

УДК 621.771.28

Рахманов С. Р.  
Вышинский В. Т.  
Поворотный В. В.

## КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ КЛЕТИ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

В технологических линиях по производству трубчатых изделий для энергетики, элементов летательных аппаратов, химических производств и т.п. существенную роль играют станы холодной пильгерной прокатки труб (ХПТ). Отметим, что на трубопрокатных предприятиях Украины работает более двухсот таких агрегатов. В условиях интенсификации режимов холодной пильгерной прокатки труб наблюдается резкое снижение долговечности рабочих клеток. Это обусловлено действием значительных по величине и часто изменяющихся нагрузок. Выходят из строя из-за усталостного разрушения ответственные элементы рабочей клетки, в частности станины и рабочие валки, несмотря на значительные запасы их статической прочности (рис. 1).



Рис. 1. Разрушенные узлы рабочей клетки стана ХПТ 32:  
а – валок под калибр в виде полудиска; б – станина клетки

Процесс функционирования этого оборудования протекает в условиях изменчивости параметров, характеризующих особенности его работы (частота периодического воздействия на обрабатываемое изделие; технологические нагрузки, обусловленные не только свойствами материала, но и кинематическими особенностями его перемещений; температурные характеристики очага деформации и т.п.). Существенное влияние на формирование общей картины для достижений показателей качества (геометрические и физические характеристики изготавливаемой трубы) путём наложения деформаций элементов рабочей клетки и технологического инструмента оказывает система взаимосвязанных упругих перемещений, в целом называемая «пружиной клетки»,

В работах [1–4] приведены некоторые первичные результаты экспериментальных исследований и описание опыта эксплуатации рабочих клеток станков ХПТ конструкции ОАО «ЭЗТМ». Исследования показали, что перемещения базовых элементов станины рабочей клетки стана ХПТ-32, образующих её «пружину», при различных усилиях прокатки линейны. В работе [5] приведены результаты исследования валков стана ХПТ-55 с калибрами в виде полудисков. Показано, что их жесткость при неизменяемой нагрузке за технологический цикл существенно переменна. Комплексная оценка напряженного состояния и прочностных характеристик валков в зависимости от угла их поворота не проведена.

Целью работы является разработка и принятие оптимальных технических решений по совершенствованию конструктивных элементов подвижной станины рабочей клетки стана ХПТ-32.

Известны способы расчёта станин и рабочих валков на прочность и жесткость для станков ХПТ различной конструкции [4, 6]. Однако их результаты заметно отличаются от реальных показателей, ввиду игнорирования влияния изменчивости внешних факторов, неучтенных особенностей формирования технологического процесса и других показателей

функционирования станов ХПТ. Для того чтобы свести к минимуму эти явления, целесообразно оптимизировать как геометрию образующей рамы клетки, так и схему передачи воздействия со стороны очага деформации на систему элементов, определяющих его жесткость. Для расширения технологических возможностей станов ХПТ-32 (прокатка тонкостенных труб, труб из сплавов титана и алюминия, труб из высокопрочных материалов) компанией «Восток-Плюс» были предложены конструкции рабочей клетки рациональной формы и валковой установки с кольцевыми калибрами (рис. 2). Достигнуто заметное увеличение жесткости всей механической системы. Это привело не только к существенному снижению как продольной, так и поперечной разностенности труб, но и к повышению долговечности конструктивных элементов подвижной клетки. Эти конструктивные решения были получены в результате решения двух задач.

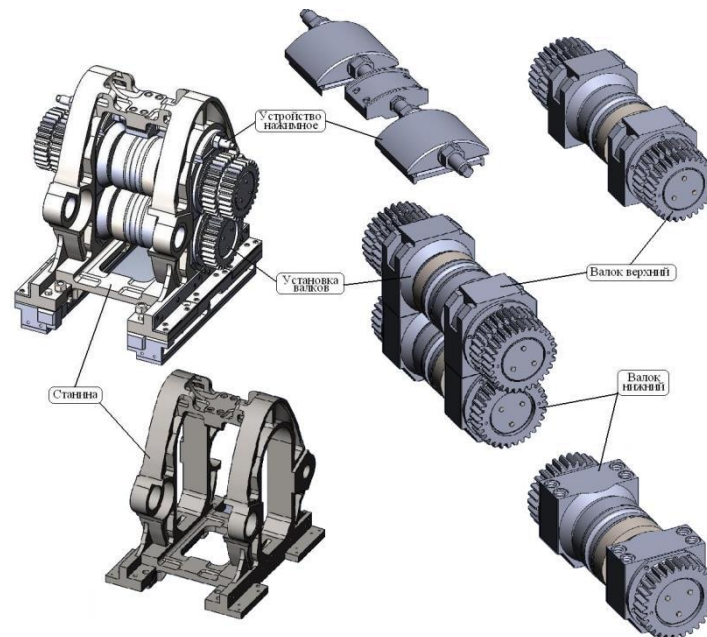


Рис. 2. Подвижная клетка стана ХПТ-32ВП и составляющие её узлы

Одна из задач свелась к формированию функционала (интеграла технологической нагрузки и изгибающего момента) и нахождению условия его экстремума [7]. Другая же задача выразилась в разработке рациональной конструкции элементов нажимного устройства [8]. Благодаря синтезированному нажимному устройству клетка приобрела свойство адаптации ко всем возможным неточностям изготовления и монтажа, а также к деформациям элементов, в результате которых появляется смещение осей и базовых поверхностей.

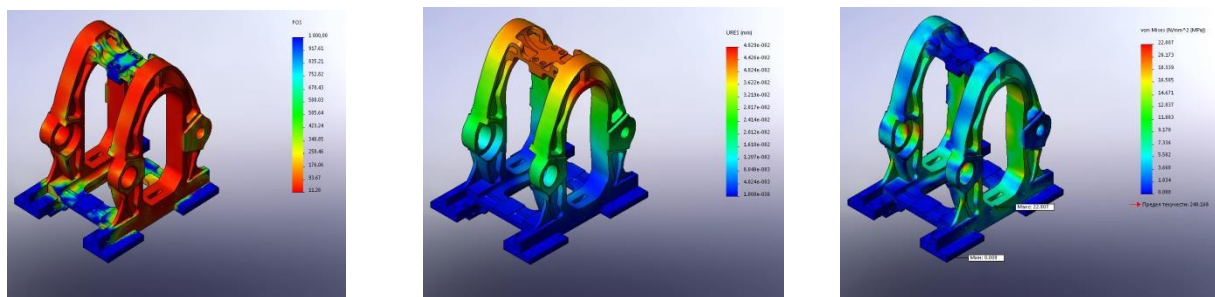


Рис. 3. Картины напряженно-деформированного состояния станины рабочей клетки стана ХПТ-32ВП

При нарушении режимов прокатки труб в ряде случаев происходит отрыв оправки от стержня механизма ее удержания, что приводит, как правило, к выходу из строя рабочей клетки вследствие многократного увеличения нагрузок на её элементы. В разработанной конструкции подушки, взаимодействуя с самоустанавливающимися клиньями нажимного

устройства, обеспечивает свободное прохождение системы «оправка – обрабатываемое изделие» в межвалковом пространстве.

Для проведения комплекса визуализированных исследований был использован программный продукт Solid Works 2015 [9], позволяющий моделировать процессы нагружения станины подвижной клетки с учетом определенных ограничений и в реальном поле силовых воздействий со стороны обрабатываемого изделия. [10].

На рис. 3 показаны картины базовых составляющих напряжений, деформаций и показатели запаса прочности станины рациональной конструкции рабочей клетки стана ХПТ-32ВП. При нагружении силой прокатки трубы в 0,5 МН напряжения не превысили 80 МПа, упругие перемещения (главная характеристика, определяющая податливость станины клетки) – 50 мкм. Запас прочности – не менее 15.

На рис. 4 показаны картины базовых составляющих напряжений, деформаций и показатели запаса прочности рабочих валков для стана ХПТ-32 соответственно под кольцевые калибры и под калибры в виде полудисков. Следует отметить, что напряженно-деформированное состояние валков под калибры в виде полудисков определяется ориентацией выемки под калибр, т.е. зависят от угла поворота в процессе воздействия на обрабатываемое изделие. Результаты этих исследований приведены в табл. 1. Валки под кольцевые калибры не чувствительны к изменению этого параметра в цикле ХПТ и при нагружении силой прокатки трубы в 0,5 МН напряжения не превысили 79 МПа, упругие перемещения (характеристика, определяющая прогиб валка) – 47 мкм, запас прочности – не менее 12.

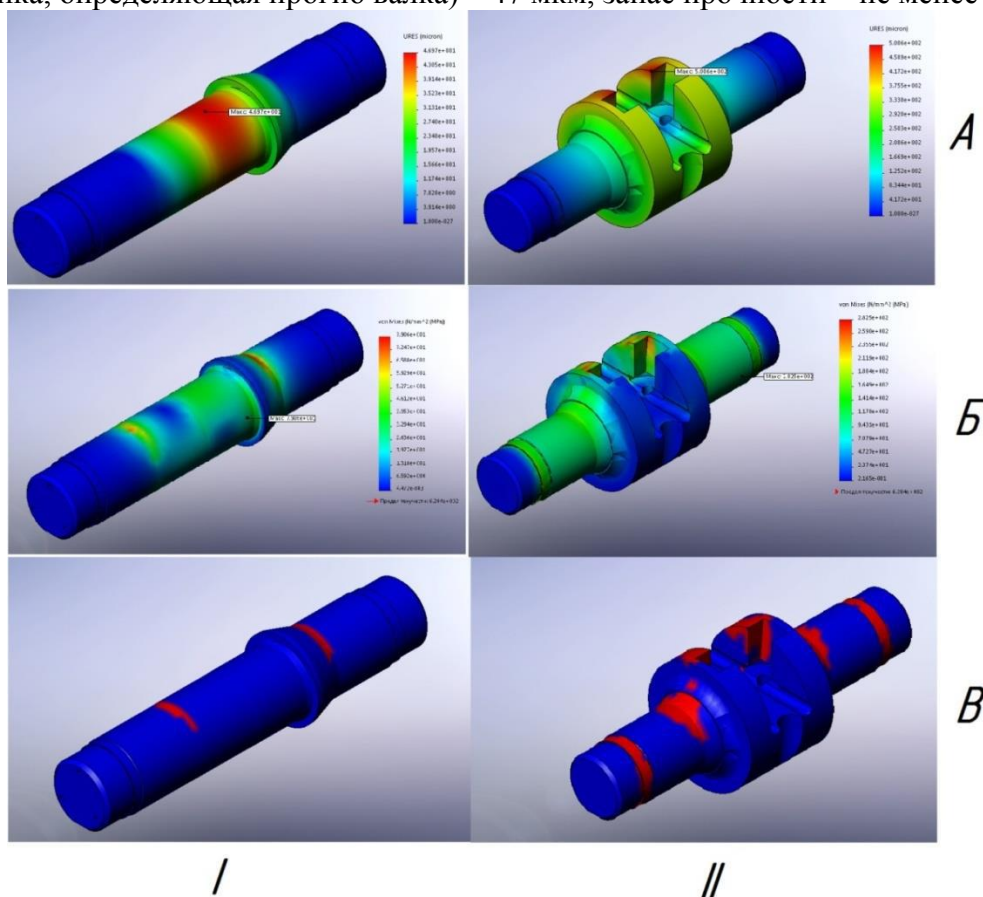


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние валков для стана ХПТ-32:

I – валок под кольцевой калибр; II – валок под калибр в виде полудиска в наиболее неблагоприятном положении;

A – перемещения; Б – напряжения; В – коэффициент запаса прочности (на валке под кольцевой калибр красным обозначена зона, для которой коэффициент запаса прочности не ниже 15; на валке под калибр в виде полудиска красным обозначена зона, для которой коэффициент запаса прочности не ниже 5)

Таблица 1

Результаты исследования валков стана ХПТ-32 под калибры в виде полудисков при нагружении силой прокатки 0,5 МН

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

Учитывая то, что воздействие на валки под калибры в виде полудисков реализуется по взаимно перпендикулярным плоскостям их пазов, путем сложения были получены графики результирующих перемещений (прогибов) валков в зависимости от угла их поворота (рис. 5).

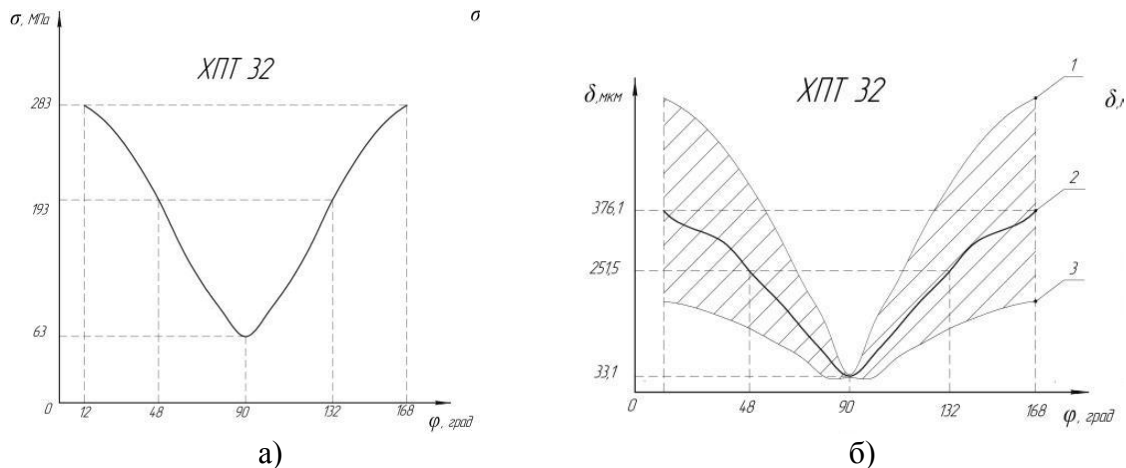


Рис. 5. Картины максимальных напряжений (а) и перемещений (б) рабочего валка с полудисковыми калибрами в зависимости от угла поворота валка стана ХПТ 32 (сила прокатки, приложенная к валку 0,5 МН)

На рис. 5б зоны возможной деформации валков выделены штриховкой. Из рисунка видно, что в процессе работы валка под калибры 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. Напряжения, возникающие в процессе работы тоже непостоянны, в крайних положениях рабочей клетки они максимальны, в среднем положении минимальны. При перекачивании валка по ходу рабочей клетки и обратно ходу прокатки трубы напряжения в валках изменяются знакопеременно, что со временем вызывает усталостное разрушение в опасных сечениях валков и взаимосвязанных с валками элементов рабочей клетки стана ХПТ.

Рабочие клетки стана ХПТ-32 оснащены нажимными устройствами, которые представляют собой размещенные в станине механизмы перемещения подушек (подшипниковых узлов) верхних валков в окнах станины. При синтезе [8] нажимного устройства клетки стана ХПТ-32 конструкции ООО «НПФ «Восток-Плюс» (рис.6а) заложено требование соблюдения постоянства положения равнодействующих силового взаимодействия звеньев цепей от подушек валков к раме станины. Реализация этого условия достигнута размещением механизмов нажимных устройств в проемах станины перпендикулярно оси прокатки.



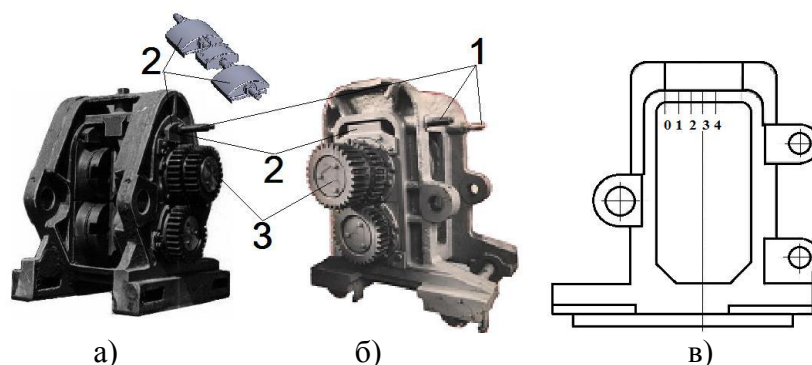


Рис. 6. К расчёту влияния положений клиньев нажимных устройств на деформацию станин рабочей клетки стана ХПТ-32

В рабочей клетке ОАО «ЭЗТМ» (рис.6б) силовое замыкание возникающих в очаге деформации усилий на станину клетки осуществляется через подушки валков 3, подвижные вдоль оси прокатки клинья 2 и размещенные в клиньях элементы предохранительных устройств. Изменяемая в процессе настройки схема силового взаимодействия элементов этой цепи определяется положением клина 2 при его движении вдоль оси прокатки. В связи с этим выполнена оценка дискретных значений величин напряжений и деформаций станины в равноудаленных положениях вдоль линии хода клиньев нажимного устройства. Результаты исследования представлены в табл. 2.

Таблица 2

Максимальные значения напряжений и перемещений верхней части станины в зависимости от положения клина нажимного устройства стана ХПТ-32 рабочей клетки ОАО «ЭЗТМ»

1	Параметры расчета	Положения клина нажимного устройства				
		0	1	2	3	4
2	Сечение					
2	Напряжение	105,3	100,5	98	95,8	101,4
3	Перемещение	104	115	121	119	109

Графическое представление этих результатов (рис. 7) более наглядно демонстрирует, что в процессе настройки при разных положениях клина напряжения и деформация клетки изменяются по различным законам. Если изменения величин напряжений не превышает 2%...3% от их среднего значения, то изменения величин деформаций превышает 20% от минимального значения. Полученное означает, что при различных рабочих положениях клина в процессе настройки изменяются показатели жесткости «пружины клетки», что влияет на качество выпускаемой продукции. Если изменяемость жесткости валков с пазами под калибры может быть учтена при формировании законов воздействия инструментов на обрабатываемые изделия [5], то изменение жесткости рамных конструкций станин в процессе настройки не может быть заложено в калибровку.

Практика эксплуатации рациональной рабочей клетки конструкции ООО «НПФ «Восток-Плюс» на станах ХПТ-32 ОАО «ЭЗТМ» показывает высокую надежность и эффективность работы, при которой достигнуты следующие показатели: увеличение производства стана более чем на 6%; снижение массы рабочей клетки на 14%; экономия энергозатрат на 9,23%; повышение срока службы рабочей клетки при прокатке труднодеформируемых сталей и сплавов фактически в 3,6 раза; повышение качества готовой продукции за счет увеличения жесткости рабочей клетки; применение оптимального нажимного устройства привело к уменьшению брака «накат» на 5% (все показатели представлены на основании осмотра прокатываемой продукции марок сталей 12Х18Н10Т размеров 20×1,6 и Х18Н10Т – 14×2,0, в соответствии с ГОСТом 9941-81 точности «высокая», где предельные отклонения геометрических размеров труб равны: по стенке ± 5-7%, по наружному диаметру ± 0,10 мм); расшире-

ние технологических возможностей стана (прокатка специального сортамента труб – особо-тонкостенных, изменение существующих маршрутов прокатки с целью уменьшения цикличности обработки).

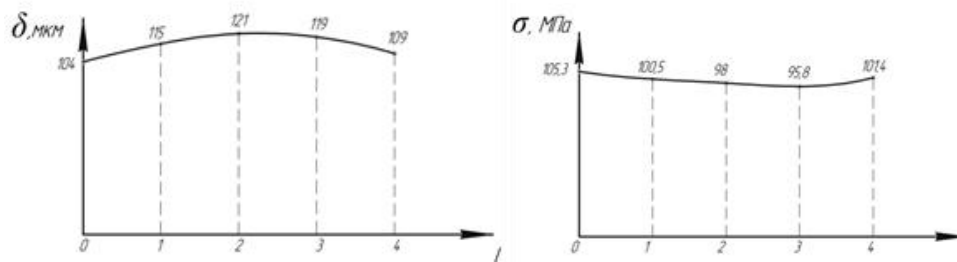


Рис. 7. Значения деформаций (а) и напряжений (б) при изменениях положений клиньев нажимных устройств рабочей клетки стана ХПТ-32 конструкции ОАО «ЭЗТМ»

В работе [11] приведены результаты исследований влияния различных технологических факторов прокатки труб в станах холодной пильгерной прокатки на величину поперечной разностенности труб. В частности приводятся сведения о том, что жесткость клетки является фактором, способным повлиять на точность труб. Для исследования влияния повышения жесткости клетки на разностенность труб были прокатаны 2 пакета труб из сплава Gr – 2, по маршруту 28x2-19x1, на двух станах ХПТ-32 – один оборудован клетью конструкции ОАО «ЭЗТМ», а другой клетью повышенной жесткости конструкции ООО «НПФ «Восток-Плюс». До и после прокатки была замерена поперечная разностенность вдоль каждой трубы каждого пакета. Результаты анализа изменения параметров поперечной разностенности обработаны методами математической статистики и сведены в полигоны изменения частот (рис. 8 и 9) абсолютной и относительной разностенности.

Как видно из полигонов изменения частот поперечной разностенности, при прокатке труб в стане, оснащенной клетью конструкции ОАО «ЭЗТМ» (см. рис 8) среднее значение абсолютной разностенности в пакете уменьшилось на 49,02 % (с 0,218 до 0,111 миллиметров). Не смотря на значительное уменьшение средней абсолютной разностенности, величина средней относительной в пакете несколько увеличилась (на 0,237 %). Анализ изменения значений поперечной разностенности пакета труб, прокатаного в стане, оснащенной клетью конструкции ООО «НПФ «Восток-Плюс» (см. рис 9), показывает, что среднее значение абсолютной разностенности в пакете уменьшилось на 52,03 % (с 0,207 до 0,099 миллиметров).

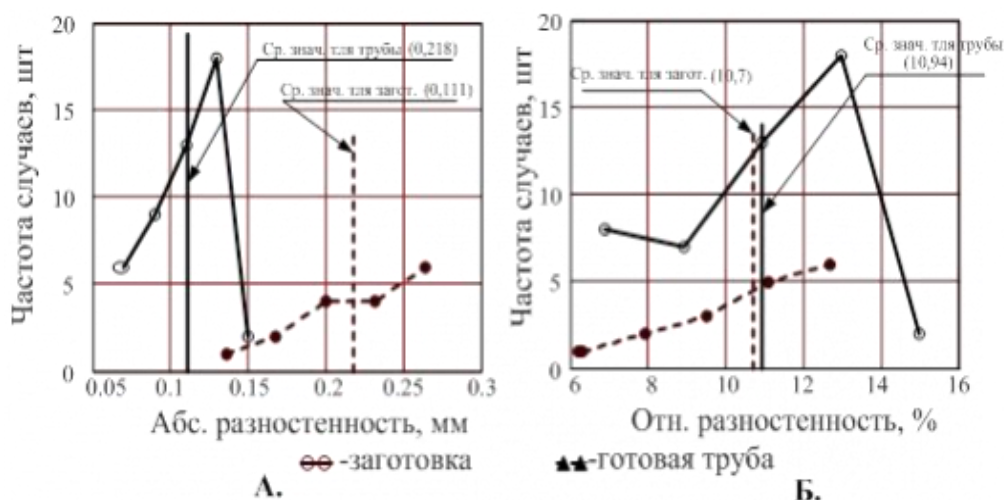


Рис. 8. Полигоны изменения частот поперечной разностенности в ходе прокатки трубы из сплава Gr–2 на стане ХПТ-32 со стандартной клетью, по маршруту 28x2-19x1:

А – абсолютная разностенность; Б – относительная

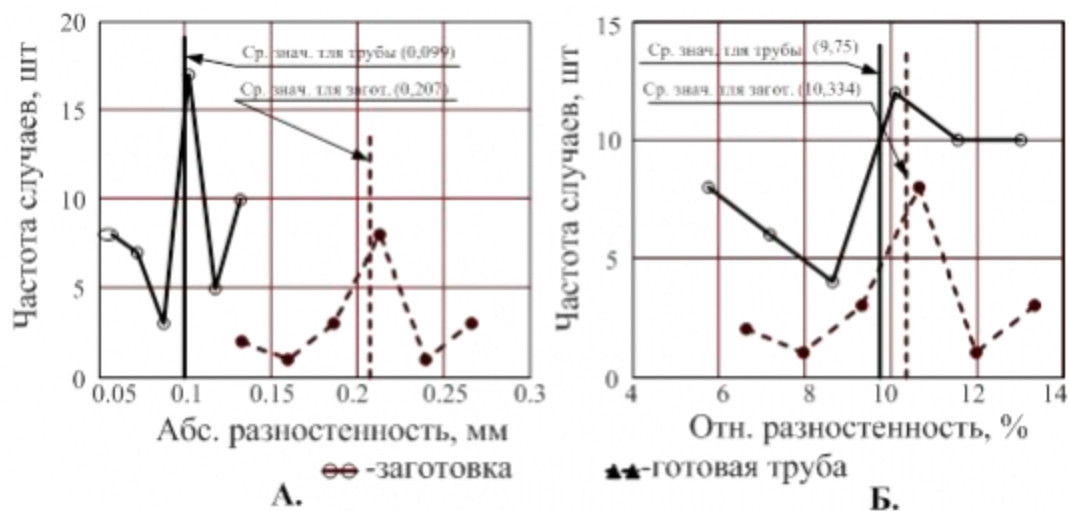


Рис. 9. Полигоны изменения частот поперечной разностенности в ходе прокатки трубы из сплава G1-2 на стане ХПТ 32 с увеличенной жесткостью клетки по маршруту 28x2-19x1:

А – абсолютная разностенность; Б – относительная

### ВЫВОДЫ

В результате использования современных информационных технологий и компьютерного моделирования проведены комплексные исследования элементов рабочих клеток для станов ХПТ-32 ОАО «ЭЗТМ» различных исполнений. Получены результаты, которые показали преимущества рабочей клетки конструкции ООО «НПФ «Восток-Плюс», снабженной установкой валков с кольцевыми калибрами, перед рабочей клетью стана ХПТ-32 традиционного исполнения с валками под установку калибров в виде полудисков:

Напряжения в валках установки валков под кольцевые калибры и станине рабочей клетки конструкции ООО «НПФ «Восток-Плюс» не изменяются в зависимости от угла поворота валка. Выявлено, что напряжения в валках установки валков под кольцевые калибры значительно ниже напряжений в валках под калибры в виде полудисков за счёт простоты конструкции и отсутствия явных концентраторов напряжений.

Комплексными исследованиями напряженно-деформированного состояния установлено, что клеть стана ХПТ-32 со станиной конструкции ООО «НПФ «Восток-Плюс» и установкой валков под кольцевые калибры имеют более высокий коэффициент запаса прочности по сравнению с аналогичной клетью стана ХПТ-32 конструкции ОАО «ЭЗТМ» и установкой валков под калибры в виде полудисков, что определенно расширяет технологические возможности стана ХПТ-32.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гриншпун М.И. Станы холодной прокатки труб / М.И. Гриншпун, В.И. Соколовский. – Машиностроение : Москва 1967 – 239 с.
2. Кофф З.А. Холодная прокатка труб / З.А. Кофф, П.М. Соловейчик. – Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии Свердловское Отделение: Свердловск 1962. – 431с.
3. Технология трубного производства. Учебник для вузов / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М.: Интермет-Инжиниринг, 2002. – 640 с.
4. Фролов В.Ф. Холодная прокатка труб : монография / В.Ф. Фролов, В.Н. Данченко, Я.В. Фролов. – Днепропетровск : Пороги, 2005 – 255 с.
5. Дехтярев В.С. Анализ упругой деформации валка при холодной пильгерной прокатки на станах ХПТ – 55 / Дехтярев В.С., Фролов Я.В., Бобух А.С. // Теория и практика металлургии – 2009. – №5–6. – С.64–66.
6. Попов М.В. Совершенствование процесса периодической прокатки труб / М.В. Попов, С.В. Атанасов, Ю.М. Беликов. – Днепропетровск: ООО Независимая издательская организация «Дива», 2008. – С. 192.

7. Расчет конструкции рабочей клетки стана холодной прокатки труб / Рахманов С.Р., Крышин С.М., Орещенко В.Ф., Вышинский В.Т., Журавлев А.В. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – №5. – С. 45–51.
8. Калашников Ю.Л. Разработка новой конструкции нажимного устройства рабочей клетки стана ХПТ с целью повышения качества катаных труб / Калашников Ю.Л., Крышин С.М., Орещенко В.Ф., Вышинский В.Т. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1995. – №1. – С. 61–63.
9. Алямовский А.А. *Инженерные расчёты в Solid Works Simulation*. – М.: БМК Пресс, 2010. – 464 с.
10. Цапко В.К., Толстикова Г.И., Ермократьев В.А., Жук Я.А. *Техника эксперимента и основы научных исследований металлургических машин и агрегатов УМК ВО* : Киев, 1989. – 138 с.
11. Пилипенко С.В. *Исследование изменения разностенности труб в ходе прокатки на стане ХПТ*. – URL: <http://www.metaljournal.com.ua/journal-mgp/archive /2015-Архив>. Дата обращения: 23.12.2015.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Grinshpun M.I. *Stany holodnoj prokatki trub* / M.I. Grinshpun, V.I. Sokolovskij. – *Mashinostroenie* : Moskva 1967 – 239 s.
2. Koff Z.A. *Holodnaja prokatka trub* / Z.A. Koff, P.M. Solovejchik. – *Gosudarstvennoe nauchno tehničeskoe izdatel'stvo literatury po chernoj i cvetnoj metallurgii Sverdlovskoe Otdelenie*: Sverdlovsk 1962. – 431s.
3. *Tehnologija trubnogo proizvodstva. Učebnik dlja vuzov* / V.N. Dančenko, A.P. Kolikov, B.A. Romancev, S.V. Samusev. – М.: *Internet-Inženiring*, 2002. – 640 s.
4. Frolov V.F. *Holodnaja prokatka trub : monografija* / V.F. Frolov, V.N. Dančenko, Ja.V. Frolov. – *Dnepropetrovsk : Porogi*, 2005 – 255 s.
5. Dehtjarev V.S. *Analiz uprugoj deformacii valka pri holodnoj pil'gernoj prokatki na stanah HPT* – 55 / Dehtjarev V.S., Frolov Ja.V., Bobuh A.S. // *Teorija i praktika metallurgii* – 2009. – №5–6. – S.64–66.
6. Popov M.V. *Sovershenstvovanie processa periodičeskoj prokatki trub* / M.V. Popov, S.V. Atanasov, Ju.M. Belikov. – *Dnepropetrovsk: OOO Nezavisimaja izdatel'skaja organizacija «Diva»*, 2008. – S. 192.
7. *Raschet konstrukcii rabochej kleti stana holodnoj prokatki trub* / Rahmanov S.R., Kryshin S.M., Oreshhenko V.F., Vyshinskij V.T., Zhuravlev A.V. // *Metallurgičeskaja i gornorudnaja promyšlennost'*. – 2013. – №5. – S. 45–51.
8. Kalashnikov Ju.L. *Razrabotka novoj konstrukcii nazhimnogo ustrojstva rabochej kleti stana HPT s cel'ju povyšeniya kachestva katanyh trub* / Kalashnikov Ju.L., Kryshin S.M., Oreshhenko V.F., Vyshinskij V.T. // *Metallurgičeskaja i gornorudnaja promyšlennost'*. – 1995. – №1. – S. 61–63.
9. Aljamovskij A.A. *Inženernye raschjoty v Solid Works Simulation*. – М.: БМК Пресс, 2010. – 464 с.
10. Capko V.K., Tolstikov G.I., Ermokrat'ev V.A., Zhuk Ja.A. *Tehnika jeksperimenta i osnovy nauchnyh issledovanij metallurgičeskijh mashin i agregatov UМК ВО* : Kiev, 1989. – 138 s.
11. Pilipenko S.V. *Issledovanie izmenenija raznostennosti trub v hode prokatki na stane HPT*. – URL: <http://www.metaljournal.com.ua/journal-mgp/archive /2015-Arhiv>. Data obrashhenija: 23.12.2015.

Рахманов С. Р. – доц. НМетАУ, Директор ООО «НПФ «Восток Плюс»  
Вышинский В. Т. – доц. НМетАУ, конструктор ООО «НПФ «Восток Плюс»  
Поворотный В. В. – ассист. НМетАУ, конструктор ООО «НПФ «Восток Плюс»

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: [npfvostok@mail.ru](mailto:npfvostok@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 09.02.2016 г.