

УДК 621.771.28

С.Р. Рахманов*Национальная металлургическая академия Украины (Днепропетровск)***В.Т. Вышинский, С.М. Крышин***ООО «НПФ Восток Плюс» (Днепропетровск)***В.В. Поворотный***Национальная металлургическая академия Украины (Днепропетровск)*

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАНИН РАБОЧЕЙ КЛЕТКИ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПИЛЬГЕРНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

Приведены результаты комплексных исследований напряженно-деформированного состояния станин рабочих клеток станков холодной пильгерной прокатки труб (ХПТ) конструкций ОАО «Электростальский завод тяжелого машиностроения» и ООО «НПФ Восток Плюс». Обосновано использование в технологической линии стана ХПТ станины рабочей клетки рациональной конструкции. Предложена методика оптимизации геометрических параметров образующей стоек станины рабочей клетки рациональной конструкции. Анализ результатов исследования показал, что для достижения равномерности нагружения элементов станины необходимо выполнение продольной перемычки, связывающей внутреннюю и наружную оболочки конструкции переменной толщины. Полученные результаты использованы в расчетах при разработке конструкции станины для стана ХПТ 32. Эксплуатация конструкции рациональной рабочей клетки на станах ХПТ 32 в промышленных условиях в режиме, характеризуемом, в основном, жесткими условиями прокатки труднодеформируемых сталей и специальных сплавов, подтверждает ее значительную прочность, повышенную жесткость и высокую эффективность в работе. Установлено, что достигнуто расширение технологических возможностей станков ХПТ и увеличение их производительности.

Ключевые слова: *холодная прокатка труб, стан, рабочая клетка, валок, станина, образующая, перемычка, подушка, масса, труба, жесткость, деформация, напряжения, запас прочности.*

В настоящее время в отраслях отечественной трубной промышленности сложилась жесткая экономическая ситуация, что обуславливает необходимость в более рациональном подходе к вопросу повышения качества холоднокатаных труб и высокой надёжности основного технологического оборудования, на котором эта продукция изготавливается. В данных условиях особое внимание стоит уделить инновационным технологиям холодной пильгерной прокатки и вопросам комплексной модернизации отечественных станков холодной прокатки труб (ХПТ).

Одним из базовых элементов станков ХПТ является рабочая клетка, совершенствование конструкции которой влияет не только на основные показатели качества продукции, но и приводит к повышению эксплуатационной надёжности работы клетки, а, как следствие, и функционирования стана ХПТ в целом. Наиболее трудоемкими в изготовлении и часто выходящими из строя узлами являются станина рабочей клетки и установка валков станков ХПТ [1-3].

Отметим, что рабочие клетки конструкции

ОАО «Электростальский завод тяжелого машиностроения» (ЭЗТМ) получили широкое применение ещё в 60-х годах прошлого века. Данная конструкция рабочей клетки до сих пор производится изготовителями станков ХПТ и работает на большинстве металлургических предприятий Украины. Однако, учитывая тяжелые условия работы и высокие технологические нагрузки, в местах концентрации напряжений станины образуются характерные трещины, которые с течением времени развиваются, что в конечном итоге приводит к разрушению самой станины [4,5].

Целью данной работы является раскрытие скрытых возможностей и совершенствование конструкции станины стана ХПТ 32 комплексным исследованием ее напряженно-деформированного состояния (НДС). Разработка практических мероприятий по модернизации станины рабочей клетки стана ХПТ.

С учетом вышеизложенных условий, ниже приведено детальное исследование НДС несущих элементов станины рабочей клетки стана ХПТ 32 двух различных конструкций – ЭЗТМ и

ООО «НПФ Восток Плюс» [6].

С помощью программного комплекса SolidWorks Simulation [7] выполнено комплексное трёхмерное моделирование конструкций станин методом конечных элементов (МКЭ), что позволяет корректировать и уточнять геометрические параметры конструкции образующей стоек станины и в целом добиться оптимизации компоновки элементов станины для стана ХПТ 32 в активном режиме.

В данной постановке конструкторами ООО «НПФ Восток Плюс» была предложена схема модернизации и доработана исходная техническая документация (оптимизация геометрии) станины рабочей клетки стана ХПТ 32, изготовленная по аналогии с опытно промышленными образцами станин конструкции, согласно работы [8].

На рис. 1-3 представлены результаты комплексных исследований и сравнительный анализ НДС рассматриваемых станин. Данные исследования выполнены в масштабе один к одному согласно существующей и разработанной проектно-технической документации [9]. При этом на элементы станин были наложены соответствующие ограничения, максимально близкие к

реальным условиям их эксплуатации и приложена принятая технологическая нагрузка в размере 0,5 МН [4,6].

Комплексные исследования НДС показали, что станина конструкции ООО «НПФ Восток Плюс» превосходит станину конструкции ЭЗТМ по большинству базовых параметров. При одинаковых габаритах и близких массах, напряжения, возникающие в станине рациональной конструкции, в 3,5 раза ниже, чем в станине конструкции ЭЗТМ. Что касается коэффициентов запаса прочности, то на рис. 3 показана картина с участками, где он ниже определенных значений. Так, например, соответственно на рис. 3а выделены участки, где коэффициент запаса прочности станины ниже 15, а на рис. 3б указаны зоны, где он ниже 10. Опыт эксплуатации рабочей клетки конструкции ЭЗТМ свидетельствует, что, как правило, в этом же месте и происходит разрушение самой станины. Отметим, что перемещения, а соответственно и жесткость станин тоже отличаются в 2,3 раза.

Численные результаты и сравнительные характеристики основных показателей исследования НДС станин рабочей клетки стана ХПТ 32 конструкций ЭЗТМ и ООО «НПФ «Восток-

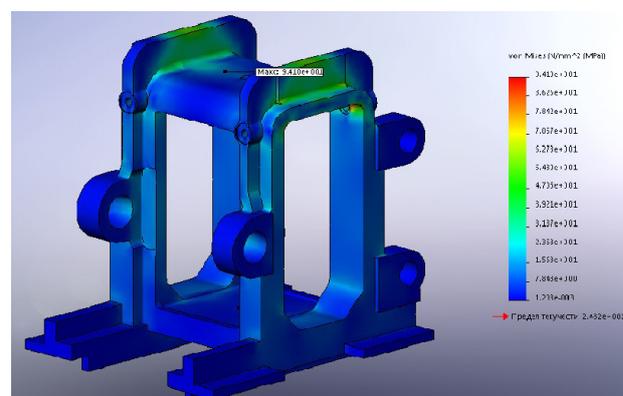
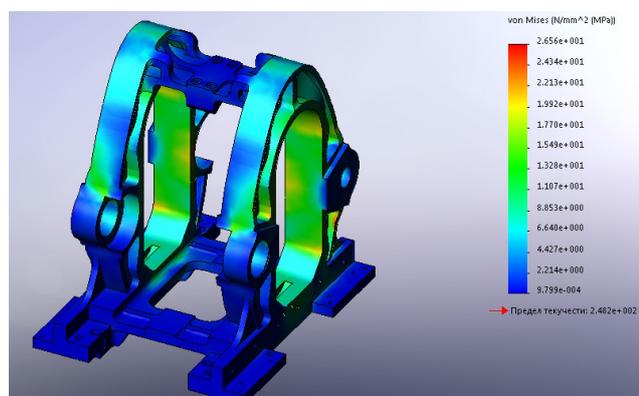


Рис. 1. НДС (картины напряжений) станин рабочей клетки стана ХПТ 32 рациональной формы конструкции ООО «НПФ Восток Плюс» (слева) и конструкции ЭЗТМ (справа)

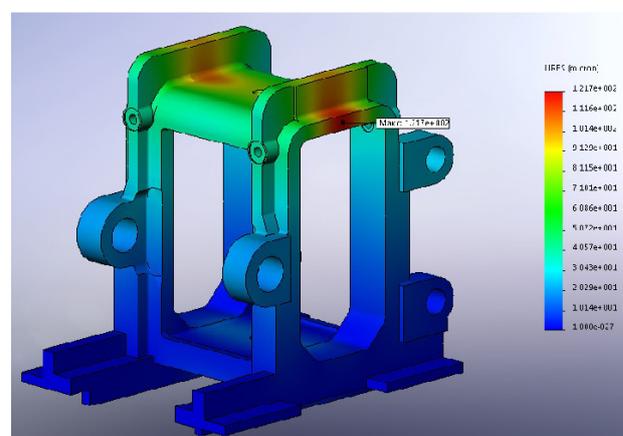
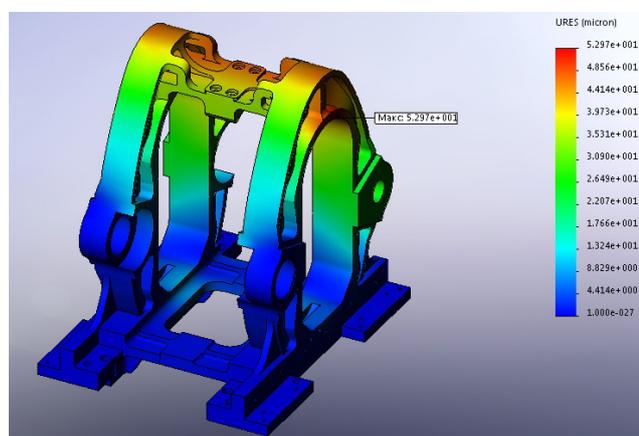


Рис. 2. НДС (картины перемещений) станин рабочей клетки стана ХПТ 32 рациональной формы конструкции ООО «НПФ Восток Плюс» (слева) и конструкции ЭЗТМ (справа)

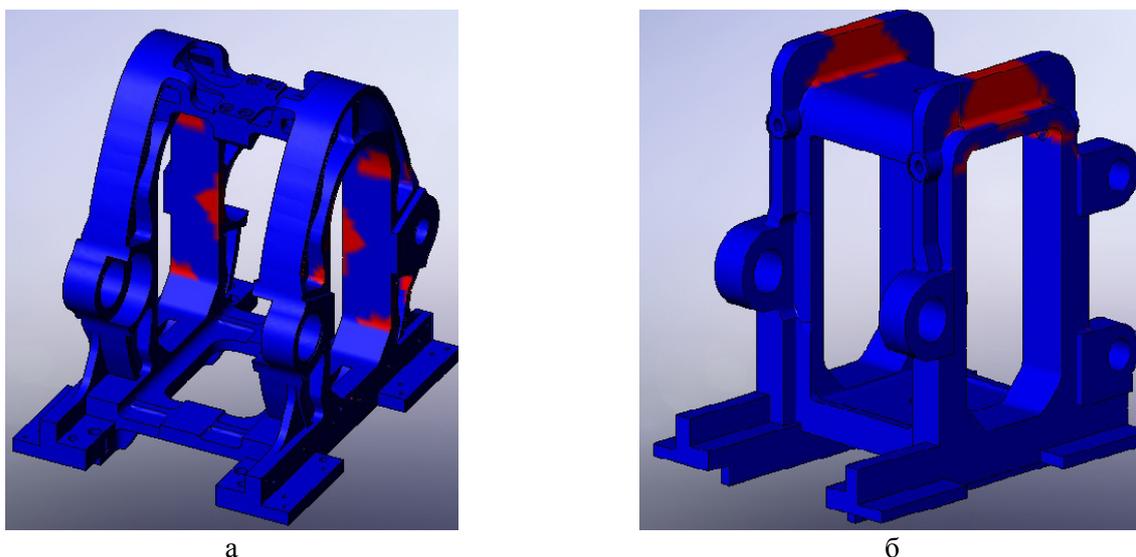


Рис. 3. НДС (картины запаса прочности) станин рабочей клетки стана ХПТ 32:
 а – станина рациональной формы конструкции ООО «НПФ Восток Плюс»;
 б – станина конструкции ЭЗТМ

Табл. 1. Результаты исследования НДС станин рабочей клетки стана ХПТ 32

№ п.п.	Тип станины	Технологическая нагрузка, кН	Максимальные напряжения, МПа	Максимальные деформации, мм	Коэффициент запаса прочности
1	ООО «НПФ Восток Плюс»	500	26,5	0,053	15
2	ЭЗТМ	500	105,3	0,121	8

Плюс» приведены в табл. 1.

Анализ НДС станин рабочей клетки показали, что напряжения и перемещения станины конструкции ЭЗТМ, в частности, определяются рабочими положениями клина нажимного устройства установки валков и имеют разные значения.

Рабочая клетка стана ХПТ 32 конструкции ООО «НПФ Восток Плюс» оснащена нажимным устройством [9], которое кардинально отличается от нажимного устройства станины конструкции ЭЗТМ. Благодаря оптимизации конструкции нажимного устройства, установленного в проемах стоек станины перпендикулярно оси прокатки, клинья имеют постоянные перемещения вне зависимости от их положения, что обеспечивает постоянный контакт вставок по дуге со стойками станины в вертикальной плоскости.

Далее были выполнены исследования напряжений и перемещений стоек станины рабочей клетки конструкции ЭЗТМ с учетом дискретных положений клина нажимного устройства (рис. 4).

Как известно, длина прямолинейного участка стойки станины, контактирующего с клином нажимного устройства, равна 290 мм, а рабочая часть клина составляет 100 мм. Следовательно, свободный ход клина от крайнего правого до крайнего левого положения по ходу процесса прокатки трубы составляет 190 мм. Для оценки дискретных значений напряжений и деформаций

станины стана ХПТ 32 рабочий ход клина нажимного устройства был разделен на 5 равных положений (рис. 4б).

Тогда для каждого выбранного положения клина определяем максимальные напряжения в рассматриваемом сечении станины и перемещения верхней части станины методом МКЭ с применением программного комплекса SolidWorks Simulation [7]. Результаты исследования представлены в табл. 2.

Опираясь на данные табл. 2, построены соответствующие зависимости максимальных напряжений в выбранных сечениях станины и перемещений верхней части рамы станины с учетом положения клина нажимного устройства (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что при разных положениях клина максимальные напряжения и деформация клетки имеют различные показатели. Полученное означает, что при различных рабочих положениях клина изменяются показатели жесткости (деформации) станины, что, в свою очередь, влияет на качество выпускаемой продукции.

Проанализируем некоторые результаты экспериментальных исследований влияния жесткости рациональной рабочей клетки и параметров нового нажимного устройства установки валков стана ХПТ 32 на точность прокатываемых труб.

Для проведения комплексных исследований

выбраны соответственно наиболее загруженные станы ХПТ 32 двух предприятий ООО «Титан Украина» и ООО «ПО «ОСКАР», оснащенные рабочей клетью повышенной жесткости с новым нажимным устройством.

Было прокатано два пакета труб. Первый из титанового сплава Ti-3Al-2.5V по маршруту 16×1,7→10×1,05 (далее пакет №1). Второй из сплава Gr2 по маршруту 25×2,8→18×1,5 (далее пакет №2). В первом пакете из 25 труб-заготовок выкатано 65 труб готового размера. Во втором пакете из 27 труб-заготовок выкатано 72 трубы. Прокатка велась в калибрах с исходной развалкой 60°.

До и после прокатки трубы подвергались диагностике на установках ультразвукового контроля, в ходе которой, среди прочих параметров,

были произведены замеры поперечной разностенности труб во всех сечениях вдоль каждой трубы.

На рис. 6 показаны полигоны параметров распределения частот поперечной разностенности первого, а на рис. 7 – второго пакетов.

Результаты прокатки труб первого пакета (сплав Ti-3Al-2.5V, маршрут 16×1,7→10×1,05), представленные ООО «Титан Украина», показали, что максимальное значение поперечной разностенности в абсолютных единицах уменьшилось с 0,2 до 0,15 мм, т.е. станом раскатано 25 % максимальной абсолютной разностенности. С другой стороны, максимальная относительная разностенность увеличилась с 11,8 до 13,2 %. Тот же процесс наблюдается и со значениями минимальной поперечной разностенности: абсо-

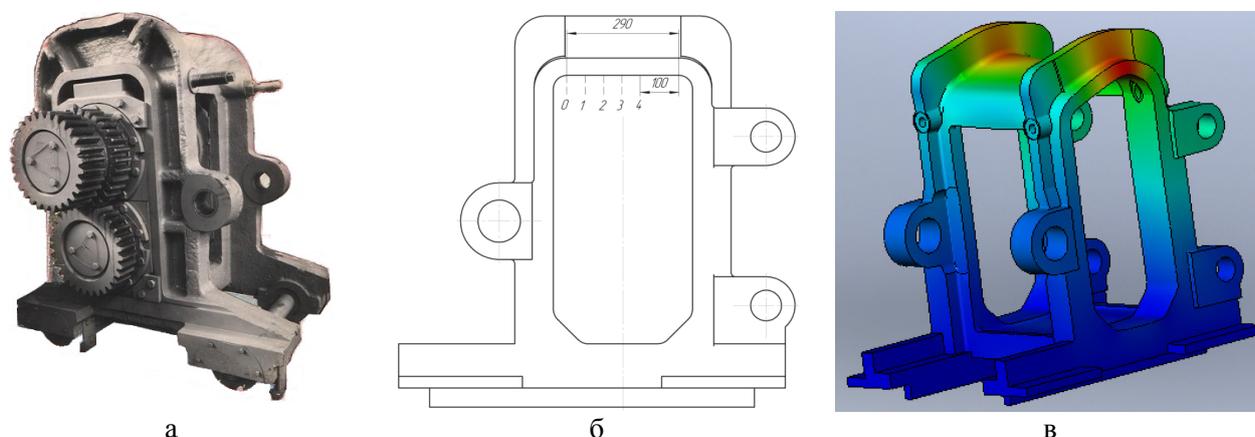


Рис. 4. Рабочая клеть стана ХПТ 32 конструкции ЭЗТМ (а), схема к расчёту деформаций верхней поперечины станины с учетом положений клина нажимного устройства (б) и НДС клетки (в)

Табл. 2. Максимальные напряжения в станине и перемещения верхней части рамы в зависимости от положения клина нажимного устройства стана ХПТ 32

№ п.п.	Параметры расчета	Положения клина нажимного устройства (рис. 4б)				
		0	1	2	3	4
1	Сечение					
2	Напряжение	105,3	100,5	98	95,8	101,4
3	Перемещение	104	115	121	119	109
		76,7	86,3	90,4	87,6	79
		35,4	47,5	55,7	44,4	33

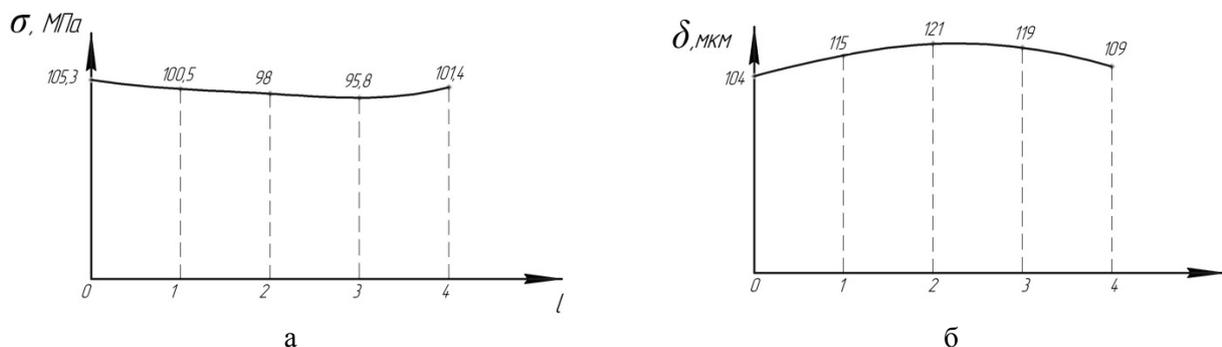


Рис. 5. Максимальные напряжения (а) и перемещения (б) в выбранных сечениях станины рабочей клетки стана ХПТ 32 конструкции ЭЗТМ с учетом положений клина нажимного устройства

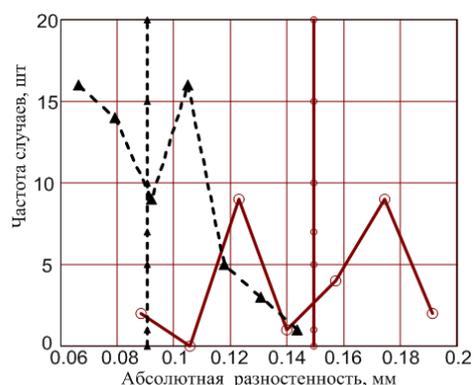
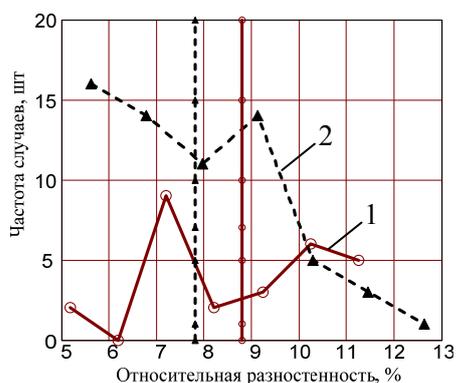


Рис. 6. Полигоны поперечной разностенности труб из сплава Ti-3Al-2.5V, прокатанных на стане ХПТ 32 с клетью повышенной жесткости и новым нажимным устройством по маршруту 16×1,7→10×1,05 (пакет №1 ООО «Титан Украина») 1 – труба-заготовка; 2 – готовая труба

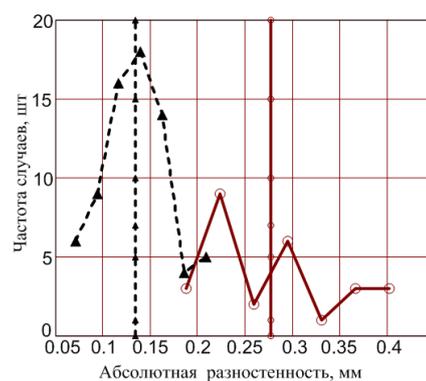
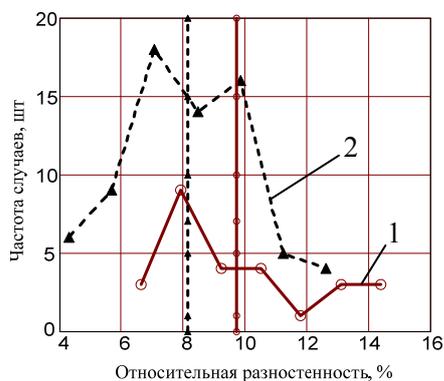


Рис. 7. Полигоны поперечной разностенности труб из сплава Gr2, прокатанных на стане ХПТ 32 с клетью повышенной жесткости и новым нажимным устройством по маршруту 25×2,8→18×1,5 (пакет №2 ООО «ПО «ОСКАР»): 1 – труба-заготовка; 2 – готовая труба

лютная уменьшилась с 0,08 до 0,06 мм (-25 % в абсолютных единицах); относительная увеличилась с 4,7 до 5,1 %. Эти данные корреспондируются с выводами, указанными в работе [6]. Отметим, что чем меньше толщина стенки, тем сложнее уменьшить относительную разностенность труб.

Практика показывает, что для каждой толщины стенки трубы существует определенная граница значений уменьшения абсолютной разностенности – ниже ее относительная разностенность растет, а выше – падает. Безусловно, данные факты являются задачей для отдельного детального теоретического исследования.

Несмотря на вышесказанное, уменьшение абсолютных значений средней разностенности с 0,15 до 0,091 мм (-39,3 % в абсолютных единицах) позволило уменьшить значение средней относительной разностенности с 8,81 до 7,8 % (-0,98 %). Уменьшилось и среднеквадратическое отклонение с 1,8 (0,031 мм) до 0,8 % (0,02 мм).

Прокатка труб второго пакета (ООО «ПО «ОСКАР», сплав Gr2, маршрут 25×2,8→18×1,5) показала лучшие результаты. Уменьшение абсо-

лютной разностенности с 0,42 до 0,22 мм (-46,62 % в абсолютных единицах) позволило снизить относительную с 15,1 до 13,3 %. Характерно, что с 0,17 (5,9 %), до 0,06 мм (3,6 %) уменьшилась и минимальная разностенность труб. При этом, средняя разностенность уменьшилась с 9,75 (0,277 мм) до 8,2 % (0,135 мм). Показатели среднеквадратического отклонения изменились с 2,6 (0,074 мм) до 2,197 % (0,037 мм). Обе схемы прокатки труб на стане ХПТ 32 показали, что снижение абсолютных значений разностенности достаточно велико.

В процессе комплексных исследований стана ХПТ 32 сила прокатки, с учетом характера максимального нагружения элементов станины рациональной формы, достигала соответственно 510 кН при прямом ходе клетки, и 374 кН при обратном (прокатка труб из стали 12X18H10T по калибровке 38×4,3→20×1,6 при скорости прокатки 85 дв.х/мин). При движении клетки вперед и назад в шатунах главного привода возникают усилия, значения которых равны 40,6 и 29 кН или примерно 7,99-5,7 % от результирующей силы прокатки, что хорошо согласуется с соот-

ветствующими теоретическими положениями процесса пильгерной прокатки труб.

Опыт эксплуатации рациональной рабочей клетки в составе всего технологического оборудования станов ХПТ 32 конструкции ЭЗТМ показывает высокую надежность и эффективность работы, при которой достигнуты следующие показатели: увеличение производительности стана на 6,7 %; снижение массы рабочей клетки на 14 %; экономия энергозатрат на 9,23 %; повышение срока службы станины рабочей клетки при прокатке труднодеформируемых сталей и сплавов фактически в 3,6 раза; повышение качества готовой продукции на 25,6 % за счет увеличения жесткости рабочей клетки в 3,82 раза; отклонение геометрических размеров прокатываемых труб по стенке (максимум) 5 %, по наружному диаметру (максимум) $\pm 0,1$ мм, уменьшение брака «накат» на 5 %.

Применением оптимального нажимного устройства установки рабочих валков, которая обеспечивает условия равномерного нагружения станины, достигнуты все показатели качества точности партии прокатываемых труб из марок сталей 12Х18Н10Т размеров 20×1,6 и Х18Н10Т – 14×2. Это указывает на значительное расширение технологических возможностей стана ХПТ 32. Основные показатели прокатываемых труб соответствуют ГОСТ 9941-81 «точность высокая», где предельные отклонения геометрических размеров труб равны: по стенке $\pm 5-7$ %, по наружному диаметру $\pm 0,1$ мм.

Таким образом, в результате комплексных исследований НДС станин различных конструкций рабочих клеток станов ХПТ 32, было выявлено следующее.

1. Максимальные напряжения конструкции станин рабочей клетки ЭЗТМ превышают напряжения в станине клетки рациональной в 3,5 раза.

2. Установлено, что станина клетки рациональной конструкции обладает большей жесткостью, чем станина клетки ЭЗТМ. Максимальные перемещения станин при одинаковом нагружении их силой прокатки трубы 0,5 МН отличаются в 2,3 раза.

3. Картины НДС и запаса прочности станин показывают, что станина рациональной конструкции имеет более высокие показатели резервов прочности и, как следствие, является более простой и надежной в эксплуатации, чем станина конструкции ЭЗТМ.

4. Установлено, что в зависимости от поло-

жения клина нажимного устройства, станина конструкции ЭЗТМ имеет различные показатели деформации перемещения в зависимости от технологической нагрузки и, как следствие, различную жесткость. Следовательно, качество труб, кроме всего прочего, определяется положениями клина нажимного устройства рабочих валков. Отметим, что для станины рациональной конструкции перемещения стоек станины не зависят от положения клина, что подтверждает высокие показатели стабильной жесткости станины

Список литературы

1. Гриншпун Н.И., Соколовский В.И. Станы холодной прокатки труб. – М.: Машиностроение, 1967. – 239 с.
2. Кофф З.А., Соловейчик П.М. Холодная прокатка труб. – Свердловск: Гос. науч.-техн. изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии (Свердловское отделение), 1962. – 431 с.
3. Технология трубного производства. Учебник для вузов / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М.: Интернет-Инжиниринг, 2002. – 640 с.
4. Фролов В.Ф., Данченко В.Н., Фролов Я.В. Холодная прокатка труб. – Днепропетровск: Пороги, 2005 – 255 с.
5. А.с. №1148660 СССР, МКИ В 21 В 21/00. Рабочая клетка стана холодной прокатки труб / А.С. Ткаченко, С.М. Крышин, В.Ф. Орещенко и др. (СССР). – №3674757/22-02. Заявл. 20.12.83, опубли. 07.04.85. Бюл. №13.
6. Разработка и внедрение рациональной конструкции рабочей клетки стана холодной прокатки труб: дис. ... канд. техн. наук. / Крышин С.М. – Днепропетровск, 1985. – 169 с.
7. Алямовский А.А. Инженерные расчёты в SolidWorks Simulation. – М.: БМК Пресс, 2010. – 464 с
8. Расчет конструкции рабочей клетки стана холодной прокатки труб / С.Р. Рахманов, С.М. Крышин, В.Ф. Орещенко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – №5. – С. 45- 51.
9. Калашников Ю.Л. Разработка новой конструкции нажимного устройства рабочей клетки стана ХПТ с целью повышения качества катаных труб / Ю.Л. Калашников, С.М. Крышин, В.Ф. Орещенко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1995. – №1. – С. 61-63.

Статья поступила 08.01.2016 г.

© С.Р. Рахманов, В.Т. Вышинский, С.М. Крышин, В.В. Поворотный, 2016