])

Параметр анализа	Стали		Влияние на решение о реконструкции
	Спокойная	Кипящая	
Распределение примесей	Равномерное по сечению	Выраженная ликвация S и P в центре (до 300-400% от среднего)	Высокий риск расслоения при сварке тавровых соединений и нагрузках поперек проката (Z-свойства)
Ударная вязкость (KCV) при -20°C	Высокая, стабильная	Низкая, нестабильная. Склонность к хрупкому переходу	Критический параметр. При KCV < 25 Дж/см ² эксплуатация в неотопляемых зонах требует усиления или замены
Свариваемость	Хорошая, без ограничений	Ограниченная. Склонность к образованию горячих и холодных трещин в зоне термического влияния (ЗТВ)	Запрет на сварку под нагрузкой без специальных мероприятий (подогрев, мягкие режимы)
Чувствительность к концентраторам	Умеренная	Высокая	Любой подрез шва или дефект монтажа может

			статья инициатором хрупкой трещины
--	--	--	------------------------------------

Как представляется, обязательным этапом обследования должен быть отбор проб (стружки) для химического анализа на содержание кремния (Si). Для кипящих сталей характерно содержание Si < 0,07%, а для спокойных – 0,12-0,30%. Этот простой «маркер» помогает с высокой вероятностью идентифицировать потенциально опасные зоны каркаса [3, 4].

Основной дилеммой при реконструкции зданий с каркасом из кипящей стали является выбор метода усиления. Традиционный подход, суть которого заключается в приварке дополнительных элементов (ребер, ламелей) к нагруженным конструкциям, в данном случае сопряжен с недопустимым риском. Введение сварочного тепла в «старый», наклепанный и склонный к старению металл вызывает охрупчивание зоны термического влияния. Вдобавок, термические деформации могут инициировать развитие трещин в зонах ликвации примесей.

Вследствие этого, современные подходы к реконструкции таких объектов смещаются в сторону «сухих» методов монтажа или использования технологий, исключающих высокотемпературное воздействие на основной металл. В таблице 2 приведен сравнительный анализ способов усиления применительно к фермам и колоннам из кипящей стали.

Таблица 2.

Эффективность методов усиления конструкций из кипящей стали (составлено на основе [1, 4, 5])

Метод усиления	Технологические риски	Применимость для кипящей стали	Рекомендуемая область применения
Увеличение сечения сваркой	Экстремально высокие. Риск разрушения шва и ЗТВ, особенно при работе на холоде	Ограниченная (только при $t > 0^{\circ}\text{C}$ и разгрузке конструкций)	Внутри отапливаемых цехов, для второстепенных элементов. Требуется предварительного подогрева, специальных электродов
Увеличение сечения на высокопрочных болтах	Низкие. Отсутствие термического влияния. Требуется сверления отверстий (ослабление сечения)	Высокая. Наиболее надежный метод для ответственных узлов	Усиление поясов ферм, стыков колонн, подкрановых балок
Изменение конструктивной схемы (шпренгели, подкосы)	Средние. Риски сопряжены с передачей усилий в новых узлах примыкания	Высокая. Позволяет разгрузить существующие элементы	Пролетные строения, фермы покрытия больших пролетов
Предварительное напряжение (затяжки)	Минимальные. Активное регулирование усилий без	Высокая. Эффективно компенсирует	Усиление нижних поясов ферм, балок, ригелей. Помогает «выключить» часть

	вмешательства в структуру металла	в	дефекты и перегрузки	и	нагрузки с основного металла
--	-----------------------------------	---	----------------------	---	------------------------------

Основываясь на проанализированных данных, можно сформулировать ряд рекомендаций для главных инженеров проектов и конструкторов, которые работают с подобными объектами. Данные предложения нацелены на решение проблемы непрогнозируемого разрушения, характерного для кипящих сталей.

Так, следует ввести в регламент реконструкции запрет на выполнение сварочных работ на элементах из кипящей стали, которые находятся под напряжением растяжения, превышающим 0,4 от расчетного сопротивления. В случае неизбежности сварки необходимо предусмотреть полное временное разгружение конструкции (домкратами или временными опорами).

При поверочных расчетах каркасов из кипящей стали, эксплуатируемых более 40-50 лет, рекомендуется вводить дополнительный понижающий коэффициент условий работы. Это позволит учесть накопленные повреждения и деградацию ударной вязкости, которые невозможно полностью обнаружить методами неразрушающего контроля.

Если конструктивное решение требует сварки (например, приварка фасонки), целесообразно предусмотреть локальную термообработку (отжиг) сварного соединения для снятия остаточных напряжений и снижения твердости в зоне термического влияния. Это, по сути, единственный способ восстановить пластичность металла в узле.

В качестве инновационного, хотя и дорогостоящего решения, предлагается рассмотреть усиление композитными материалами (углепластиковыми ламелями) на клеевой основе. Данный метод полностью исключает термическое воздействие и концентрацию напряжений от отверстий. Это идеально подходит для хрупких кипящих сталей.

Выводы

Реконструкция производственных зданий с каркасом из кипящей стали представляет собой сложную инженерную задачу – она лежит на стыке строительной механики и металловедения. Проведенный анализ показывает, что ключевым фактором риска служит не столько потеря несущей способности от коррозии, сколько деградация пластических свойств металла – склонность к старению и хладноломкости. Ошибочный выбор технологии усиления, в частности, неконтролируемое применение сварки, способно спровоцировать лавинообразное хрупкое разрушение, особенно в условиях низких температур.

Впрочем, наличие каркаса из кипящей стали не является «приговором» для здания. Применение дифференцированного подхода, который базируется на глубокой инструментальной диагностике и приоритете безсварочных методов усиления (болтовые соединения, преднапряженные затяжки), позволяет успешно продлевать жизненный цикл таких объектов. Экономическая целесообразность реконструкции в данном случае сохраняется, однако она требует более высокой квалификации проектировщиков и строгого соблюдения технологической дисциплины на этапе производства работ.

Таким образом, с помощью результатов проведенного исследования подчеркивается необходимость пересмотра типовых подходов к усилению металлоконструкций в пользу «щадящих» технологий. Дальнейшее развитие нормативной базы рекомендуется ориентировать на уточнение методик расчета остаточного ресурса сталей с учетом кинетики деформационного старения. Это даст возможность более точно оценивать риски и оптимизировать затраты на восстановление промышленного потенциала страны.

Список литературы:

1. Макаренко Е.И. Катастрофические разрушения по причине хладноломкой стали: экспертная оценка социолога // Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. – 2022. – № 3 (4). – С. 72-77.
2. Маликова Е.А. Обследование строительных конструкций, выполненных из кипящих сталей // Тенденции развития современной науки. Сборник трудов научно-практической конференции Липецкого государственного технического университета. – Липецк: 2022. – С. 273-276.
3. Маликова Е.А. Определение остаточного ресурса несущих конструкций здания, выполненных из кипящих сталей // Тенденции развития современной науки. Сборник трудов научно-практической конференции Липецкого государственного технического университета. – Липецк: 2022. – С. 276-279.
4. Петрова Л.Г. Металловедческая экспертиза разрушений конструкций по причине хладноломкости: исторический обзор // Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. – 2022. – № 2 (3). – С. 29-46.
5. Покровский А.А. Хрупкое разрушение стальных конструкций // URL: <https://portal.edufire37.ru/articles/839> (дата обращения: 18.12.2025).

References:

1. Makarenko E.I. Catastrophic destruction due to cold-breaking steel: an expert assessment of a sociologist // Problems of expertise in the automotive and road industry. – 2022. – No. 3 (4). – Pp. 72-77.
2. Malikova E.A. Inspection of building structures made of boiling steels // Trends in the development of modern science. Proceedings of the scientific and practical conference of Lipetsk State Technical University. – Lipetsk: 2022. – Pp. 273-276.
3. Malikova E.A. Determination of the residual resource of building load-bearing structures made of boiling steels // Trends in the development of modern science. Proceedings of the scientific and practical conference of Lipetsk State Technical University. – Lipetsk: 2022. – Pp. 276-279.
4. Petrova L.G. Metallographic examination of structural damage due to cold fracture: a historical review // Problems of expertise in the automotive and road industry. – 2022. – No. 2 (3). – Pp. 29-46.
5. Pokrovsky A.A. Brittle fracture of steel structures // URL: <https://portal.edufire37.ru/articles/839> (date of request: 12/18/2025).