

УДК 004.942+621.774.28

Хацкелян И.П.^а, Поворотный В.В.^б, Вышинский В.Т.^в, Рахманов С.Р.^в

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ КЛЕТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО СТАНА ТПА 350 С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

^а ООО «ИНТЕРПАЙП НИКО ТЬЮБ», г. Никополь, Украина^б Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина^в ООО НПФ «Восток-Плюс», г. Днепр, Украина

Наименее изученным среди динамических процессов, сопровождающих прокатку гильз на автоматическом стане, является поведение станины рабочей клетки, проявляющееся в виде её динамических смещений. Объяснить это можно тем, что на гильзу, взаимодействующую с валками и оправкой, воздействует стержневой механизм удержания оправки на оси прокатки. Возможность динамических смещений может быть также объяснена как проявлением износа опорных поверхностей, так и отклонений от регламентных состояний систем фиксации анкерными болтами. Это послужило обоснованием для выполнения экспертно-технического обследования состояния элементов станины рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 ООО «ИНТЕРПАЙП НИКО ТЬЮБ» методом магнитной памяти; осуществления ультразвукового контроля их металла; мониторинга пространственного положения рабочей клетки с регистрацией динамических смещений и углов отклонения её узлов и деталей; выполнения научно-исследовательской работы по определению напряженно-деформированного состояния основных элементов рабочей клетки при прокатке основных видов труб; контроля целостности анкерных стержней с выявлением недопустимых дефектов. Анализ результатов этого комплекса работ обосновал постановку задачи на разработку компьютерной модели рабочей клетки автоматического стана с целью её использования при проведении имитаций различных вариантов технологических и конструктивных нагружений для обоснования стратегии дальнейшей эксплуатации ТПА 350. Приведены результаты исследований 3D модели автоматического стана ТПА 350 в сопоставлении с результатами научно-исследовательской работы «Определение напряженно-деформированного состояния рабочей клетки ТПА 350». Так, было установлено, что в станине рабочей клетки возникают максимальные напряжения в зонах выявленных ранее трещин, места концентраций максимальных напряжений «мигрируют» при изменении условий закрепления станины.

Ключевые слова: агрегат для производства бесшовных горячекатаных труб, очаг деформации автоматического стана, станина рабочей клетки, механизмы удержания рабочей клетки, компьютерное моделирование, конечные элементы, концентраторы напряжений, сетка трёхмерной модели, условия закрепления опорных узлов, поля напряжений.

DOI: 10.32434/2521-6406-2019-6-2-83-90

Введение

Трубопрокатные агрегаты (ТПА) с автоматическим станом, предназначенные для производства бесшовных горячекатаных труб широкого ассортимента. Возможность быстрого пе-

рехода с производства одного вида труб на другой определяет высокую эффективность использования ТПА с автоматическим станом при прокатке малых партий труб. Наименее изученным среди динамических процессов, сопровождаю-

ших процесс прокатки гильз на автоматическом стане, является поведение станины рабочей клетки со всеми механизмами её удержания. Условия, формирующие специфические начальные условия технологического процесса, обуславливают сложное поведение рабочей клетки, проявляющиеся в виде её динамических смещений, возможность которых может быть объяснена не только проявлением износа опорных поверхностей, но и отклонений от регламентных состояний систем фиксации анкерными болтами. Это послужило обоснованием для выполнения мониторинга пространственного положения клетки в процессе эксплуатации с регистрацией динамических смещений и углов отклонения клетки автоматического стана ТПА 350 ООО «ИНТЕРПАЙП НИКО ТЬЮБ» [1]; комплексного экспертно-технического обследования её состояния; описания особенностей её функционирования [2]; научно-исследовательской работы по определению напряженно-деформированного состояния станин при прокатке основных видов труб [3]; постановки задачи на разработку модели клетки автоматического стана ТПА 350 с целью её применения для обоснования стратегии дальнейшей эксплуатации ТПА 350.

Анализ источников

Многочисленные результаты анализа разрушений базовых деталей тяжелых машин [4-7] показал, что эти разрушения не связаны со старением всего объема материала детали в процессе длительной эксплуатации. Причины разрушения в виде локальных зон, конструктивных и технологических концентраторов напряжений, существовали с самого начала эксплуатации и могли быть «заложены» в машину как заводом-изготовителем на стадиях проектирования, изготовления и монтажа, так и в процессе эксплуатации.

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

Исследование напряженно-деформированных состояний элементов конструкции рабочей клетки автоматического стана ТПА 350, обусловленных динамическими процессами при прокатке гильз.

Изложение основного материала исследования

В процессе создания 3D модели клетки автоматического стана ТПА 350 была использована не только техническая документация ООО «ИНТЕРПАЙП НИКО ТЬЮБ», но и результаты натурных обследований, позволивших выявить изменения, обусловленные 90-летним

периодом её эксплуатации. При создании сетки модели (рис. 1) особое внимание уделялось зонам конструктивных и технологических концентраторов напряжений, зонам возникновения трещин, проявившихся за предшествующий период эксплуатации и «залеченных» при выполнении ремонтных работ.

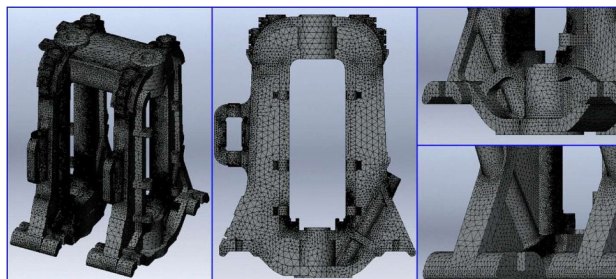


Рис. 1. Отображение сетки на трехмерной компьютерной модели станины автоматического стана ТПА 350

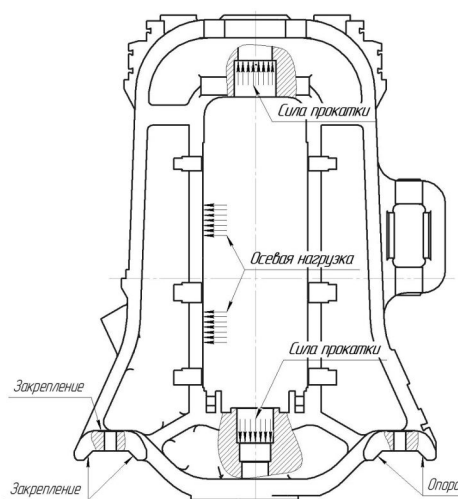


Рис. 2. Схема нагружения станины рабочей клетки автоматического стана ТПА 350

На результаты решений задач по определению напряженно-деформированного состояния объектов с использованием метода конечных элементов существенное влияние оказывает процесс формирования расчётной схемы (рис. 2), включающий выбор величин приложенных усилий, точек и направлений их приложения, указания характера распределения нагрузок, взаимосвязь исследуемого объекта с другими телами не участвующими в исследовании, но воздействующими на объект исследования. В совокупности вышеприведенные факторы являются отдельной наукоёмкой задачей. Усилия, дей-

ствующие на станину рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 можно условно разделить на два вида:

1. Статические силы, которые не зависят от режима прокатки и геометрических характеристик прокатываемых изделий.

2. Силы, возникающие в процессе прокатки, к которым относятся усилия прокатки, передаваемые нажимными винтами через гайки на соответственные части станины; силы взаимодействия подушек и передних стоек станины, в момент захвата заготовки валками.

При техническом обслуживании рабочей клетки в период проведения научно-исследовательской работы по определению напряженно-деформированного состояния при прокатке основных видов труб установлено, что условия закрепления переднего левого и заднего правого опорных узлов клетки не соответствовали установочным требованиям. На передней левой опоре величина усилия затяжки была ниже значения, регламентируемого нормативными документами; на задней правой опоре наблюдалось отсутствие усилия затяжки. Результаты решений при различных комбинациях затяжки болтов опорных узлов станины, кардинально отличались друг от друга. Следует отметить, что количество возможных вариантов закрепления станины по критериям «болт затянут», «болт отпущен» для данной клетки составляет 40320 вариантов. Из этого следует, что ввиду большого разброса вариантов закрепления станины клетки, целесообразно проводить периодические проверки значений усилий затяжки болтов.

В процессе исследования в рамках научно-исследовательской работы проводились замеры

напряжений, возникающие в станине автоматического стана ТПА 350 при прокате двух пакетов труб: 324×8,3 и 324×7,2 из материала Сталь 20. Напряжения замерялись в различных зонах станины (верхних углах рам, на передних и задних стойках, в районе задних лап станины). На рис. 3 представлены схемы закрепления «розеток» (систем из трёх тензодатчиков) на станине автоматического стана ТПА 350. Также были произведены замеры усилий на верхних нажимных винтах. Величины усилий на нажимных винтах представлены в табл. 1.

Таблица 1

Величины усилий при прокате на нажимных винтах

	Величины усилий воздействия подушек на винты нажимных устройств, кН	
	Винт левой полустанины	Винт правой полустанины
Труба 324×8,3	340	966
Труба 324×7,2	392	1094

При исследованиях напряженно-деформированных состояний были выполнены замеры главных и эквивалентных напряжений в зонах трехмерных моделей, соответствующих местам крепления датчиков на станине. Сопоставление результатов, полученных с использованием метода конечных элементов и научно-исследовательской работы, представлены в табл. 2 и 3.

Анализируя данные, приведенные в таблицах 2 и 3, можно сделать следующие выводы:

1. Величины напряжений, полученные в местах крепления «розеток», не превышают значения 6 МПа. Данные напряжения являют-

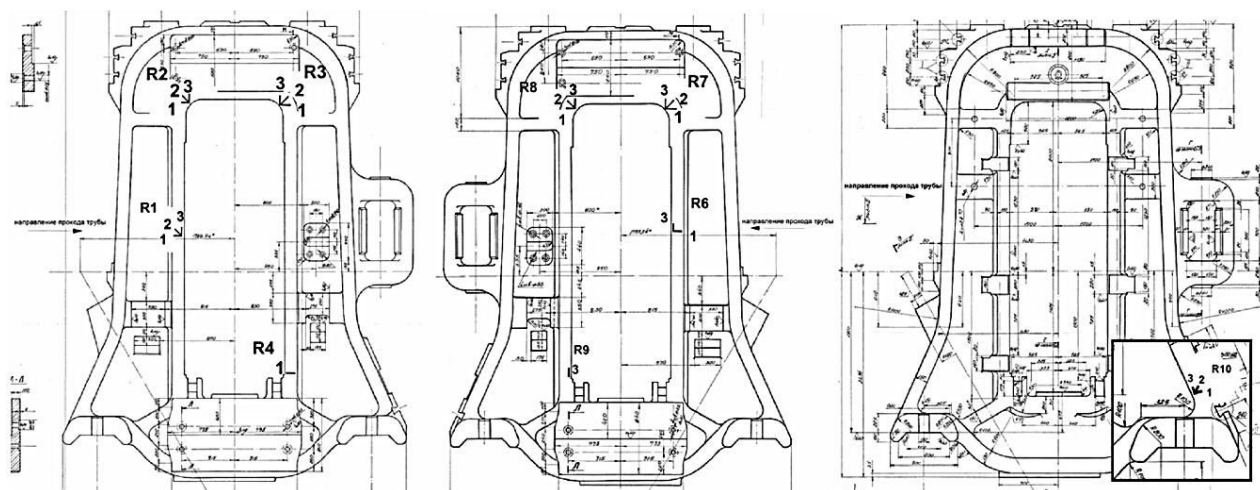


Рис. 3. Расположение «розеток» на станине автоматического стана ТПА 350 при проведении научно-исследовательской работы по определению напряженно-деформированного состояния станин при прокатке основных видов труб

Таблица 2

Данные при прокатке трубы 324x8,3 (силы прокатки: левая станина – 340 кН; правая станина – 966 кН)
(результаты при имитации идеального закрепления станины)

Метод исследований	Вид напряжений	Значения напряжений в зонах крепления «розеток», МПа					
		1	2	3	7	8	10
Результаты исследований тензометрическим методом	Первое главное напряжение	0,28	0,66	4,68	1,36	0,54	-0,81
	Третье главное напряжение	-0,13	-2,02	0,63	-0,63	-1,27	-3,48
	Эквивалентное напряжение	0,41	2,68	4,05	1,99	1,81	2,67
Исследование трехмерной модели методом конечных элементов	Эквивалентное напряжение	0,70	1,15	2,40	1,60	1,70	2,46
	Первое главное напряжение	0,60	0,65	2,70	2,80	4,60	1,50
	Третье главное напряжение	-0,10	-0,43	-0,12	-0,02	-0,05	-0,88

Таблица 3

Данные при прокатке трубы 324x8,3 (силы прокатки: левая станина – 340 кН; правая станина – 966 кН)
(условия закрепления переднего левого и заднего правого опорных узлов клетки не соответствовали установочным требованиям)

Метод исследований	Вид напряжений	Значения напряжений в зонах крепления систем тензодатчиков, МПа					
		1	2	3	7	8	10
Результаты исследований тензометрическим методом	Первое главное напряжение	0,28	0,66	4,68	1,36	0,54	-0,81
	Третье главное напряжение	-0,13	-2,02	0,63	-0,63	-1,27	-3,48
	Эквивалентное напряжение	0,41	2,68	4,05	1,99	1,81	2,67
Исследование трехмерной модели методом конечных элементов	Эквивалентное напряжение	0,65	0,86	2,30	2,65	4,50	2,10
	Первое главное напряжение	0,60	0,46	2,38	2,60	4,60	1,97
	Третье главное напряжение	-0,02	-0,40	0	0	-0,01	-0,12

ся незначительными и не несут угрозы разрушения станины в приведенных местах.

2. Величины напряжений, полученные при изменении условий закрепления станины, отличаются по своей величине и в некоторых случаях далеки по своей величине от реальных напряжений. Данное явление подтверждает гипотезу о том, что величины и места концентраций напряжений напрямую зависят от условий закрепления станины.

3. Сравнивая величины напряжений, полученных с использованием метода конечных элементов при прокате двух пакетов труб, наблюдается следующая закономерность: при повышении усилия прокатки, увеличивается величина напряжений, возникающих в конструкции станины. При анализе результатов исследования напряженно-деформированного состояния станины с использованием тензометрического метода, наблюдается отсутствие закономерного увеличения напряжений при увеличении энергосиловых параметров прокатки. Данное явление свидетельствует о том, что в процессе прокатки рабочая клеть дополнительно испытывает предварительно напряженное состояние, изменяющееся после каждого прохода трубы. В

данном случае это может быть связано с возможностью совершать произвольные перемещения при неправильном закреплении клетки.

При исследовании напряженно-деформированного состояния трехмерной модели методом конечных элементов рассматривались как наблюдаемые варианты нагружения станины, так и их возможные варианты. Среди наблюдаемых вариантов рассматривался наиболее часто реализуемый вариант процесса прокатки трубы 324x7,2 в крайнем правом калибре (данную трубу катают в правом калибре более 70-ти лет) как в период установившегося процесса, так и в момент захвата заготовки. Также рассматривался возможный вариант проката трубы 324x7,2 в крайнем левом калибре клетки.

За почти 90-летний период эксплуатации клетки в теле станины могли накопиться повреждения, приводящие к разрушению конструкции. Явления накопления повреждений усугубляются наличием динамических нагрузок, возникающих в результате захвата заготовки, проявлением зазоров в линии привода автоматического стана, зазоров в элементах конструкции станины. Из анализа картин формирования напряженных состояний во время захватов гильз и

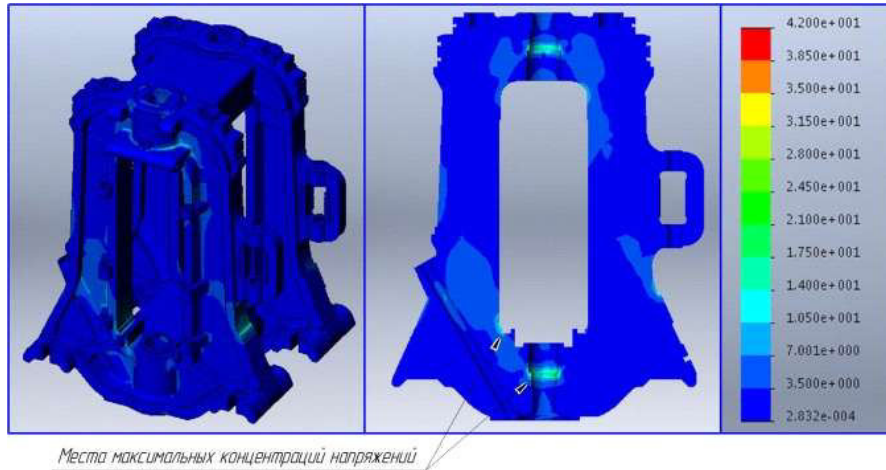


Рис. 4. Поля напряжений, возникающие в станине во время прокатки трубы 324×7,2 из стали Ст. 20 в правом калибре

Таблица 4

Максимальные напряжения, возникающие в станине автоматического стана ТПА 350 при прокате трубы из стали 12Х18Н10Т

Место концентрации максимальных напряжений в правой полустанине	Значения напряжений, МПа				
	Главные			Эквивалентные	
	σ_1	σ_2	σ_3	σ_{III}	σ_{IV}
Установившийся процесс					
Место установки гайки нижнего нажимного винта	30	30,5	88	58	79
Зона образования трещины	77,1	25,0	20,0	57,1	56,0
Момент захвата заготовки					
Место установки гайки нижнего нажимного винта	110	113	323	213	296
Зона образования трещины	273	88	70	203	207

стационарных периодов прокатки следует, что коэффициент динамичности может достигать 3, что губительно сказывается на её прочности. Этот результат согласуется с данными других исследователей [8,9].

На рис. 4 представлены поля эквивалентных напряжений, возникающие в станине рабочей клетки автоматического стана ТПА 350, а также в плоскости симметрии правой полустанины при прокате трубы 324×7,2 из стали Ст. 20. Результаты исследований показывают, что максимальные напряжения возникают в местах контакта гайки нажимного устройства и тела станины, а также в нижнем углу рамы правой полустанины.

Наряду с исследованием напряженно-деформированного состояния станины автоматического стана ТПА 350, при прокате трубы 324×7,2 из стали Ст. 20, выполнены исследования напряженно-деформированного состояния станины при прокате труб из труднодеформируемых сплавов. Результаты исследований напряженно-деформированного состояния стани-

ны автоматического стана ТПА 350, представленные в виде максимальных напряжений, возникающих в станине при прокате трубы из стали 12Х18Н10Т, отображенные в таблице 4, свидетельствуют о превышении предела текучести на кратковременный срок (в пределах 0,1 секунды) в момент захвата заготовки. Данное обуславливает наличие процесса накопления повреждений, что в дальнейшем создает предпосылки образования трещин в конструкции станины.

За время эксплуатации станины автоматического стана ТПА 350 в её конструкции возникали трещины, которые устранялись при ремонтах. На рис. 5 представлены поля напряженно-деформированного состояния зоны, в которой возникла трещина, имитация которой формировалась по геометрическим характеристикам реальной трещины.

Сравнение результатов исследований методом конечных элементов и обследования станины автоматического стана ТПА 350 методом ультразвукового контроля [1] свидетельствуют о соответствии мест концентрации напряжений

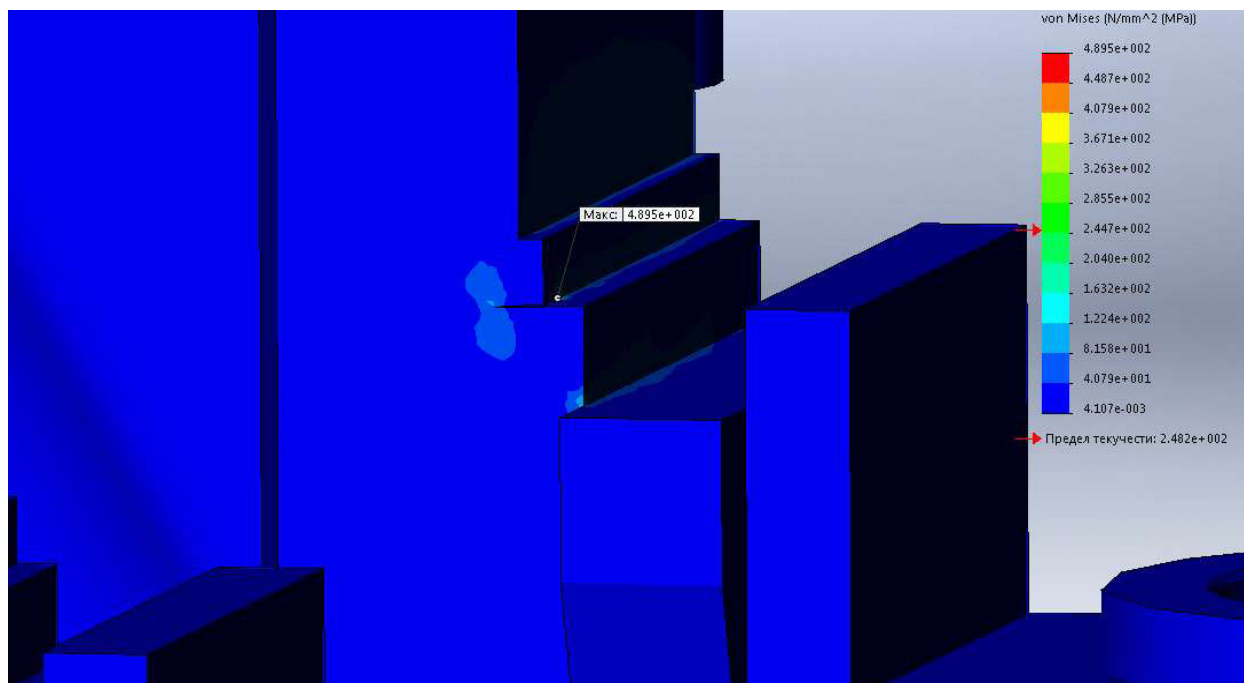


Рис. 5. Поля эквивалентных напряжений в зоне имитированной трещины, возникающие в станине рабочей клетки автоматического стана ТПА 350 при прокатке трубы из стали 12Х18Н10Т в правом калибре

местам возникновения неоднородностей в теле станины.

Выводы

Опираясь на результаты исследований напряженно-деформированного состояния станины автоматического стана ТПА 350 можно установить:

1. В процессе прокатки трубы в автоматическом стане, в станине рабочей клетки возникают максимальные напряжения в зонах выявленных ранее трещин, а также в месте контакта гаек нажимного устройства с телом станины. При этом, напряжения, возникающие в теле станины в среднем не превышают величины в 10 МПа, что подтверждает наличие 8-10 кратного запаса прочности, устанавливаемого при проектировании в начале прошлого века. Критическими напряжения, обусловленные высоким уровнем динамичности, становятся в момент захвата заготовки рабочими валками.

2. В процессе исследования напряженно-деформированного состояния станины автоматического стана ТПА 350 было установлено, что места концентраций максимальных напряжений «мигрируют» при изменении условий закрепления станины. Было установлено, что при несоответствии условий закрепления станины условиям, указанным в технической документации, максимальные касательные напряжения возник-

ают в задних лапах станины, тем самым приводя к образованию неоднородности металла на определенной глубине в теле станины.

3. Результаты исследований напряженно-деформированного состояния станины автоматического стана ТПА 350 показали, что при прокате трубы из трудно деформируемых сплавов (например, стали из сплава 12Х18Н10Т), напряжения, возникающие в станине при установившемся процессе, не несут угрозы разрушения станины, чего нельзя сказать о фазе захвата заготовки рабочими валками.

4. Опираясь лишь на исследование напряженно-деформированного состояния станины автоматического стана ТПА 350 нельзя однозначно сказать о допустимых величинах усилий прокатки, а также прогнозировать срок службы станины и вероятность её разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Технический* отчёт мониторинга пространственного положения клетки в процессе эксплуатации с регистрацией динамических смещений и углов отклонения клетки автоматического стана ТПА 350. – Никополь, 2018. – 287 с.
2. *Рахманов С.Р., Вышинский В.Т., Пача С.В.* Особенности функционирования рабочей клетки автоматического стана трубопрокатного агрегата // Компьютерное моделирование

ня: аналіз, управління, оптимізація. – 2018. – № 2 (4). – С.65-72. <https://doi.org/10.32434/2521-6406-2018-4-2-65-72>.

3. *Отчёт по научно-исследовательской работе «Определение напряженно-деформированного состояния рабочей клетки ТПА 350 (автоматический стан)».* – Днепр, 2019. – 26 с.

4. *Морозов Б.А.* Моделирование и прочность металлургических машин. – М.: Машгиз, 1963. – 284 с.

5. *Васильев В.В.* Исследование напряжений в угловых элементах несущих деталей прокатных станов и прессов: диссерт. канд. техн. наук: 05.02.09. – Москва, ВНИИМЕТМАШ, 1962. – 115 с.

6. Комплексное изучение условий нагружения и напряженного состояния станины блюминга 1100 КМК / Морозов Б.А., Софронов Е.И., Сурков А.И., Коновалов Л.В., Кузнецов Б.Г. // Труды первой всес.конфер. по расчетам на прочность металлургических машин, Сб., ВНИИМЕТМАШ. – № 24. – Москва, 1969. – С.3-16.

7. *Shlomchak G.G., Mamuzich I., Vodopivec F.* Optical modeling of non-stationary rolling process // Materials science and technology. – № 3. – 1995. – P.312-316. Access mode: <https://doi.org/10.1179/mst.1995.11.3.312>.

8. *Зиомковский В.М.* Совершенствование конструкции автоматстанов ТПА-140 и ТПА-220 на основе моделирования динамики привода: диссерт. канд. техн. наук: 05.02.09. – Екатеринбург, ФГАОУВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012. – 169 с.

9. *Єрмокрацьєв В.О., Кононов Д.О.* Дослідження динаміки головної силової лінії автоматичного стану ТПА-350 / *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2018. – № 7. – С.133-138.

Поступила в редакцию 06.11.2019

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РОБОЧОЇ КЛІТИ АВТОМАТИЧНОГО СТАНУ ТПА 350 ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Хацькелян І.П., Поворотній В.В., Вишинський В.Т., Рахманов С.Р.

Найменш вивченою серед динамічних процесів, які супроводжують прокатку гільз на автоматичному стані, є поведінка станини робочої кліти, що виявляється у вигляді її динамічних зсувів. Пояснити це можна тим, що на гільзу, що взаємодіє з валками і оправкою, впливає стержневий механізм утримання оправки на осі прокатки. Можливість динамічних зсувів може бути також пояснена як проявом зносу опорних поверхонь, так і відхиленнь від регламентних станів систем фіксації анкерними болтами. Це слугувало обґрунтуванням для виконання експертно-технічного обстеження стану елементів станини робочої кліти автоматичного стану ТПА 350 ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТБЮБ» методом магнітної пам'яті; здійснення ультразвукового контролю їх металу; моніторингу просторового положення робочої кліти з реєстрацією динамічних зсувів і кутів відхилення її вузлів і деталей; виконання науково-дослідницької роботи з визначення напружено-дефор-

мованого стану основних елементів робочої кліти під час прокатки основних видів труб; контролю цілісності анкерних стержнів з виявленням неприпустимих дефектів. Аналіз результатів цього комплексу робіт обґрунтував постановку задачі на розробку комп'ютерної моделі робочої кліти автоматичного стану з метою її використання при здійсненні імітацій різних варіантів технологічних і конструктивних навантажень для обґрунтування стратегії подальшої експлуатації ТПА 350. Наведено результати досліджень 3D моделі автоматичного стану ТПА 350 в зіставленні з результатами науково-дослідної роботи «Визначення напружено-деформованого стану робочої кліти ТПА 350». Так, було встановлено, що в станині робочої кліти виникають максимальні напруження в зонах виявлених раніше тріщин, місця концентрацій максимальних напружень «мігрують» при зміні умов закріплення станини.

Ключові слова: агрегат для виробництва безшовних гарячекатаних труб, вогнище деформації автоматичного стану, станина робочої кліти, механізми утримання робочої кліти, комп'ютерне моделювання, кінцеві елементи, концентратори напружень, сітка тривимірної моделі, умови закріплення опорних вузлів, поля напружень.

THE STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE WORKING STAND OF THE AUTOMATIC MILL TPA 350 USING INFORMATION TECHNOLOGY

Khatskelyan I.P.^a, Povorotny V.V.^b, Vishinskiy V.T.^c, Rakhmanov S.R.^c

^a LLC Interpipe Nico Tube, Nikopol, Ukraine

^b National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

^c Research and Production Company «Vostok-Plus», Dnipro, Ukraine

The least studied among the dynamic processes accompanying the rolling of sleeves on an automatic mill is the behavior of the bed of the working stand, manifested in the form of its dynamic displacements. This can be explained by the fact that the core mechanism for holding the mandrel on the rolling axis acts on the sleeve interacting with the rollers and the mandrel. This served as the basis for the expert-technical examination of the state of elements of the bed of the working stand of the automatic mill TPA 350 LLC INTERPIPE NIKO TUBE using magnetic memory; carry out ultrasonic testing of their metal; monitoring the spatial position of the working stand with registration of dynamic displacements and deviation angles of its nodes and parts; carrying out research work to determine the stress-strain state of the main elements of the working stand during rolling of the main types of pipes; integrity control of anchor rods with the identification of unacceptable defects. An analysis of the results of this set of works substantiated the statement of the problem for the development of a computer model of the working stand of an automatic mill for the purpose of its use in simulating various technological and structural loads to justify the strategy for the further operation of TPA 350. The results of studies of the 3D model of the automatic TPA 350 mill are presented in comparison with the results of the research work «Determination of the stress-strain state of the working stand of TPA 350». So, it was found that in the bed of the working stand maximum stresses arise in the zones of previously identified cracks, the places of concentration of maximum stresses «migrate» when the conditions for fixing the bed change.

Keywords: unit for the production of seamless hot-rolled pipes, deformation zone of the automatic mill, bed of the working stand, mechanisms for holding the working stand, computer simulation, finite elements, stress concentrators, three-dimensional model mesh, conditions for fixing the support nodes, stress fields.

REFERENCES

1. *Tekhnicheskij otchjot monitoringa prostranstvennogo polozhenija kleti v processe jekspluatatsii s registraciej dinamičeskikh smeshhenij i uglov otklonenija kleti avtomatstana TPA 350* [Technical report of monitoring the spatial position of the stand during operation with registration of dynamic displacements and deviation angles of the stand of automatic machine TPA 350]. Nikopol', 2018, 287 p. (in Russian).
2. Rakhmanov S.R., Vyshynskiy V.T., Pacha S.V. *Osobnosti funkcionirovanija rabochej kleti avtomatičeskogo stana truboprolatnogo agregata* [Features of functioning of the working stand of the automatic mill in the pipe-rolling unit]. *Komp'juterne modeluvannâ: analiz, upravlinnâ, optimizaciâ* [Computer Modeling: Analysis, Control, Optimization], 2018, no 2 (4), pp.65-72. <https://doi.org/10.32434/2521-6406-2018-4-2-65-72>. (in Russian).
3. *Otchjot po nauchno-issledovatel'skoj rabote «Opređenje naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija rabochej kleti TPA 350 (avtomatičeskij stan)»* [Report on research work «Determination of the stress-strain state of the working stand TPA 350 (automatic mill)»]. Dnepr, 2019, 26 p. (in Russian).
4. Morozov B.A. *Modelirovanie i prochnost' metallurgičeskikh mashin* [Modeling and strength of metallurgical machines]. Moscow, Mashgiz, 1963, 284 p. (in Russian).
5. Vasil'ev V.V. *Issledovanie naprjazhenij v uglovyh jelementah nesushhih detalej prokatnyh stanov i pressov* [The study of stresses in the corner elements of the bearing parts of rolling mills and presses]. Dissert. kand. tehn. nauk, 05.02.09, Moscow, VNIIMETMASH, 1962, 115 p. (in Russian).
6. Morozov B.A., Sofronov E.I., Surkov A.I., Konovalov L.V., Kuznecov B.G. *Kompleksnoe izučenie uslovij nagruženija i naprjazhennogo sostojanija staniny bljuminga 1100 KMK* [Comprehensive study of loading conditions and stress state of the blooming bed 1100 KMK]. *Trudy pervoj vses.konfer. po raschetam na prochnost' metallurgičeskikh mashin* [Proceedings of the first All-Union Conference on Strength Analysis of Metallurgical Machines], Sb. VNIIMETMASH, Moscow, 1969, no. 24, pp.3-16. (in Russian).
7. Shlomchak G.G., Mamuzich I., Vodopivec F. Optical modeling of non-stationary rolling process. *Materials science and technology*, 1995, no. 3, pp.312-316. <https://doi.org/10.1179/mst.1995.11.3.312>.
8. Ziomkovskij V.M. *Sovershenstvovanie konstrukcii avtomatstanov TPA-140 i TPA-220 na osnove modelirovanija dinamiki privoda* [Improving the design of automatic machines TPA-140 and TPA-220 based on simulation of drive dynamics]. Dissert. kand. tehn. nauk, 05.02.09, Ekaterinburg, FGOUVO «Ural'skij federal'nyj universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'cina». 2012, 169 p.
9. Ermokrat'ev V.O., Kononov D.O. *Doslidžennja dinamiki golovnoï silovoï linii avtomatičeskogo stana TPA-350* [Investigation of the dynamics of the main power line of the automatic mill TPA-350] *Metallurgičeskaja i gornorudnaja promyšlennost'* [Metallurgical and mining industry]. 2018, no. 7, pp.133-138.