Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт

Факультет материаловедения и металлургических технологий
Кафедра процессов и машин обработки металлов давлением

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент

_____ /Черных И.Н. /

_____ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой

_____ /Радионова Л.В./

_____ 2020 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ ДЕФЕКТОВ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКЕ В ЛИНИИ ТПА-140 ПАО «СИНАРСКИЙ ТРУБНЫЙ ЗАВОД»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ МАГИСТРА

ЮУрГУ – 22.04.02 – 2020 – 159 – 00.00.00 ПЗ

Нормоконтролер

_____ *к.т.н., доцент*

Радионова Людмила Владимировна
_____ 2020 г.

Руководитель работы

_____ *к.т.н., доцент*

Радионова Людмила Владимировна
_____ 2020 г.

Автор работы
студент группы *П-238*
_____

Геймм Евгений Александрович

__ _____ 2020 г.

Челябинск
2020

АННОТАЦИЯ

Гейм Е.А. Исследование образования и трансформации дефектов при продольной прокатке в линии ТПА-140 ПАО «Синарский Трубный Завод». – Челябинск: ЮУрГУ, ПИ, МиМТ, 2020. – 64 с., 36 ил., 12 табл., библиогр. список – 10 наим.

Появление дефектов на поверхности труб обусловлено как технологией получения труб в станах линии ТПА, так и наличием дефектов на поверхности исходной заготовки. При этом в процессе прокатки изменяется внешний вид, геометрические характеристики дефектов заготовки – происходит трансформация дефектов.

В зависимости от комбинации технологических параметров, в частности, при раскатке гильз в станах продольной оправочной прокатки исходная глубина изменяется с разной интенсивностью, что предопределяет наличие их на поверхности готовых труб. Изучение механизмов трансформации дефектов является актуальной задачей исследования.

В данной работе, приводится результат комплексного подхода к анализу технологии прокатки труб в линии ТПА-140. В частности, приведен анализ штатной технологии определения дефектов и причин их возникновения в линии ТПА.

На основе проведенного статистического анализа качества труб определены массовые виды дефектов наружной поверхности труб, показаны статистические закономерности изменения доли исправимой продукции по данным дефектам от технологических факторов прокатки.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 5
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ АНАЛИЗ 7
1.1 Определение наиболее массовых видов дефектов в линии ТПА-140 ... 7
1.2 Литературный анализ массовых видов несоответствий..... 10
1.2.1 Наружная плена 11
1.2.2 Закат 12
1.2.3 Раковина вдав по телу 13
1.3 Анализ протоколов исследования качества поверхности образцов 14
2. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ ТРУБ 19
2.1 Анализ технологии прокатки труб в линии ТПА-140 ПАО «СинТЗ» с точки зрения возникновений РВН, ПТН, ЗкН 19
2.2 Мероприятия, способствующие сокращению количества несоответствий поверхности..... 20
2.3 Причины возникновения несоответствий поверхности 21
2.4 Обработка статистической информации по несоответствиям поверхности 26
2.4.1 Результаты обработки статистической информации за период не менее года для линии ТПА-140 27
3. ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОКАТОК И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ 33
3.1 Подготовка к проведению опытно-промышленных прокаток 33
3.2 Анализ изменения формы дефектов..... 34
3.3 Трансформация дефектов в прошивном стане 35
3.4 Трансформация дефектов в СПП-1 37
3.5 Трансформация дефектов в СПП-2 39
3.6 Трансформация дефектов в обкатном стане..... 41
3.7 Трансформация дефектов в редукционном стане 43
3.8 Анализ влияния технологических факторов прокатки на изменение размеров и расположения дефектов по длине трубы 45

3.9 Общий анализ трансформации искусственно нанесенных дефектов .. 48
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ГЛУБИНОЙ ЗАЛЕГАНИЯ И ПРИЧИНОЙ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННЫХ ТРУБАХ С ПРОКАТА ТПА-140 51
4.1 Исходные данные для моделирования 51
4.2 Схема нанесения контрольных точек 53
4.3 Сопоставление данных опытно-промышленных прокаток и компьютерного моделирования 54
4.4 Установление зависимостей между изменением глубины залегания дефектов и параметрами процесса прокатки на основании компьютерного моделирования 57
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 61
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 63

ВВЕДЕНИЕ

Требования современных российских и зарубежных стандартов ужесточаются в части регламентирования допускаемой глубины дефектов на поверхности готовых труб.

При наличии дефектов повышается риск возникновения брака при производстве труб, отнесения труб к категории попутной, снижается производительность процесса прокатки труб на трубопрокатных агрегатах. В то же время требования к качеству поверхности исходных горячедеформированных или непрерывнолитых заготовок допускают наличие дефектов на поверхности, обусловленных производством. В связи с этим необходимо совершенствование технологии производства труб, направленное на уменьшение глубины этих дефектов до допустимых значений и предотвращение появления дефектов.

Режимы горячей прокатки бесшовных труб в отдельных станах ТПА могут способствовать появлению дефектов, но также уменьшению глубины дефектов заготовки. В выпускной квалификационной работе приводятся результаты применения комплексного подхода к изучению процессов трансформации дефектов заготовки при прокатке в станах продольной прокатки линии ТПА-140. Более подробно изучена трансформация дефектов при раскате гильз в станах продольной прокатки линии ТПА-140.

На основе статистического анализа качества труб определены виды дефектов наружной поверхности труб, характерные для данной технологии. Изучены и уточнены причины возникновения дефектов наружной поверхности вида раковина-вдав, плена трубопрокатная, закат. В зависимости от вида дефекта при производственных испытаниях уточнено место их возникновения в линии ТПА. Изучены механизмы формирования данных дефектов из дефектов исходной заготовки. С привлечением методов компьютерного моделирования исследовано влияние технологических параметров продольной оправочной прокатки на изменение геометрических характеристик дефектов различной формы и исходной глубины.

Предложены формулы для расчёта уменьшения глубины дефектов в процессе прокатки в станах продольной прокатки. Формулы могут быть применены для расчёта допускаемой глубины дефектов на поверхности гильзы, являющейся заготовкой при раскатке в станах продольной прокатки в линии ТПА-140.

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ АНАЛИЗ

1.1 Определение наиболее массовых видов дефектов в линии ТПА-140

При производстве горячекатаных бесшовных труб в линии ТПА-140 ПАО «СинТЗ» на поверхности труб в ряде случаев обнаруживаются дефекты. Продукция с возможностью ремонта этих дефектов (несоответствий) относится к категории исправимой (ИП).

Проведение ремонта труб сопровождается увеличением трудозатрат на производство трубной продукции, увеличением расходного коэффициента металла, увеличением времени на выполнение заказа и прочее. При этом часть продукции ремонту не подлежит.

В данных условиях (с целью внесения корректировок в процесс производства) актуальным становится выявление операции производства труб на ТПА, при которой образуется то или иное несоответствие. Из практики трубного производства известно, что во многих случаях по виду несоответствия, характеру его расположения и глубине залегания по толщине стенки на готовой трубе можно определить этап производства, на котором образовалось несоответствие, а также причину его образования.

На основе фактической информации, предоставленной ПАО «СинТЗ», определены наиболее массовые виды несоответствий труб, произведённых в линии ТПА-140 в цехе Т-2.

Всего предоставлено данных по 24 видам несоответствий, наблюдаемых на трубах.

В соответствии с [1] виды дефектов трубного производства по «природным признакам» можно разделить на 3 группы: дефекты поверхности (наружной и внутренней); дефекты формы; дефекты сталеплавильного происхождения. На рисунке 1 также указана группа «прочие дефекты», в эту группу вошли виды несоответствий, по своим признакам не удовлетворяющие указанной классификации.

Рисунок 1. Группы дефектов труб, произведённых в линии ТПА-140

Доля каждой группы дефектов трубной продукции, произведённой в линии ТПА-140.

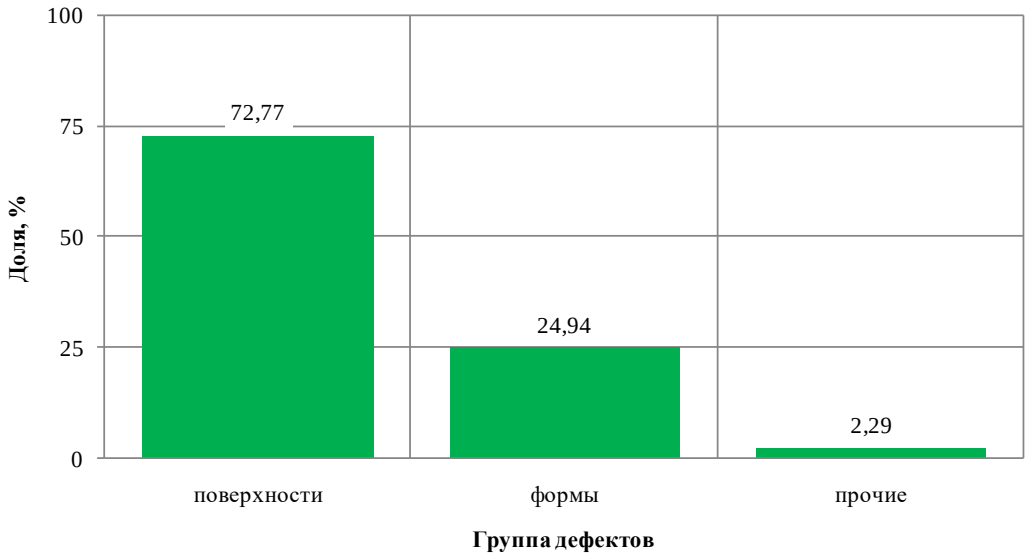


Рисунок 2. Доля различных групп дефектов трубной продукции в общем количестве ИП

Видно, что основная доля ИП труб, произведённых в линии ТПА-140 приходится на группу дефектов поверхности.

Доля каждого вида несоответствия, вносимая в общее количество ИП, показана на рисунке 3.

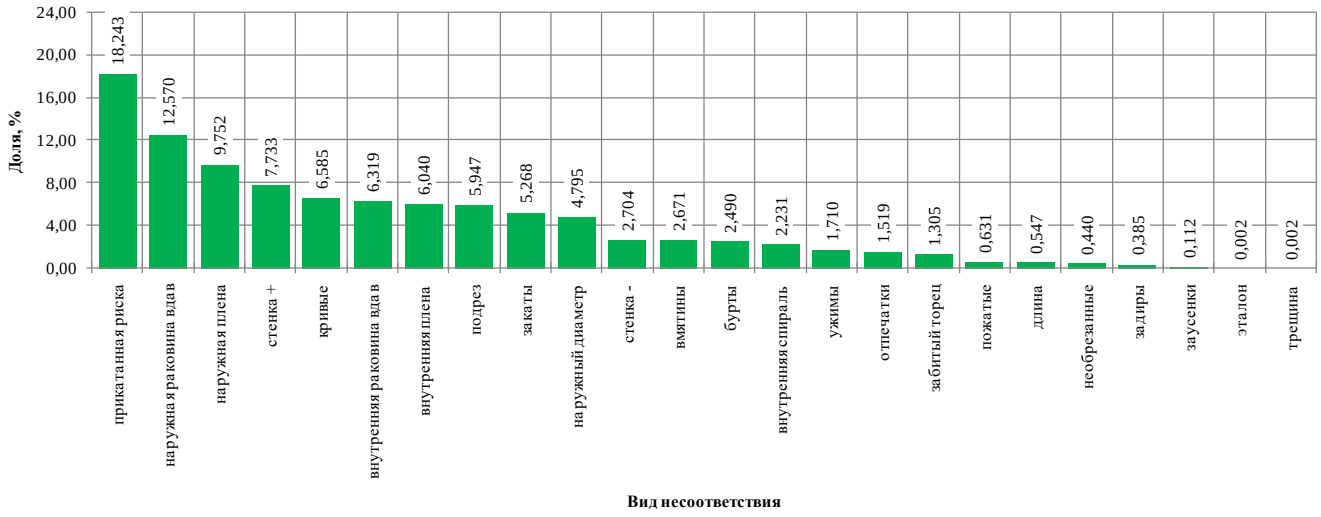


Рисунок 3. К определению наиболее массовых видов несоответствий

Наиболее массовыми видами несоответствий наружной поверхности труб являются: «наружная раковина вдав», «наружная плена», «закат».

Наибольшее количество ИП по выявленным массовым несоответствиям наблюдается при производстве в линии ТПА-140 на следующих трубах по назначению:

- «наружная раковина вдав»: бурильные трубы – 1,42%; насосно-компрессорные и обсадные трубы – 0,77% и 0,74% соответственно;

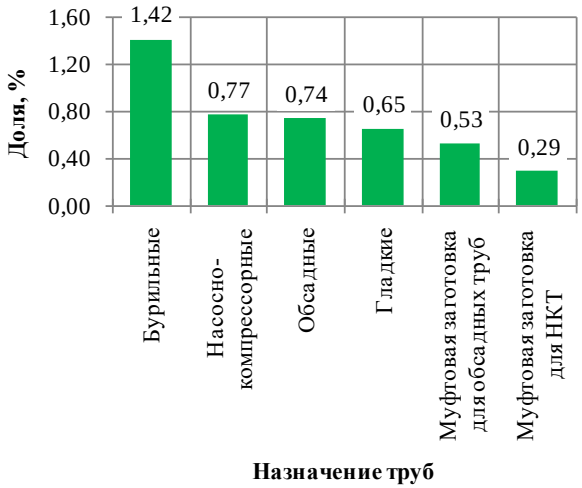


Рисунок 4. Доля труб различного назначения в общем количестве ИП по несоответствию вида «наружная раковина вдав»

- «закат»: гладкие трубы – 0,36%; насосно-компрессорные трубы – 0,33%; муфтовая заготовка для обсадных труб и насосно-компрессорные трубы – 0,13% и 0,4%, бурильные трубы 0,01%;

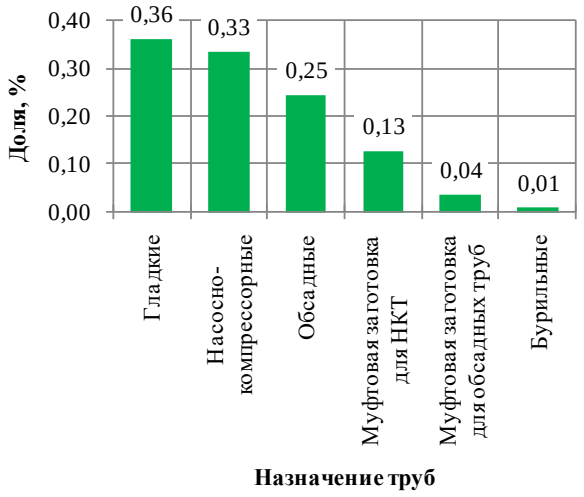


Рисунок 5. Доля труб различного назначения в общем количестве ИП по несоответствию вида «закаты»

- «наружная плена» (рисунок 6): обсадные трубы – 0,82%; насосно-компрессорные трубы – 0,52%; гладкие трубы – 0,38%.

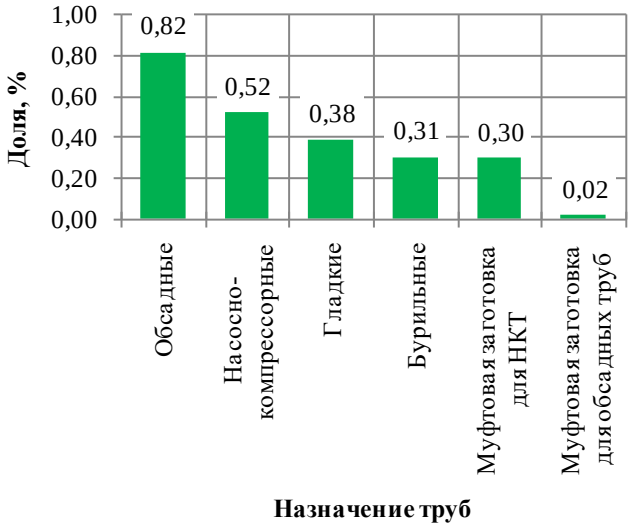


Рисунок 6. Доля труб различного назначения в общем количестве ИП по несоответствию вида «наружная плена»

По выявленным массовым видам несоответствий наибольшую долю в формирование ИП вносят следующие трубы по назначению: обсадные и бурильные.

1.2 Литературный анализ массовых видов несоответствий

Анализ по критериям причины образования, характера расположения несоответствия и возможному этапу производства труб, при котором

возникает несоответствие, проведён на основе информации, имеющейся в литературных источниках [1-2].

В [1-2] рассматриваемые виды несоответствий определяются как дефекты.

1.2.1 Наружная плена

Другие определения:

[1]: «Трубопрокатная плена»;

[2]: «Плена трубопрокатная наружная»;

[3]: «Раковины».

Причина образования, характер расположения, этап производства труб:

[1]: «Раскатывание дефектов отпечатков валков трубопрокатного стана, печного оборудования, продиров (задиров), рябизны, царапин, образовавшихся на более ранней стадии деформации труб»;

«Плёны по раскатанным отпечаткам представляют поперечные языкообразные или продольные отслоения и периодически повторяются по длине трубы через кратные промежутки. Плёны по раскатанным продирам (задирам) и царапинам имеют произвольное расположение. Плёны по раскатанной грубой рябизне – групповые, имеют вид разориентированной чешуи».

[2]: «Плена трубопрокатная наружная образуется при работе на изношенных валках и линейках, раскатывании отпечатков от прокатного инструмента, задиров, рябизны, царапин, уса, образовавшихся на более ранних стадиях деформации трубы»;

«Плена трубопрокатная наружная может иметь продольную или поперечную ориентацию, может повторяться по длине трубы через равные промежутки, может быть единичным или групповым, в этом случае представляет собой множественные отслоения металла в виде чешуи, образующиеся по раскатанной рябизне».

[3]: «Плохая поверхность исходных заготовок (наличие трещин)»;

«Изношенный инструмент стана поперечно-винтовой прокатки. Из-за скручивания материала при поперечно-винтовой прокатке располагаются по спирали на поверхности трубы»;

«Дефекты на поверхности трубных заготовок могут также раскатываться в трубопрокатных станах с образованием раковин».

Проведённый анализ справочной информации [1-2] по несоответствию (дефекту в [1-2]) вида «наружная плена» позволил сформулировать следующие выводы:

- этап производства труб: несоответствие может образовываться на всех этапах горячего передела.
- «наружная плена» может образовываться из несоответствий, возникших на предыдущих операциях получения трубы, в том числе из несоответствий, полученных при прошивке [3].

1.2.2 Закат

Описание, характер расположения: продольное отслоение металла, плотно прилегающее к поверхности трубы. Для прокатки в НРС характерно расположение дефектов через равные промежутки по длине окружности раската (180° - для 2-валковой клети; 120° - для 3-валковой клети). Дефект может быть также единичным, может быть непрерывным и периодически повторяющимся.

Металлографические признаки: полость дефекта расположена под углом к поверхности трубы, заполнена окалиной, сужается вглубь с образованием острого конца, от которого могут образовываться трещины, в том числе сквозные. Изменения в микроструктуре металла отсутствуют, либо имеется частичное обезуглероживание.

Геометрические характеристики: длина – зачастую соответствует длине трубы; глубина одинаковая по длине дефекта – до нескольких миллиметров.

Причина образования при прокатке в НРС:

- закатывание глубоких рисок, образовавшихся из-за прокатки на изношенной оправке;

- закатывание уса, образовавшегося на ранних стадиях прокатки (в первых клетях НРС)

1.2.3 Раковина вдав по телу

Другие определения:

[1]: «След от вдава»;

[2]: «Отпечатки (вмятины)».

Подразумевается наличие несоответствия на наружной поверхности труб.

Причина образования, характер расположения, этап производства труб:

[1]: «Вкатывание постороннего предмета, случайно попавшего на поверхность трубы во время прокатки»;

«След от вдава представляет собой локальное единичное углубление и имеет форму и размеры вкатанного в металл трубы предмета, затем выпавшего из него».

[2]: «Отпечатки локальные углубления на наружной поверхности трубы»;

«Дефекты на поверхности валков стана поперечно-винтовой прокатки труб или на поверхности калибра стана продольной прокатки труб на оправке»;

«Прилипшие частицы металла, углубления (места выработки) на поверхности валков на заключительных этапах прокатки».

Анализ литературных данных по рассматриваемому виду несоответствия «раковина-вдав по телу» [1-2] показал, что данный вид несоответствия может образовываться на всех этапах трубного передела, начиная с процесса прошивки заготовки.

Причина возникновения из-за вкатывания в поверхность трубы какого-либо постороннего предмета, а затем его выпадение, а также из-за выпадения локальных плён подтверждается данными [3].

1.3 Анализ протоколов исследования качества поверхности образцов

Результаты анализа информации по видам несоответствий труб, имеющейся в протоколах лаборатории металловедения и термообработки ЦЗЛ ПАО «СинТЗ».

Протоколы отбирались по принципу наличия информации о несоответствиях поверхности, всего отобрано:

Информация структурирована относительно внешнего вида несоответствия, диаметра заготовки, размеров готовых труб, марки стали.

Таблица 1 – Глубина залегания несоответствий поверхности

ТПА-140	Вид несоответствия	Наружная раковина вдав	Наружная плена	Закаты
	Глубина залегания, мм	0,24-2,6	0,35-0,1	0,53

Таблица 2 – Появление несоответствий поверхности труб при прокатке в линии ТПА-140 относительно марок сталей

Вид несоответствия	Марка стали								
	09Г2С	38Г2СФ	32ХГМА	Д-8	32Г1	13ХФА	32Г2	Сталь 20	35ГФ
Наружная раковина вдав		■	■	■	■	■	■	■	
Наружная плена	■	■		■		■			■
Закаты				■					

Несоответствия поверхности вида «наружная раковина вдав» и «наружная плена» обнаруживаются при прокатке труб различного марочного состава.

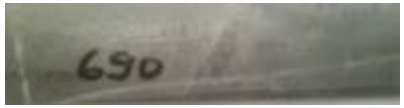
Наибольшее количество несоответствий поверхности наблюдается при прокатке труб с соотношением наружного диаметра к толщине стенки (D/S):

- в линии ТПА-140: 13,68 (размер труб: 73×5,5 мм; 88,9×6,5 мм); 15,63 (размер труб: 101,1×6,5 мм; 101,6×6,5 мм; 114,3×7,4 мм; 168,28×10,59 мм); 18,82 (размер труб: 146,1×7,7 мм; 168,3×8,9 мм).

Таблица 3 – Несоответствия поверхности труб, получаемых прокаткой в линии ТПА-140

№ п/п	Вид несоответствия	Внешний вид несоответствия*	Диаметр заготовки, мм	Размеры готовых труб, D×S, мм	Марка стали	Описание и характер расположения несоответствия	Глубина залегания, мм	Примечание
2	Наружная раковина вдав	 Внешний вид Панорама нетравленого шлифа ×100	120	73×5,5 73×5,5 73×5,5 88,9×6,5 101,1×6,5 101,6×6,5 101,6×8,38 114×5 114,3×6,4 114,3×7,4 114,3×7,4	32Г1 38Г2СФ 32Г2 32Г2 Д-8 Д-8 32ХГМА ст.20 38Г2СФ 38Г2СФ Д-8	- Локальное углубление без нарушения сплошности металла трубы. - Углубление с бугристым дном.	0,24-2,6	- От выпадения вкатанного металла, окалины, инородных включений. - В процессе высадки от выпадения вдавленной окалины.
			156	146×7 146,1×7 159×5	Д-8 Д-8 13ХФА			
3	Наружная плена	 Внешний вид Панорама нетравленого шлифа ×100	120	73×5,5 88,9×6,5 88,9×6,5 101,1×6,5 101,6×6,5 108×5 108×5 108×6 114×6 114,3×6,4 114,3×7,4	38Г2СФ Д-8 38Г2СФ Д-8 Д-8 Д-8 09Г2С 09Г2С 13ХФА 38Г2СФ 38Г2СФ	- Отслоение, соединённое с основным металлом одной стороной. -Несплошность саблевидной формы. - Расположение прямолинейное, либо под углом к образующей 3-5º, 10-12º. - Единичное несоответствие.	В среднем 0,35-1 Выпады 2,25	- Раскатывание несовершенства трубной заготовки.
			156	146×7 146,1×7 146,1×7,7 146,1×8,1 159×5 168,28×8,94 168,3×8,9	Д-8 Д-8 Д-8 38Г2СФ 13ХФА 35ГФ 35ГФ			

Продолжение таблицы 3

№ п/п	Вид несоответствия	Внешний вид несоответствия	Диаметр заготовки	Размеры готовых труб, D×S	Марка стали	Описание и характер расположения несоответствия	Глубина залегания	Примечание
			мм	мм			мм	
7	Закаты	 Внешний вид Панорама нетравленого шлифа ×100	120	101,6×6,5	Д-8	Описание: - нарушение сплошности металла в направлении прокатки продольной ориентации, плотно прилегающее к поверхности; -несплошность с гладкими стенками, расположенная под углом к поверхности, суживающаяся вглубь. Расположение: - по всей длине трубы с переднего, заднего концов и посередине трубы.	0,53	- На наружной поверхности. - В процессе производства труб.

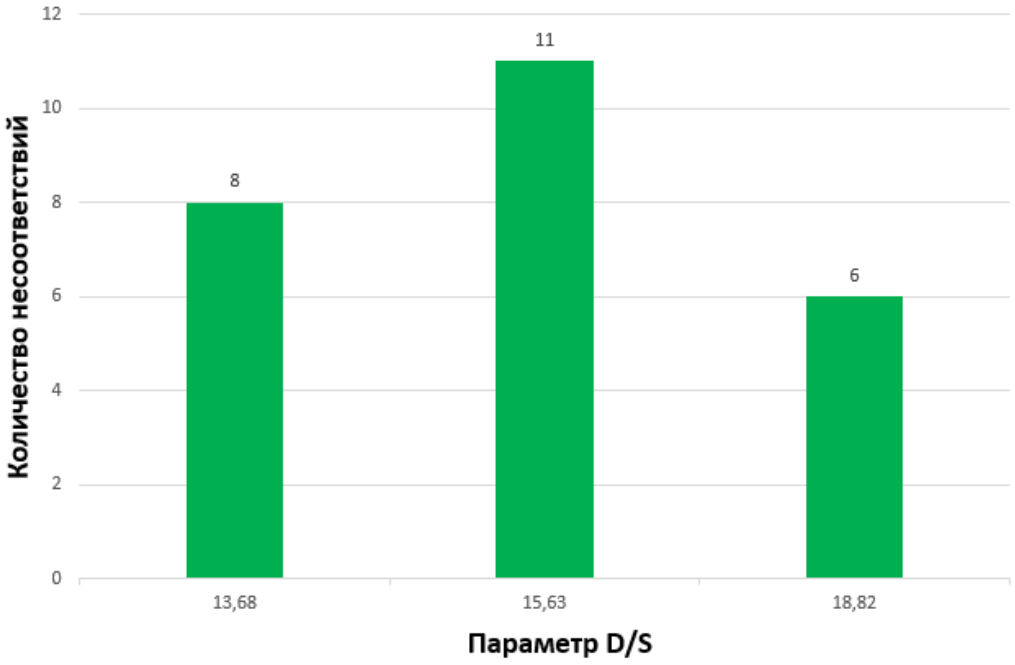


Рисунок 7. Выявление несоответствий поверхности при прокатке в линии ТПА-140 труб с соотношением наружного диаметра к толщине стенки: а) 13,68; б) 15,63; в) 18,82; г) для рассматриваемого диапазона значений

2. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ ТРУБ

2.1 Анализ технологии прокатки труб в линии ТПА-140 ПАО «СинТЗ» с точки зрения возникновений РВН, ПТН, ЗкН

Выписка данных из [4] по несоответствиям вида раковина-вдав на наружной поверхности (далее РВН), плена трубопрокатная на наружной поверхности (далее ПТН) и закат на наружной поверхности (далее ЗкН) приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристика несоответствий поверхности готовых труб, получаемых прокаткой в линии ТПА-140

Параметр	Линия прокатки	Вид несоответствия поверхности		
		РВН	ПНТ	ЗкН
	ТПА-140	Углубление без нарушения сплошности металла трубы с бугристым дном	- Единичное отслоение, соединённое с основным металлом одной стороной. - Несплошность саблевидной формы, расположение прямолинейное, либо под углом к образующей 3-5º, 10-12º.	- Нарушение сплошности металла в направлении прокатки продольной ориентации, плотно прилегающее к поверхности. - Несплошность с гладкими стенками, расположенная под углом к поверхности, суживающаяся вглубь. - Расположение: по всей длине трубы с переднего, заднего концов и посередине трубы.
Причина возникновения		От выпадения вкатанного металла, окалины, инородных включений	Раскатывание несовершенства заготовки	—
Глубина залегания, мм		0,24-2,60	0,35-1,0; выпады: 2,25	0,53

2.2 Мероприятия, способствующие сокращению количества несоответствий поверхности

Последовательность мероприятий при производстве труб в условиях цеха Т-2 ПАО «СинТЗ», способствующих снижению количества наблюдений несоответствий РВН, ПТН или ЗкН на готовых трубах представлена на рисунке 8:

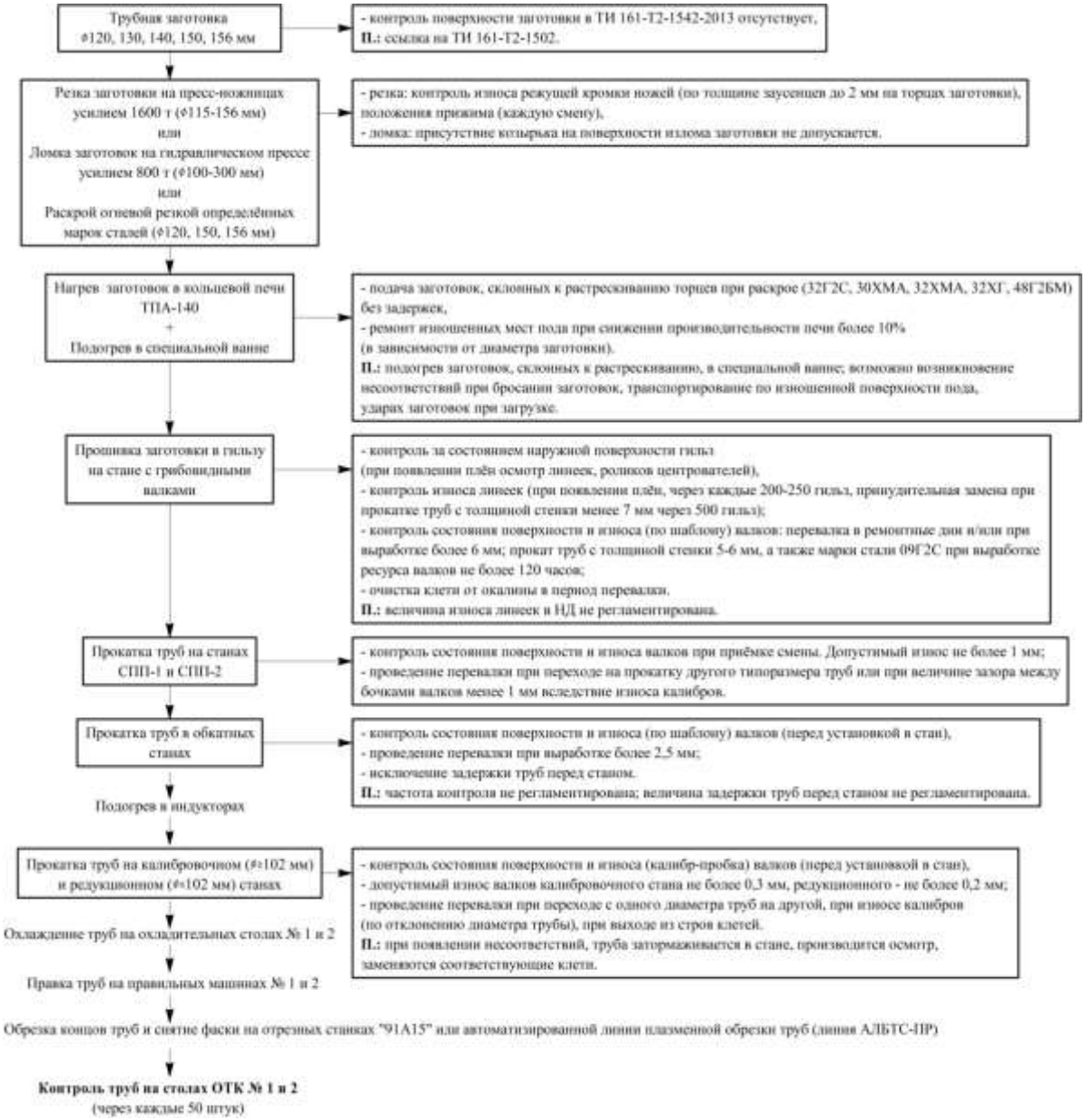


Рисунок 8. Мероприятия, способствующие снижению вероятности возникновения несоответствий поверхности при прокатке труб в линии ТПА-140

В линии ТПА-140 предусмотрены следующие мероприятия: «после перевалки и прокатки первых 10-15 штук ТПА-140 останавливается для

отбора проб, оценки геометрических размеров и качества поверхности труб, обкатка которых производилась на разных обкатных станах. В случае перехода ТПА-140 на прокат новой стенки при сохранении диаметра труб, для настройки используется пробная партия из 5-7 штук. После перенастройки прокатывается повторная партия в количестве 5-7 штук труб, на которых производится контроль геометрических размеров и состояния наружной и внутренней поверхности». Готовые трубы в линии ТПА-140 подвергаются неразрушающему контролю.

Из приведённой на рисунке 8 информации следует:

- образование несоответствий возможно в результате износа деформирующего инструмента всех станов линии ТПА, влияния факторов транспортировки (износ транспортирующих механизмов, удары заготовок, очистка оборудования от окалины и остатков металла), прокатки некачественной заготовки (наличие макро- и микродефектов);
- несоответствия поверхности могут возникать на всех этапах производства труб;
- контроль качества поверхности раската по переделу осуществляется визуально;
- применяемая система контроля направлена, прежде всего, на выявление труб с несоответствиями, возникающими массово (на каждой трубе в партии).

2.3 Причины возникновения несоответствий поверхности

В данном пункте приведен анализ литературных данных [1][3][5-7] и данных, содержащихся в существующей технологической документации с точки зрения причин возникновения несоответствий поверхности вида РВН, ПНТ, ЗкН на готовых трубах.

Результаты анализа данных приведены:

- для линии ТПА-140 в таблице 5.

Совместный анализ причин возникновения несоответствий рассматриваемых видов позволил:

- расширить список возможных причин возникновения несоответствий в линии ТПА-140;
- выделить общую причину возникновения несоответствий – качество поверхности исходных заготовок и подката;
- показать, что несоответствия РВН, ПТН или ЗкН могут трансформироваться из дефектов, полученных на всех стадиях горячего передела, включая транспортировку.

С учётом литературных данных в линии ТПА-140 несоответствия поверхности могут возникать:

- РВН: в СПП, в прошивном, обкатном и редукционном станах;
- ПНТ и ЗкН: в СПП и прошивном стане.

Таблица 5 – Результаты литературного анализа причин возникновения несоответствий

№ п/п	Вид несоответствия		
	РВН	ПНТ	ЗкН
1 [3]	- дефекты на поверхности валков стана поперечно-винтовой прокатки или на поверхности калибра стана продольной прокатки на оправке; - прилипшие частицы металла на поверхности валков на заключительных этапах прокатки; - при передаче (транспортировке) труб; - окалина, находящаяся на роликах, при прохождении трубы через печь переходит на наружную поверхность и закатывается при прокатке на калибровочных, редукционных и других прокатных станах.	- плохая поверхность исходных заготовок (наличие трещин, неметаллических включений).	- плохое состояние поверхности исходной заготовки (закаты, трещины, риски от прокатки и т.д.); - сильно развитые «швы прокатки», которые приводят при дальнейшей прокатке к закатам; - слишком большой наружный диаметр трубы (трубы, полученные при прокатке на оправке, имеют слишком большой диаметр, вследствие чего калибры последующих прокатных станов переполняются, и происходит заворот металла).
2 [5]	- выкрошенный ручей валков стана продольной прокатки; - вдавливание окалины при прокатке; - наличие наваров на калибрах валков калибровочного стана; - поверхность калибров редукционного стана с налипшими частицами металла.	- продольные и поперечные трещины, волосовины на заготовке (подкате), неметаллические включения; - раковины и другие дефекты на поверхности заготовки; - плохое состояние поверхности валков станов непрерывной оправочной и поперечно-винтовой прокатки.	- закат уса, образующегося в выпусках калибра; - низкая величина овальности калибра.

Продолжение Таблицы 5

3 [6]	- вкатывание постороннего предмета, случайно попавшего на поверхность трубы во время прокатки; - низкое качество прокатного инструмента и оборудования трубопрокатных агрегатов, выкрашивание из них частиц металла.	- раскатывание дефектов отпечатков валков трубопрокатного стана, печного оборудования, продиров, рябизны, царапин, образовавшихся на более ранней стадии деформации труб.	- неудовлетворительная настройка станов трубопрокатных агрегатов, закатывание «уса» и ужима.
4 [7]	- вдавливание в поверхность труб окалины, образующейся при нагреве (подогреве) раската; - вдавливание металла, налипшего на валки оправочного стана продольной прокатки, обкатного и калибровочного станов; - недоброкачественная заготовка, имеющая скрытые и видимые дефекты.	- низкое качество исходной заготовки (волосовины, трещины, плёны); - износ валков, линеек; - скольжение металла в процессе прокатки; - неравномерный нагрев; - недоброкачественная заготовка, имеющая скрытые и видимые дефекты.	- закатывание «уса», образующегося в выпусках калибра; - низкая величина овальности калибра.
5 [1]	- вдавливание окалины в поверхность заготовки; - износ валков прокатных станов; - местные механические повреждения поверхности трубы.	- прокатка в изношенных валках; - при транспортировке гильз от прошивного к непрерывному стану возникают повреждения поверхности, вызывающие появление закатов, плён; - плохое качество поверхности заготовки.	Информация отсутствует

Таблица 6 - Причины возникновения несоответствий труб, получаемых прокаткой в линии ТПА-140 [3]

Этап производства труб	Вид несоответствия		
	РВН	ПНТ	ЗкН
Прошивка заготовки в гильзу	- некачественная заготовка; - низкое качество рабочей поверхности инструмента («волчки», навар металла, острые кромки и т.д.).	- некачественная заготовка; - низкое качество рабочей поверхности инструмента («волчки», навар металла, острые кромки и т.д.).	- некачественная заготовка; - низкое качество рабочей поверхности инструмента («волчки», навар металла, острые кромки и т.д.).
Раскатка гильзы в СПП	- выкрошенная поверхность или навар металла на поверхность ручья калибра валков (Периодически повторяющиеся отпечатки или раковины на наружной поверхности труб).	Информация отсутствует	Информация отсутствует
Прокатка на обкатных станах	- налипание металла на валки; - местная выработка, выбоины или раковины на поверхности валков.	Информация отсутствует	Информация отсутствует

2.4 Обработка статистической информации по несоответствиям поверхности

В работе [8] указывается на возможные зависимости появления дефектов от параметров процесса прокатки: диаметра заготовки, толщины стенки горячекатаной трубы, температуры металла перед прокаткой, коэффициента вытяжки на стане и т.п. Выводы о причинах возникновения дефектов, в том числе закат, вмятина, наружная плена, основаны на результатах обработки статистических данных брака по наружной поверхности [1].

Заводом были предоставлены статистические данные о количестве несоответствий за период не менее года, относительно диапазонов диаметров и толщин стенок готовых труб.

Предоставленные данные обработаны с точки зрения технологических параметров, содержащихся в таблицах прокатки и относительно несоответствий поверхности РВН, ПТН, ЗкН.

2.4.1 Результаты обработки статистической информации за период не менее года для линии ТПА-140

Повышенное количество несоответствий наблюдается при прокатке в линии ТПА-140 следующих марок стали на рисунке 9:

- РВН: 48Г2БМ, 37Г2С, Д, 30ХМА;
- ПНТ: 32Г2, Д, 35;
- ЗкН: 32Г2, Д.

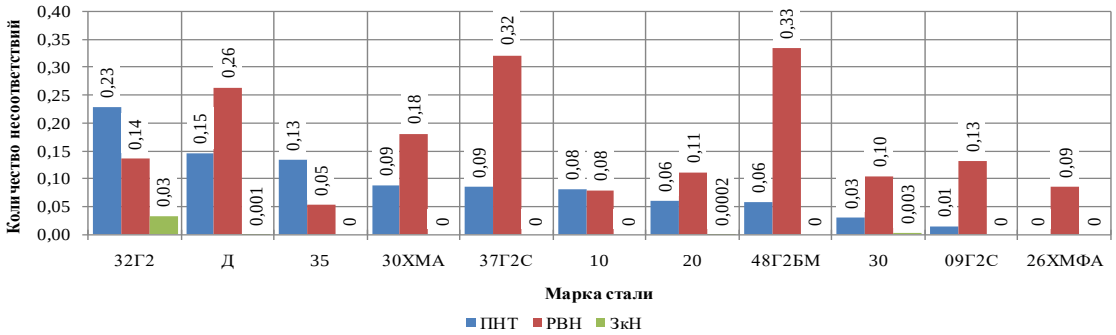


Рисунок 9. Количество несоответствий (шт.) на единицу готовой продукции (шт.) из заготовок различных марок стали

Средние значения исследованных параметров приведены в таблице 7. Для параметра «изменение толщины стенки при прокатке в редукционном стане» знак «-» означает:

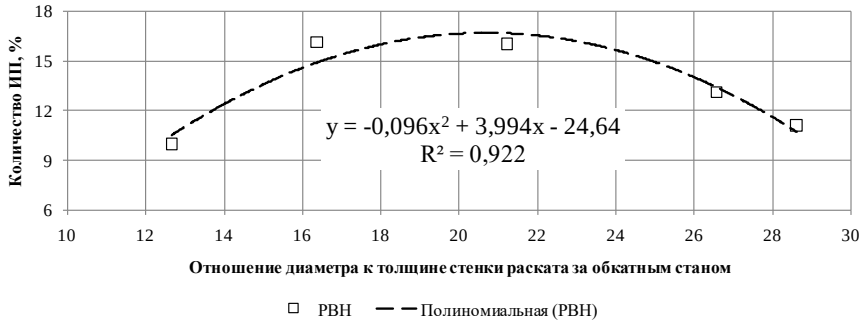
- прокатка с утолщением стенки раската;
- для параметров «изменение наружного диаметра при прокатке в прошивном и обкатном станах»: прокатку с увеличением наружного диаметра раската.

Таблица 7 – Средние значения параметров прокатки труб в линии ТПА-140

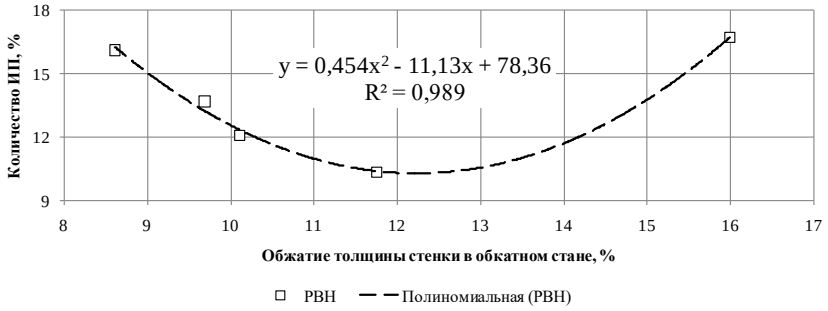
Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значения параметров				
			1	2	3	4	5
Диаметр готовой трубы	D	мм	81	101,6	120,5	140,65	160,15
Толщина стенки готовой трубы	S	мм	15,02	7,95	5,62	—	—
Отношение диаметра к толщине стенки:							
- готовых труб	D/S		26,64	20,30	16,53	12,28	8,79
- гильзы за прошивным станом	$D/S_г$		16,71	16,41	12,64	11,79	9,15
- раската за СПП-1	$D/S_{СПП-1}$		22,21	18,27	14,97	10,30	9,71
- раската за СПП-2	$D/S_{СПП-2}$		22,95	22,01	17,89	16,62	10,85
- раската за обкатным станом	$D/S_{ОбС}$		28,63	26,58	21,24	16,37	12,67
- раската за редукционным станом	$D/S_{РС}$		26,65	21,13	17,89	13,87	9,18
Изменение толщины стенки при прокатке:							
- в СПП-1	$\Delta S_{СПП-1}$	%	25,95	24,26	23,62	22,76	15,70
- в СПП-2	$\Delta S_{СПП-2}$	%	11,74	11,56	11,26	11,06	8,17
- итого в двух СПП	$\Delta S_{СПП}$	%	33,69	33,00	31,85	31,21	22,11
- в обкатном стане	$\Delta S_{ОбС}$	%	16,00	11,76	10,11	9,69	8,61
- в редукционном стане	$\Delta S_{РС}$	%	-1,35	-5,31	-10,00	-10,05	-23,18
Изменение наружного диаметра при прокатке:							
- в прошивном стане	$\Delta D_г$	%	-5,90	-6,67	-7,55	-9,79	-10,61
- в СПП-1	$\Delta D_{СПП-1}$	%	6,25	6,27	5,24	4,66	4,27
- в СПП-2	$\Delta D_{СПП-2}$	%	1,69	1,63	1,53	1,48	1,32
- в обкатном стане	$\Delta D_{ОбС}$	%	-5,56	-6,51	-7,42	-7,58	-9,73
- в редукционном стане	$\Delta D_{РС}$	%	35,86	17,63	12,41	9,74	5,67
Коэффициент вытяжки:							
- суммарный по ТПА	μ_Σ		7,32	6,27	5,26	4,31	3,31
- в прошивном стане	$\mu_г$		3,93	3,85	3,20	2,75	2,26
- в СПП-1	$\mu_{СПП-1}$		1,40	1,39	1,37	1,26	1,25
- в СПП-2	$\mu_{СПП-2}$		1,15	1,14	1,13	1,10	1,10
- итого в двух СПП	$\mu_{СПП}$		1,60	1,58	1,55	1,39	1,38
- в обкатном стане	$\mu_{ОбС}$		1,10	1,06	1,02	1,00	1,00
- в редукционном стане	$\mu_{РС}$		1,38	1,15	1,10	1,08	1,04

Полученные предварительные зависимости количества ИП по несоответствиям поверхности от параметров таблицы прокатки с величиной достоверности свыше 0,7 приведены: РВН на рисунке 10; ПТН на рисунке 11; ЗкН на рисунке 12.

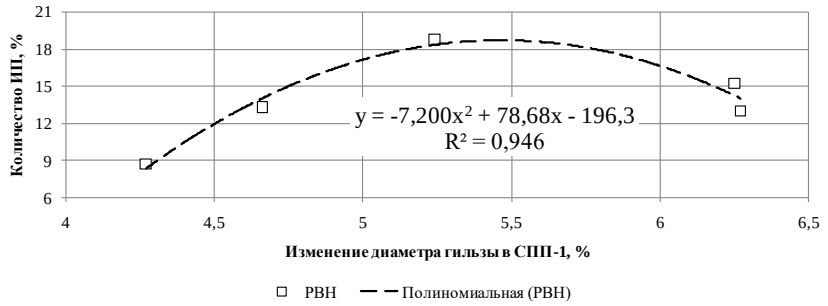
С увеличением степени тонкостенности раската за обкатным станом, обжатия толщины стенки в обкатном стане и обжатия по наружному диаметру в СПП-1 количество ИП по несоответствию РВН изменяется по квадратичным зависимостям.



а

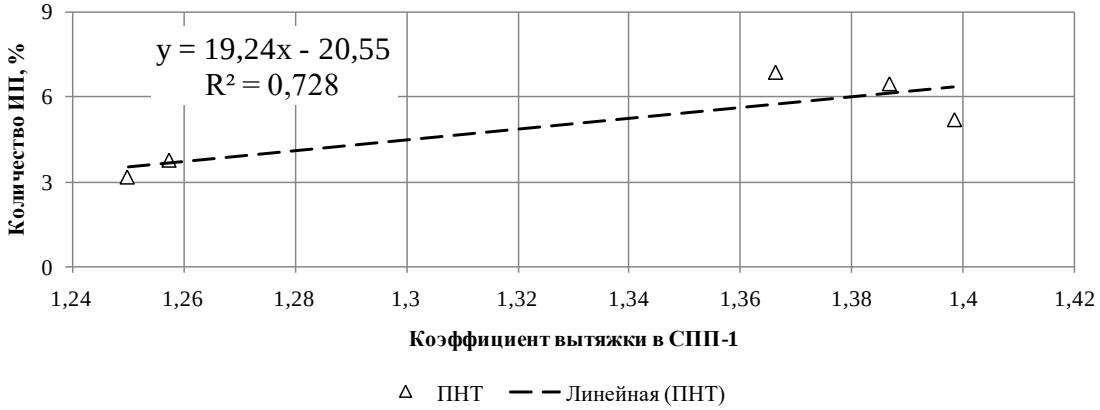


б

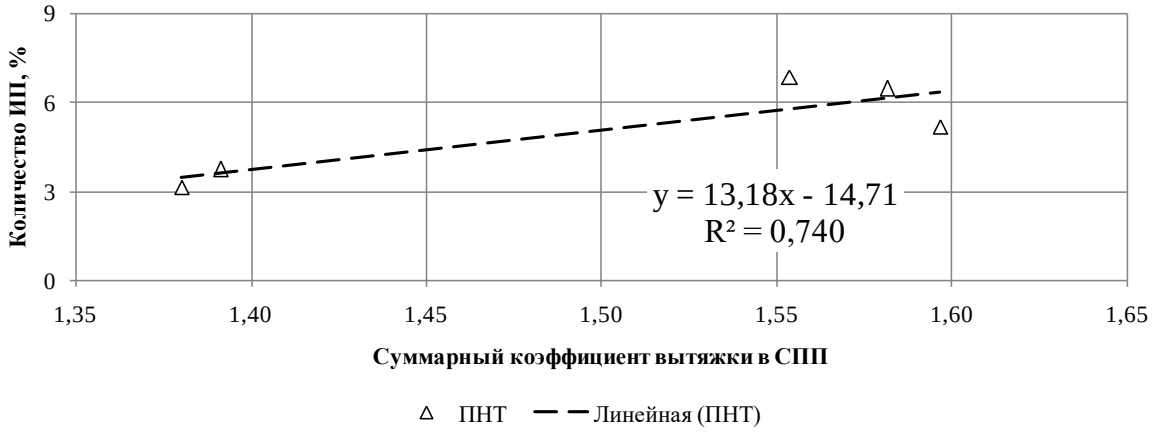


в

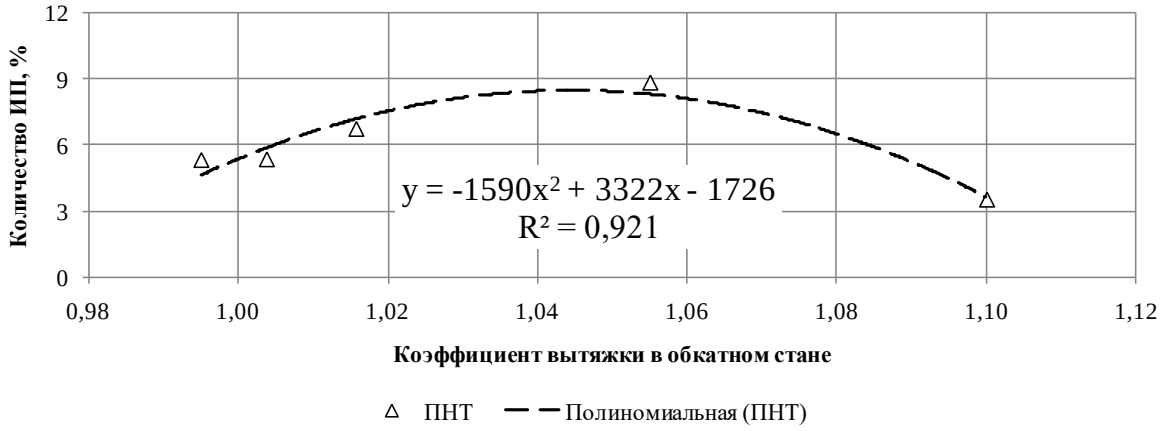
Рисунок 10. Количество ИП по РВН в зависимости от параметров прокатки в линии ТПА-140:
а) отношения диаметра к толщине стенки раската за обкатным станом;
б) обжатия толщины стенки в обкатном стане;
в) изменения диаметра гильзы в СПП-1



а



б



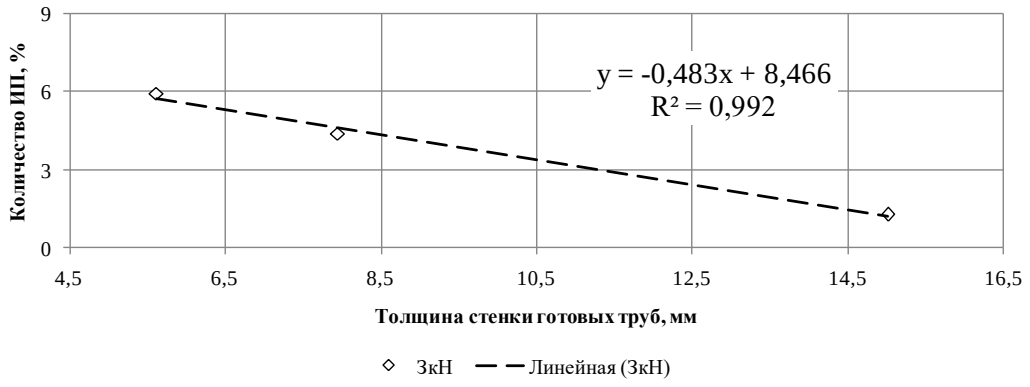
в

Рисунок 11. Количество ИП по ПНТ в зависимости от параметров прокатки в линии ТПА-140:

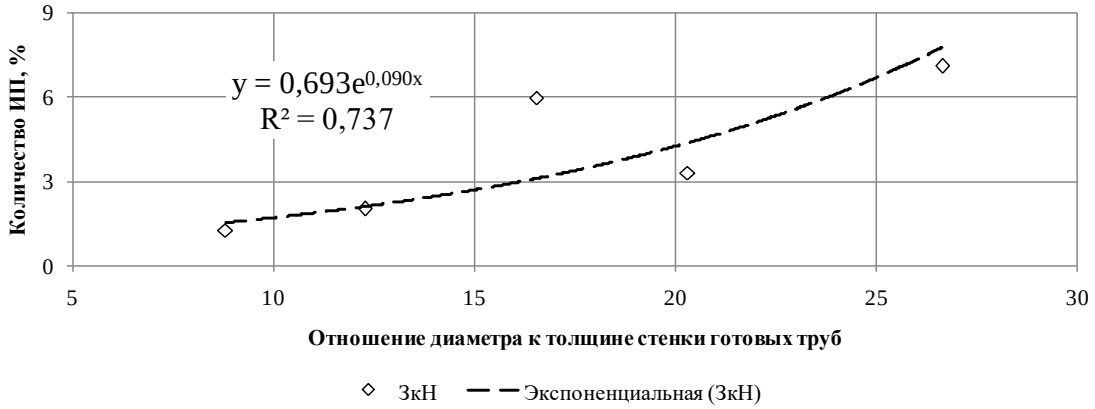
а) коэффициент вытяжки в СПП-1; б) суммарного коэффициента вытяжки в СПП; в) коэффициента вытяжки в обкатном стане

С увеличением коэффициента вытяжки в СПП-1 и суммарного коэффициента вытяжки в СПП количество ИП по несоответствию ПНТ растёт;

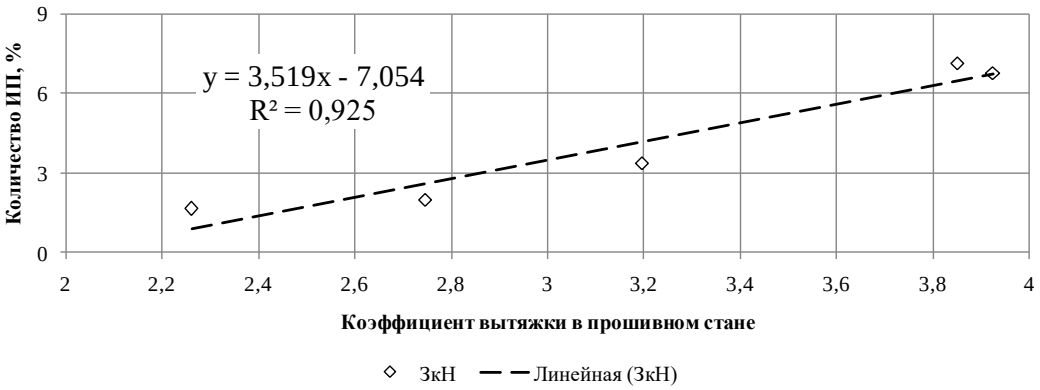
С увеличением коэффициента вытяжки в обкатном стане количество ИП по несоответствию ПНТ изменяется по квадратичной зависимости.


y = -0,483x + 8,466
R² = 0,992
Количество ИП, %
Толщина стенки готовых труб, мм
3кН
Линейная (3кН)

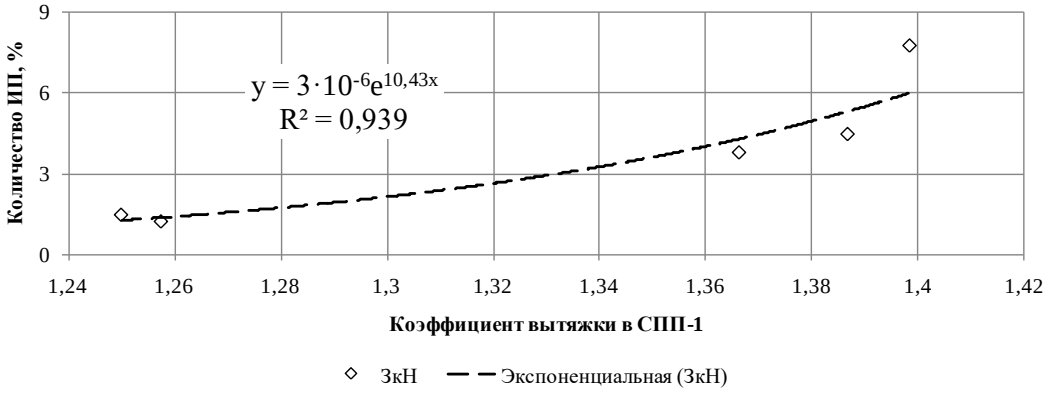
а


y = 0,693e^0,090x
R² = 0,737
Количество ИП, %
Отношение диаметра к толщине стенки готовых труб
3кН
Экспоненциальная (3кН)

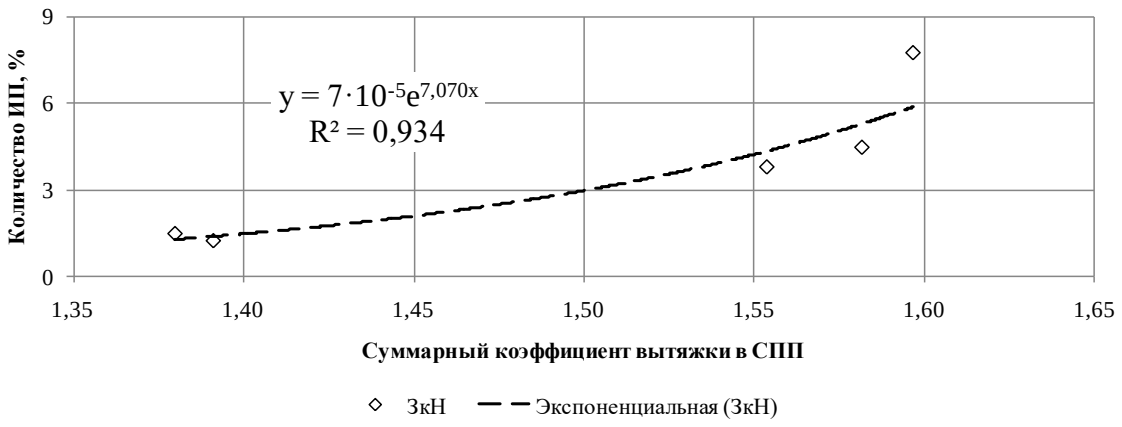
б


y = 3,519x - 7,054
R² = 0,925
Количество ИП, %
Коэффициент вытяжки в прошивном стане
3кН
Линейная (3кН)

в


y = 3·10^-6e^10,43x
R² = 0,939
Количество ИП, %
Коэффициент вытяжки в СПП-1
3кН
Экспоненциальная (3кН)

г



Д

Рисунок 12. Количество ИП по ЗкН в зависимости от параметров прокатки в линии ТПА-140:

а) толщины стенки готовых труб; б) отношения диаметра к толщине стенки готовых труб; в) коэффициента вытяжки в прошивном стане; г) коэффициента вытяжки в СПП-1; д) суммарного коэффициента вытяжки в СПП

С увеличением степени тонкостенности готовых труб, коэффициента вытяжки в СПП-1 и суммарного коэффициента вытяжки в СПП количество ИП по несоответствию ЗкН возрастает по экспоненциальным зависимостям.

С уменьшением толщины стенки готовых труб и с увеличением коэффициента вытяжки в прошивном стане количество ИП по несоответствию ЗкН растёт.

По результатам обработки статистических данных в линии ТПА-140 появление несоответствий поверхности на трубах зависит от параметров прокатки:

- РВН: в СПП-1, обкатном стане;
- ПТН: в СПП и обкатном стане;
- ЗкН: в СПП и прошивном стане.

3. ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОКАТОК И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1 Подготовка к проведению опытно-промышленных прокаток

В условиях ТПА-140 при прокатке насосно-компрессорных труб из марки стали 32Г2 наружным диаметром 101,6 мм с толщиной стенки 6,5 мм в цехе Т-2 проведено исследование трансформации дефектов наружной поверхности заготовки.

Штанга общей длиной 10800 мм с искусственно нанесёнными дефектами была подвергнута ломке на прессе на 5 частей длиной 2160 мм. Все 5 частей с искусственно нанесёнными дефектами последовательно загружались в кольцевую печь и прокатывались в порядке, предусмотренном в таблице 8.

Таблица 8 – Порядок прокатки заготовок с искусственно нанесёнными дефектами в линии ТПА-140

<table>
<tr><td rowspan="2">Стан линии ТПА</td><td colspan="5">Фактический порядок посада заготовок в печь/ порядок извлечения раската с линии горячего передела</td></tr>
<tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td></tr>
<tr><td>прошивной</td><td>прокат</td><td>прокат</td><td>прокат</td><td>прокат</td><td>прокат</td></tr>
<tr><td>СПП-1</td><td>прокат</td><td>прокат</td><td>прокат</td><td>прокат</td><td rowspan="4">выброс</td></tr>
<tr><td>СПП-2</td><td>прокат</td><td>прокат</td><td>прокат</td><td rowspan="3">выброс</td></tr>
<tr><td>обкатной</td><td>прокат</td><td>прокат</td><td rowspan="2">выброс</td></tr>
<tr><td>редукционный</td><td>прокат</td><td>выброс</td></tr>
</table>

При загрузке в печь и прокатке в линии ТПА искусственно нанесённые дефекты находились со стороны заднего торца заготовки. Раскат извлекался с линии ТПА после прокатки в каждом стане с целью проведения исследований по трансформации дефектов.

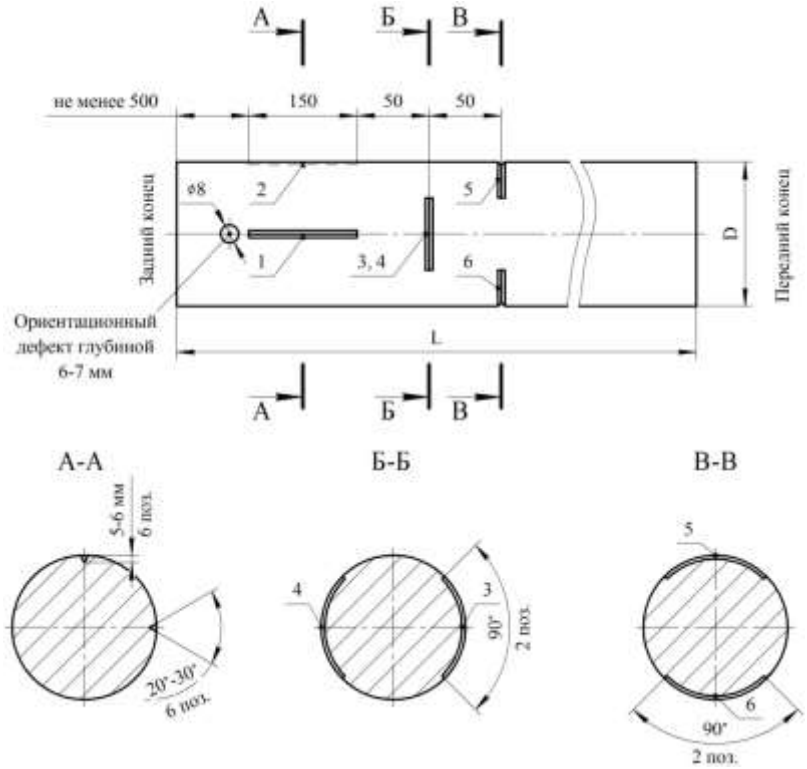


Рисунок 13. Схема нанесения искусственных дефектов на поверхность заготовок в линии ТПА-140 ПАО «СинТЗ»: 1-6 – нумерация дефектов

При прокатке заготовок с искусственно нанесёнными дефектами по существующей технологии в каждом отдельном стане дефекты подвергались трансформации – изменялся вид дефекта, характер расположения, а также глубина залегания. Также были измерены геометрические параметры раскатов после их прокатки на станах.

Металлографические исследования проводились при 50- и 100-кратном увеличении образцов, на приводимых в данной главе рисунках указанный масштаб при компоновке данного отчёта не соблюдался.

3.2 Анализ изменения формы дефектов

На поверхность заготовки диаметром 120 мм были нанесены искусственные дефекты продольной и поперечной ориентации в соответствии со схемой на рисунке 13.

При прокатке в прошивном (ПС), СПП-1, СПП-2, обкатном (ОС), редукционном (РС) станах все дефекты трансформировались в виде плён и раковин различной ориентации, изменялась их глубина залегания, расположение по длине раската.

Внешний вид дефектов на заготовке представлен на рисунке 14.

Рисунок 14. Внешний вид искусственно нанесённых дефектов продольной и поперечной ориентации на поверхности заготовки

Глубина залегания продольно ориентированных дефектов составляла от 5,3 до 7,0 мм, поперечно ориентированных от 5,3 до 7,8 мм.

3.3 Трансформация дефектов заготовки в прошивном стане

При производстве труб наружным диаметром 101,6 мм с толщиной стенки 6,5 мм заготовка диаметром 120 мм прокатывается в прошивном стане линии ТПА-140 с получением гильзы наружным диаметром 128 мм с толщиной стенки 9,5 мм. Внешний вид искусственно нанесённых дефектов после прокатки в прошивном стане представлен на рисунке 14.

Основные формы дефектов по результатам металлографических исследований представлены на рисунке 15.

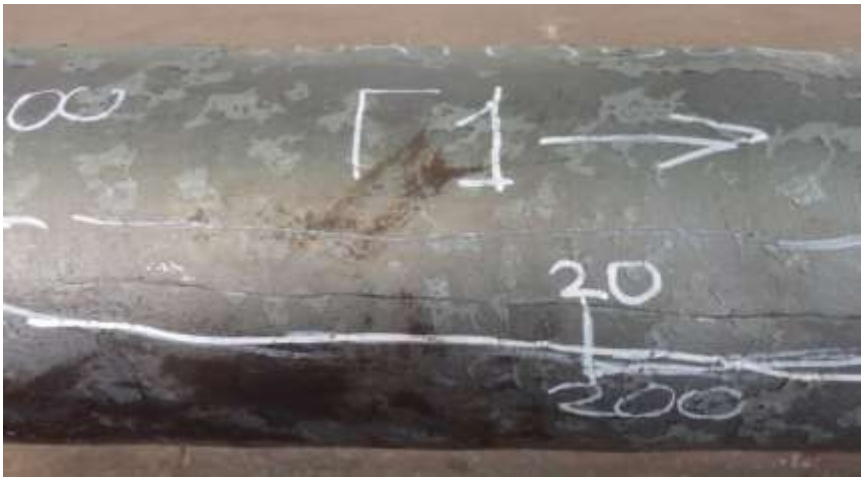
После прокатки в прошивном стане:

- внешний вид дефектов: отслоение металла продольной или поперечной ориентации, соединённое с основным металлом одной стороной;
- угол скручивания продольно ориентированных дефектов составил 5,72°. Угол скручивания поперечно ориентированных дефектов не наблюдался.

По результатам металлографических исследований:

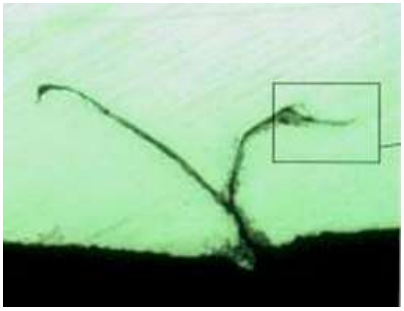
- дефекты продольной ориентации классифицированы к виду плена с глубиной залегания дефектов 0,35÷1,94 мм; поперечной ориентации – к виду плена глубиной залегания 0,64÷2,46 мм и раковина-вдав от выпадения плён глубиной залегания 0,50 мм;

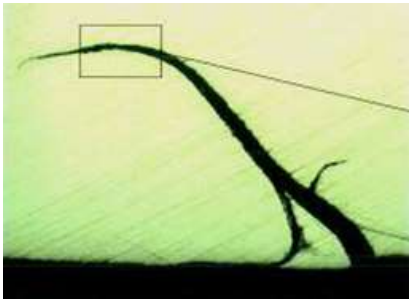
- форма дефектов в соответствии с рисунком 18: полости несплошностей могут быть заполнены окалиной, полости сопровождаются скоплениями мелких диффузионных окислов, в микроструктуре наблюдается обезуглероживание.



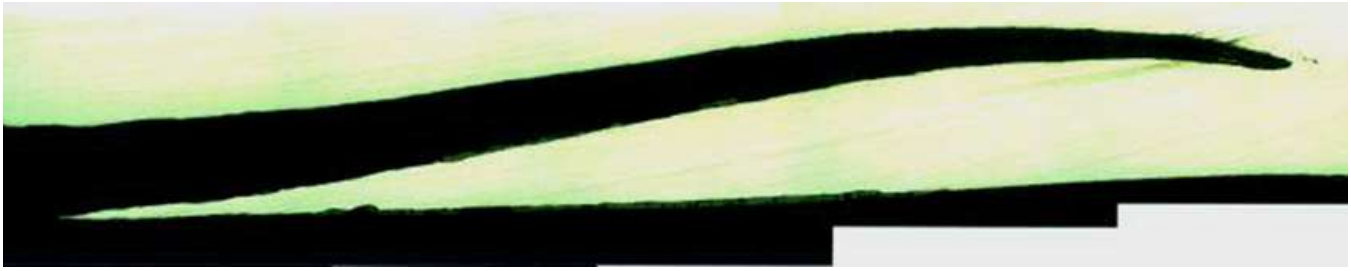
а б

Рисунок 15. Внешний вид искусственно нанесённых дефектов после прокатки в обжимном стане: а) продольной ориентации; б) поперечной ориентации

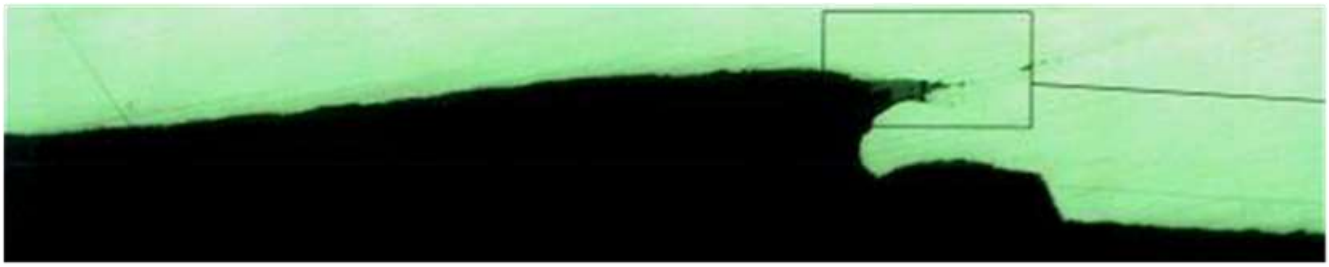




а б в



г



д

е

Рисунок 16. Форма дефектов по результатам металлографических исследований: а, б, в – дефект продольной ориентации (саблевидная, разветвлённая и саблевидная с ответвлениями форма соответственно); г, д, е – дефект поперечной ориентации (г – саблевидная форма, д – несплошность с широким основанием, е – замкнутая форма)

3.4 Трансформация дефектов заготовки в СПП-1

В соответствии с таблицами прокатки в СПП-1 получают раскат наружным диаметром 120 мм толщиной стенки 7,3 мм. Дефекты при прокатке в СПП-1 изменяли внешний вид и размеры.

Основные формы дефектов по результатам металлографических исследований представлены на рисунке 16.

После прокатки в СПП-1:

- внешний вид дефектов: отслоение металла продольной или поперечной ориентации, соединённое с основным металлом одной стороной;
- угол скручивания продольно ориентированных дефектов составил 4,0°;

По результатам металлографических исследований:

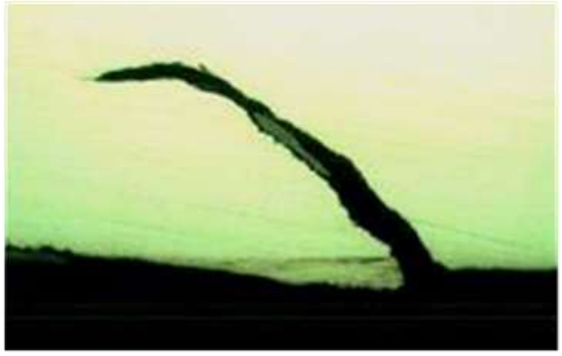
- дефекты классифицированы к виду плена с глубиной залегания дефектов продольной ориентации 0,46÷1,60 мм, поперечной ориентации – 0,11÷1,70 мм.

- форма дефектов в соответствии с рисунком 16: полости несплошностей заполнены окалиной, полости сопровождаются скоплениями мелких диффузионных окислов, в микроструктуре наблюдается обезуглероживание.

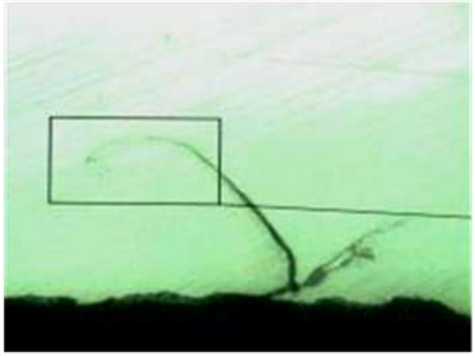
а

б

Рисунок 17. Внешний вид искусственно нанесённых дефектов после прокатки в СПП-1 линии ТПА-140: а) продольной ориентации;
б) поперечной ориентации

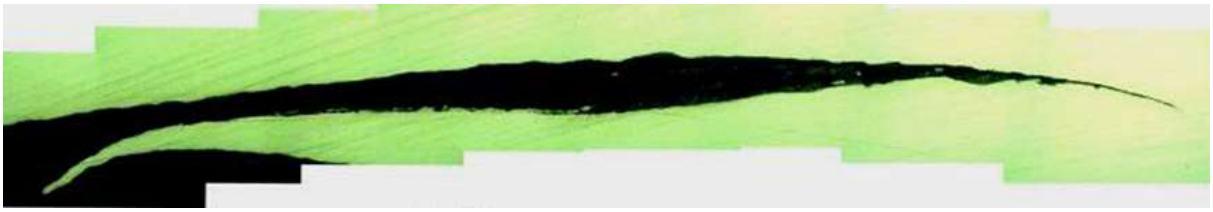


а

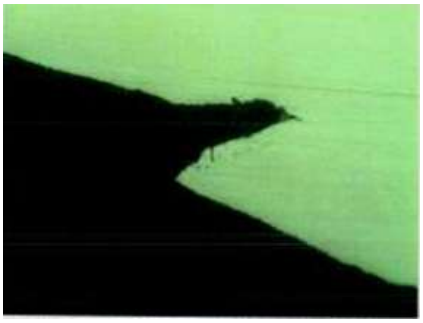


б

в



г



д

Рисунок 18. Форма дефектов по результатам металлографических исследований: а, б, в – дефект продольной ориентации (а – саблевидная форма; б – саблевидная форма с ответвлениями; в – несплошности, расположенные навстречу); г, д – дефект поперечной ориентации (г – саблевидная форма, д – несплошность с широким основанием)

3.5 Трансформация дефектов заготовки в СПП-2

Прокаткой в СПП-2 получали раскат с наружным диаметром 118 мм с толщиной стенки 6,5 мм. Внешний вид дефектов после прокатки в СПП-2 представлен на рисунке 19.

Основные формы дефектов по результатам металлографических исследований представлены на рисунке 20.

После прокатки в СПП-2:

- внешний вид дефектов: отслоение металла продольной или поперечной ориентации, соединённое с основным металлом одной стороной;
- угол скручивания продольно ориентированных дефектов составил 3,6°;

- поперечно ориентированные дефекты имеют вид отслоений попарно с плотно и неплотно прижатыми краями по направлению прокатки, что может быть обусловлено прокаткой в разных зонах калибра в СПП-2.

По результатам металлографических исследований:

- несоответствия классифицированы к виду плена с глубиной залегания дефектов продольной ориентации 0,24÷1,40 мм, поперечной ориентации – 0,36÷1,86 мм.

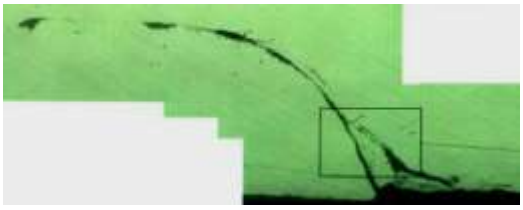
- форма дефектов в соответствии с рисунком 20: полости несплошностей в большинстве заполнены окалиной, полости сопровождаются скоплениями мелких диффузионных окислов, в микроструктуре наблюдается обезуглероживание.

а

б

Рисунок 19. Внешний вид искусственно нанесённых дефектов после прокатки в СПП-2 линии ТПА-140: а) продольной ориентации; б) поперечной ориентации

а



б

в

г

д

Рисунок 20. Форма дефектов по результатам металлографических исследований: а, б – дефект продольной ориентации (а – саблевидная форма; б – саблевидная форма с ответвлениями); в, г, д – дефект поперечной ориентации (в – саблевидная форма, г – замкнутая форма, д – несплошность с широким основанием)

3.6 Трансформация дефектов заготовки в обкатном стане

В обкатном стане прокатка ведётся с увеличением наружного диаметра до 128 мм и обжатием толщины стенки до 5,97 мм. Внешний вид дефектов после прокатки в обкатном стане представлен на рисунке 21.

Основные формы дефектов по результатам металлографических исследований представлены на рисунке 22.

После прокатки в обкатном стане:

- внешний вид дефектов: отслоение металла продольной или поперечной ориентации, соединённое с основным металлом одной стороной;
- угол скручивания продольно ориентированных дефектов составил 4,9°; угол раскручивания составил 8,5°;
- в области поперечно ориентированных дефектов наблюдается раковина-вдав от выпавшей плены.

По результатам металлографических исследований:

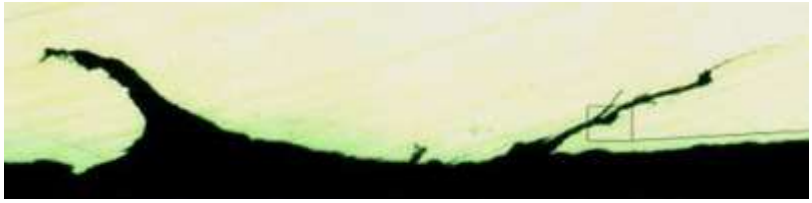
- дефекты продольной ориентации классифицированы к виду плена с глубиной залегания 0,17÷1,20 мм, поперечной ориентации – плёны глубиной залегания 0,12÷1,48 мм и раковина-вдав с отходящими несплошностями в виде плён глубиной залегания 0,50 мм.

- форма дефектов в соответствии с рисунком 22: полости несплошностей в половине случаев заполнены окалиной, полости сопровождаются скоплениями мелких диффузионных окислов. Во всех случаях в микроструктуре наблюдается обезуглероживание.

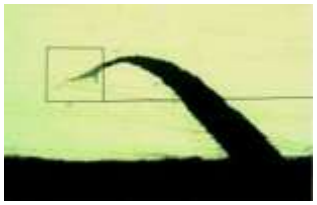
а

б

Рисунок 21. Внешний вид искусственно нанесённых дефектов после прокатки в обкатном стане: а) продольной ориентации; б) поперечной ориентации



а



б

в

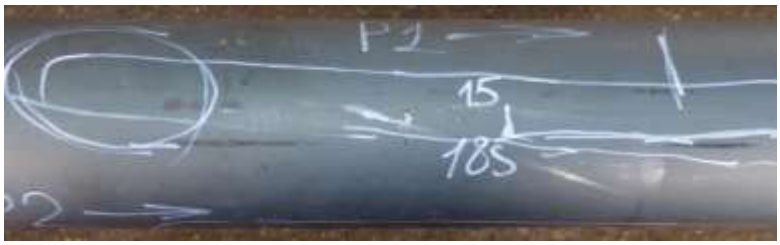
г

д

Рисунок 22. Форма дефектов по результатам металлографических исследований: а, б – дефект продольной ориентации (а – разветвлённая форма; б – саблевидная форма); в, г, д – дефект поперечной ориентации (в – саблевидная форма, г – замкнутая форма, д – несплошность с широким основанием)

3.7 Трансформация дефектов заготовки в редукционном стане

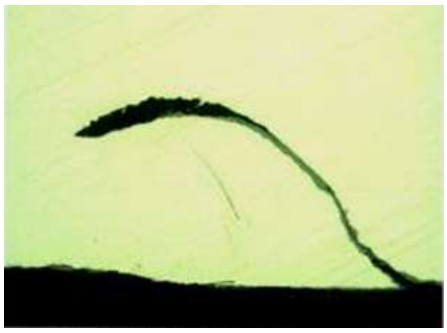
На поверхности трубы наружным диаметром 102,9 мм с толщиной стенки 6,7 мм после редукционного стана дефекты приобрели конечный вид и размеры.



а б

Рисунок 23. Внешний вид искусственно нанесённых дефектов после прокатки в редукционном стане: а)продольной ориентации; б) поперечной ориентации

а б

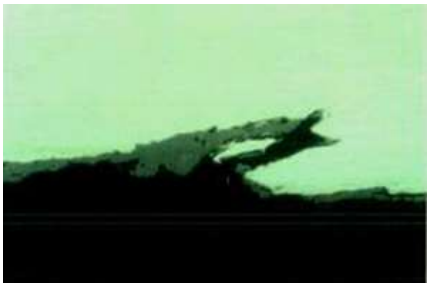


в

г

д

е



ж

Рисунок 24. Форма дефектов по результатам металлографических исследований: а, б, в, г – дефект продольной ориентации (а – разветвлённая форма; б – перпендикулярно к поверхности; в – саблевидная форма; г – под углом к поверхности); д, е, ж – дефект поперечной ориентации (д – саблевидная форма, е – замкнутая форма, ж – несплошность с широким основанием)

После прокатки в редукционном стане:

- внешний вид дефектов: отслоение металла продольной или поперечной ориентации, соединённое с основным металлом одной стороной;
- угол скручивания продольно ориентированных дефектов составил 4,9°;
- поперечно ориентированные дефекты имеют внешний вид отслоений различной ориентации.

По результатам металлографических исследований:

- дефекты продольной ориентации классифицированы к виду плена с глубиной залегания 0,05÷1,65 мм, поперечной ориентации – плёны глубиной залегания 0,26÷2,24 мм; раковина-вдав от выполнения плены глубиной залегания 1,0 мм; раковина-вдав с отходящими несплошностями в виде плён общей глубиной залегания 2,31 мм;
- форма дефектов в соответствии с рисунком 24: полости несплошностей в половине случаев заполнены окалиной, полости сопровождаются скоплениями мелких диффузионных окислов. Во всех случаях в микроструктуре наблюдается обезуглероживание.

3.8 Анализ влияния технологических факторов прокатки на изменение размеров и расположения дефектов по длине трубы

При анализе результатов металлографических исследований были зафиксированы следующие величины, характеризующие размеры дефектов и характер их расположения:

h – глубина залегания дефекта, мм;

l – длина дефектов, мм;

L – расстояние от заднего торца раската до начала дефектов, мм.

От каждого искусственно нанесённого дефекта для металлографических исследований отбиралось 2-6 образцов. Для каждого вида искусственно нанесённых дефектов вычислены средние значения величин $h_{ср}$, $l_{ср}$, $L_{ср}$.

Влияние процесса прокатки труб наружным диаметром 101,6 мм с толщиной стенки 6,5 мм на средние величины $h_{ср}$, $l_{ср}$, $L_{ср}$ отражено на рисунках 25-27.

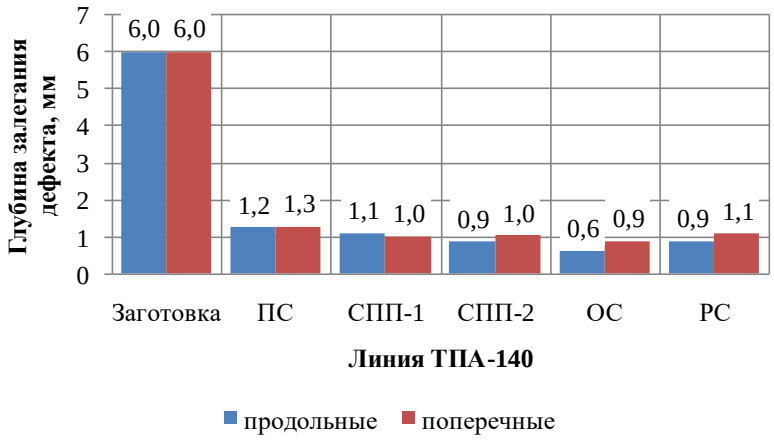


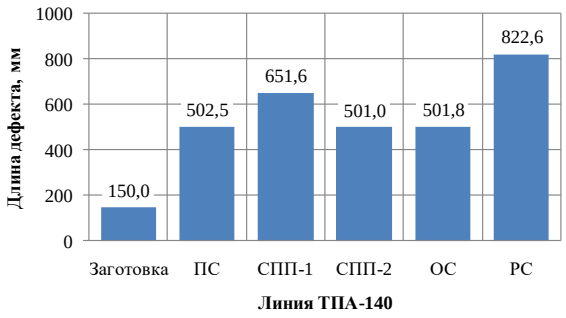
Рисунок 25. Влияние прокатки труб в линии ТПА-140 на среднюю глубину залегания дефектов

Основное уменьшение глубины залегания дефектов при прокатке в линии ТПА-140 происходит в прошивном стане. В редукционном стане глубина дефектов увеличивается.

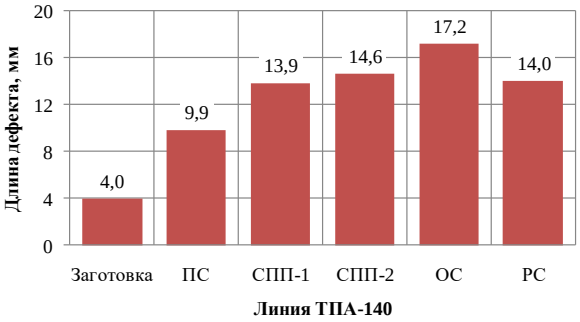
Искусственные дефекты продольной ориентации выкатываются интенсивнее, чем дефекты поперечной ориентации. Суммарное изменение глубины залегания дефектов при прокатке труб наружным диаметром 101,6 мм с толщиной стенки 6,5 мм составило:

- продольной ориентации: 85%;
- поперечной ориентации: 81,7%.

Основное увеличение длины дефектов и расстояния до дефектов также происходит в прошивном стане.



а



б

Рисунок 26. Влияние прокатки труб на среднюю длину дефектов а) продольной ориентации; б) поперечной ориентации

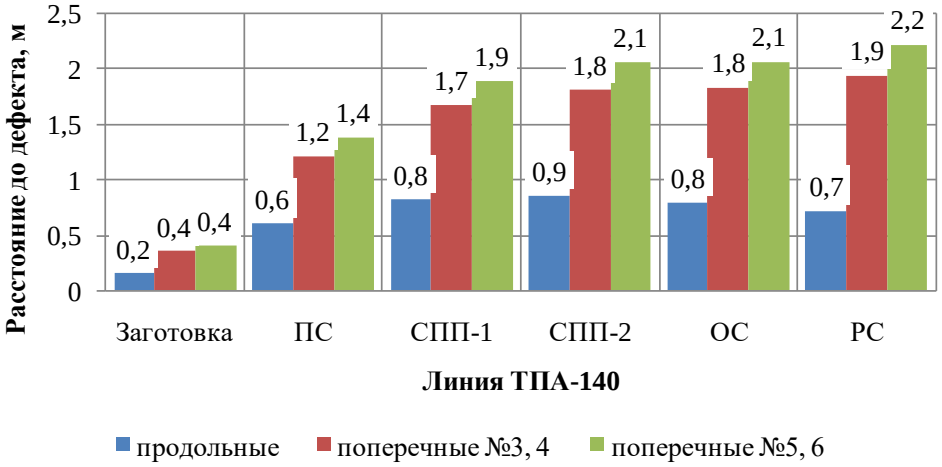


Рисунок 27. Влияние прокатки труб на расстояние до дефектов

Изменение угла скручивания продольно ориентированных дефектов в станах линии ТПА-140 показано на рисунке 28.

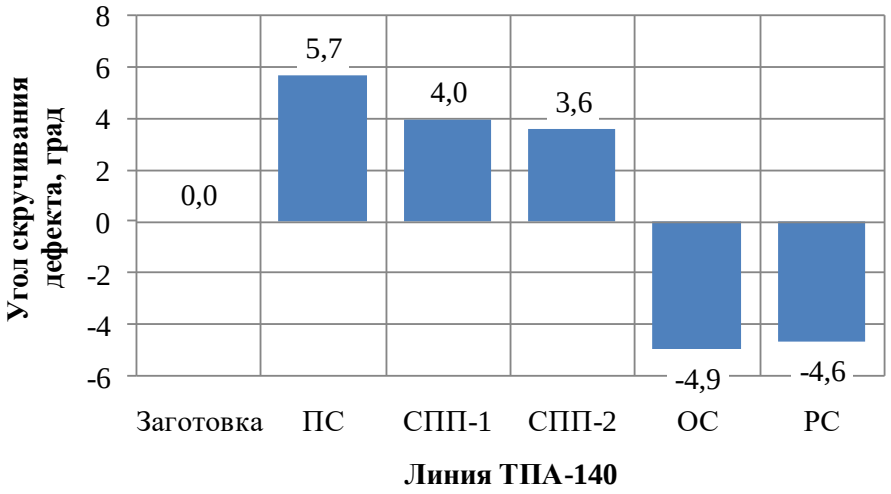


Рисунок 28. Угол скручивания продольно ориентированных дефектов при прокатке в станах

Из рисунка 28 видно:

- угол скручивания изменяется во всех станах линии ТПА;
- наибольшее изменение угла скручивания зафиксировано после прокатки в обкатном стане – 8,5°;
- в обкатном стане угол скручивания изменяется на противоположный.

Дефекты заготовки переходят на готовую трубу. Средняя глубина залегания дефектов на трубе после редукционного стана составила:

- продольной ориентации: 0,9 мм (13,8% от толщины стенки);

- поперечной ориентации: 1,1 мм (16,9% от толщины стенки).

Требования стандартов на производство труб могут ограничивать глубину дефектов на готовой трубе не более 5% от толщины стенки. Для толщины стенки 6,5 мм эта величина составит 0,325 мм.

Соответственно, можно рассчитать допустимую глубину залегания дефектов на заготовке для прокатки труб наружным диаметром 101,6 мм с толщиной стенки 6,5 мм:

- продольной ориентации: $\frac{0,325*85}{5} = 5,53$ мм;
- поперечной ориентации: $\frac{0,325*81,7}{5} = 5,31$ мм.

3.9 Общий анализ трансформации искусственно нанесенных дефектов

Приведён анализ полученных результатов в ходе опытно-промышленных прокаток. Результаты анализа сведены в таблице 9

Знак «-» в таблице 10 означает раскручивание дефектов продольной ориентации, а также увеличение глубины залегания дефектов.

Анализируя результаты таблицы 9:

1. Форма дефектов в поперечном сечении формируется в первом по ходу прокатки стане. При прокатке в последующих станах форма дефектов повторяется;
2. Угол скручивания дефектов продольной ориентации изменяется во всех станах линии ТПА.
3. На трубе за редукционным станом в области дефектов наблюдаются плёны и раковины-вдавы. На поверхности раската за станами продольной оправочной прокатки (СПП-1, СПП-2) продольно ориентированные дефекты можно классифицировать к виду закат.

Таблица 9 – Сводная таблица по результатам опытно-промышленной прокатки в линии ТПА-140

№	Параметр	Ориентация дефекта на заготовке	Стан в линии ТПА-140				
			прошивной	СПП-1	СПП-2	обкатной	редукционный
1	Внешний вид дефекта	продольные	отслоение металла продольной или поперечной ориентации, соединённое с основным металлом одной стороной				
		поперечные					
2	Форма дефекта в поперечном сечении	продольные	саблевидная; разветвлённая; с ответвлениями	саблевидная; с ответвлениями; навстречу друг другу	саблевидная; с ответвлениями	саблевидная; разветвлённая	саблевидная; разветвлённая
		поперечные	саблевидная; замкнутая; с широким основанием	саблевидная; с широким основанием	саблевидная; замкнутая; с широким основанием	саблевидная; замкнутая; с широким основанием	саблевидная; замкнутая; с широким основанием
3	Наличие окалины/диффузионных окислов/обезуглероженного слоя	продольные	+/+/+. Полости дефектов в половине случаев заполнены окалиной				
		поперечные					
4	Классификация дефекта	продольные	плена	плена, закат	плена, закат	плена	плена
		поперечные	плена, раковина-вдав	плена	плена	плена, раковина-вдав	плена, раковина-вдав

Продолжение таблицы 9

5	Длина дефекта, мм	продольные	502,5	651,6	501	501,8	822,7
		поперечные	9,86	13,88	14,63	17,22	14,04
6	Расстояние от заднего торца до дефекта, м	продольные	0,6	0,82	0,85	0,79	0,72
		поперечные 3, 4	1,21	1,67	1,81	1,83	1,94
		поперечные 5, 6	1,38	1,89	2,06	2,07	2,22
7	Угол скручивания, град	продольные	5,72	4	3,6	-4,9	-4,6
8	Глубина залегания дефектов, мм	продольные	1,24	1,11	0,86	0,61	0,89
		поперечные	1,28	1,02	1,03	0,87	1,08
9	Изменение глубины залегания дефектов, %	продольные	79,26	10,92	22,03	29,32	-45,16
		поперечные	78,71	20,49	-1,06	15,14	-23,57

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ГЛУБИНОЙ ЗАЛЕГАНИЯ И ПРИЧИНОЙ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ГОРЯЧЕДЕФОРМИРОВАННЫХ ТРУБАХ С ПРОКАТА ТПА-140

4.1 Исходные данные для моделирования

При проведении опытно-промышленных прокаток [10] было зафиксировано изменение характеристик дефектов, искусственно нанесённых на поверхность исходной заготовки. При прокатке во всех станах линии ТПА-140 зафиксировано изменение вида, формы и глубины залегания продольно и поперечно расположенных дефектов. При прокатке в обжимном и прошивном стане зафиксировано разнонаправленное изменение угла продольно расположенных дефектов.

Учитывая полученные при опытно-промышленных прокатках результаты и необходимость исследования влияния конкретного стана линии ТПА-140 на трансформацию дефектов, были разработаны соответствующие 3d-модели заготовок с нанесёнными дефектами. Универсальным, характерным для всех станов линии ТПА-140 (обжимной, прошивной, непрерывный, редукционный) технологическим фактором прокатки, является коэффициент вытяжки.

Моделирование производилось с использованием средств QForm.

При проведении опытно-промышленных прокаток [10] уменьшение глубины залегания дефектов исходной заготовки достигало 84,7% (поперечных) и 70,9% (продольных) уже на этапе прокатки в прошивном стане. Отметим также, что нанесенный на заготовку точечный дефект (в виде сверленого отверстия) обнаружить при визуальном осмотре раскатов не удалось.

При этом известно, что глубина дефектов при прокатке в станах линии ТПА уменьшается пропорционально величине деформации в станах, суммарной величине деформации в линии ТПА и исходной глубине залегания дефектов [7]. Дефекты различного вида на поверхности заготовки, могут при прокатке в станах трансформироваться в дефекты различного вида

на поверхности раскатов [7, 9]. В [7] также отмечается, что трансформация дефектов при прошивке может зависеть от параметров настройки прошивного стана.

Все дефекты имитировались в соответствии со схемой, приведённой на рисунке 29.

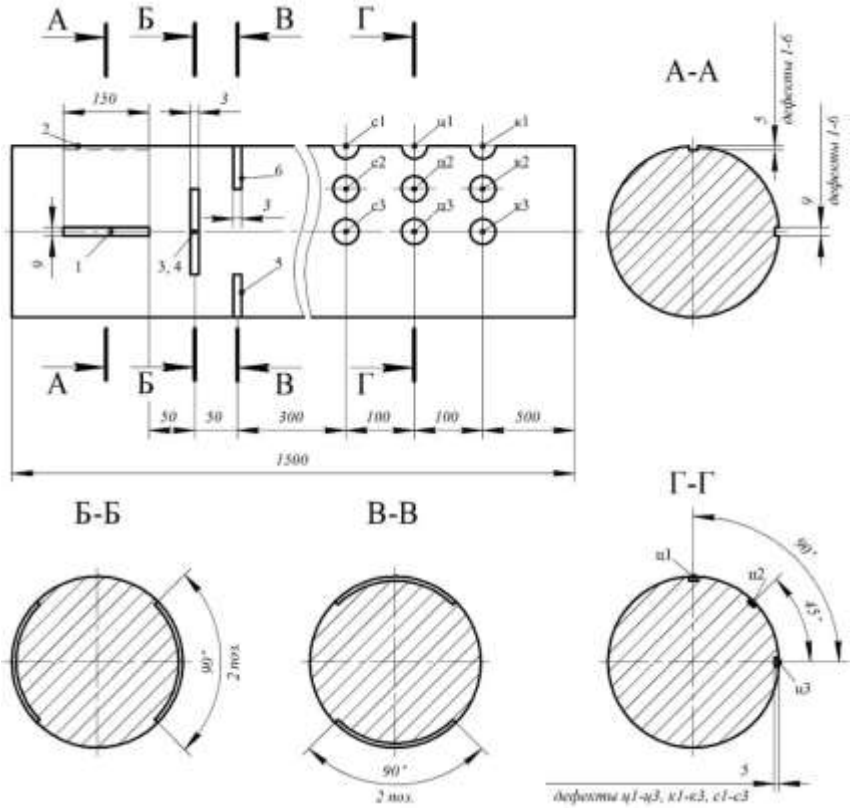


Рисунок 29. Схема нанесения дефектов на исходную заготовку

1-6 – позиции дефектов в соответствии с опытно-промышленной прокаткой; с1-с3, ц1-ц3, к1-к3 – позиции дефектов одинакового профиля с разной глубиной залегания

Размеры дефектов 1-6 и характер их расположения соответствуют проведённой опытно-промышленной прокатке. Данные дефекты нанесены в целях сопоставления результатов компьютерного моделирования и опытно-промышленной прокатки.

Глубина точечных дефектов различной исходной глубины залегания, может при прокатке в линии ТПА изменяться неодинаково [7, 10]. С этой целью нанесены дефекты с1-с3, ц1-ц3, к1-к3 с разной исходной глубиной залегания.

4.2 Схема нанесения контрольных точек

При компьютерном моделировании в среде QFORM необходимо учитывать, что при определённых условиях деформирования, нанесённые на поверхность заготовки (промежуточного раската) дефекты могут закатываться. Последующее попадание таких (закатанных) дефектов в область с растягивающими напряжениями не гарантирует их раскрытия. Это может затруднить получение данных, необходимых для оценки изменения глубины залегания, формы дефекта внутри толщины стенки, картины напряжённо-деформированного состояния в области дефекта.

В связи с вышесказанным в области дефектов необходимо нанести контрольные (трассирующие) точки, позволяющие оценивать изменение НДС в динамике – с течением времени компьютерного моделирования прокатки.

Контрольные точки наносятся в центральной части каждого дефекта на дне и у вершины. Пример нанесения контрольных точек в области протяженных дефектов показан на рисунке 30.

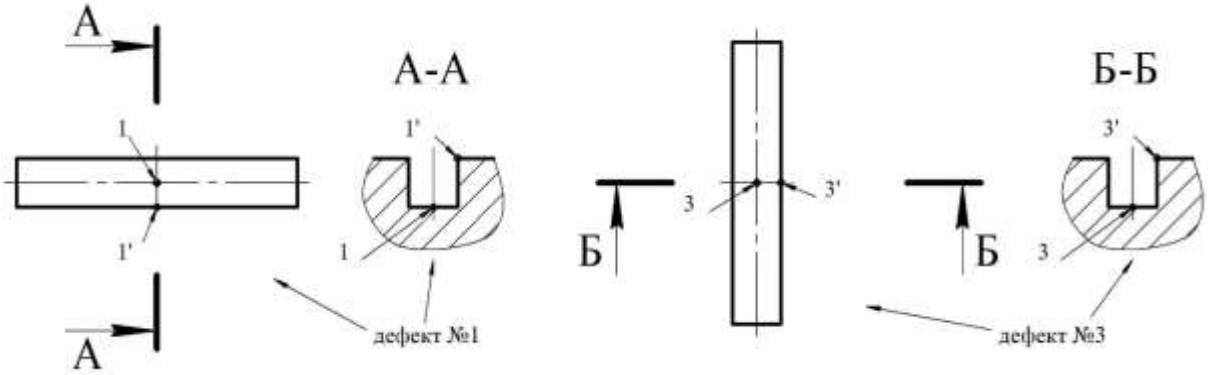


Рисунок 30. Схема нанесения контрольных точек в области протяженных дефектов

Контрольные точки в области точечных дефектов разной глубины наносятся аналогично.

Геометрические параметры исходной глубины дефектов на заготовках приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Геометрические параметры исходной глубины дефектов

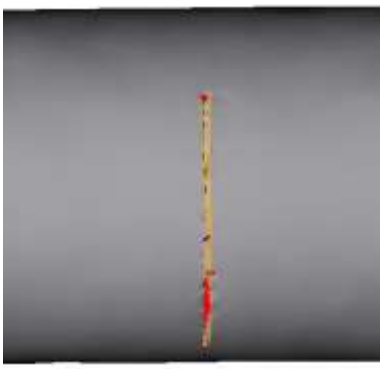
Стан линии ТПА -140	Размер	Вид дефекта		
		точечные	продольные	поперечные
Обжимной	Глубина	3,79	1,01	0,86
Прошивной		6,86	5,94	6,02
СПП-1		4,47	1,70	1,38
СПП-2		3,84	0,84	1,42
Редукционный		1,79	0,59	0,90

4.3 Сопоставление данных опытно-промышленных прокаток и компьютерного моделирования

При прокатке окончательно вид дефектов определяется на основании визуального осмотра и металлографических исследований. При этом изменение вида дефектов в привязке к стану в линии ТПА-140 было зафиксировано в работе [10].

На рисунках 31-34 представлен результат сопоставления опытно-промышленных прокаток и компьютерного моделирования с точки зрения внешнего вида дефектов, так же область дефектов обозначена красными точками.

а



б

в

г

Рисунок 31. Внешний вид дефектов после прокатки в обжимном стане

а, б – поперечных; в, г – продольных

а

б

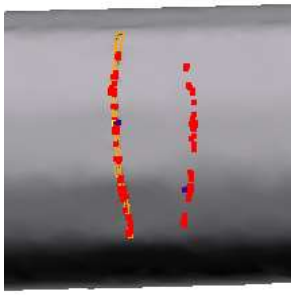
в

г

Рисунок 32. Внешний вид дефектов после прокатки в прошивном стане

а, б – поперечных; в, г – продольных

а



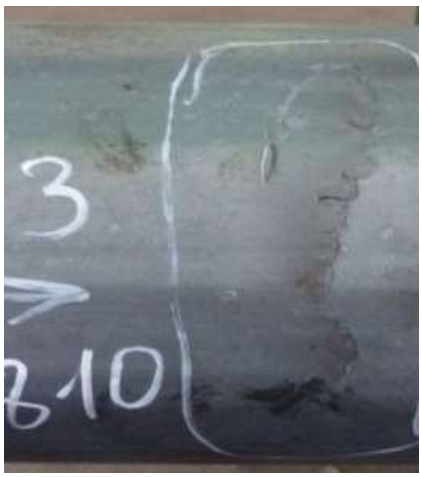
б

в

г

Рисунок 33. Внешний вид дефектов после прокатки в СПП-1

а, б – поперечных; в, г – продольных



а

б

в

г

Рисунок 34. Внешний вид дефектов после прокатки в СПП-2

а, б – поперечных; в, г – продольных

С точки зрения внешнего вида дефектов результаты опытно-промышленных и компьютерных исследований в целом коррелируются.

При компьютерном моделировании процессов прокатки так же, как при проведении опытно-промышленных прокаток изменялась глубина залегания дефектов, т.е. геометрические характеристики дефектов.

4.4 Установление зависимостей между изменением глубины залегания дефектов и параметрами процесса прокатки на основании результатов компьютерного моделирования

В данной работе приведены результаты моделирования трансформации дефектов при продольной прокатке. Данная работа является частью исследования по изучению трансформации дефектов во всех станах линии ТПА-140.

В таблице 11 представленные геометрические параметры глубины дефектов для всех заготовок СПП-1 и СПП-2

Таблица 11 – Исходные геометрические параметры глубины дефектов для всех заготовок

Модель	ПП	ПР	Точечные			
			Г	С	Н	СР
СПП 1-1	1,38	1,70	6,44	4,62	2,34	4,47
СПП 1-2	1,44	1,20	3,99	3,18	1,60	2,92
СПП 1-3	1,35	1,83	3,39	2,43	1,19	2,34
СПП 1-4	1,38	1,96	6,80	4,99	2,34	4,71
СПП 2-1	1,42	0,84	5,97	3,70	1,85	3,84
СПП 2-2	1,01	1,24	4,39	2,66	1,11	2,72
СПП 2-3	1,26	1,16	4,50	2,78	1,03	2,77
СПП 2-4	0,82	1,01	4,53	2,76	0,99	2,76

Таблица 12 – Изменение геометрических параметров глубины дефектов по результатам компьютерного моделирования прокатки в СПП-1 и СПП-2

Модель	ПП	ПР	Точечные			
			Г	С	Н	СР
СПП 1-1	1,89	2,73	2,55	2,41	1,33	2,16
СПП 1-2	2,39	1,07	1,23	1,10	0,45	0,91
СПП 1-3	1,73	3	1,12	0,84	0,35	0,75
СПП 1-4	1,33	4,31	2,27	1,98	1,31	1,90
СПП 2-1	1,31	1	1,45	1,22	1,15	1,23
СПП 2-2	0,84	0,92	1,65	1,29	1,06	1,24
СПП 2-3	1,16	1,15	2,57	1,65	0,62	1,64
СПП 2-4	0,89	1,13	1,91	1,25	0,48	1,25

На основании полученных данных в таблице построены гистограммы изменения глубины точечных дефектов от исходной глубины, так же приведен график изменения глубины дефектов от комплексного фактора.

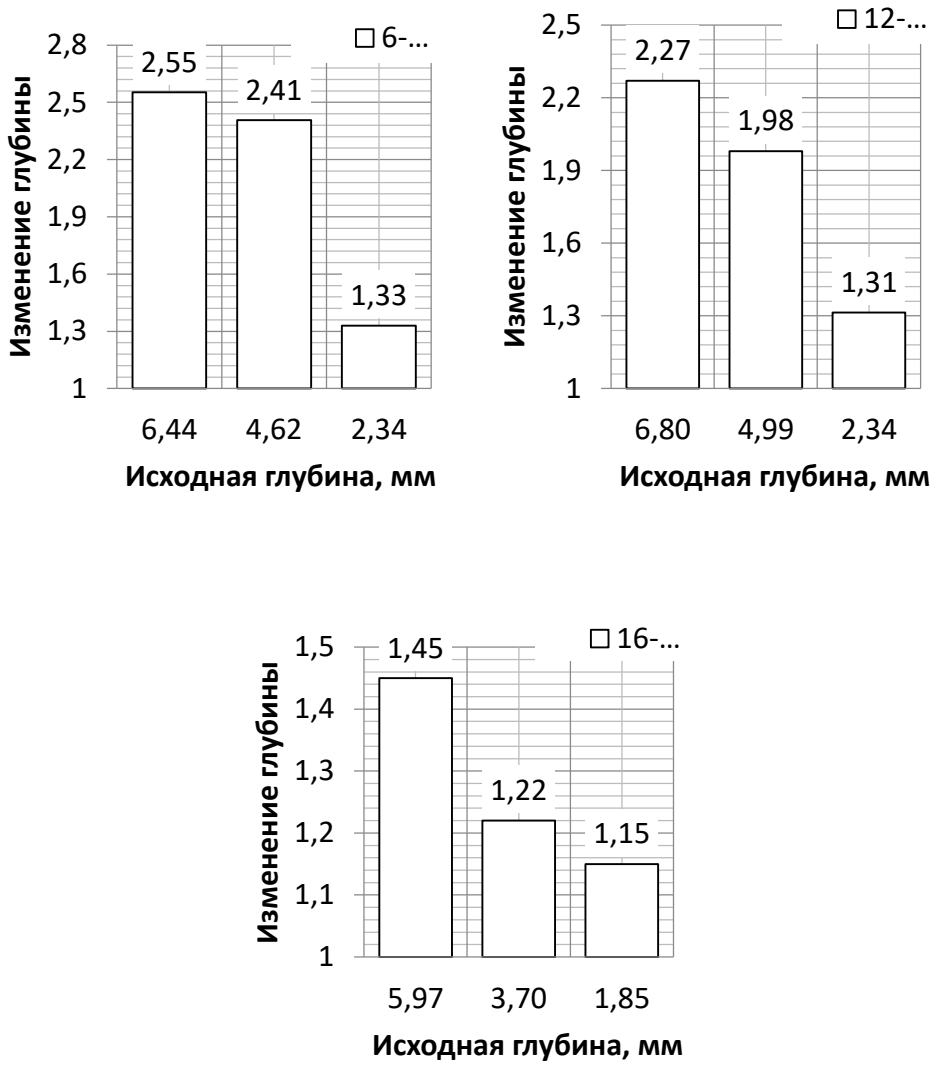


Рисунок 35. Зависимость изменения глубины точечных дефектов от исходной глубины

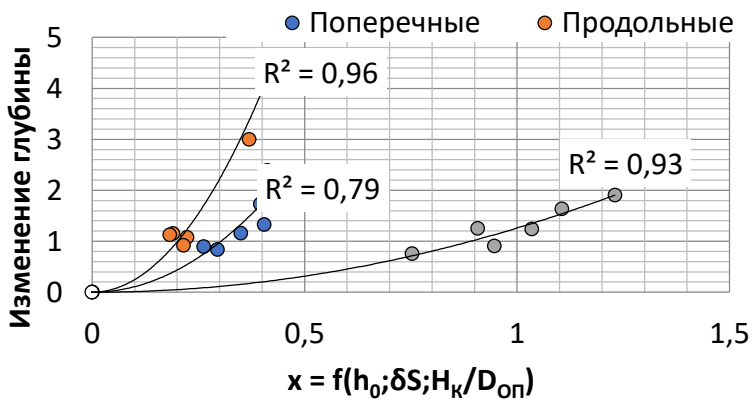


Рисунок 36. Изменение глубины залегания дефектов от совместного влияния факторов процесса

Проведя анализ гистограмм и графика:

1. Получены закономерности изменения глубины залегания дефектов в СПП линии ТПА-140.

2. С увеличением глубины дефекта на заготовке в процессе прокатки изменение данной глубины происходит интенсивнее

3. Изменение глубины залегания при прокатке в СПП зависит от совместного влияния нескольких факторов процесса:

- Исходной глубины залегания
- Ориентировки дефекта (поперечно, продольно расположенные дефекты)
- Величины деформации гильзы по толщине стенки
- Параметра настройки валков относительно оправки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе:

1. Изучен состав несоответствий, характерных для технологии производства труб в линии ТПА-140. Наибольшее количество несоответствий относится к категории несоответствий поверхности труб.

2. Изучена штатная методология контроля возникновения несоответствий на трубах. Применяемая система контроля направлена, прежде всего, на выявление труб с несоответствиями, возникающими массово (на каждой трубе в партии).

3. Определены массовые виды несоответствий наружной поверхности труб, характерные для технологии прокатки в линии ТПА-140: плена, раковина-вдав, закаты.

4. Получены статистические закономерности о влиянии параметров технологии прокатки труб в линии ТПА-140 на вероятность возникновения массовых видов дефектов.

5. Изучен механизм трансформации дефектов, искусственно нанесенных на поверхность заготовки, при прокатке в станах линии ТПА-140 труб ø101,6×6,5 мм по штатной технологии. Показано следующее:

- дефекты вида закат, плена и раковина-вдав на наружной поверхности труб могут быть получены в результате трансформации из дефектов исходной заготовки. Дефекты вида плена, раковина-вдав возникают на всех этапах производства труб. Дефекты вида закат возникают при прокатке в станах продольной прокатки линии ТПА-140.

- глубина дефектов на поверхности готовых труб, наблюдаемых при прокатке по штатной технологии, соответствовала глубине дефектов, зафиксированных при проведении опытной прокатки. Следовательно, подтверждается вероятность возникновения рассматриваемых несоответствий из дефектов исходной заготовки.

- для технологии прокатки труб ø101,6×6,5 мм уточнена допускаемая глубина дефектов на поверхности исходной заготовки.

6. При использовании средств компьютерного моделирования получены закономерности изменения глубины дефектов различной ориентации от технологических факторов прокатки гильз в станах продольной прокатки СПП-1 и СПП-2 линии ТПА-140.

7. Полученные закономерности (п.6) могут быть в дальнейшем использованы для расчёта допускаемой глубины дефектов на поверхности гильзы для всего сортаментного ряда труб, прокатываемых в линии ТПА-140.

8. Изучение характеристик механизмов трансформации дефектов в производственных условиях позволило уточнить для линии ТПА-140 причину возникновения дефектов вида раковина-вдав, закат, плена на готовых трубах из дефектов исходной заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правосудович В.В. Дефекты стальных слитков и проката: справочное издание / В.В. Правосудович, В.П. Сокуренко, В.Н. Данченко и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 384 с.

2. Атлас дефектов стали / Под ред. М.Л. Бернштейна, пер. с немецкого Е.Я Капуткина. – М.: Металлургия, 1979. – 188 с.

3. Классификатор дефектов горячекатаных труб из катаной заготовки. Договор № 3.10-С-07/07. Этап №3. Челябинск, 2008. – 84 с.

4. Отчёт ОАО «РосНИТИ» о научно-исследовательской работе по этапу №1, договор № 1.21.1–М–51/15 «Сбор и анализ информации по фактическим видам, характеру расположения, глубине залегания дефектов», Челябинск, 2016 г., 56 с.

5. Розов Н.В. Производство труб. Справочник для рабочих / Н.В. Розов. - М.: Металлургия, 1974. – 600 с.

6. Данилов Ф.А. Горячая прокатка труб. Издание второе, переработанное и дополненное / Ф.А. Данилов, А.З. Глейберг, В.Г. Балакин. – М.: Металлургиздат, 1962. – 592 с.

7. Зильберг Ю.В., Чус В.Г., Кагарлицкий А.С., Бондаренко В.А., Фот Г.В., Гороховский В.М. Статистический анализ брака наружной поверхности котельных труб // Обработка металлов давлением. Сборник научных трудов №59. – М.: Металлургия, 1976. – С. 257-273.

8. Отчёт ОАО «РосНИТИ» о научно-исследовательской работе по этапу №2, договор № 1.21.1–М–51/15 «Выбор сортамента труб и анализ технологии прокатки труб», Челябинск, 2016 г., 53 с.

9. Терещенко А.А., Кравченко О.Ю., Скрынник А.В., Фролов Я.В. Видоизменение дефектов горячепрессованных труб при холодной пильгерной прокатке // Пластическая деформация металлов. 2014. С. 160 - 163.

10. Отчёт ОАО «РосНИТИ» о научно-исследовательской работе по этапу №4, договор № 1.21.1–М–51/15 «Участие в опытных прокатках по согласованному сортаменту труб», Челябинск, 2017 г., 66 с.