



С. Р. Рахманов /к. т. н./
Национальная металлургическая академия
Украины

В. Т. Вышинский /к. т. н./, В. В. Поворотный
ООО «НПФ «Восток Плюс»

Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния валков рабочей клетки стана холодной прокатки труб

Приведены результаты комплексного анализа напряженно-деформированного состояния валков рабочей клетки станов холодной пильгерной прокатки труб (ХПТ), оснащенных калибрами в виде полудисков и кольцевыми калибрами, с использованием информационных технологий и метода конечных элементов. Выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния валков рабочей клетки отечественных станов ХПТ. Установлено, что при прокатке труб повышенного качества из труднодеформируемых сталей и сплавов ввиду оптимального напряженно-деформированного состояния и значительного повышения жесткости системы «валок – калибр» целесообразно на станах ХПТ всех типоразмеров использовать установку валков с кольцевыми калибрами в комплексе с рабочей клетью рациональной конструкции. (Ил. 5. Табл. 4. Библиогр.: 8).

Ключевые слова: труба, стан ХПТ, сила прокатки, рабочая клеть, калибр, валок, подушка, подшипник, станина, напряжения, упругая деформация, жесткость.

Use of a method of final elements carried out the complex analysis of the intense deformed condition of installation of rolls of camps of cold rolling of pipes various the designs equipped with calibers in the form of semi-disks and ring calibers. It is established that in view of optimization of the intense deformed condition of system «a roll – caliber» and substantial increase of rigidity of system for rolling of pipes of the increased quality on camps of CPT it is expedient to use installation of rolls with ring calibers in a complex with a working cage of a rational design.

Key words: CPT camp, rolling force, working cage, caliber, roll, pillow, bearing, bed, pipe, tension, elastic deformation, rigidity.

Введение

Конкурентоспособность отечественных трубопрокатных предприятий в условиях современного производства холоднокатаных труб преимущественно поддерживается за счет высокого качества выпускаемой продукции.

Трубы высокого качества, полученные методом холодной пильгерной прокатки (ХПТ), используются в таких сферах, как ядерная энергетика, авиастроение, химическое производство и др. При этом наряду с другими с экономической точки зрения немаловажную роль играет и стоимость холоднокатаных труб, которая напрямую зависит от затрат на проведение текущих и капитальных ремонтов станов ХПТ. Следовательно, от условий функционирования и надежности работы отдельных базовых узлов стана ХПТ в целом зависят показатели выпуска холоднокатаных труб.

В силу того, что на ряде отечественных предприятий существуют технологические линии, производящие холоднокатаные трубы, где работают на устаревшем оборудовании со станами ХПТ (срок эксплуатации станов конструкции ОАО «ЭЗТМ» составляет более 50 лет), вопросы комплексной модернизации станов и тех-

нологий холодной пильгерной прокатки труб являются актуальными. В свою очередь, ввиду как морального, так и физического износа базового технологического оборудования, большинством станов ХПТ не обеспечиваются ожидаемые показатели качества готовых труб и не открываются определенные мировой практикой возможности для производства высокоточных холоднокатаных труб путем реализации современных технических решений и инновационных технологий.

Постановка задачи

Исходя из вышеизложенного, в постановочной части задачи ставится вопрос по совершенствованию ответственных узлов комплекса основного оборудования и вспомогательных узлов рабочей клетки стана ХПТ, связанного с реализацией современных технологий производства высококачественных тонкостенных и особотонкостенных холоднокатаных труб.

Отметим, что при реализации процессов ХПТ наряду со всеми происходит упругая деформация элементов рабочей клетки, имеющих определенные массы и жесткости. Данная система взаимосвязанных деформаций, в целом называемая «пружиной клетки», в свою очередь, фор-

мируется наложением деформаций технологических инструментов и других элементов рабочей клетки, что отражается на геометрических параметрах стенки изготавливаемой трубы. Общая картина показателей качества и геометрии (продольная и поперечная разностенности) готовой продукции не соответствуют требованиям существующих стандартов и технических условий [1–6].

Известно, что на процесс ХПТ значительно влияет упругая деформация установки валков рабочей клетки. В процессе прокатки трубы фактические размеры калибра складываются из суммарного перемещения базовых элементов рабочей клетки, таких как стойки станины рабочей клетки, валков с калибрами, подушек с подшипниками, предохранительное устройство, нажимной механизм, и т. д. Влияние упругой деформации установки валков и элементов рабочей клетки соответствующим образом учитывается при калибровке технологического инструмента (калибра и оправки) [7].

В работах [1; 2] приведены результаты комплексных экспериментальных исследований и описание опыта эксплуатации рабочих клеток станов ХПТ 32, ХПТ 55 и ХПТ 75/90 конструкции ОАО «ЭЗТМ». Исследования показали, что перемещение базовых элементов клеток станов ХПТ 32, ХПТ 55 и ХПТ 75/90, образующих их суммарную жесткость (пружину), зависят квазилинейно от силы прокатки, и только лишь перемещение предохранительного устройства рабочих валков изменяется нелинейно.

Картина полной деформации рабочей клетки стана ХПТ изменяется в зависимости от компоновки ее элементов. Наличие встроенного в клин нажимного механизма предохранительного элемента рабочих валков существенно усложняет данную картину. Отметим, что при использовании предохранительного устройства в рабочей клетке показатели деформации рассматриваемой системы в целом изменяются по не-

линейному закону. Следовательно, без предохранительного устройства параметры жесткости системы изменяются по квазилинейному закону. Из опыта эксплуатации установки валков стана ХПТ 32 видно, что доля показателей деформации в общей картине пружины рабочей клетки составляет примерно 17–18 % [1; 4].

Характерно, что надежность функционирования рабочей клетки стана ХПТ и ограниченная долговечность деталей установки валков во многом определяются показателями прочности самих валков. В большинстве случаев показатели прочности элементов установки валков являются сдерживающими факторами при прокатке тонкостенных или особотонкостенных прецизионных труб из труднодеформируемых сталей и специальных сплавов с заданными технологическими свойствами и требуемых геометрических параметров.

Опыт эксплуатации отечественных станов ХПТ показывает, что валки являются ответственным элементом рабочей клетки. Они обладают большой податливостью и низкой долговечностью, в силу чего часто подвержены разрушениям.

На рис. 1 и 2 показаны характерные разрушения валков станов ХПТ 32 и ХПТ 75, вышедшие из строя в результате продолжительной работы и несовершенства своей конструкции.

Цель работы

Целью работы является разработка рациональных технических решений по совершенствованию конструкции установки валков стана ХПТ.

Метод решения задачи

Известны аналитические способы и численные методы расчета рабочих валков различных моделей отечественных станов ХПТ на прочность и жесткость [4; 5]. Однако результаты данных расчетов заметно отличаются от реальных показателей эксплуатации ввиду невозможности учета влияния ряда внешних факторов, ха-



Рис. 1. Разрушенный нижний валок установки валков рабочей клетки стана ХПТ 32

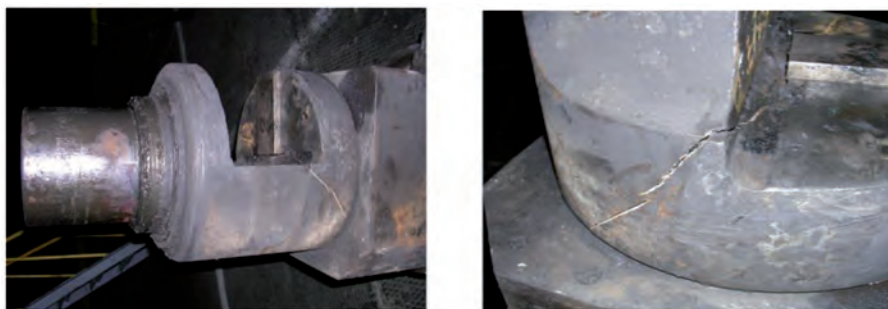


Рис. 2. Разрушенный нижний валок рабочей клетки стана ХПТ 75

рактера формирования технологической нагрузки и других показателей процесса на особенности функционирования станов ХПТ.

При исследовании основного технологического оборудования используют как фундаментальные теоретические методы, которые включают в себя математическое моделирование рассматриваемого объекта, так и физическое моделирование, основанное на непосредственном исследовании самого объекта или модели, ему подобной [6].

Следует отметить, что с развитием современных информационных технологий при исследованиях сложных машин и механизмов, способных объединить преимущества фундаментальных методов в компьютерное моделирование (например, метод конечных элементов), стала возможной визуализация реального состояния объекта исследования в условиях, максимально приближенных к действительным.

В работе [7] при помощи компьютерного моделирования авторами выполнено исследование валка стана ХПТ 32 под установку калибра в виде полудиска. Результаты напряженно-деформированного состояния валка в данной работе представлены исключительно в показателях деформации в одном рабочем положении валка. Оценка напряженно-деформированного состояния и прочностных характеристик валка установки валков в зависимости от угла его поворота не проведена, что во многом является определяющим фактором при установлении показателей его прочности и деформации.

Для расширения технологических возможностей станов ХПТ ООО «НПФ «Восток Плюс» была разработана и реализована адаптированная к существующей конструкции станины рабочей клетки установка валков с кольцевыми калибрами для прокатки тонкостенных и особотонкостенных труб из высокопластичных материалов (например, титана и специальных сплавов).

Опытном эксплуатации отечественных станов ХПТ 32 показано, что при использовании рабочей клетки рациональной конструкции ООО

«НПФ «Восток Плюс» и валковой установки с кольцевыми калибрами достигнуто многократное увеличение жесткости всей механической системы и стабилизация напряжений в опасных зонах. Высокая точность геометрических размеров готовых труб достигнута за счет применения установки валков постоянной жесткости с кольцевыми калибрами.

Применение рабочей клетки рациональной в компоновке валковой установки с кольцевыми калибрами на стане ХПТ 32 ООО «ПО «ОСКАР» привело к снижению как продольной, так и поперечной разностенности труб [4; 5].

Повышение надежности функционирования валка возможно обеспечить за счет устранения всех зон концентраторов опасных напряжений на рабочем валке и оптимизации конструкции установки валков.

Для проведения комплекса визуализированных компьютерных исследований использован программный продукт Solid Works 2015, позволяющий пространственно моделировать рабочие валки с учетом определенных ограничений и в реальном поле силовых воздействий со стороны обрабатываемого изделия [8]. При этом удается создать нагружение рабочих валков, максимально приближенное к реальным процессам холодной пильгерной прокатки труб и по характерным физическим условиям соответствующее механическим свойствам материала прокатываемых труб.

На рис. 3 показаны картины базовых составляющих напряжений, деформаций и показатели запаса прочности рабочих валков с кольцевыми калибрами (новой конструкции) и валков с калибрами в виде полудисков (старой конструкции) для стана ХПТ 32.

На рис. 3 приведено напряженно-деформированное состояние рабочих валков в положениях максимальных напряжений. Угол поворота для валков с калибрами в виде полудисков в данном случае соответствует 12°.

Численные результаты исследований для валковых установок соответствующих станов ХПТ 32, ХПТ 55 и ХПТ 75/90 приведены в табл. 1–4.

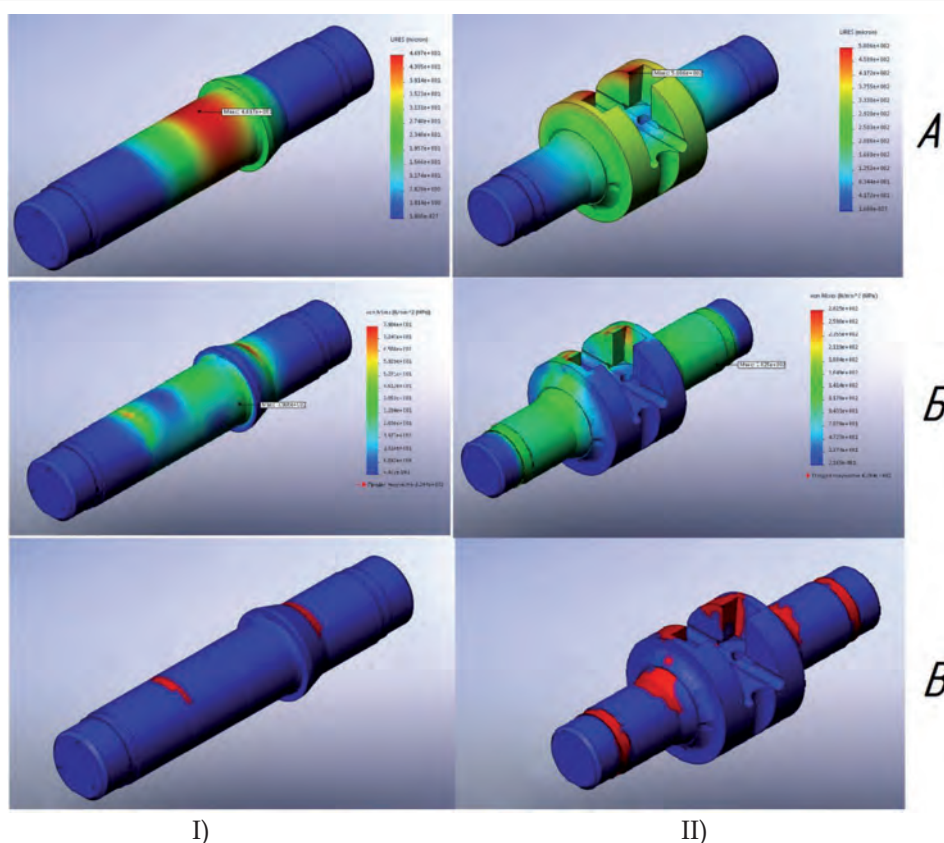


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние валков стана ХПТ 32:

I – в валках установки валков с кольцевыми калибрами (новой конструкции); II – в валках с калибрами в виде полудисков (старой конструкции): а – перемещения, б – напряжения, в – коэффициент запаса прочности

Таблица 1

Результаты исследования валка стана ХПТ 32 с калибрами в виде полудиска (старой конструкции) при нагружении силой прокатки трубы в 0,5 МН

Плоскость приложения силы	Угол поворота, градусы															Показатель
	12	24	36	48	60	72	84	90	102	108	120	132	144	156	168	
Нижняя, мкм	348	331	300	255	200	134	64	33	64	134	200	255	300	331	348	Мин.
	175	164	146	122	93	61	32	30	32	61	93	122	146	164	175	Ср.
	81	75	67	55	41	24	7	27	7	24	41	55	67	75	81	Макс.
Боковая, мкм	500	468	416	345	260	163	60	14	60	163	260	345	416	468	500	Мин.
	333	297	278	220	166	105	42	14	42	105	166	220	278	297	333	Ср.
	170	160	143	120	91	59	26	13	26	59	91	120	143	160	170	Макс.
Напряжения, МПа	283	264	233	193	144	105	72	63	72	105	144	193	233	264	283	Макс.

Таблица 2

Результаты исследований валков стана ХПТ 55 с калибрами в виде полудисков (старой конструкции) при нагружении силой прокатки трубы, 1 МН

Плоскость приложения силы	Угол поворота, градусы															Показатель
	12	24	36	48	60	72	84	90	102	108	120	132	144	156	168	
Нижняя, мкм	481	461	420	361	286	200	103	61	103	200	286	361	420	461	481	Мин.
	248	192	172	144	113	78	51	50	51	78	113	144	172	192	248	Ср.
	43	40	35	28	21	11	3	43	3	11	21	28	35	40	43	Макс.
Боковая, мкм	500	468	416	345	260	163	60	14	60	163	260	345	416	468	500	Мин.
	333	297	278	220	166	105	42	14	42	105	166	220	278	297	333	Ср.
	170	160	143	120	91	59	26	13	26	59	91	120	143	160	170	Макс.
Напряжения, МПа	863	810	722	602	456	290	150	144	150	290	456	602	722	810	863	Макс.

Результаты исследований валков стана ХПТ-90 с калибрами в виде полудисков (старой конструкции) при нагружении силой прокатки трубы, 2 МН

Плоскость приложения силы	Угол поворота, градусы															Показатель
	12	24	36	48	60	72	84	90	102	108	120	132	144	156	168	
Нижняя, мкм	603	580	530	458	365	257	137	90	137	257	365	458	530	580	603	Мин.
	306	287	257	181	142	101	74	73	74	101	142	181	257	287	306	Ср.
	51	48	42	35	26	11	6,6	60	6,6	11	26	35	42	48	51	Макс.
Боковая, мкм	931	870	772	640	480	300	107	26,7	107	300	480	640	772	870	931	Мин.
	532	500	476	370	279	176	69	25	69	176	279	370	476	500	532	Ср.
	221	210	188	160	123	83	42	23,6	42	83	123	160	188	210	221	Макс.
Напряжения, МПа	1197	1119	990	820	613	380	138	120	138	380	613	820	990	1119	1197	Макс.

Таблица 4

Максимальные значения напряжений и перемещений в рабочих валках станов ХПТ с кольцевыми калибрами

Показатель	ХПТ 32 (0,5 МН)	ХПТ 55 (1 МН)	ХПТ 90 (2 МН)
Напряжения, МПа	79	162	184
Перемещения, мкм	47	72,5	90

Из расчета следует, что для валков с кольцевыми калибрами напряжения не зависят от угла поворота вала.

Из картин напряженно-деформированного состояния валков видно, что валки старой конструкции имеют более низкий коэффициент запаса прочности по сравнению с валком рациональной конструкции. Кроме того, характерные зоны концентрации напряжений совпадают с местами, где в дальнейшем происходят разрушения валков с полудисковыми калибрами, аналогично рис. 1 и 2.

Учитывая то, что сила прокатки на валки старой конструкции прикладывалась по взаимно перпендикулярным плоскостям, получены графики результирующих перемещений (прогибов) валков в зависимости от угла их поворота (рис. 4).

Анализируя результаты табл. 1–3, были построены графики зависимости напряжений в валках от угла поворота валков (рис. 5).

На рис. 5 зоны возможной деформации валков выделены штриховкой. Из рисунка видно, что в процессе работы валка установки валков с калибрами в виде полудисков при условно постоянном силовом воздействии со стороны обрабатываемой трубы в силу изменения его жесткости меняются базовые показатели его деформации. Минимальной она является в крайних положениях валка. Установлено, что напряжения, возникающие в процессе работы стана, тоже непостоянны, а в крайних положениях рабочей клетки они максимальны, в среднем положении – минимальны. При перекачивании валка по ходу прокатки трубы и обратно ходу прокатки напряжения в валках изменяются знако-

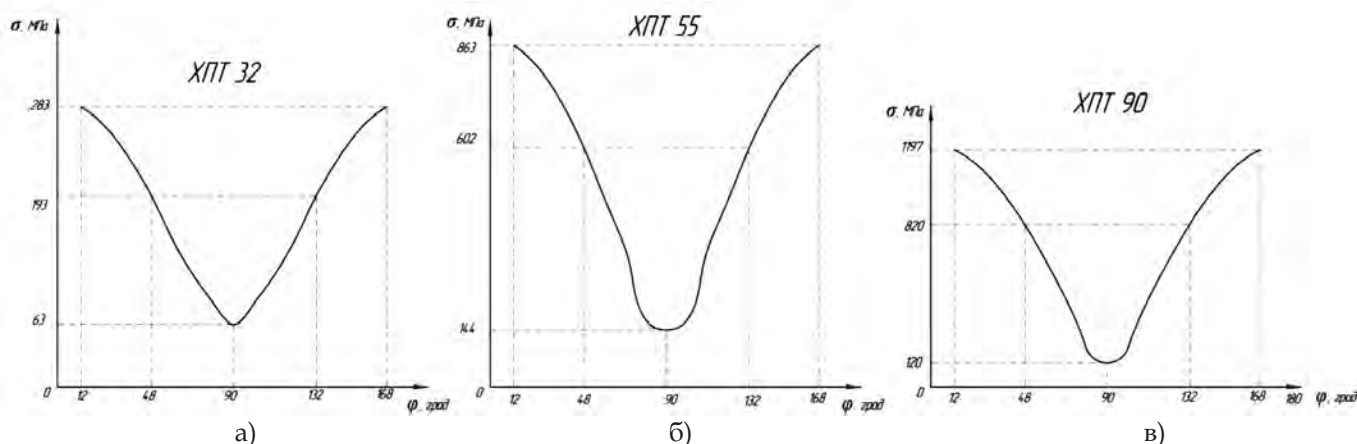


Рис. 4. Картины максимальных напряжений в рабочих валках стана ХПТ с полудисковыми калибрами в зависимости от угла поворота валка:

а – стан ХПТ 32, сила прокатки, приложенная на валок 0,5 МН; б – стан ХПТ 55, сила прокатки, приложенная на валок 1 МН; в – стан ХПТ 90, сила, приложенная на валок 2 МН

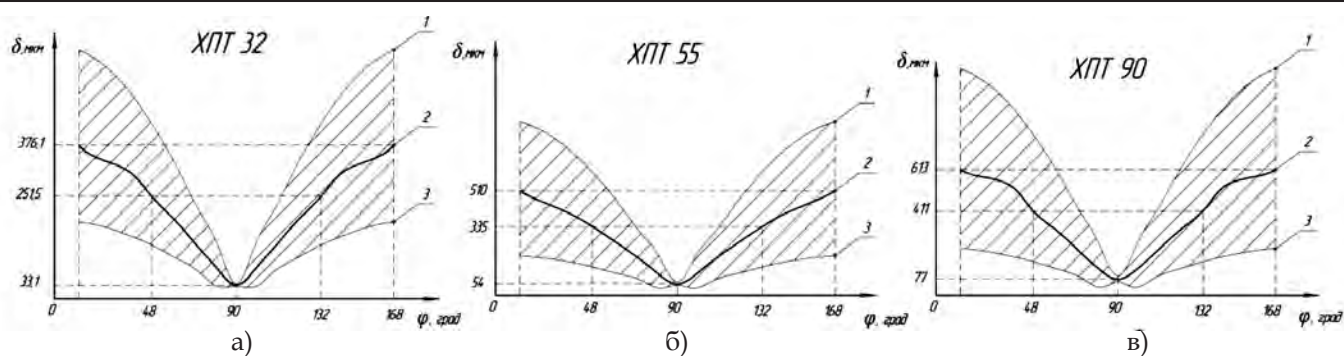


Рис. 5. Картины максимальных перемещений в рабочих валках станов ХПТ с полудисковыми калибрами в зависимости от угла поворота вала:

а – стан ХПТ 32, сила, приложенная на валок 0,5 МН; б – стан ХПТ 55, сила, приложенная на валок 1 МН; в – стан ХПТ 90, сила, приложенная на валок 2 МН; 1 – кривая максимальных перемещений вала; 2 – кривая среднего перемещения вала; 3 – кривая минимальных перемещений вала

переменно, что со временем вызывает усталостное разрушение в опасных сечениях валков и взаимосвязанных с валками элементов рабочей клетки стана ХПТ.

Выводы

В результате моделирования валков рабочей клетки станов ХПТ с применением информационных технологий и проведения расчетов методом конечных элементов получены следующие результаты, которые показали преимущества установки валков с кольцевыми калибрами над валками с калибрами в виде полудисков:

1. Напряжения в валках установки валков станов ХПТ с кольцевыми калибрами (новой конструкции) не изменяются в зависимости от угла поворота вала и постоянны по своему численному значению.

2. Напряжения в валках установки валков станов ХПТ с кольцевыми калибрами (новой конструкции) значительно ниже напряжений в валках с калибрами в виде полудисков (старой конструкции) за счет простоты конструкции и отсутствия концентраторов напряжения.

3. Жесткость вала установки валков станов ХПТ с кольцевыми калибрами (новой конструкции) постоянна и не зависит от угла поворота.

4. Жесткость валков с калибрами в виде полудисков переменна и изменяется в зависимости от их угла поворота (непостоянство жесткости валков), что, в свою очередь, влияет на пружину клетки и, как следствие, на качество выпускаемых труб.

5. Исследования напряженно-деформированного состояния и анализ показателей прочности показали, что валки установки валков станов ХПТ с кольцевыми калибрами имеют более высокий коэффициент запаса прочности в опасных сечениях и местах концентрации напряжений по отношению к валкам старой конструкции.

Библиографический список

1. Гриншпун Н. И. Станы холодной прокатки труб / Н. И. Гриншпун, В. И. Соколовский. – М.: Машиностроение, 1967. – 239 с.
2. Фролов В. Ф. Холодная прокатка труб: монография / В. Ф. Фролов, В. Н. Данченко, Я. В. Фролов. – Днепропетровск: Пороги, 2005 – 255 с.
3. Попов М. В. Совершенствование процесса периодической прокатки труб / М. В. Попов, С. В. Атанасов, Ю. М. Беликов. – Днепропетровск: ООО Независимая издательская организация «Дива», 2008. – 192 с.
4. Крышин С. М. Разработка и внедрение рациональной конструкции рабочей клетки стана холодной прокатки труб: дис. ... канд. техн. наук / С. М. Крышин. – Днепропетровск, 1985. – 169 с.
5. Рахманов С. Р. Расчет конструкции рабочей клетки стана холодной прокатки труб / С. Р. Рахманов, С. М. Крышин, В. Ф. Орещенко, В. Т. Вышинский, А. В. Журавлев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 5. – С. 45–51.
6. Цапко В. К. Техника эксперимента и основы научных исследований металлургических машин и агрегатов УМК ВО / В. К. Цапко, Г. И. Толстикова, В. А. Ермократьев, Я. А. Жук. – Киев, 1989. – 138 с.
7. Дехтярев В. С. Анализ упругой деформации вала при холодной пильгерной прокатки на станах ХПТ – 55 / В. С. Дехтярев, Я. В. Фролов, А. С. Бобух // *Теория и практика металлургии*. – 2009. – № 5, 6. – С. 64–66.
8. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – М.: БМК Пресс, 2010. – 464 с.

Поступила 01.12.2015