

УДК 620. 181. 41

НАЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

PURPOSE MODE HEAT TREATMENT FOR PARTS OF STRUCTURAL ALLOYED STEEL OPERATING UNDER CONDITIONS OF DYNAMIC LOADS.

Коротков Александр Николаевич,

доктор техн. наук, профессор, e-mail: korotkov.a.n@mail.ru

Korotkov Alexander N., Dr. Sc., Professor

Короткова Лидия Павловна,

кандидат техн. наук, доцент

Korotkova Lidiya P., C. Sc., Assistant Professor

Баканов Александр Александрович,

кандидат техн. наук

Bakanov Alexandr A., C. Sc., Assistant Professor

Лащина Светлана Викторовна,

магистрант

Lashchinina Svetlana V., undergraduate

Видин Денис Владимирович,

магистрант

Vidin Denis V., undergraduate

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Vesennyaya street, 28, Kemerovo, 650000, Russia

Аннотация. В работе приведены результаты по оптимизации процесса термической обработки корпусных деталей из конструкционной легированной стали типа 50ХМЮА, обеспечивающего получение мартенситной структуры не выше 3÷4 балла, с твердостью не менее 58÷59 HRC. Разработан методологический подход по назначению режима закалки в условиях градиента температуры по сечению печи. Результаты имеют научное и практическое значение с точки зрения обеспечения высоких эксплуатационных показателей изделиям из данной стали, а так же с позиции возможности автоматизации процесса их закалки.

Abstract. The study shows the results of the optimization process of thermal treatment of body parts made of structural type alloyed steel 50HMUA ensuring obtaining of martensite structure not higher than 3÷4 points with hardness not less than 58÷59 HRC. A methodological approach is designed to setting of the mode of quenching in the temperature gradient conditions for the furnace profile. Results have scientific and practical importance in terms of providing high performance indicators for the products made of this steel, and also opportunities for introducing automated quenching process.

Ключевые слова: оптимизация термической обработки, качество стали, микроструктура, мартенсит, троостит, балл зерна, эксплуатационные свойства.

Keywords: optimization of thermal treatment, quality of steel, structure, martensite, troostite, grain size, operational indicators.

На машиностроительном предприятии по производству деталей из сложнолегированной стали марки типа 50ХМЮА возникла проблема, связанная с их низкими эксплуатационными характеристиками. В процессе эксплуатации детали, работающие в условиях значительных динамических нагрузок, либо сминались в момент удара, либо происходило их хрупкое разрушение. Разные виды разрушения свидетельствуют о значительных различиях в свойствах термически обрабо-

танных деталей, т. к. смятие происходит из-за пониженной твердости, а хрупкое разрушение – из-за пониженной ударной вязкости.

Задачей данного исследования являлось обеспечение высоких эксплуатационных показателей стальных корпусных деталей за счет разработки рекомендаций по назначению режимов упрочняющей термообработки, с получением мартенситной структуры не выше 3÷4 балла и твердостью не менее 58÷59 HRC [1].

Для реализации поставленной задачи проведен контроль качества материала деталей в состоянии поставки. Изучено также влияние упрочняющей термической обработки на качество стали в зависимости от режимов закалки путем определения допустимого соотношения интервала закалочных температур и длительности нагрева деталей.

Материалы и методика исследований

Материалом деталей послужила сложнолегированная сталь типа 50ХМЮА, а процесс исследований включал в себя контроль качества материала деталей в состоянии поставки и после упрочняющей термической обработки. Для исследований использовалась методика контроля каче-

В состоянии поставки исследовались: химсостав, микроструктура мартенсита [2], макроструктура [3], твердость в исходном состоянии [4], вид излома [5], обезуглероженный слой [6], наличие неметаллических включений [7], микропористость [8].

После упрочняющей термической обработки исследовались: величина аустенитного зерна [9], механические свойства [10], твердость после закалки и отпуска [4].

Технические требования на исследуемую марку стали типа 50ХМЮА изложены в ТУ14-1-2232-2004.

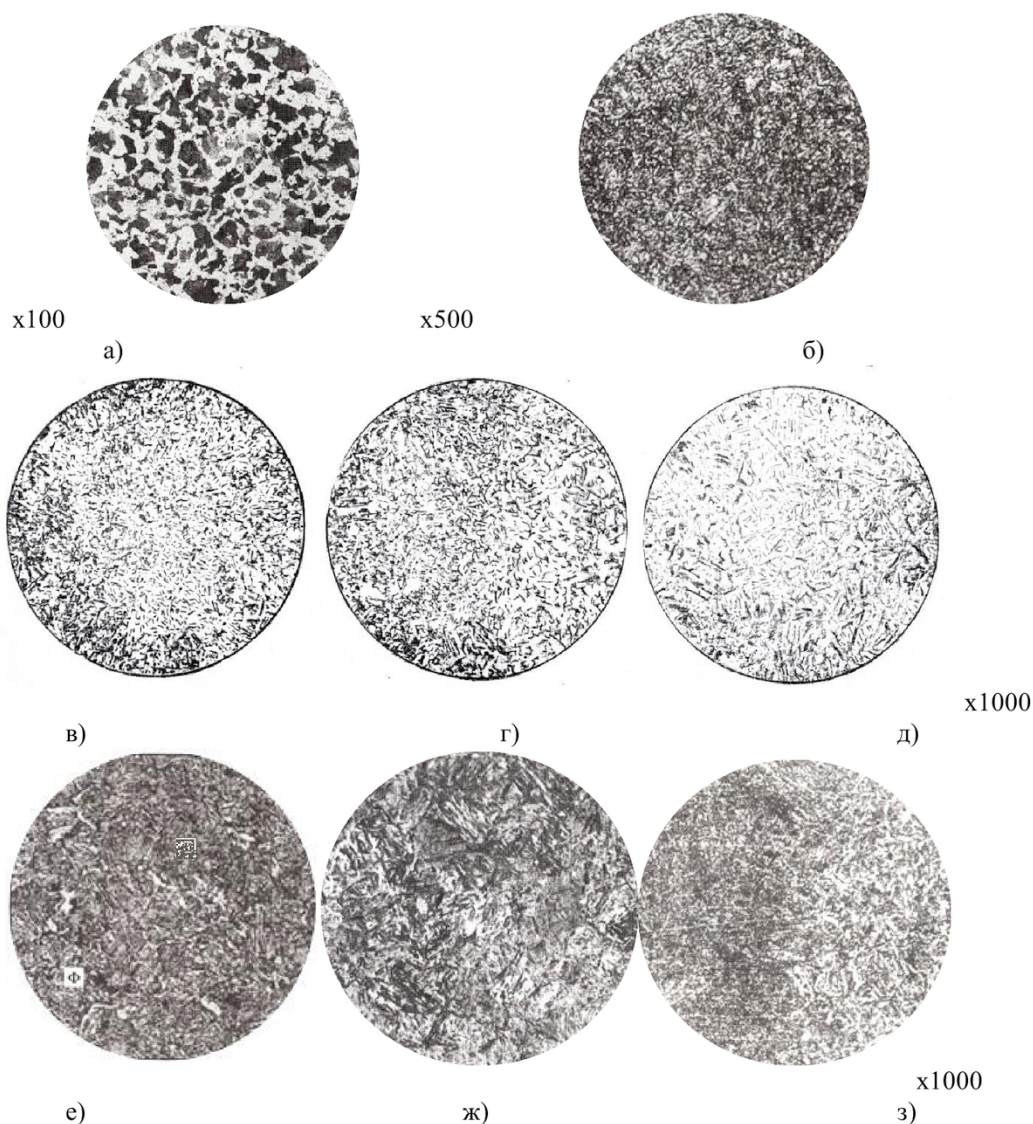


Рис. 1 Микроструктура стали 50ХМЮА в состоянии поставки (а, б):

- а) нормализованный прокат (пластинчатый перлит и сетка феррита); б) улучшенный прокат (сорбит); после термической обработки: в) мартенсит, балл 3 (режим 4, 6, 7); г) мартенсит, балл 4 (режим 2, 6); д) мартенсит, балл 5, недопустимый (режимы 3 и 8); е) недогрев стали (режим 6); ж) мартенсит и троостит (режим 4); з) троостит (режим 1)

ства сталей, разработанная и внедренная на кафедре «Металлорежущие станки и инструменты» Кузбасского государственного технического университета [1].

Результаты исследований и их обсуждение

В состоянии поставки отклонения в химсоставе материала деталей не обнаружены. Сталь во всех контролируемых партиях соответствовала

марке типа 50ХМЮА. На предприятие поступает прокат в нормализованном состоянии с феррито-перлитной структурой (рис. 1, а), либо улучшенный с сорбитной структурой (рис. 1, б). Дефекты микроструктуры в состоянии поставки не обнаружены. Неметаллические включения присутствовали, но не превышали допустимые значения ($1\div 2$ балл), поры не обнаружены. Твердость находилась на допустимом уровне и не превышала $160\div 220$ НВ.

Таким образом, можно сделать вывод, что все исследованные партии стали в состоянии поставки имели качество, соответствующее требованиям ТУ14-1-2232-2004.

Упрочняющая термическая обработка деталей из стали типа 50ХМЮА выполнялась на микроструктуру мартенсит и заключалась в полной закалке в масло с последующим низким отпуском. В соответствии с техническими требованиями изделие должно обладать твердостью не менее $58\div 59$ HRC, а микроструктура мартенсита должна иметь по размеру не более $3\div 4$ балла (рис. 1, в, г) [1]. Проблема заключалась в том, что после упрочняющей термообработки не все детали имели требуемый комплекс свойств и микроструктуру. Решение проблемы усложнялось тем, что для закалки использовалась трубчатая печь типа П-

20769-ПС с переменным градиентом температуры по длине нагревательного устройства. Детали в неё загружались и передвигались по трубе из зоны низких в зону высоких температур, обеспечивая их постепенный нагрев. Из-за конструкции печи длительность нагрева и температура перед закалкой каждой детали в партии различались, находясь в некотором интервале значений. Качество закалки определялось соотношением этих двух параметров режима термической обработки.

Характеристики режимов термической обработки (номера режимов 1 – 8) отражены в табл. 1.

Для повышения качества закалки проведены эксперименты по нахождению оптимального режима термообработки. За параметры оптимизации режимов закалки приняты температура, время нагрева и охлаждающая среда, обеспечивающие микроструктуру мартенсита не выше $3\div 4$ балла и твердость не ниже $58\div 59$ HRC. В ходе экспериментов определялось допустимое соотношение между интервалом закалочных температур и интервалом длительности нагрева. При окончательном выборе режима термообработки учитывалась скорость нагрева деталей, т.к. из-за особенности конструкции печи этот параметр тоже менялся. Результаты исследований режимов упрочняющей термической обработки представлены в табл. 1.

Таблица 1. Влияние режимов закалки на микроструктуру и твердость деталей из стали 50ХМЮА

№ режима	Режим термической обработки			Микроструктура	Твёрдость, HRC (средняя)		Анализ микроструктуры и режимов закалки
	tnагр., оС	Время нагрева, τ, с	Охлаждение в масле, Т, оС		Поверхность	Сердцевина	
1	940	200	60 оС	Мартенсит и троостит, преимущественно	55,5	54,5	Возникновение троостита связано с замедленным охлаждением при закалке
2	930	200	20 оС	Мартенсит, балл 4	58	55	Допустимый балл мартенсита
3	920	200	20 оС	Мартенсит, балл 4÷5	58,5	56,5	Классический мартенсит, крупноиглочатый, превышающий допустимый балл. Вызывается температурным перегревом стали
4	910	210	40 оС	Мартенсит, балл 3 преимущественно и местами троостит	59	57	Возникновение троостита связано с замедленным охлаждением при закалке, а наличие вторичных карбидов – с недостаточной при нагреве
5	910	195	20 оС	Мартенсит, балл 3	58	57	Допустимый балл мартенсита
6	900	220	20 оС	Мартенсит, балл 3÷4 и феррит (не более 10%)	59	57	Возникновение феррита связано с недогревом стали из-за недостаточной выдержки под закалку
7	890	267	20 оС	Мартенсит, балл 3÷4	58	56	Допустимый балл мартенсита
8	910	240	20 оС	Мартенсит,	58,5	56,5	Классический мартенсит, крупноигло-

				балл 4÷5			чатый, превышающий допустимый балл. Из-за длительной выдержки при нагреве стали под закалку
--	--	--	--	----------	--	--	---

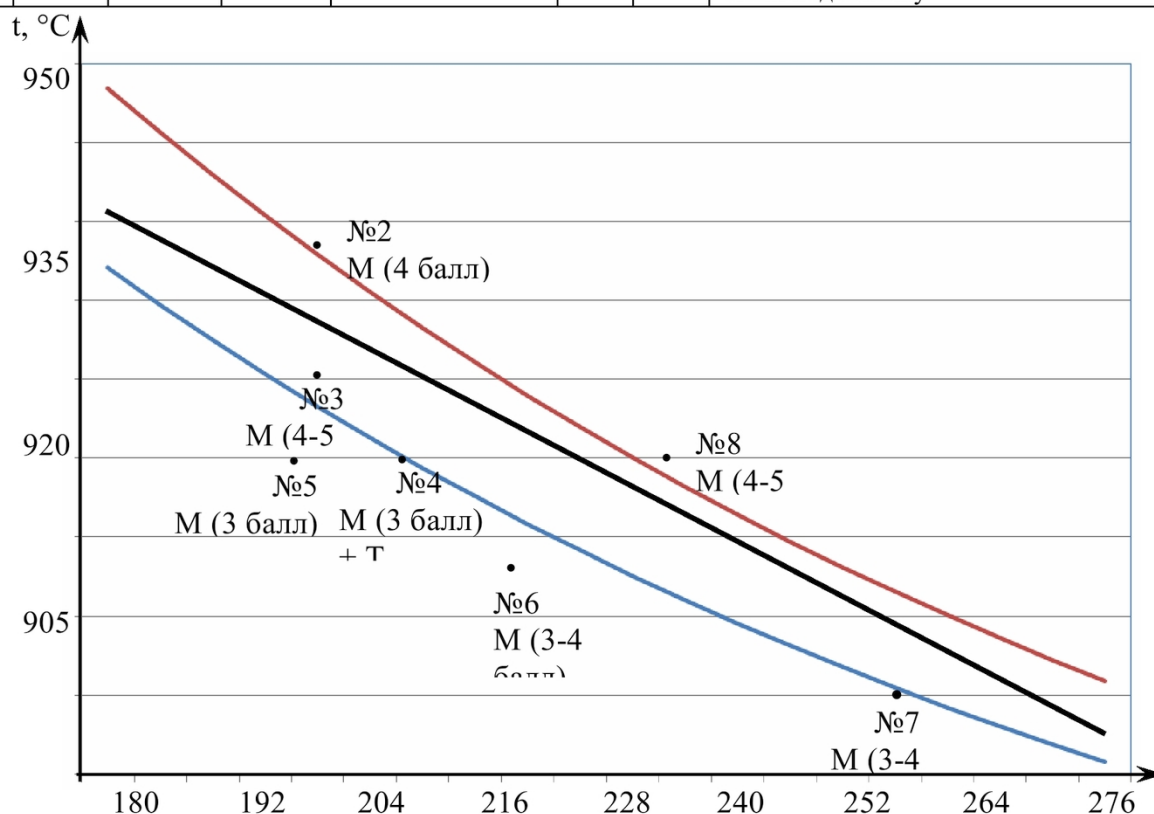


Рис. 2. Область оптимального режима закалки стали типа 50ХМЮА с формированием структуры мартенсита 3–4 балла, с твердостью

Подбор режима закалки осуществлялся комплексно. Варьировались все три параметра режима закалки: температура нагрева (t) находилась в интервале $890\div 940$ °С, время нагрева (τ) – в интервале от 195 с до 270 с, температура охлаждающего масла (T) – в интервале от 20 до 60 °С.

Оптимальная область режима закалки представлена на графике рис. 2 в виде пространства, где обеспечивается получение мартенситной структуры не выше 3–4 балла с твердостью не менее 58–59 HRC. Верхняя линия пространства характеризует собой максимальное соотношение температуры и времени прогрева, нижняя линия – отражает минимальное соотношение температуры и времени прогрева, а средняя линия представляет усредненное соотношение упомянутых параметров.

Представленные результаты актуальны для конкретного нагревательного оборудования, применяемого на предприятии, формы и размеров детали, но общим является методология выбора режимов термообработки, которые могут быть экстраполированы на другие случаи закалки. В этом контексте график рис. 2 имеет практическое значение. 58–59 HRC (здесь: М – мартенсит, Т – троостит, Ф – феррит)

Как видно из графика, формируемая микроструктура зависит от соотношения температуры и длительности нагрева под закалку, которые определяются скоростью нагрева деталей. Причем, чем выше температура, тем меньше должна быть длительность выдержки (сравните режимы №2 и №8). Слишком длительная выдержка приводит к перегреву стали (режимы №8) и к получению крупномартенситной структуры 5 балла (рис. 1, д). Недогрев при закалке так же опасен, так как в результате недостаточной выдержки при нагреве в структуре остается феррит (режим №6 на рис. 3, а), который наследуется в структуре закаленной стали (рис. 1, е). Таким образом, нагрев под закалку может находиться в довольно широком интервале температур ($890\div 930$ °С), но при этом следует корректировать длительность выдержки, которая должна составлять $210\div 195$ секунд, соответственно.

Для указанного интервала температур нагрева и времени выдержки, на основе метода наименьших квадратов, построена математическая модель зависимости балла зерна (N) от температуры (t , °С) и длительности выдержки (τ , с), с коэффициентом корреляции $R^2=0,74$:

$$N = -50,913 + 0,055t + 0,023\tau$$

Полученный результат может найти объяснение с точки зрения кинетики превращения перлита в аустенит ([11] ÷ [15]). Он проиллюстрирован диаграммой, представленной на рис. 3, а. При сравнении, например, режимов №7 и №8, видно,

что чем выше скорость нагрева ($v_8 > v_7$), тем выше температура окончания превращения перлита в аустенит и меньше длительность превращения ($\tau_8 < \tau_7$).

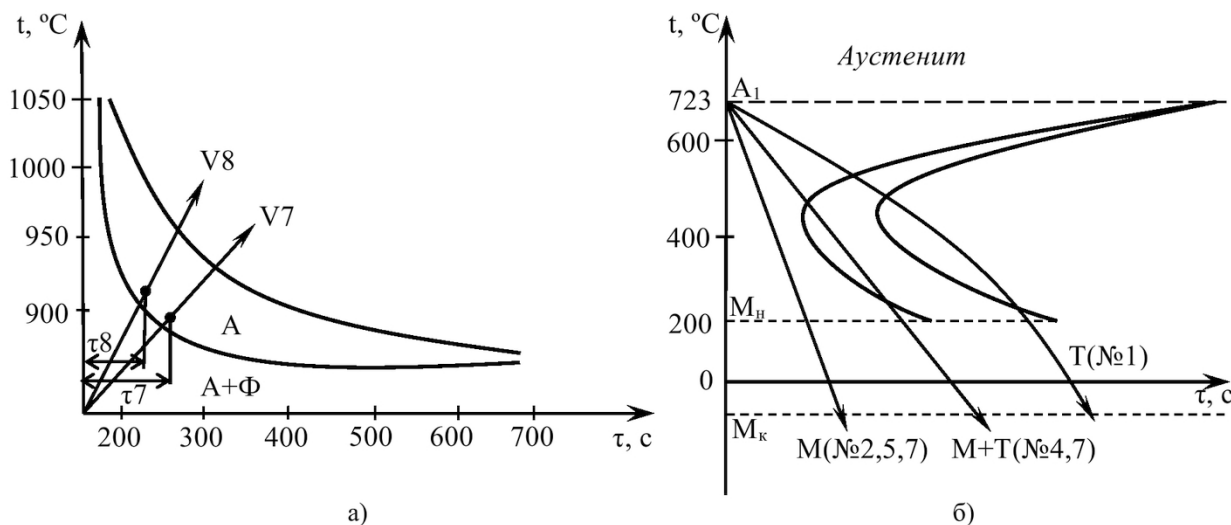


Рис. 3. Диаграммы изотермического превращения [11]:

- а) перлита в аустенит при нагреве;
б) аустенита при непрерывном охлаждении

На характер структурных превращений при закалке стали типа 50ХМЮА влияет температура охлаждающей среды. Это видно на примере диаграммы кинетики превращения аустенита при охлаждении с различными скоростями (рис. 3, б). Из диаграммы следует, что закалка в масло с температурой 20 °С обеспечивает достаточную скорость охлаждения для образования мартенситной структуры во всех исследованных случаях (см. табл. 1). Закалка в перегретом масле с температурой 40 °С (по режимам №4, 7) приводит к образованию троосто-мартенситной структуры (рис. 1, ж), а с температурой масла 60 °С (по режиму №1) – к трооститной структуре (рис. 1, з), что недопустимо.

Выводы

1. Разработан методологический подход по оптимизации режима термической обработки в случае использования нагревательного устройства с переменной скоростью нагрева по сечению печи, с учетом того, что нагревательное устройство не обеспечивает постоянство скорости нагрева детали.
2. В результате исследований сформулированы рекомендации по назначению режима закалки на примере стали типа 50ХМЮА, обеспечиваю-

щие высокие эксплуатационные свойства за счет получения микроструктуры мартенсита 3÷4 балла, с твердостью 58÷59 HRC, не менее:

- получена графическая интерпретация (рис. 2) и математическая модель оптимального соотношения между температурой и длительностью при нагреве под закалку;
- температура закалки может находиться в интервале 890÷930 °С, но при этом следует корректировать длительность выдержки, которая, для данной конструкции печи и размеров детали, должна находиться в интервале 210÷195 секунд, соответственно;
- для обеспечения образования мартенситной структуры в деталях необходимо следить за режимом охлаждения в процессе закалки, в частности, нельзя допускать перегрев масла выше 20 °С.

3. Параметры режима закалки (температура, время) в допустимом интервале значений могут быть обеспечены за счет подбора и изменения скорости передвижения образцов деталей в нагревательной печи.

4. Полученные результаты исследований могут послужить основой для автоматизации процесса закалки сложнолегированных сталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Короткова Л.П., Шатко Д.Б., Дубинкин Д.М. Контроль качества материалов (в машиностроительном производстве). – ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева». – Кемерово, 2011. – 171 с.
2. ГОСТ 8233–56. Сталь. Эталоны микроструктуры. – Введ. 1957–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 4 с.

3. ГОСТ 10243. Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры. Введ. 1978–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 41 с.
4. ГОСТ 9012–59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. – Введ. 1960–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 2007. – 39 с.
5. ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенных температурах. – Введ. 1979–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 11 с.
6. ГОСТ 1763–68. Сталь. Методы определения глубины обезуглероженного слоя. – Введ. 1971–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 21 с.
7. ГОСТ 1778–70. Методы контроля обезуглероженного слоя. – Введ. 1972–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1971. – 8 с.
8. ГОСТ 801–78. Сталь подшипниковая. Технические условия. – Введ. 1980–01–01. М. : Изд-во стандартов, 2004. – 23 с.
9. ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – Введ. 1983–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 25 с.
10. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 1986–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 2008. – 15 с.
11. Металлы и сплавы. Справочник. / под ред. Ю. П. Солнцева. – С.-Пб.: АНО НПО «Профессионал», АНО НПО «Мир и Семья», 2003. – 1066 с.
12. Зубченко, А. С. Марочник сталей и сплавов / под ред. А. С. Зубченко. – М. : Машиностроение, 2001. – 1066 с.
13. Гольдштейн М. И. Специальные стали : учеб. для вузов / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. – М. : Metallurgiya, 1985. – 408 с.
14. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов : учеб. для вузов. – М.: Metallurgiya, 1986. – 480 с.
15. Франценюк И. В. Альбом микроструктур чугуна, стали, цветных металлов и их сплавов. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2004. – 192 с.

REFERENCES

1. Korotkova L.P., Shatko D.B., Dubinkin D.M. Kontrol kachestva materialov (v mashinostroitelnom proizvodstve). – fgbou vpo «kuzbasskij gosudarstvennyj texnicheskij universitet im. t.f. gorbacheva». – Kemerovo, 2011. – 171 s.
2. Gost 8233–56. Stal. Etalony mikrostruktury. – Vved. 1957–07–01. – М. : Izd-vo standartov, 2004. – 4 s.
3. Gost 10243. Stal. Metody ispytaniy i ocenki makrostruktury. Vved. 1978–01–01. – М. : Izd-vo standartov, 1985. – 41 s.
4. Gost 9012–59. Metally. Metod izmereniya tverdosti po brinellyu. – Vved. 1960–01–01. – М. : Izd-vo standartov, 2007. – 39 s.
5. Gost 9454–78. Metally. Metod ispytaniya na udarnyj izgib pri ponizhennoy, komnatnoy i povyshennyh temperaturah. – Vved. 1979–01–01. – М. : Izd-vo standartov, 2002. – 11 s.
6. Gost 1763–68. Stal. Metody opredeleniya glubiny obezuglerozhennogo sloya. – Vved. 1971–01–01. – М. : Izd-vo standartov, 1987. – 21 s.
7. Gost 1778–70. Metody kontrolya obezuglerozhennogo sloya. – Vved. 1972–01–01. – М. : Izd-vo standartov, 1971. – 8 s.
8. Gost 801–78. Stal podshipnikovaya. Tehnicheskie usloviya. – Vved. 1980–01–01. М. : Izd-vo standartov, 2004. – 23 s.
9. Gost 5639–82. Stali i splavy. Metody vyyavleniya i opredeleniya velichiny zerna. – Vved. 1983–01–01. – М. : Izd-vo standartov, 2003. – 25 s.
10. Gost 1497–84. Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie. – Vved. 1986–01–01. – М. : Izd-vo standartov, 2008. – 15 s.
11. Metally i splavy. Spravochnik. / pod red. yu. p. solnceva. – S.-Pb.: ano npo «professional», ano npo «mir i semya», 2003. – 1066 s.
12. Zubchenko, A. S. Marochnik staley i splavov / pod red. A. S. Zubchenko. – М. : Mashinostroenie, 2001. – 1066 s.
13. Goldshteyn M. I. Specialnye stali : ucheb. dlya vuzov / M. I. Goldshteyn, S. V. Grachev, YU. G. Veksler. – М. : Metallurgiya, 1985. – 408 s.
14. Novikov I. I. Teoriya termicheskoy obrabotki metallov : ucheb. dlya vuzov. – М.: Metallurgiya, 1986. – 480 s.
15. Francenyuk I. V. Albom mikrostruktur chuguna, stali, cvetnyh metallov i ih splavov. – М. : IKC «Akademkniga», 2004. – 192 s.

Поступило в редакцию 26.01.2017
Received 26.01.2017

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

МЕТОД ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ УЗЛОВ В МНОГОЭТАЖНЫХ СТАЛЬНЫХ КАРКАСАХ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

PRESTRESSING METHOD OF RIGID JOINTS IN MULTI-STORIED STEEL FRAMES AT MINING OPERATIONS

Вершинин Дмитрий Сергеевич¹,
e-mail: dimavershinin1@mail.ru

Vershinin Dmitry S.¹

Добрачев Валерий Михайлович²,
e-mail: mdk@sibstrin.ru

Dobrachev Valery M.²

¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Весенняя 28

²Новосибирский государственный архитектурно – строительный университет (Сибстрин), г. Новосибирск, Ленинградская 113

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

²Novosibirsk State University of Architecture and Construction (Sibstrin) Novosibirsk, Russian Federation

Аннотация. В данной статье представлен краткий обзор существующих решений жестких узлов сопряжения ригеля с колонной стальных каркасов многоэтажных зданий, анализируются достоинства и недостатки существующих решений жестких узлов сопряжения ригеля с колонной; на основе выполненного анализа предлагается новое конструктивное решение жесткого узла сопряжения ригеля с колонной с использованием высокопрочной затяжки и предварительного напряжения околоопорной зоны ригеля. Высокопрочная затяжка с предварительным напряжением создает в ригеле противоположные моменты в опорной и пролетной зонах ригеля, а также участвует в передаче опорного момента с ригеля на колонну. В работе произведено сравнение металлоемкости стального каркаса, содержащего различные узлы сопряжения ригеля с колонной, обозначена область применения нового конструктивного решения узла, а также показано, что в результате применения высокопрочной затяжки можно достичь уменьшения поперечного сечения ригеля и снижения расхода металла на каркас здания.

Abstract. The paper presents a brief overview of the existing solutions for connecting the rigid joints with the steel frame columns in multi-storied buildings. The advantages and disadvantages of the existing designs of rigid connection are analyzed. On the basis of the analysis performed a new structural design of beam to column connection with the use of the high-strength beam and pre-stressing of the near-support girder segment is suggested. A high-strength tie with pre-stressing creates in a girder opposite torques in the step and span girder zones and is also involved in transfer of the support moment from girder to the column. The paper presents the comparison of the metal consumption for a steel frame containing different longitudinal beam to column joints, the area of application of the new joint structural design has been specified; it was also shown that as the result of using the high-strength tie one may reduce the beam cross-section and reduce the metal consumption per a building frame.

Ключевые слова: новое конструктивное решение; жесткий узел; высокопрочная затяжка; предварительное напряжение; фланцевый узел.

Keywords: new structural design, rigid joint, high-strength tie, pre-stressing, flange unit.

Введение

В связи с широким распространением рамных систем в многоэтажных каркасных зданиях, снижение расхода стали в таких системах является актуальной задачей. Опыт строительства и проектирования позволил разработать целый ряд типовых конструктивных решений узловых сопряжений ригель-колонна [1, 2], применяемых в настоящее время в стальных каркасах зданий.

По степени защемления все узлы сопряжения балки с колонной можно разделить на шарнирные, жесткие и полужесткие [3]. Граница между шарнирными и жесткими узлами с полужесткими довольно условна. Объясняется это тем, что в большинстве случаев при шарнирном сопряжении имеется некоторое защемление ригеля в узле сопряжения с колонной, а при жестком сопряжении – некоторая податливость. Исследованию работы

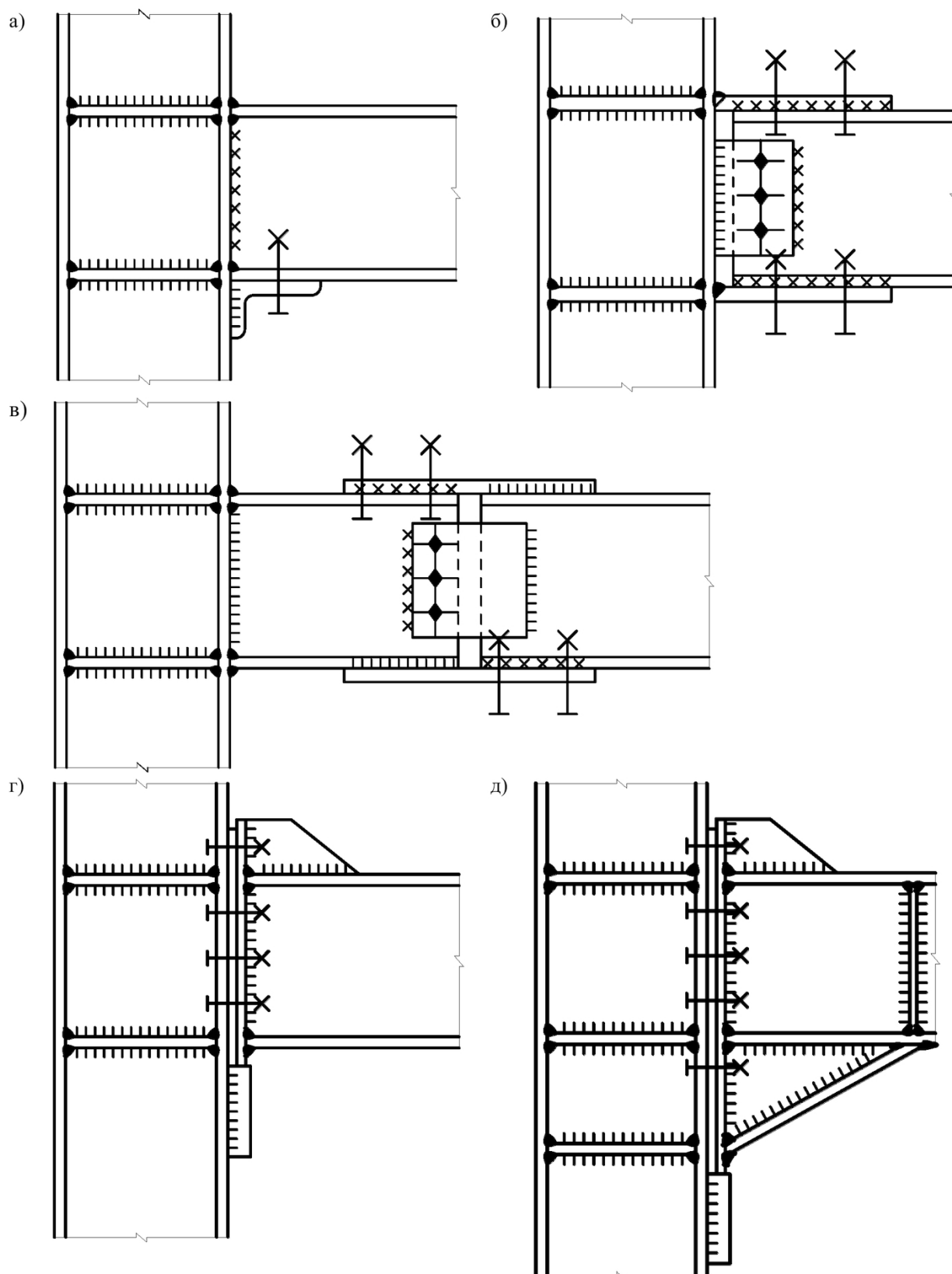


Рис. 1. Конструкции жестких узлов

а) приваренный впритык ригель, б) узел на накладках, в) выносной стык, г) фланцевый узел, д) усиление вутом

стальных каркасов зданий с учетом реальной изгибной жесткости узлов сопряжения ригеля с колонной посвящены работы [3- 7].

В Российских нормах проектирования [8, 9] отсутствует классификация узлов в зависимости от степени заземления ригеля в колонне. При

этом в узлах соединения ригелей с колоннами в стальных каркасах допускается применение стальных накладок работающих в пластической стадии для перераспределения изгибающих моментов³ (п. 14.4). В зарубежных нормах узлы в зависимости от степени защемления ригеля в колонне делятся на простые (шарнирные), жесткие и полужесткие [10]. В зарубежных нормах для классификации узлов по жесткости допускается использовать два критерия: по вращательной жесткости узла, которая определяется по изгибной жесткости его компонентов; по результатам экспериментальных данных, на основе опыта предыдущей удовлетворительной эксплуатации и по результатам расчета на основе результатов испытаний.

На рис. 1. представлены некоторые наиболее широко применяемые типы жестких узлов. Предлагаемое конструктивное решение узла сопряжения ригеля с крайней колонной [13] показано на рис. 2, вариант конструктивного решения для средней колонны [14] показан на рис. 3.

Целью настоящего этапа исследования является обоснование эффективности и целесообраз-

ности применения предлагаемого конструктивного решения узлов сопряжения ригелей с колоннами с предварительным напряжением. Для достижения цели в настоящей работе поставлены следующие задачи: 1. Выявить особенности распределения внутренних усилий в рамных системах с предлагаемым способом предварительного напряжения узлов; 2. Выработать укрупненный критерий для определения области рационального применения предлагаемого способа предварительного напряжения. 3. Выполнить опытное проектирование двухпролетной пятиэтажной рамы с жестким фланцевым узлом сопряжения ригеля и колонны, с узлом на накладках и с предлагаемым конструктивным решением узла. Итерационным методом определить оптимальные параметры затяжки (диаметр, длина, марка стали и усилие предварительного напряжения). 4. На основании опытного проектирования, выполнить сравнение металлоемкости стального каркаса, содержащего различные узлы сопряжения ригеля с колонной; 5. Обозначить область рационального применения предлагаемых узлов с предварительным напряжением.

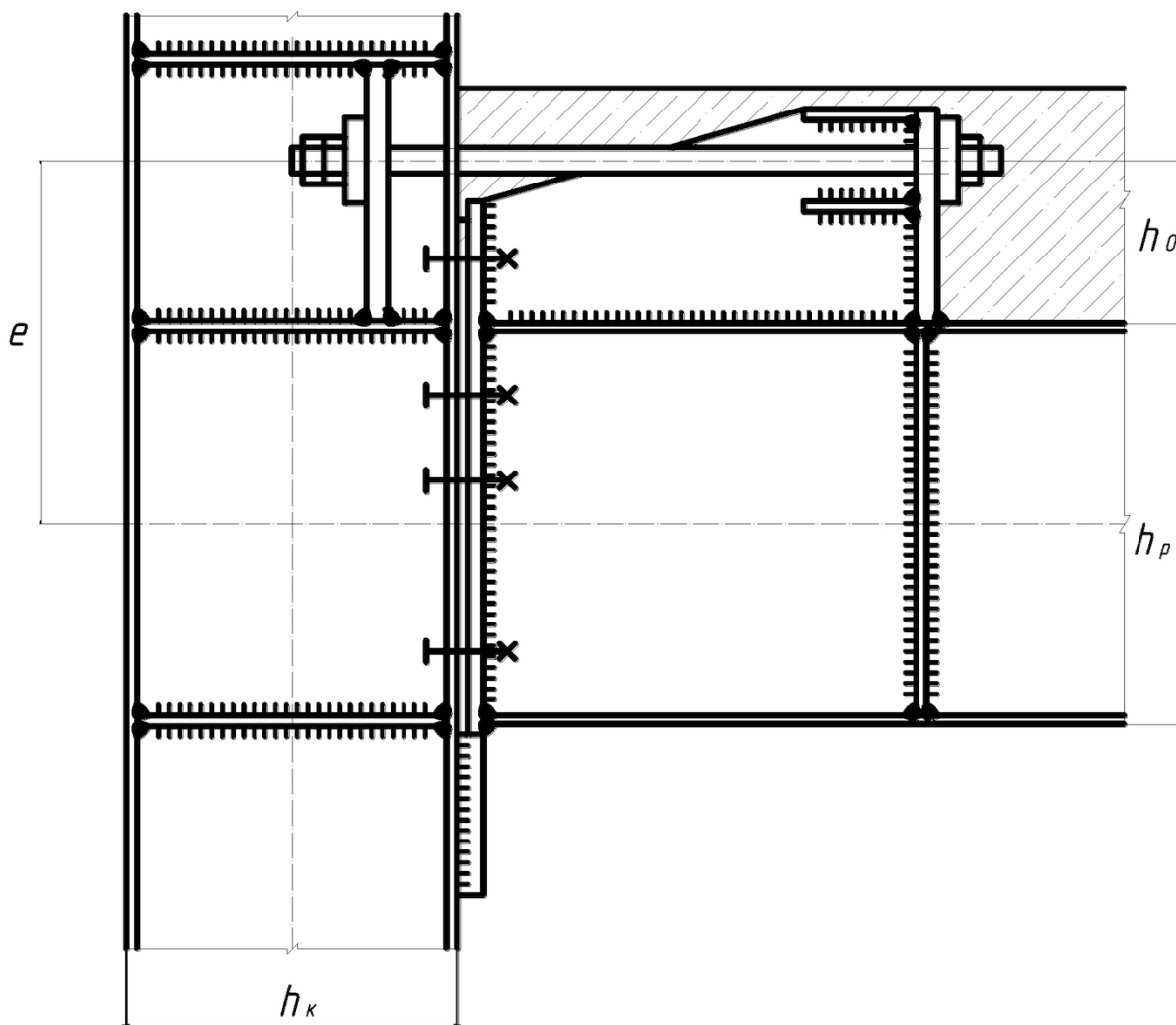


Рис. 2. Новое конструктивное решение рамного узла

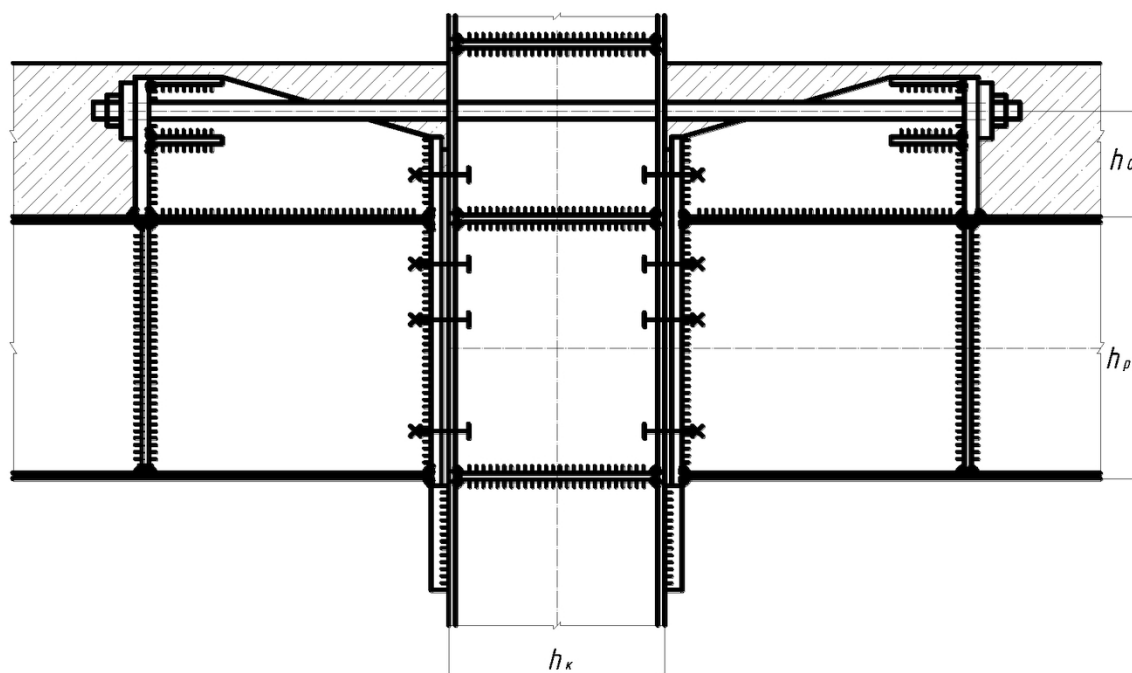


Рис. 3. Вариант решения узла при опирании ригелей на среднюю колонну

Объект исследования

Целью нового конструктивного решения [13, 14] является повышение несущей способности жесткого фланцевого узла сопряжения ригеля с колонной. При этом используется высокопрочная затяжка, состоящая, как правило, из двух стержней, с предварительным натяжением. Высокопрочная затяжка располагается в опорной зоне ригеля со стороны верхнего пояса с эксцентриситетом $e = h_0 + h_p/2$ относительно оси ригеля. Одним концом затяжка крепится к вертикальной пластине, приваренной к горизонтальным ребрам жесткости колонны, либо к полке колонны. Другим концом затяжка крепится к упору, расположенному на верхнем поясе балке. Предварительное натяжение затяжки производится гайкой с контролем усилия натяжения. В узле опирания ригеля на среднюю колонну затяжка проходит через отверстия в полках колонны и крепится к упорам, расположенных на верхних поясах ригелей.

Высокопрочная затяжка с предварительным натяжением совместно с фланцевым соединением участвует в передаче доли изгибающего момента с ригеля на колонну. Кроме этого в результате предварительного напряжения, создает противоположный по знаку момент в опорной и пролетной зонах балки, что ведет к более благоприятному распределению усилий в ригеле. Использование высокопрочной затяжки приводит к уменьшению требуемой высоты ригеля перекрытия и снижению расхода стали на каркас здания. Например, при $h_p = 0,4$ м, $h_0 = 0,1$ м и усилия предварительного напряжения $N^{п.н.} = 0,19$ МН, момент предварительного напряжения $M^{п.н.} = 6$ тсм, для

указанного усилия предварительного напряжения может быть применена затяжка, состоящая из одного стержня диаметром 18 мм из стали 40Х или затяжка, состоящая из двух стержней диаметром 14 мм из стали 40Х.

Материалы и методы

Для определения напряженно-деформированного состояния рамных систем с предлагаемым способом предварительного напряжения был использован метод конечных элементов, реализованный в программных комплексах Robot и Ansys.

На простейшем примере однопролетной одноэтажной рамы показано влияние предварительного напряжения затяжки в жестком узле на распределение внутренних усилий в элементах рамы. Для выявления особенностей распределения усилий была выполнена серия статических расчетов рамы с варьированием соотношения погонных жесткостей ригеля и колонны $0.1 \leq k \leq 10$, где $k = i_p/i_k = I_p H/I_k L$. Эти соотношения приняты как наиболее распространенные для одноэтажных однопролетных рам.

Авторами произведен расчетный конечно-элементный анализ влияния предварительного напряжения на распределение усилий в однопролетных, двухпролетных и трехпролетных одноэтажных и многоэтажных рамах. Для указанных рам получена зависимость отношения опорного и пролетного момента в ригеле $M_{оп}/M_{пр}$ от соотношения погонных жесткостей k , которая сравнивалась со справочными данными [12]. Установлено, что расхождение результатов не превышает 3%.

Результаты и обсуждения

Анализируя характер распределения внутренних усилий в рассматриваемой одноэтажной однопролетной раме можно отметить следующее. Для однопролетной одноэтажной рамы $M_{оп}/M_{пр} = 4/(3k + 2)$, где $k = i_p/i_k$ – соотношение погонных жесткостей ригеля и колонны. При $k > 0,67$ опорный момент становится меньше пролетного.

Опорный и пролетный моменты в ригеле от предварительного напряжения противоположны по знаку соответствующим моментам в ригеле от вертикального нагружения. Предварительное напряжение уменьшает значения опорного и пролетного расчетных моментов в ригеле, а также уменьшает разницу между ними. Соотношение опорного и пролетного моментов от предварительного напряжения зависит от соотношения погонных жесткостей ригеля и колонны k и лежит в диапазоне от $M_{оп}^{п.н.}/M_{пр}^{п.н.} = 2,1$ при $k = 0,1$ до $M_{оп}^{п.н.}/M_{пр}^{п.н.} = 8,1$ при $k = 10$. В типовых решениях таких рам соотношение погонных жесткостей находится в интервале $0,7 < k < 1,5$ [11], соотношение моментов для этого интервала $3,1 < M_{оп}^{п.н.}/M_{пр}^{п.н.} < 4,3$, т.е. опорный момент всегда больше пролетного.

Использование предварительного напряжения существенно увеличивает поперечную силу в колонне на участке между ригелем и затяжкой (на величину усилия предварительного напряжения в затяжке), а также увеличивает изгибающий момент в колонне.

На основании результатов рассмотренного примера, а также анализируя соотношения погонных жесткостей типовых решений по серии «Канск» [11] можно сделать вывод, что использование предлагаемого способа предварительного напряжения в конструкциях одноэтажных однопролетных зданий имеет ограниченное применение. Объясняется это тем, что в большинстве случаев соотношение погонных жесткостей в таких рамах $k > 0,67$ и $M_{оп} < M_{пр}$, $M_{оп}^{п.н.} > M_{пр}^{п.н.}$, при таких соотношениях предлагаемый способ предварительного напряжения не приводит к выравниванию расчетных опорного и пролетного моментов в ригеле. Исключения составляют относительно низкие рамы с большим пролетом (высотой 4,8 м и пролетами 18, 24 м). В таких рамах возникает также проблема конструктивного оформления кровли при размещении затяжки.

В реальных каркасах однопролетных многоэтажных рам соотношение погонных жесткостей лежит в интервале $0,1 < k < 0,5$. Указанному диапазону k соответствует диапазон соотношения опорного и пролетного моментов в ригеле от вертикального нагружения $1,8 < M_{оп}/M_{пр} < 2,0$ и диапазон соотношения моментов в ригеле от предварительного напряжения $2,0 < M_{оп}^{п.н.}/M_{пр}^{п.н.} < 3,0$. Поэтому применение предлагаемого способа предварительного напряжения в таких рамах целесообразно,

т.к. позволяет уменьшить опорный и пролетный расчетные моменты в ригеле, а также разницу между ними.

В многопролетных рамах отношение опорного и пролетного моментов в ригеле у средней колонны $M_{оп}^{ср.}/M_{пр} > 1,5$ при $0,125 < k < 8$, а отношение опорного и пролетного моментов в ригеле у крайней колонны $M_{оп}^{кр.}/M_{пр} > 1,2$ при $k < 0,5$. В реальных каркасах $0,1 < k < 0,5$. Этот факт делает целесообразным применение предлагаемого способа предварительного напряжения во всем диапазоне соотношения погонных жесткостей.

С увеличением высоты здания увеличивается опорный момент в ригеле от горизонтальных нагрузок. При этом, опорный момент от горизонтального нагружения имеет разные знаки на концах ригеля, что ограничивает область применения предлагаемого способа предварительного напряжения в высотных зданиях, где момент от горизонтальных нагрузок сопоставим с моментом от вертикальных нагрузок. Например, для однопролетной 15-этажной рамы пролетом 6 м и высотой этажа 3,6 м при вертикальной нагрузке 9,81 кПа и первом ветровом районе опорный момент в ригеле второго этажа от вертикальной нагрузки составляет 0,17 МНм, от ветровой – $\pm 0,17$ МНм. Чем выше расположен этаж, тем меньше опорный момент в ригеле от горизонтальных нагрузок. С увеличением числа пролетов здания опорный момент в ригеле от горизонтальных нагрузок уменьшается. Для аналогичной двухпролетной рамы опорный момент в ригеле от ветровой нагрузки становится меньше приблизительно в 2 раза. Поэтому применение предлагаемого способа предварительного напряжения целесообразно в однопролетных многоэтажных зданиях высотой до 15 этажей, двухпролетных многоэтажных зданиях – до 25 – 30 этажей, при числе пролетов от трех и более – до 50 этажей. В более высоких зданиях предлагаемый способ предварительного напряжения целесообразно применять только на верхних ярусах.

При применении предварительного напряжения материал ригеля (при его постоянном сечении) будет использоваться с максимальной эффективностью в случае равенства опорного и пролетного моментов от расчетной комбинации усилий. Учитывая, что вклад усилий от горизонтальных нагрузок в расчетное сочетание для зданий с высотой до 30 м невелик, а также при постоянной высоте ригеля, условие при котором материал ригеля постоянного сечения используется с максимальной эффективностью можно представить в виде:

$$\frac{M_{оп} + M_{оп}^{п.н.}}{M_{пр} + M_{пр}^{п.н.}} = 1 \quad (1)$$

где $M_{оп}$, $M_{пр}$ – опорный и пролетный моменты ригеля от нагружения вертикальной нагрузкой;

$M_{оп}^{п.н.}$, $M_{пр}^{п.н.}$ – опорный и пролетный моменты ригеля от предварительного напряжения.

Опорный и пролетный моменты от вертикаль-