

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС»

На правах рукописи

Экз. №

КРАСИКОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ ТРУБ
НА АГРЕГАТАХ С НЕПРЕРЫВНЫМИ СТАНАМИ С ЦЕЛЬЮ
ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ОПРАВОК**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель

проф., д.т.н.

Н.М. Вавилкин

Москва – 2015

Содержание

	стр.
Введение.....	5
Глава 1. Обзор научно-технической литературы.....	8
1.1 Особенности технологии и оборудования ТПА с непрерывным раскатным станом.....	8
1.2 Технология изготовления плавающих, контролируемо-перемещаемых оправок и параметры качества.....	14
1.3 Условия работы и износ длинных оправок раскатных станов.....	17
1.4 Тепловое состояние длинных оправок в цикле раскатки.....	22
Глава 2. Исследование особенностей параметров раскатки в двух и трехвалковых клетях непрерывных станов.....	28
2.1 Сравнительное исследование деформационных и энергосиловых параметров при раскатке в двух и трехвалковых клетях на плавающей и контролируемо-перемещаемой оправках...	28
2.2 Анализ кинематических параметров при раскатке в двух и трехвалковых клетях на плавающей и контролируемо-перемещаемой оправках.....	42
Глава 3. Исследование влияния технологических факторов раскатки на температурное поле длинных оправок непрерывных станов.....	46
3.1 Методика исследования влияния технологических факторов раскатки на температурное поле длинных оправок.....	46
3.1.1 Качественный анализ влияния технологических факторов раскатки на температурное поле длинных оправок.....	47
3.1.2 Математическая постановка задачи расчета температурного поля длинной оправки.....	49

3.1.3 Численная реализация решения уравнения нестационарной теплопроводности.....	56
3.2 Влияние основных технологических факторов раскатки на температурное поле длинных оправок непрерывных станов.....	64
3.2.1 Исследование тепловых условий работы для плавающей оправки.....	64
3.2.2 Анализ тепловых условий работы для контролируемо-перемещаемой оправки.....	69
3.2.3 Исследование влияния технологических факторов на температурное поле длинной оправки.....	71
3.2.3.1 Изучение влияния температуры гильзы на температурное поле длинной оправки.....	72
3.2.3.2 Анализ влияния длительности процесса раскатки на температурное поле длинной оправки.....	73
3.2.3.3 Исследование влияния диаметра длинной оправки на ее температурное поле.....	74
3.3 Проверка сходимости результатов расчета температурного поля длинной оправки в промышленных условиях.....	77
Глава 4. Исследование влияния технологических факторов на термонапряженное состояние длинных оправок непрерывных раскатных станов.....	81
4.1 Математическая постановка задачи расчета термических напряжений длинной оправки и ее численная реализация.....	81
4.2 Влияние основных технологических факторов раскатки на термонапряженное состояние длинных оправок непрерывных станов.....	84
4.2.1 Исследование термонапряженного состояния плавающей оправки.....	84
4.2.2 Анализ термонапряженного состояния контролируемо-	

перемещаемой оправки.....	87
4.2.3 Исследование влияния технологических факторов раскатки на термонапряженное состояние оправки.....	88
4.2.3.1 Изучение влияния температуры гильзы на термонапряженное состояние длинной оправки.....	89
4.2.3.2 Анализ влияния длительности процесса раскатки на термонапряженное состояние длинной оправки.....	90
4.2.3.3 Исследование влияния диаметра длинной оправки на ее термонапряженное состояние.....	91
Глава 5. Исследование условий работы и износа длинных оправок ...	94
5.1 Экспериментальное исследование уменьшения диаметра длинных оправок.....	95
5.2 Исследование особенностей теплового и термонапряженного состояния длинных оправок с наплавленным слоем.....	110
5.3 Разработка рекомендаций по повышению износостойкости длинных оправок и предложений для снижения производственных издержек	116
Основные результаты и выводы.....	119
Список использованной литературы.....	122
Приложение 1. Акты внедрения результатов исследований в технологические процессы производства бесшовных труб на ОАО "СинТЗ".....	130
Приложение 2. Акт внедрения результатов исследований в учебный процесс на кафедре ТОТП НИТУ "МИСИС".....	136

Введение

Одной из главных задач, стоящей перед трубной промышленностью Российской Федерации, является сокращение производственных издержек при обеспечении высокого качества выпускаемой продукции. Производство труб на трубопрокатных агрегатах (ТПА) с непрерывными станами получило наибольшее развитие ввиду высокой производительности и экономичности. В отечественной и мировой практике, кроме плавающих оправок, эксплуатируются так же контролируемо-перемещаемые, раскатка гильз на которых осуществляется в двух и трехвалковых клетях. Изменение условий контакта контролируемо-перемещаемой оправки с деформируемым металлом в трехвалковых клетях существенно влияет на износостойкость инструмента и требует проведения сравнительного анализа деформационных, энергосиловых и кинематических параметров процесса раскатки. Длинные оправки непрерывных станов эксплуатируются в тяжелых температурных и силовых условиях, а тенденция к увеличению производства бесшовных труб из легированных сталей существенно усугубляет эти условия. Доля затрат на плавающие оправки в себестоимости готовых труб составляет 3-5 %, а на контролируемо-перемещаемые доходит до 20 %, так как их закупка осуществляется по импорту. Одним из основных факторов определяющим стойкость длинных оправок является уровень температуры и её распределение по объёму раскатного инструмента. В этой связи сравнительное исследование теплового состояния плавающих и контролируемо-перемещаемых оправок в процессе раскатки в непрерывных станах с двух и трехвалковыми клетями является актуальной задачей. Неравномерный разогрев длинных оправок в процессе раскатки и дальнейшее резкое охлаждение приводят к появлению знакопеременных термических напряжений, что обуславливает необходимость исследования

их циклического воздействия на инструмент с целью предотвращения появления сетки разгара.

Одним из характерных видов износа в производственной практике является уменьшение диаметра длинной оправки. Изнашивание оправок в цикле раскатки носит комбинированный характер: механическое и коррозионно-механическое. В производственных условиях уменьшение рабочего диаметра оправки до определенной критической величины является браковочным признаком, после чего инструмент направляется в переточку на меньший размер. В этой связи актуальной задачей является исследование уменьшения диаметра длинных оправок с целью повышения их стойкости.

Автором выносятся на защиту:

- результаты сравнительного анализа деформационных, энергосиловых и кинематических параметров раскатки на плавающей и контролируемо-перемещаемой оправках в непрерывных станах с двух и трехвалковыми клетями;

- результаты исследований теплового состояния плавающей и контролируемо-перемещаемой оправок в зависимости от технологических факторов раскатки;

- результаты расчета термонапряженного состояния плавающей и контролируемо-перемещаемой оправок в зависимости от технологических факторов раскатки;

- выводы по исследованию уменьшения диаметра длинных оправок, изготовленных из хромоникелевых сталей;

- закономерности теплового и термонапряженного состояния длинных оправок с наплавкой жаропрочных материалов;

Целью настоящей работы является исследование процесса раскатки на ТПА с непрерывными станами, и совершенствование на этой основе условий эксплуатации длинных оправок для повышения их износостойкости.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести сравнительный анализ деформационных, энергосиловых и кинематических параметров раскатки на плавающей и контролируемо-перемещаемой оправках в непрерывных станах с двух и трехвалковыми клетями;

- определить тепловое и термонапряженное состояние длинных оправок в зависимости от технологических факторов раскатки и оценить сходимость полученных результатов в промышленных условиях;

- изучить уменьшение диаметра длинных оправок из конструкционных хромоникелевых сталей;

- исследовать особенности теплового и термонапряженного состояния длинных оправок с наплавленным слоем областей повышенного износа.

Глава 1. Обзор научно-технической литературы

Уровень развития трубного производства в России и за рубежом характеризуется большим разнообразием применяемых способов и технологий для производства бесшовных труб. Наибольшее распространение при производстве бесшовных труб получили ТПА с непрерывным станом, в котором раскатка гильзы осуществляется на длинной оправке [1, 2].

1.1 Особенности технологии и оборудования ТПА с непрерывным раскатным станом

Агрегаты с непрерывным станом в силу их значительной единичной мощности весьма перспективны для производства труб массового назначения [3]. На современных ТПА с непрерывным станом производят бесшовные трубы диаметром от 16 до 426 мм с толщиной стенки 2,0...25 мм из углеродистых, низко и высоколегированных сталей. Для раскатки гильзы в черновую трубу применяют продольную непрерывную прокатку в 3-9 клетях с круглыми и овальными калибрами на длинной оправке.

В работе [51] приведено описание непрерывного стана с тремя двухвалковыми клетями, эксплуатируемого в США. Технология прокатки на нем отлична, поскольку длинные трубы прокатываются на относительно коротких оправках, длина которых составляет всего 10 % длины прокатываемой трубы. Описание параметров технологии изготовления труб на данном стане в источнике отсутствует. Эксплуатация непрерывных станов с тремя клетями не получила распространения.

Сравнительные технические характеристики ТПА с непрерывным станом, используемых в настоящее время на отечественных предприятиях, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Сравнительные характеристики ТПА с непрерывным станом

	ОАО «СинТЗ» ТПА 80	ОАО «ПНТЗ» ТПА 30-102	ОАО «ВТЗ» ТПА 159-426			ОАО «ТАГМЕТ» PQF 10 3/4"	
1	2	3	4	5	6	7	8
Диапазон производимых труб: D_T , мм S_T , мм	28,0-88,9 2,8-14,0	32,0-108,0 2,9-8,0	168,0-426,0 7,1-40,5			73,0-273,0 5,0-25,0	
Кол-во клетей стана	8	9	7			5	
Кол-во валков в клетях непрерывного стана	2	2	2			3	
Режим работы оправки непрерывного стана	плавающий	плавающий	контролируемо-перемещаемый			контролируемо-перемещаемый	
Тип заготовки	круглая катаная	круглая катаная	круглая НЛЗ			круглая НЛЗ	
Диаметр заготовки D_3 , мм	100-120	150	240	300	360	210	300
Наружный диаметр гильзы D_G , мм	98-126	148	257-263	281-344	416-495	224	332
Толщина стенки гильзы, S_G , мм	14-22	15-21	25,5-42,0	26,5-58,0	30,5-61,5	16,1-33,3	18,7-38,0
D_G/S_G (max)	9	9,9	10,3	13,0	16,6	13,9	17,8
Максимальный коэффициент вытяжки в прошивном стане	2,25	2,77	суммарная – 3,49			3,84	
Диаметр черновой трубы $D_{ч.т.}$, мм	91-94	115	189-235,2	269,6-290	357,2-443,5	188-192,5	285,4-291,1
Толщина стенки черновой трубы $S_{ч.т.}$, мм	2,8-13,0	3,35-7,9	7-35,1	7,9-37,8	8,6-40	4,65-23,55	5,30-24,65
$D_{ч.т.}/S_{ч.т.}$ (max)	33,6	34,3	43,3			54,7	
Максимальный коэффициент вытяжки в непрерывном стане, max μ	5,74	5,33	4,26			3,89	
Диаметр бочки валков D_6 , мм	400	550-530	1-3 кл – 930-620; 4-7 кл – 840-520			1 кл – 715,64-665,64;	1 кл – 698,55-648,58;

						2кл – 722,58- 672,58; 3кл – 724,68- 674,68; 4-5кл – 624,18- 574,18	2кл – 707,70- 657,70; 3кл – 709,86- 659,86; 4-5кл – 563,86- 513,84
Ширина бочек валков L_b , мм	230	230	1-3кл - 590; 4-7кл - 540			1-3кл – 280; 4-5кл – 300	1-3кл – 320; 4-5кл – 300
Диаметр оправок $D_{оп}$, мм	63-83	95-104	165-425			145,20- 179,55	239,80- 278,35
Общая длина оправок $L_{оп}$, мм	19500	19500	24000			17500	
Расстояние между осями клеток, мм	850	1150	1630, 2040, 1530, 1840, 1840, 1430			1050,1580, 1050, 1050	
D_b/D_T	4,2-4,4	4,6-4,8	1-3 кл – 1,4-4,9; 4-7 кл – 1,2-4,4			1-3кл – 3,5-3,8; 4-5кл – 3,0-3,3	1-3кл – 2,2-2,5; 4-5кл – 1,7-1,9
$\Delta V/V_d$ (max), %	27,4-30,3	25,0-27,1	27,3-35,8	33,6-47,4	56,9-89,2	9,7-14,8	16,2-28,5
ΔS (max), мм	14,0	13,1	21,6	21,1	24,9	12,0	15,3
ΔS (min), мм	10,5	11,7	18,4	19,7	18,1	9,8	12,5
Производительность P , тыс.тн/год	230	650	700			600	

Анализ таблицы 1.1 показал, что каждый из приведенных ТПА может применяться при производстве труб определенного диаметра: для малого (до 108 мм) - в основном прокатка в 8-9 двухвалковых клетях на плавающей оправке, среднего и большого (от 114 до 426 мм) - в 5-7 двух или трехвалковых клетях на контролируемо-перемещаемой [3, 4]. Раскатка на плавающей оправке в основном применяется для производства труб из углеродистых марок сталей, в то время как на контролируемо-перемещаемой обеспечивается пластическая деформация легированных сталей.

Основное достоинство процесса раскатки в непрерывном стане – возможность прокатки черновых труб значительной длины (до 33 м) с большой скоростью (до 6,5 м/с), что обеспечивает высокую производительность установки. К преимуществам ТПА данного типа следует отнести также минимальные технологические отходы и расположение оборудования, удобное для автоматизации технологических операций [1-4].

Из таблицы 1.1 следует, что развитие традиционного способа непрерывной прокатки на плавающей оправке сдерживалось рядом технологических ограничений, а именно: максимальная длина оправки (до 20 м) ограничивала размеры черновой трубы; увеличение диаметра трубы приводило к недопустимой массе оправки; уменьшение толщины стенки усложняло извлечение инструмента [2].

По мнению многих авторов [2, 3, 5-8] наиболее прогрессивным в производстве бесшовных труб является процесс раскатки гильзы в непрерывном стане на контролируемо-перемещаемой оправке. Однако существенное повышение качества производимой продукции и расширение диапазона размеров бесшовных труб было достигнуто с внедрением новых непрерывных станов с трехвалковыми клетями [5-8].

Новая технология раскатки гильз внедряется по всему миру – наибольшее распространение агрегаты подобного типа получили в Китае, ТПА со станом FQM введен в ОАЭ, строительство подобных агрегатов ведется в Индии, Южной и Северной Америке. В России в IV квартале 2008г. на ОАО «Таганрогский металлургический завод» (ОАО «ТАГМЕТ») был введен в эксплуатацию агрегат с непрерывным станом PQF 10 3/4", предназначенный для производства бесшовных труб нефтяного сортамента диаметром 73...273 мм с толщиной стенки от 5 до 25 мм. Двумя годами ранее в Белоруссии на РУП «Белорусский металлургический завод» (РУП «БМЗ») введен в эксплуатацию агрегат подобного типа PQF 6 5/8" для производства труб диаметром 21-168 мм с толщиной стенки от 2,3 до 25 мм. Непрерывный

стан PQF 10 3/4" состоит из пяти трехвалковых клетей, калибры которых установлены с поворотом на 60° друг относительно друга. Раскатка гильзы происходит на контролируемо-перемещаемой оправке, скорость перемещения которой несколько ниже скорости выхода трубы из первой клетки стана. В мировой промышленности кроме пятиклетевых эксплуатируются так же шестиклетевые трехвалковые непрерывные станы PQF.

Основными производителями оборудования непрерывных трубoproкатных станов подобной конструкции являются немецкая компания «SMS Meer» (стан PQF – Premium Quality Finishing mill) и итальянская – «Danieli» (стан FQM – Fine Quality Mill) [6-9]. Анализ научно-технической литературы показал отсутствие исчерпывающей информации по деформационным, энергосиловым и кинематическим параметрам раскатки в непрерывных станах с трехвалковыми клетями.

Теоретическим вопросам изучения процесса раскатки труб в непрерывных станах посвящены многочисленные работы А.П. Чекмарева, Я.Л. Ваткина, И.П. Савкина, И.А. Чекмарева, Г.И. Гуляева, В.Н. Данченко и др. Было проведено большое количество исследований, освещающих отдельные вопросы теории и практики процесса непрерывной прокатки труб на длинной оправке, а также работ, посвященных разработке и исследованию рациональных технологических режимов и калибровок инструмента непрерывных оправочных станов [4, 12-35]. Однако данные работы проводились и были ориентированы на непрерывные станы с двухвалковыми клетями и не могут быть применены, в полной мере, к непрерывным оправочным с трехвалковыми.

Перед подачей оправки в гильзу для дальнейшей раскатки на ее поверхность наносится технологическая смазка. В традиционной непрерывной прокатке на плавающей оправке это, как правило, водный раствор триполифосфата натрия, для контролируемо-перемещаемых чаще

используется графитовая смазка. Смазка снижает коэффициент трения на поверхности контакта металла с оправкой и способствует снижению перегрева [3, 4].

В трехвалковых рабочих клетях в сравнении с традиционными двухвалковыми осуществляются большие разовые обжаты. В этой связи общее количество клетей в непрерывных станах новой конструкции гораздо меньше и составляет 4-5 против 8-9, используемых в традиционной раскатке.

Важной особенностью агрегатов с непрерывным станом PQF является наличие двухвалкового прошивного стана с грибовидными валками и направляющими приводными дисками Дишера. К основным преимуществам станов подобного типа можно отнести: меньший износ направляющего инструмента (дисков Дишера); увеличение осевой скорости прокатки [36].

Обжатие гильзы тремя валками в совокупности с контролируемым перемещением оправки обеспечивает более благоприятное напряженно-деформированное состояние металла за счет подпирющей силы трения и снижения неравномерности деформации, что, в свою очередь, положительно сказывается на качестве готовых труб. Тем не менее, в связи с тяжёлыми температурными и силовыми условиями работы оправок возникает необходимость повышения их износостойкости [6-9, 36].

Негативный фактор повышенного износа инструмента для случая контролируемого перемещения может быть компенсирован возможностью прокатки большего диапазона стенок труб в трехвалковой клети в сравнении с двухвалковой и, как следствие, необходимостью содержания меньшего парка оправок [36]. Данное обстоятельство приведет к существенному сокращению производственных издержек. Кроме того, трехвалковая схема обеспечивает меньшую разностенность черновых труб. Геометрически это подтверждается эффектом диафрагмы – чем больше лепестков, тем больше форма отверстия похожа на окружность. В то же время, очевидно, что дальнейшее увеличение числа валков в рабочей клети (до четырех и более) с

технологической точки зрения предпочтительно, однако в этом случае усложняется конструкция клетки и снижается ее надежность [5].

Сравнительный анализ различных способов получения исходных заготовок для производства бесшовных труб показал эффективность и экономичность применения непрерывно-литой заготовки [3, 37-45].

На основании проведенного обзора научно-технической литературы можно сделать вывод о том, что при организации нового производства и реконструкции действующего приоритетным представляется применение агрегатов с непрерывным станом и контролируемо-перемещаемой оправкой.

1.2 Технология изготовления плавающих, контролируемо-перемещаемых оправок и параметры качества

Сравнительный анализ материалов, используемых для изготовления длинных оправок на предприятиях РФ, представлен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 Сравнительные характеристики материалов оправок

№	марка стали	классификация	завод/ТПА	факт. стойкость, шт	твёрдость поверхности, НВ
1	35ХН2Ф	конструкционная легированная	СинТЗ <i>ТПА-80</i>	800	212-248
2	0ХН2Ф	конструкционная легированная	ПНТЗ <i>ТПА 30-102</i>	800	205-232
3	4Х5МФ1СА (ЭП572)	инструментальная штамповая	ВТЗ <i>ТПА 159-426</i>	1 500	345-377
4	X35 CrMoV 05 KU – UNI 2955 (аналог 35Х5МФ)	инструментальная штамповая	ТАГМЕТ <i>PQF 10 ¾"</i>	1 450	315-360

В работе [46] для каждой стали приведена ее условная классификация. Анализ таблицы 1.2 позволяет сделать вывод, что стойкость оправки связана с твердостью ее рабочей поверхности и тем выше, чем больше значение данного показателя.

Плавающие оправки изготавливаются из заготовок конструкционных легированных марок сталей полученных продольной прокаткой. Чистота рабочей поверхности и прочностные свойства инструмента достигаются обкаткой заготовки [1-4, 34].

Сталь, легированная различными элементами, среди которых хром, ванадий, молибден и кремний используется для эффективного увеличения срока службы оправки. С одной стороны содержание углерода имеет влияние на возникновение трещин в условиях циклических температур, но с другой он увеличивает твердость стали. Критическая величина содержания углерода составляет 0,3 %. Более высокое содержание углерода приводит к возникновению трещин.

Плавающая оправка состоит из наконечника, рабочей части и хвостовика. Изготовление новых оправок в условиях ОАО "СинТЗ" производится с использованием операции обкатки. Сначала осуществляется горячая правка заготовки на обкатном стане. Температура штанги при выходе их печи должна быть в пределах от 750 до 820 °С. Правка осуществляется в три пропуска с обжатием 0,5-0,6 мм. На бесцентрово-обдирочном станке производится предчистовая обточка с припуском 0,5+0,20/-0,00 мм от номинального диаметра с чистотой поверхности 2,5 мкм. Далее нагретые заготовки обкатываются в двухвалковом стане с припуском 1 мм от номинального диаметра. Температура заготовки при выходе их печи должна быть в пределах от 820 до 870 °С, а после первого пропуска от 730 до 750 °С. Допуск на диаметр новых оправок должен быть в пределах +0,30/-0,00 мм. Обкатка заканчивается, когда оправка имеет готовый размер диаметра (проверка производится скобой) и гладкую блестящую

поверхность. На поверхности готовых оправок не допускается риск, плен, чашуйчатости, раковин, забоин, граненности.

Оправки максимальных диаметров изготавливаются из новых штанг. Все остальные размеры оправок получают путем переточки изношенных оправок с последующей обкаткой. Диаметр изношенной оправки после переточки должен быть больше соответствующего размера готовой на 0,5 мм с чистотой обработки 2,5 мкм. Нагрев и обкатка оправок производятся в соответствии с техническими требованиями.

В зарубежной практике оправки вместо обкатки подвергают шлифовке и полированию. Стойкость и в том, и в другом случае одинакова [47].

Оправки изготавливают партиями в количестве не менее 12 шт. Допускаемое отклонение по диаметру для оправок одной партии - не более 0,2 мм [2].

Контролируемо-перемещаемые оправки изготавливаются из кованных заготовок инструментальных штамповых сталей. Чистота рабочей поверхности и прочностные свойства инструмента достигаются нанесением специального хромового покрытия [1-4, 34].

Контролируемо-перемещаемая оправка непрерывных станов состоит из следующих частей: наконечник, оправка (рабочая часть), удлинитель, хвостовик. В процессе работы, с нагретым металлом контактирует только рабочая часть, и она воспринимает все нагрузки как тепловые, так и силовые. Удлинитель служит исключительно для увеличения длины оправки. Он соединяется с рабочей частью с помощью замка, который в процессе раскатки воспринимает тянущие усилия. Хвостовик необходим для перемещения оправки с заданной скоростью в процессе работы, а так же для извлечения оправки из черновой трубы [3, 4].

Стойкость рабочей части оправки составляет 400-2000 прокатанных труб. После чего она отправляется на переточку на меньший размер. Срок

службы удлинителя и хвостовика значительно больше и ограничивается лишь техническим состоянием соединений [1-4, 33, 34].

На практике встречаются контролируемо-перемещаемые оправки, имеющие внутреннюю полость (труба с большой толщиной стенки). Как правило, это инструмент большого диаметра. Внутренняя полость обеспечивает лучшее охлаждение оправки водой после прокатки. Кроме того, такая конструкция позволяет значительно снизить вес, не ухудшая при этом прочностных свойств. Одним из недостатков такого инструмента является сложность его изготовления – чрезвычайно трудно получить толстостенную трубу большого диаметра ($D/S < 4$) и длиной более 10-12 метров [1, 2].

Контролируемо-перемещаемые оправки имеют хромовое покрытие для уменьшения коэффициента трения и энергосиловых параметров при раскатке гильз. Хромовое покрытие имеет высокую твердость HRC до 60-80 [1-4, 33, 34]. Стоимость нанесения такого покрытия достаточна высока.

Для использования в промышленных условиях перспективным представляется изготовление длинных оправок способом обкатки. Данная технология доступна и экономична.

1.3 Условия работы и износ длинных оправок раскатных станов

Важнейшими характеристиками процесса раскатки на длинной оправке являются деформационные, энергосиловые и кинематические параметры.

Основная деформация при раскатке гильзы в черновую трубу происходит по толщине стенки. Производственный опыт показал, что режимы, соответствующие основной деформации металла в первых клетях, обеспечивают максимальную производительность стана [4].

Обоснованный выбор и правильный расчет скоростного режима непрерывного стана обеспечивает его безаварийную работу, а так же получение труб заданных размеров и высокого качества [4].

Особенность рассматриваемого процесса раскатки заключается в том, что труба на оправке деформируется в последовательно расположенных калибрах, в которых по мере обжатия стенки происходит нарастание скорости металла. Одновременно с этим увеличивается скорость перемещения длинной оправки, контактирующей с черновой трубой не только в очагах деформации, но и в межклетевых промежутках [14, 15].

Существенное влияние на процесс раскатки (характер деформации металла в калибрах) и качество труб, получаемых в непрерывном оправочном стане, оказывает распределение скоростей прокатки по клетям. При этом кинематические параметры находятся в зависимости от формы калибров и режима обжатия.

Определяя скоростной режим раскатки в непрерывном стане на контролируемо-перемещаемой оправке, следует учитывать, что контактная поверхность металла с валком в очаге деформации каждой клетки имеет, как обычно, зоны опережения и отставания, а с оправкой – только зону опережения. При этом скорость оправки всегда меньше скорости металла в первой клетке стана [48].

Многочисленные лабораторные и промышленные исследования показали, что подпор оказывает более существенное влияние на изменение параметров деформации трубы, чем действие соответствующих натяжений [4, 11-13, 17-19, 24, 28, 29, 32, 33, 49, 50]. Так при прокатке труб с натяжением коэффициент вытяжки увеличивается в сравнении с прокаткой без него, а приложение подпора уменьшает коэффициент вытяжки, причем стенка трубы в выпусках утолщается.

Прокатка с натяжением приводит к плотному охвату оправки трубой и, следовательно, затрудняет её извлечение. Подпор способствует получению зазора между трубой и оправкой, но сопровождается увеличением объема течения металла в поперечном направлении и, следовательно, повышает вероятность переполнения калибра, а при некоторых определенных условиях

приводит к потере продольной устойчивости трубы и образованию некоторых дефектов («гармошки») [48].

Из анализа результатов многочисленных исследований [2, 3, 5-8] можно заключить, что целесообразно стремиться к ведению процесса прокатки при скоростном режиме, близком к режиму свободной прокатки, то есть к условиям, при которых скорости валков каждой клетки соответствуют условиям постоянства секундных объемов металла [1, 2, 48].

Одним из основных признаков классификации непрерывных станов следует считать тип применяемых оправок и характер их движения при прокатке. Известно несколько схем непрерывной прокатки труб: 1) на свободной длинной оправке, перемещающейся за счет сил трения, возникающих на ее поверхности при деформации трубы; 2) на неподвижной длинной оправке; 3) на неподвижных коротких оправках; 4) на подвижной удерживаемой оправке (с замедленным перемещением); 5) на ускоренно перемещающейся оправке; 6) на самоудерживаемой оправке и др. Из них в промышленности применяют первый и четвертый способы [51], второй и третий применялись ранее, остальные не реализованы.

В практике трубного производства условно все длинные оправки можно разделить на плавающие и контролируемо-перемещаемые.

Принудительное перемещение оправок обеспечивается механизмами привода различного типа (реечным, цепным, винтовым, гидравлическим и др.) [17]. Благодаря замедленному принудительному перемещению оправки со скоростью, меньшей скорости заднего конца гильзы, устраняется операция извлечения инструмента после прокатки и появляется возможность прокатывать более длинные трубы.

Анализ существующих методов определения скорости длинной оправки и относительного смещения металла по ней при непрерывной раскатке гильз показал, что известные зависимости не учитывают некоторых особенностей процесса и пригодны для приближенной оценки [4].

Кинематические параметры процесса раскатки оказывают значительное влияние на качество производимых труб и износ технологического инструмента. Изменение схемы взаимодействия гильзы с длинной оправкой существенно усложняет кинематические условия на контакте, что обусловило необходимость их анализа. Высокая стоимость и относительно низкая стойкость длинных оправок подтверждают такую необходимость [2, 33].

В работах Ю.М. Матвеева, В.Н. Данченко и других авторов [78-81] было отмечено, что износ оправок непрерывного стана пропорционален величине суммарной работы сил трения, приходящейся на каждый участок длины инструмента.

Как показали результаты экспериментальных исследований распределения твердости на рабочей поверхности оправок по их длине, характеры изменений данного показателя и накопленной работы сил трения практически совпадают. При этом исходная твердость уменьшается максимально (примерно на 20 %) на участках, находящихся на расстоянии от 5 до 7 м от переднего торца оправки. Именно на этом участке оправки в процессе ее эксплуатации происходит разупрочнение поверхностных слоев металла инструмента и, как следствие этого, повышенный его износ [3].

Основными видами износа длинных оправок являются: сетка разгара, уменьшение диаметра, налипание металла, вмятины рабочей поверхности и обрывы [1-4].

Сетка разгара образуется в цикле раскатки вследствие неравномерного нагрева и резкого охлаждения оправки. С увеличением количества прокатанных труб указанные дефекты проявляются более интенсивно: трещины проникают вглубь металла оправки, окисляются и развиваются более активно [2, 33, 34].

Длинные оправки неравномерно разогреваются и поэтому по длине изнашиваются неравномерно; наиболее интенсивный разогрев соответствует

средней части, хотя и с некоторым смещением к переднему концу. Этот разогрев распространяется на небольшую глубину и уже через несколько секунд после извлечения оправки из трубы температура по ее сечению выравнивается. Неравномерность же температуры по длине остается значительной и достигает 100-150 °С, особенно если прокатка ведется с большим числом оправок в комплекте. Износ оправок контролируют в их средней части, и если он достигает 0,1 мм, то такие оправки заменяют. Обычно на каждой оправке можно раскатать 400-2000 гильз, причем стойкость оправок несколько выше при прокатке труб с более толстой стенкой [2].

Локальное уменьшение диаметра оправки в результате износа приводит к изменению толщины стенки по длине труб, которое не может быть устранено настройкой стана без дополнительной регулировки зазоров между валками в процессе прокатки.

Величина обжатия стенки в каждой из клеток в разные моменты времени будет различной в зависимости от того, какой из участков изношенной и перемещаемой с заданной скоростью оправки находится в очаге деформации. При прохождении через очаг деформации наиболее изношенного участка оправки деформация в этой клетки уменьшается в сравнении с расчетной, а в случае значительного износа, когда уменьшение диаметра оправки превышает теоретическую величину обжатия, деформация по стенке вообще отсутствует.

Участки трубы с не обжатой до требуемой величины стенкой, попадая в последующие клетки, вызывают в них резкое увеличение нагрузки вплоть до создания аварийных ситуаций. Положение усугубляется и тем, что по мере износа оправки все более затрудняется перемещение металла по ее поверхности и возрастает усилие удержания. Значительный износ может привести даже к торможению трубы в стане, что наблюдалось при освоении

ТПА 159-426 ОАО "ВТЗ", когда производилась прокатка на сильно изношенных оправках [3].

Возможными способами увеличения стойкости длинных оправок являются: подбор материала, совершенствование технологии изготовления, разработка рациональных режимов работы инструмента с учетом влияния технологических факторов, наплавка областей повышенного износа и использование составных. Выбор рационального режима работы позволяет значительно повысить срок службы инструмента и увеличить количество раскатанных гильз перед переточкой оправки на меньший размер [3, 33].

Ввиду отсутствия в научно-технической литературе исчерпывающей информации об условиях работы непрерывных станов с трехвалковыми клетями необходимо провести сравнительный анализ деформационных, энергосиловых и кинематических параметров процесса раскатки на плавающей и контролируемо-перемещаемой оправках. Результаты сравнительного анализа необходимо использовать для изучения уменьшения диаметра оправки.

1.4 Тепловое состояние длинных оправок в цикле раскатки

Все более высокие скорости обработки металлов давлением, применение новых высокомеханизированных и автоматизированных прокатных станов, постоянно растущие требования к выпускаемой продукции обуславливают необходимость учета в инженерных расчетах температурных изменений и напряженного состояния деформируемого металла.

Анализ температурного поля и напряженного состояния деформируемого металла и деталей оборудования для обработки металлов давлением представляет собой в каждом конкретном случае

самостоятельную сложную задачу, для решения которой необходимо применять методы теории теплообмена и механики сплошных сред [52].

Тепловая энергия переносится между двумя любыми частицами веществами или взаимодействующими физическими областями, имеющими разные температуры. Такой вид перераспределения энергии в пространстве называется теплообменом или теплопередачей. Механизм или способ теплообмена зависит от свойств рассматриваемых частиц или физических систем и особенно от свойств находящегося между ними вещества. Существует три способа передачи тепловой энергии, а именно: теплопроводность, излучение и конвекция.

Явления теплообмена, сопутствующие процессу обработки металлов давлением, чрезвычайно сложны. Поэтому при исследовании температурного поля деформируемого металла и инструмента обычно принимают ряд упрощающих допущений, что позволяет использовать при анализе процесса теплопроводности феноменологический метод [52].

Схематически весь комплекс явлений теплопереноса при обработке металлов давлением можно представить следующим образом (на примере прокатки металлов). Извлеченная из нагревательной печи заготовка по мере перемещения к валкам охлаждается за счет лучистого и конвективного теплообмена с окружающей средой, а так же за счет контактного теплообмена с рольгангами, слитковозом и т.д.

При подаче заготовки в валки происходят следующие процессы. С одной стороны, охлаждение раската в результате теплопередачи в валки через прослойку окалины. С другой стороны, происходит нагревание раската за счет диссипации механической энергии пластического формоизменения, а так же работы против внешних сил трения. Выйдя из очага деформации, металл вновь подвергается лучистому и конвективному теплообмену с окружающей средой и т.д.

В процессе обработки давлением металл подвергается контактному теплообмену с некоторыми элементами технологического оборудования (рольгангами, манипуляторами, линейками, проводками и т.д.). Однако ввиду малости времени контакта и невысоких значений, наблюдающихся при этом тепловых потерь, данной составляющей коэффициента теплоотдачи между поверхностью деформируемого металла и окружающей средой пренебрегают [52-57].

Независимо от вида обработки давлением между поверхностью металла и рабочим инструментом при деформации всегда имеется прослойка, состоящая из оксидов деформируемого металла, воздуха, водяного пара и т.д. Таким образом, имеет место контактный теплообмен в системе трех тел: деформируемый металл, прослойка, рабочий инструмент. Основным затруднением при аналитическом исследовании температурного поля подобного трехслойного тела является сложность определения теплофизических свойств прослойки. Дело в том, что состав и толщина прослойки зависят от целого ряда других факторов. Например, по данным работы [58], при прокатке на непрерывных мелкосортных станах толщина окалины для различных пропусков может изменяться от 0,7 мм до нескольких сотых долей миллиметра, то есть на порядок. Соответственно на порядок изменяется и величина теплового сопротивления прослойки, а так же значение коэффициента теплоотдачи между поверхностью деформируемого металла и рабочим инструментом (валками, штампом, оправкой и т.д.)

Для случая прокатки значение коэффициента теплоотдачи между металлом и валками может быть определено теоретически на основании работы [59]. Другие авторы приводят экспериментальные данные о величине коэффициента.

В общем случае для решения дифференциального уравнения при краевых условиях необходимо, прежде всего, иметь данные о компонентах

скоростей течения металла и компонентах скоростей перемещения поверхности раската. Эти компоненты должны предварительно определяться из решения уравнений прокатки, что так же, в какой то мере, является упрощающим допущением, так как компоненты поля деформаций металла и температурного поля взаимосвязаны. Однако совместное решение дифференциальных уравнений прокатки и теплопроводности [60] с учетом всех факторов теплообмена – задача очень сложная.

При решении уравнений теплопроводности применяются методы математической физики: метод разделения переменных (метод Фурье); метод функций источников (функций Грина); метод тепловых потенциалов; метод интегральных преобразований [61-67].

Учитывая простую форму рассматриваемого нами объекта – длинной оправки в виде цилиндра, наиболее подходящим для численного решения уравнения теплопроводности является метод конечных разностей.

Неоднородность температурного поля возникает в момент введения оправки в гильзу вследствие их линейного контакта (оправка лежит на нижней образующей отверстия гильзы в течение всего времени подготовки к прокатке). Величина нагрева составляет: на поверхности до 400 °С и на глубине 25 мм до 150 °С. После первой клетки температура в зоне контакта оправки с металлом составляет: на поверхности 300-350 °С, а на глубине 5 мм до 150 °С, но в то же время имеются зоны нагрева 400 °С и приближенная к 100 °С на месте выпусков калибра. После второй клетки ситуация несколько выравнивается: температура практически всей поверхности равна 300-350 °С за исключением зоны расположенной вокруг нижней образующей.

Далее по клетям постепенно увеличивается толщина нагретого слоя и температура поверхности. Причем после каждой нечетной клетки неоднородность температурного поля увеличивается, а после четной – уменьшается за счет перекрытия соответствующей областью неконтактной зоны предыдущей клетки [33, 34].

Таким образом, неоднородность температурного поля существует на всех этапах, постепенно уменьшаясь к концу раскатки.

Время контакта оправки с нагретым металлом трубы сравнительно мало. За это время тепловому воздействию подвергается только тонкий поверхностный слой оправки, поэтому ее можно рассматривать как полубесконечное тело, нагреваемое с поверхности, при условии, что тепловой поток через единицу поверхности граничной плоскости величина постоянная.

Разогрев оправки при раскатке на ней гильзы обусловлен контактной передачей тепла от нагретой черновой трубы (теплопроводностью) и работой сил трения. Конвекцией и излучением можно пренебречь [3, 4, 33, 34].

При небольших значениях скорости скольжения разогрев оправок от работы контактных сил трения невелик, однако уже при величине данного показателя более 2-3 м/с он соизмерим с разогревом от тепла, переданного теплопроводностью. Дальнейшее увеличение приводит к тому, что разогрев оправки в большей мере зависит от работы контактных сил трения, чем от передачи тепла теплопроводностью. С увеличением относительной скорости оправки при раскатке повышение температуры ее поверхности, обусловленное работой сил трения, вначале резко уменьшается, а при ходе свыше 200-300 мм изменяется незначительно. Аналогичный характер носит изменение суммарной температуры поверхности оправки [4].

Таким образом, смазки, обеспечивающие относительно высокий коэффициент трения, но обладающими хорошими теплоизоляционными свойствами, можно применять при малых скоростях скольжения трубы по оправке. При высоких скоростях скольжения смазка должна иметь, прежде всего, хорошие антифрикционные, а так же теплоизоляционные свойства [4, 33].

Расчет температуры разогрева поверхности плавающей оправки на ЭВМ, выполненный для условий прокатки труб из стали 20 размером 109х4

мм в непрерывном стане ТПА 30-102 с использованием триполифосфатной смазки оправок, показал, что по длине оправки имеются два наиболее разогретых участка, температура которых достигает 800°С [4].

При этом максимум температуры в передней части инструмента обусловлен главным образом передачей тепла оправке теплопроводностью, а на заднем участке – передачей энергии от работы сил трения.

После извлечения оправок из труб температура их поверхности составляет 380-410 °С, а после охлаждения в ванне с водой 150-200 °С. Такой режим работы оправок определяет их стойкость главным образом в соответствии с их локальным износом [4, 34].

Таким образом, температурный фактор является одним из ключевых при изучении износа длинных оправок. Отсутствие исследований тепловых полей для контролируемо-перемещаемых оправок, в том числе для трехвалковых клетей, требует тщательного изучения данного вопроса. Анализ тепловых условий работы длинных оправок позволит выявить уровень температур и напряжений при которых образуется сетка разгара и дать рекомендации по предупреждению развития данного дефекта.

Глава 2. Исследование особенностей параметров раскатки в двух и трехвалковых клетях непрерывных станов

Изменение условий контакта контролируемо-перемещаемой оправки с деформируемым металлом при раскатке в трехвалковых клетях в сравнении с плавающей в двухвалковых, требует исследования деформационных, энергосиловых и кинематических параметров процесса, так как они оказывают существенное влияние на износостойкость инструмента.

2.1 Сравнительное исследование деформационных и энергосиловых параметров при раскатке в двух и трехвалковых клетях на плавающей и контролируемо-перемещаемой оправках

Для изучения процесса формоизменения и деформации гильзы при обработке в непрерывных станах с двух и трехвалковыми клетями сравнивались процессы в двух раскатных станах ТПА 80 в условиях ОАО "СинТЗ" и PQF 10 3/4" ОАО "ТАГМЕТ" при производстве одного типоразмера бесшовных труб.

В таблице 2.1 представлены исходные данные для проведения сопоставимого анализа. Расчет схем формоизменения гильзы в черновую трубу для непрерывных станов с двух и трехвалковыми клетями проводили для готового изделия размером 73×5,5 мм из стали 32ХГ.

Получение черновой трубы диаметром 94 мм на непрерывном стане с трехвалковыми клетями – одно из принятых при расчетах допущений. В реальных условиях производства на агрегатах со станом PQF минимальный диаметр черновых труб составляет 125 мм. Также в проводимом анализе не учитывалось изменение геометрических параметров черновой трубы при извлечении оправки в стане-извлекателе. На данном этапе рассматривается лишь операция раскатки гильзы в непрерывном стане.

Таблица 2.1 Технические характеристики непрерывных станов с двух и трехвалковыми клетями

Параметр	Непрерывный стан с двухвалковыми клетями	Непрерывный стан с трехвалковыми клетями
Количество клеток, шт	8	5
Диаметр гильзы, мм	124	
Толщина стенки гильзы, мм	18	11
Диаметр черновой трубы, мм	94	
Толщина стенки черновой трубы, мм	5,5	6,5
Диаметр оправки непрерывного стана, мм	81	
Общая длина оправки непрерывного стана, мм	19500	17500
Материал оправки, сталь	35ХН2Ф	35Х5МФ
Начальная температура оправки, °С	100	
Температуры гильзы на входе в непрерывный стан, °С	1100	
Машинное время раскатки, с	12	
Скорость прокатки, м/с	4,3	4,0

Расчет калибровки валков непрерывного стана с трехвалковыми клетями проводился на основании рекомендуемого распределения обжатий по толщине стенки, представленного в работе [48]. В основе методики расчет калибровки валков непрерывного двухвалкового стана, подробно описанный в работах [1, 13], а так же опыт эксплуатации действующих ТПА.

При проектировании непрерывных станов с трехвалковыми клетями рекомендуется в первых клетях стана (I–III клеть для пяти- и I–IV клетки для

шестиклетьевых непрерывных станов) применять овалыные калибры со скругленными выпусками, в последующих чистовых клетях (IV, V клетки для пяти- и V, VI для шестиклетьевых непрерывных станов) – калибры круглой формы со скругленными выпусками.

Величины обжатий по стенке трубы в непрерывных станах с двухвалковыми клетями составляют: в первой клетке – от 32 до 50 %; во второй клетке – от 44 до 61 %; в последних клетях – от 2 до 9 %. Деформация стенки трубы в непрерывных станах с трехвалковыми клетями происходит аналогичным образом, как и с двухвалковыми. Основная деформация по стенке трубы осуществляется в первых двух клетях: обжатие в первой клетке составляет от 46 до 49 %, во второй клетке – от 58 до 63 %. В последующих трех клетях формируется готовая стенка, при этом величина относительного обжатия стенки в последней клетке весьма мала (обжатие в последних клетях составляет от 2 до 7 %).

На основании проведенного анализа процесса раскатки труб в непрерывных станах с трехвалковыми клетями, а также практики работы можно рекомендовать величины углов выпусков равными 60° для всех клеток стана. Для обеспечения необходимого зазора между трубой и оправкой в последних клетях стана, и как следствие, для облегчения извлечения оправки из трубы с сохранением высокой точности размеров труб за счет применения калибра круглой формы в средней клетке стана (III клетка для пяти- и IV клетка для шестиклетьевого стана) угол выпуска также можно выбирать равным $60\text{--}62^\circ$.

Величину зазоров между валками устанавливают с учетом возможной величины износа калибров в период их кампании. На основании опыта работы непрерывных оправочных станов с трехвалковыми клетями рекомендуется принимать величину зазора между валками равной: клетки I, II – 16–20 мм; клетка III – 12–15 мм; клетки IV, V – 8–12 мм. При этом, как

правило, при проектировании калибровки задаются равными значениями величин зазоров между валками в клетях в пределах одной группы.

Данная методика позволяет назначать распределение обжатий в стане, исключаящее переполнение металлом калибров в наиболее нагруженных клетях, и на основании принятых обжатий рассчитывать геометрические размеры профиля калибров валков.

Анализ распределения относительных обжатий стенки по клетям, представленного на рисунке 2.1, показал, что в сравнении с двухвалковыми трехвалковые клетки характеризуются меньшей разовой деформацией. Так же из особенностей можно отметить отсутствие обжатий в седьмой и восьмой клетях непрерывного стана ТПА 80. Указанные клетки являются калибрующими в то время как для технологии раскатки PQF предусмотрен отдельный извлекательно-калибровочный стан.



Рисунок 2.1 Распределение относительных обжатий по толщине стенки ($\Delta S/S$) при раскатке гильзы по клетям непрерывных станов

На рисунках 2.2 и 2.3 представлены схемы формоизменения гильзы в черновую трубу в непрерывных станах с двух и трехвалковыми клетями. Для сравнения процессов формоизменений и определения схемы с более равномерной деформацией при раскатке гильзы была применена методика, учитывающая тот факт, что основное обжатие при раскатке гильзы происходит по толщине стенки. Сравнение проводилось по абсолютной величине данного показателя.

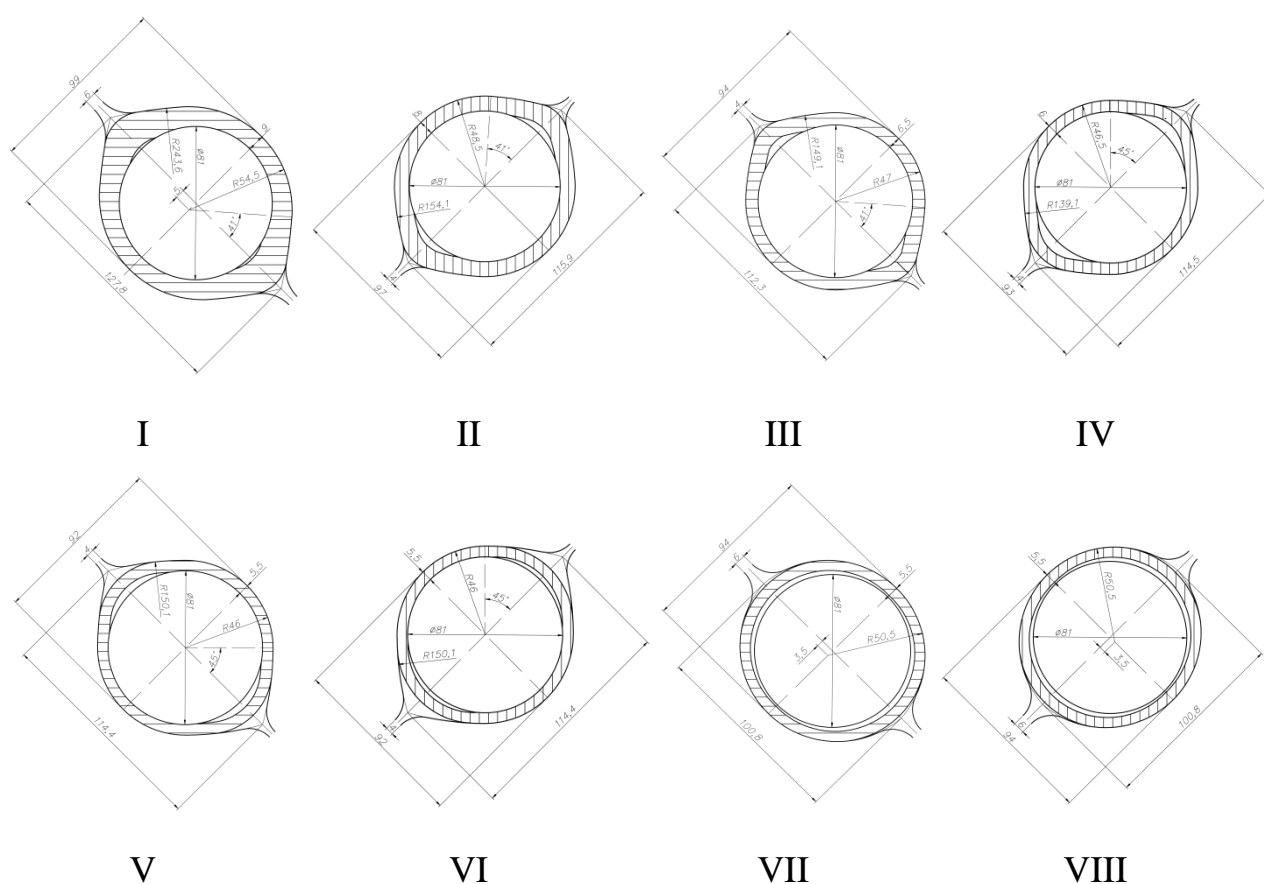


Рисунок 2.2 Схема формоизменения гильзы в черновую трубу по клетям при раскатке на плавающей оправке в непрерывном стане с двухвалковыми клетями

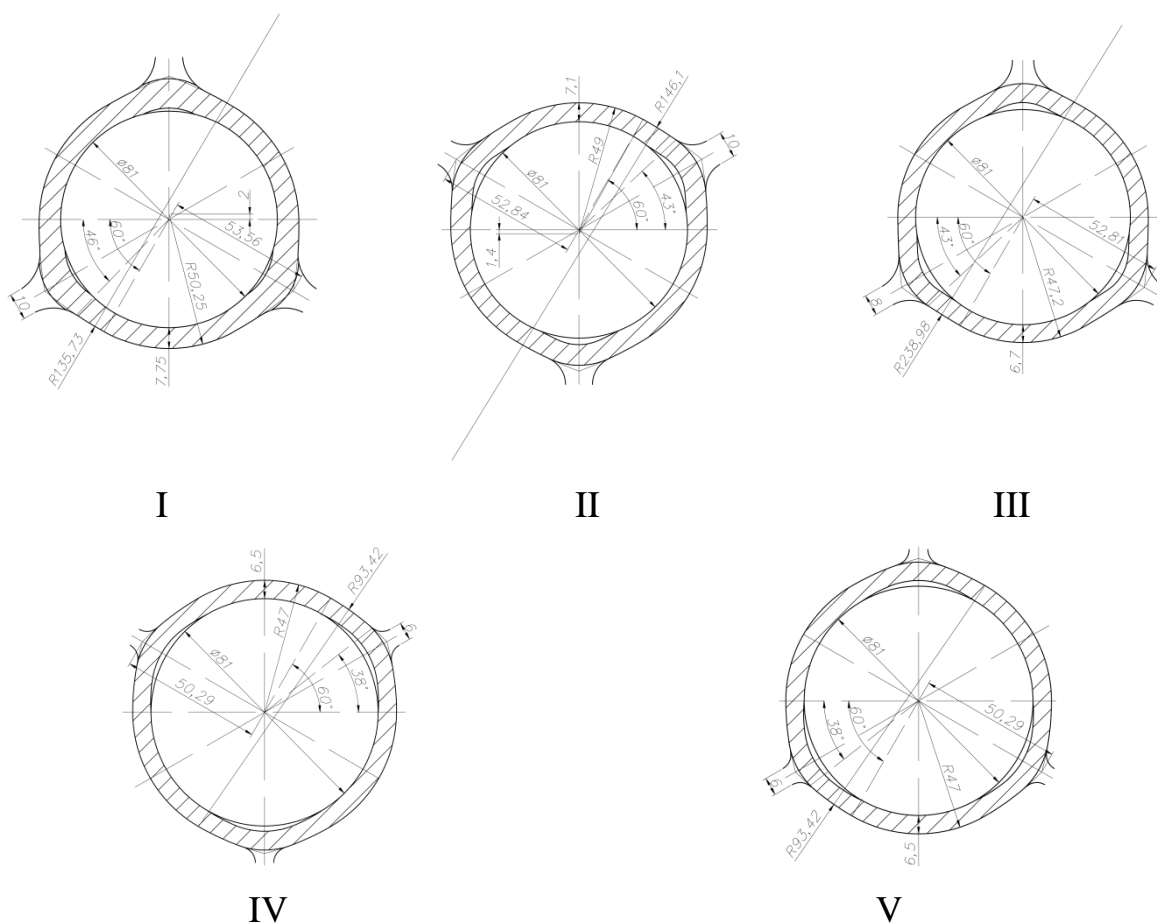


Рисунок 2.3 Схема формоизменения гильзы в черновую трубу по клетям при раскатке на контролируемо-перемещаемой оправке в непрерывном стане с трехвалковыми клетями

Минимальная толщина стенки соответствовала дну калибра. Максимальная толщина стенки определялась в крайней точке области контакта валка и деформируемого металла. Для точек соответствующих минимальной и максимальной толщинам стенок вычислялись абсолютные обжатия в каждой клет. Далее для каждой клетки в отдельности вычисляли разность абсолютных обжатий в двух рассматриваемых точках и брали по модулю. Данная разность характеризует равномерность деформации по толщине стенки в клетях и между ними. Результаты расчетов по предложенной методике представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 Абсолютные обжатия по толщине стенки в клетях

№	Двухвалковые клетки			Трехвалковые клетки		
	$\Delta S1$, мм	$\Delta S2$, мм	$ \Delta S1 - \Delta S2 $	$\Delta S1$, мм	$\Delta S2$, мм	$ \Delta S1 - \Delta S2 $
1	9	5,7	3,3	3,25	2,1	1,15
2	0,2	4,3	4,1	0,6	1,8	1,2
3	2,7	0,5	2,2	1,7	0,4	1,3
4	0,2	1,5	1,3	0,19	1	0,81
5	0,8	0,3	0,5	0,02	0,01	0,01
6	0,05	0,2	0,15	-	-	-
7	0	0	-	-	-	-
8	0	0	-	-	-	-

Сравнение по клетям модулей разности абсолютных обжатий по толщине стенки в выпуске и по дну калибра для двух и трехвалковой схем показало существенно меньшие значения для последней. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о более равномерной деформации в трехвалковых клетях. Так же отмечается тенденция уменьшения модуля разности абсолютных обжатий со второй по шестую клетки двухвалковой схемы, в то время как в трехвалковой данный показатель увеличивается до третьей клетки и далее уменьшается.

На следующем этапе была произведена оценка плотности охвата длинной оправки в двух и трехвалковых клетях. Для каждой клетки замерялся центральный угол, соответствующий области соприкосновения инструмента с деформируемым металлом. Далее этот угол умножали на количество валков в клетях и получали значение суммарного центрального угла. Результаты расчетов представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 Центральные углы охвата оправки по клетям

№	Двухвалковые клетки			Трехвалковые клетки		
	α , град	N, шт	$\alpha \cdot N$	α , град	N, шт	$\alpha \cdot N$
1	120	2	240	95	3	285
2	120	2	240	85	3	255
3	100	2	200	85	3	255
4	100	2	200	70	3	210
5	90	2	180	70	3	210
6	90	2	180	-	-	-
7	80	2	160	-	-	-
8	80	2	160	-	-	-

Критерием более тесного охвата длинной оправки является больший суммарный угол, то есть приближение к полному охвату с углом 360 градусов. Сравнение суммарных углов по клетям для двух и трехвалковой схем позволяет сделать вывод о более тесном охвате оправки в трехвалковых клетях. Стоит отметить тенденцию уменьшения области соприкосновения оправки с деформируемым металлом от клетки к клетям как для случая двух, так и трехвалковой схемы. Наибольший охват длинной оправки осуществляется в первой и второй клетях для двухвалковой схемы и первой клетки трехвалковой.

Контролируемое перемещение длинной оправки приводит к существенному изменению действия сил трения на границе контакта инструмента и деформируемого металла. На рисунке 2.4 представлена схема действия сил трения на контакте металла с деформирующим инструментом на стадии установившегося процесса раскатки гильз в непрерывных станах с плавающей и контролируемо-перемещаемой оправками.

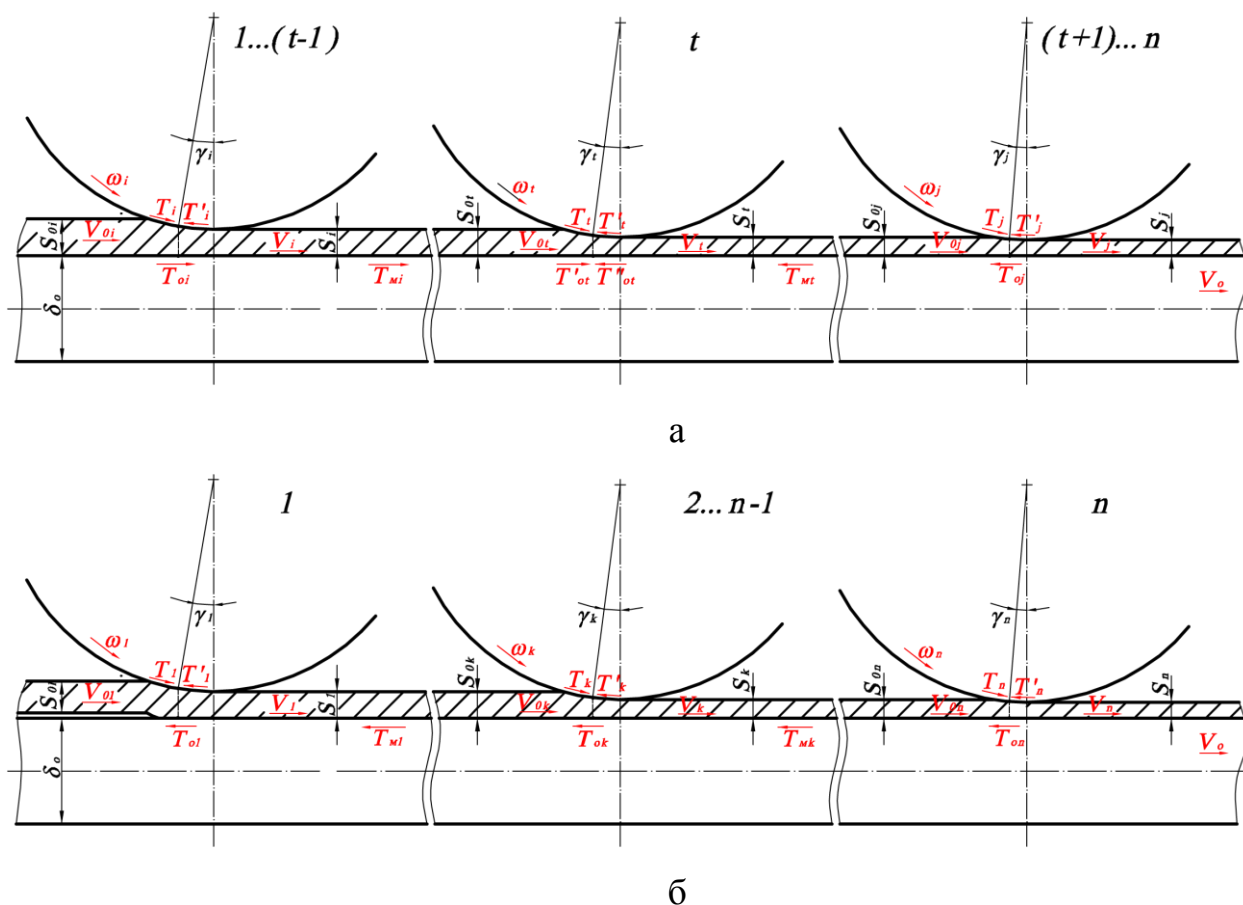


Рисунок 2.4 Схема действия сил трения на контакте металла с деформирующим инструментом на стадии установившегося процесса раскатки гильз в непрерывных станах с плавающей (а) и контролируемо-перемещаемой оправками (б)

На рисунке 2.4 представлены следующие условные обозначения:

$i=[1;t-1]$ – клеть непрерывного стана, предшествующая транспортирующей;

t – транспортирующая клеть непрерывного стана;

$j=[t+1;n]$ – клеть непрерывного стана, следующая за транспортирующей (для непрерывных станов с плавающей оправкой);

$k=[2;n-1]$ – клеть непрерывного стана, следующая за транспортирующей (для непрерывных станов с контролируемо-перемещаемой оправкой);

n – количество клетей непрерывного стана;

$S_{0i,0t,0j,01,0k,0n}$ – толщина стенки трубы на входе в клеть, мм;

$S_{i,t,j,1,k,n}$ – толщина стенки трубы на выходе из клетки, мм;

δ_o – диаметр оправки, мм;

$\omega_{i,t,j,1,k,n}$ – окружная скорость валков, с^{-1} ;

$\gamma_{i,t,j,1,k,n}$ – нейтральный угол, град;

$V_{0i,0t,0j,01,0k,0n}$ – скорость трубы на входе в очаге клеть, м/с;

$V_{i,t,j,1,k,n}$ – скорость трубы на выходе из клетки, м/с;

$T_{i,t,j,1,k,n}$ – сила трения на контакте металла с валком в зоне отставания;

$T'_{i,t,j,1,k,n}$ – сила трения на контакте металла с валком в зоне опережения;

$T_{0i,0j,01,0k,0n}$ – сила трения на контакте металла с оправкой в очаге деформации;

$T_{mi,mt,m1,mk}$ – сила трения на контакте металла с оправкой в межклетевых промежутках;

T'_{ot} – сила трения на контакте металла с оправкой в очаге деформации в зоне отставания;

T''_{ot} – сила трения на контакте металла с оправкой в очаге деформации в зоне опережения.

При раскатке на плавающей оправке в период заполнения стана металлом инструмент в каждый момент времени приобретает скорость, среднюю между скоростью переднего и заднего концов трубы. В результате возникает скольжение металла относительно оправки по ходу и против хода раскатки. Только в одной клетке, называемой транспортирующей, существует сечение, в котором скорости металла и длинной оправки равны между собой [4, 71]. Роль транспортирующей в различный период прокатки играют все клетки стана. При этом в клетях, расположенных перед транспортирующей (по ходу раскатки), на контакте металла с длинной оправкой наблюдается только зона отставания, а после нее – только зона опережения. В очаге деформации транспортирующей клетки на контакте металла с оправкой

присутствуют зоны отставания и опережения (T'_{ot}, T''_{ot} в клетки t на рисунке 2.4, а).

Контактная поверхность металла с валком в очаге деформации каждой клетки при раскатке гильз в непрерывных станах с контролируемо-перемещаемой оправкой имеет также зоны отставания и опережения. Ключевой особенностью данных станов, в которых скорость перемещения оправки меньше соответствующей величины выхода трубы из первой клетки (рисунок 2.4, б) является то, что контактная поверхность металла с оправкой как в очаге деформации каждой клетки, так и в межклетьевых промежутках имеет только зону опережения. То есть скорость течения металла трубы во всех клетях стана на контактной поверхности с инструментом больше соответствующей величины перемещения оправки. С одной стороны это создаёт дополнительное сопротивление течению металла в продольном направлении и необходимость подвода дополнительной мощности в очаг деформации со стороны валков. С другой – увеличение мощности приведёт к сокращению зоны опережения на контактной поверхности трубы с валками и реализации однонаправленной (в направлении истечения металла) схемы действия сил трения (противоположной направлению действия сил трения на контакте металла с оправкой).

Уточнение схемы действия сил трения на контактной внутренней поверхности гильзы и рабочей поверхности длинной оправки позволяет провести качественный анализ напряженного состояния. Схема напряженного состояния при раскатке гильз на плавающей оправке до транспортирующей клетки и после нее, а так же контролируемо-перемещаемой оправке представлена на рисунке 2.5.

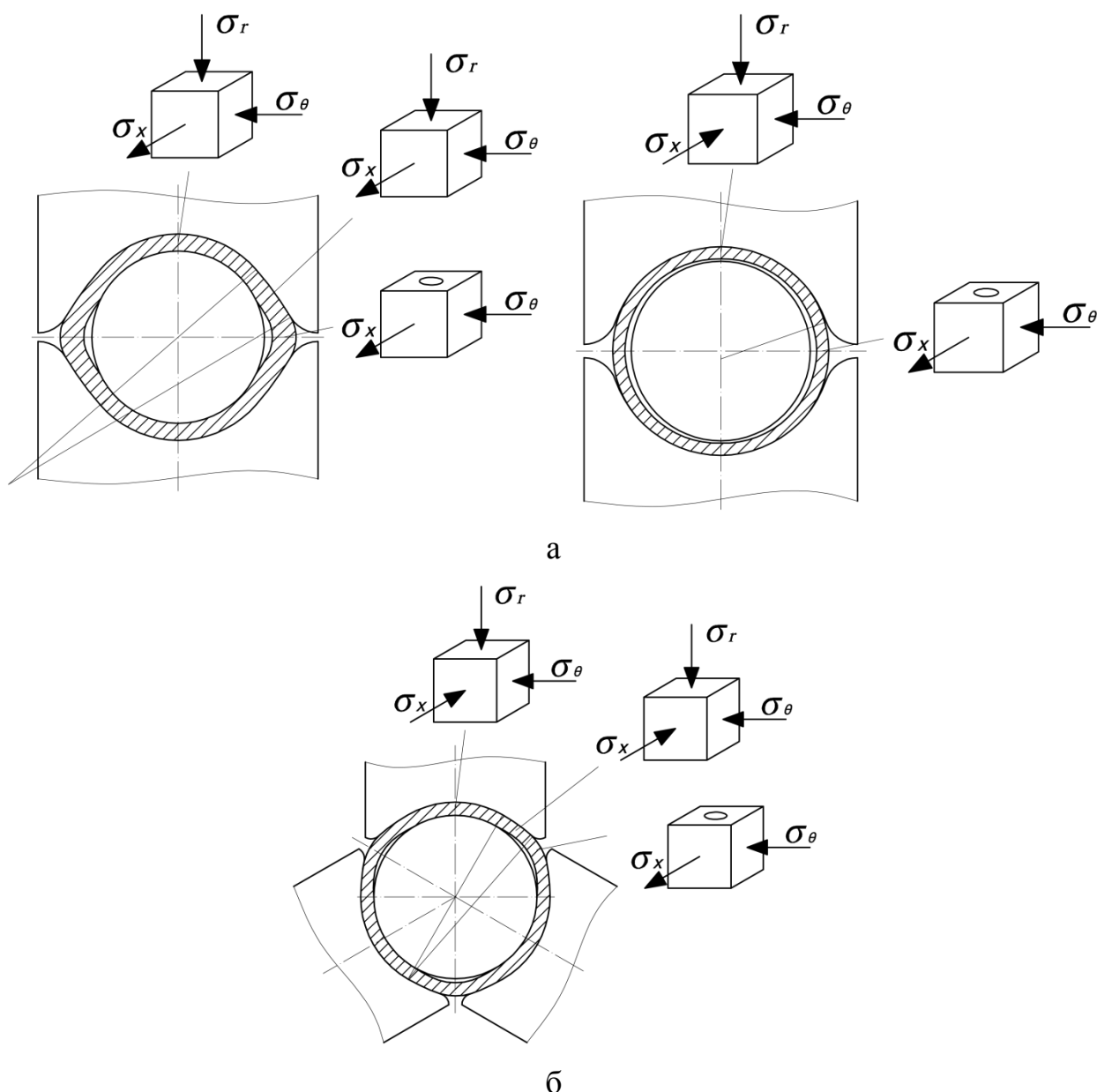


Рисунок 2.5 Схема напряженного состояния на стадии установившегося процесса раскатки гильз в непрерывных станах с плавающей (а) и контролируемо-перемещаемой оправками (б)

Условия контакта на границе соприкосновения металла с длинной оправкой в процессе раскатки имеют большее влияние на тепловое состояние и износ инструмента, чем с вальками. В этой связи учет сил трения на границе контакта металла с вальками можно пренебречь.

При прокатке труб в калибрах непрерывных станов металл в основном подвергается действию радиальных и тангенциальных сжимающих

напряжений. Осевые напряжения имеют различный знак для металла, обрабатываемого в станах с двух и трёхвалковыми клетями на плавающей и контролируемо-перемещаемой оправках. При этом напряженное состояние металла для различных участков калибра так же отличается.

На любом участке калибра непрерывного стана действуют различные напряжения: в направлении осадки σ_r , в направлении уширения σ_θ и в направлении вытяжки σ_x . Для участков трубы, находящихся в области зазоров валков, действуют напряжения в направлении уширения σ_θ и в направлении вытяжки σ_x .

При раскатке гильзы в непрерывных станах с трехвалковыми клетями на контролируемо-перемещаемой оправке за исключением зазора между валками напряженное состояние деформируемого металла описывается схемой всестороннего сжатия. Данная схема обеспечивает благоприятное напряженно-деформированное состояние, а значит контролируемое перемещение длинных оправок обеспечивает возможность раскатки не только углеродистых, но и трудно деформируемых сталей.

Для раскатки на плавающей оправке до транспортирующей клетки действует схема с одним растягивающим и двумя сжимающими напряжениями, а после как и в случае контролируемого перемещения только всестороннего сжатия.

Стоит отметить, что как для раскатки на плавающей оправке, так и на контролируемо-перемещаемой радиальное напряжение металла в зазоре между валками отсутствует, то есть равно нулю, а в зоне выпуска, ограниченной калибром, его значение меньше по модулю в сравнении с соответствующими напряжениями по дну калибра и в средней точке периметра.

Деформация гильзы на любом участке калибра непрерывного стана с двух и трёхвалковыми клетями при раскатке на плавающей и

контролируемо-перемещаемой оправках состоит из осаживания ε_r по диаметру и стенке, уширения ε_θ и вытяжки ε_x (рисунок 2.6).

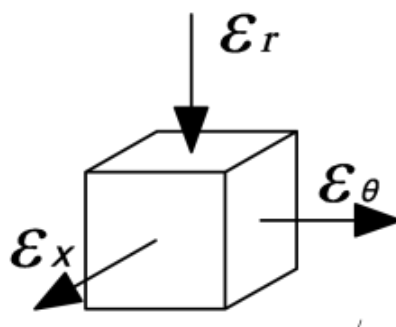


Рисунок 2.6 Схема деформированного состояния гильзы в калибре непрерывного стана с двух и трёхвалковыми клетями

При использовании трёх валков для формирования очага деформации непрерывных станов уменьшается глубина ручьёв рабочих валков, соответственно уменьшается разность окружных скоростей валка в вершине и участке выпусков, что приводит к более равномерному распределению окружных скоростей по периметру трёхвалкового калибра, меньшему скольжению металла относительно валков на контактной поверхности. Трёхвалковые клетки позволяют прокатывать больший диапазон стенок, а значит делают возможным содержание меньшего парка оправок. Данное обстоятельство приводит к существенному сокращению производственных издержек. Кроме того, трехвалковая схема обеспечивает меньшую разностенность черновых труб. Геометрически это подтверждается эффектом диафрагмы – чем больше лепестков, тем больше форма отверстия похожа на окружность [36]. В то же время, очевидно, что дальнейшее увеличение числа валков в рабочей клетке (до четырех и более) с технологической точки зрения предпочтительно, однако в этом случае усложняется конструкция и снижается ее надежность [5].

Проведенный сравнительный анализ позволяет сделать вывод, что главными преимуществами раскатки гильзы в непрерывных станах с трехвалковыми клетями являются: более равномерная деформация и тесный охват длинной оправки, благоприятное напряженно-деформированное состояние, содержание меньшего парка оправок, меньшая разностенность.

2.2 Анализ кинематических параметров при раскатке в двух и трехвалковых клетях на плавающей и контролируемо-перемещаемой оправках

Сравнительный анализ скоростей плавающей и контролируемо-перемещаемых оправок проводился в два этапа:

- плавающей и контролируемо-перемещаемой оправок;
- двух контролируемо-перемещаемых оправок в условиях различных непрерывных станов.

Сравнение проводилось для условий раскатки гильз в непрерывных станах ОАО "СинТЗ", ОАО "ТАГМЕТ" и ОАО "ВТЗ" при производстве труб одного типоразмера.

Расчет скоростного режима перемещения длинной оправки при раскатке гильзы в непрерывных станах с двух и трехвалковыми клетями выполнен по зависимостям, предложенным в работах [3, 4]. Суть методики расчета для плавающей оправки заключается в решении уравнения равновесия сил, действующих на нее.

Контролируемо-перемещаемая оправка с постоянной скоростью перемещается вдоль очага деформации до тех пор, пока ее передний конец не выходит на 1,5-2 м за последнюю клеть стана, после чего тормозится и меняет направление на обратное. При этом скорость обратного хода контролируемо-перемещаемой оправки выбиралась таким образом, чтобы ее

рабочая часть не вышла из очага деформации пятой клетки до завершения процесса раскатки гильзы. Результаты расчетов представлены на рисунке 2.7.

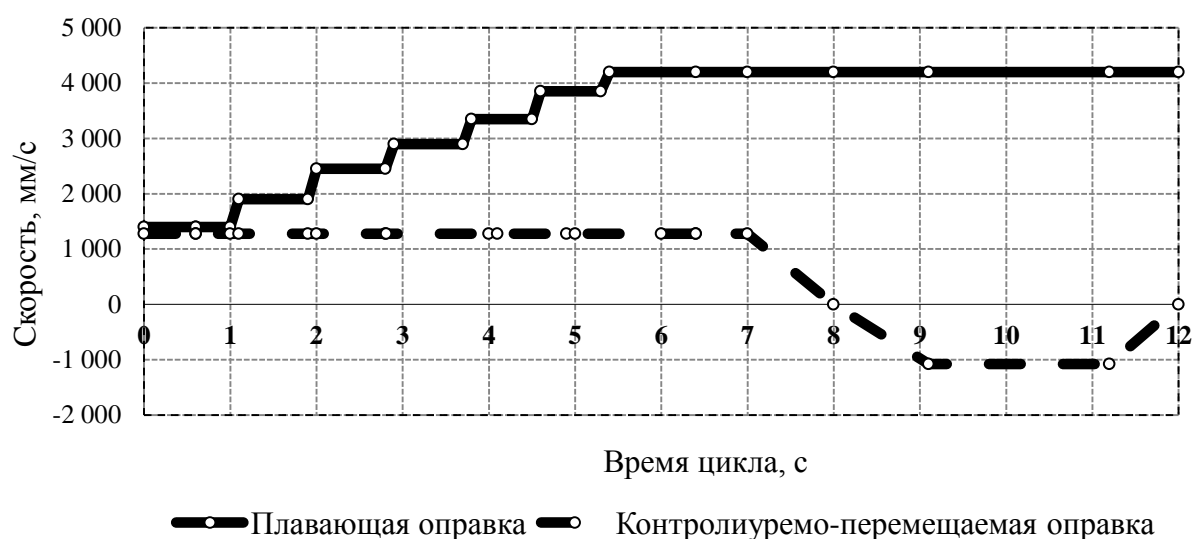


Рисунок 2.7 Скорость движения плавающей и контролируемо-перемещаемой оправок при раскатке гильзы

Скорость перемещения плавающей оправки носит ступенчатый характер. Абсолютная скорость технологического инструмента в цикле раскатки гильзы колеблется от 1400 до 4200 мм/с. Максимальное ее значение достигается на шестой секунде процесса и не меняется до конца цикла.

С первой по седьмую секунду процесса раскатки гильзы в черновую трубу контролируемо-перемещаемая оправка движется с постоянной скоростью 1280 мм/с. Далее в течение двух секунд оправка тормозится и меняет направление на противоположное. Извлечение инструмента с десятой по двенадцатую секунду происходит со скоростью 1080 мм/с.

В отличие от традиционной непрерывной раскатки на плавающей оправке, где относительно транспортирующей клетки есть как зона отставания, так и зона опережения, для контролируемо-перемещаемой оправки в любой клетки есть только зона опережения. Скорость

контролируемо-перемещаемой оправки всегда ниже скорости движения деформируемого металла.

Очевидно, что следствием контролируемого перемещения является существенное увеличение сил трения на границе контакта поверхностей длинной оправки и гильзы. Работа данных сил приводит к более интенсивному износу инструмента в сравнении с плавающей оправкой.

При сравнении условий раскатки в непрерывных станах PQF 10^{3/4}" ОАО «ТагМет» с трехвалковыми клетями и ТПА 159-426 ОАО «ВТЗ» с двухвалковыми в качестве базового был рассмотрен типоразмер труб 168x10 мм, который изготавливается как на первом, так и на втором агрегате.

Абсолютные скорости контролируемого перемещения длинных оправок в цикле раскатки гильз в непрерывных станах как с двух, так и с трехвалковыми клетями представлены на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 Скорость движения контролируемо-перемещаемых оправок при раскатке гильзы в непрерывных станах с двух и трехвалковыми клетями

Из особенностей стоит отметить подобие характера изменения скоростей оправок обоих станков. Данное обстоятельство связано с общим временем цикла раскатки. Большая степень деформации в трехвалковых

клетях уменьшает время всего цикла. В целом графики носят последовательно подобный характер с небольшими различиями в узлах изменения скоростей, а также смены направлений движения оправок, что связано с особенностями конструкций самих раскатных станов и работающих в комплексе с ними калибровочно-извлекательных станов. Максимальная скорость движения длинной оправки стана PQF 10³/₄" при раскатке гильзы превышает наибольшую скорость технологического инструмента непрерывного стана ТПА 159-426 на 260 мм/с при движении вперед, и на 180 мм/с в обратном направлении. Разность времени между сменой направления движения оправки с прямого на обратное равна 3 с, что составляет 25 % и 19 % длительности цикла раскатки для станов PQF 10³/₄" и ТПА 159-426 соответственно.

Проведенный анализ выявил особенности деформационных, энергосиловых и кинематических параметров раскатки на плавающих и контролируемо-перемещаемых оправках в непрерывных станах с двух и трехвалковыми клетями. Данные особенности оказывают существенное влияние на тепловые условия работы длинных оправок в цикле раскатки.

Глава 3. Исследование влияния технологических факторов раскатки на температурное поле длинных оправок непрерывных станов

В процессе работы оправки непрерывных станов подвергаются циклическому тепловому воздействию при нагреве в период взаимодействия с горячим прокатываемым металлом и охлаждения после раскатки, извлечения и транспортировки. При этом величина и характер распределения температуры в оправках, определяющие механические свойства их материала и величину термических напряжений, в значительной степени зависят от технологических факторов, и в конечном счете существенно влияют на износостойкость.

Объектом исследования в данной работе являются длинные цилиндрические оправки, работающие в плавающем и контролируемо-перемещаемом режимах в непрерывных раскатных станах с двух и трехвалковыми клетями.

3.1 Методика исследования влияния технологических факторов раскатки на температурное поле длинных оправок

Температурное поле длинных оправок в процессе раскатки и группы операций их подготовки зависят от большого количества взаимосвязанных и взаимозависимых технологических факторов. Эти факторы по специфике их воздействия можно условно разделить на несколько групп:

- 1) начальная температура раскатки;
- 2) калибровка технологического инструмента и размеры гильзы, определяющие процесс формоизменения и режим деформации;
- 3) кинематические условия;
- 4) смазка и окалина;
- 5) материал для изготовления длинных оправок.

3.1.1 Качественный анализ влияния технологических факторов раскатки на температурное поле длинных оправок

Анализ научно-технической литературы, а так же промышленный опыт эксплуатации позволяют сделать вывод о существенном влиянии технологических факторов на температурное поле длинных оправок при раскатке труб.

При горячей непрерывной раскатке гильз тепловой баланс складывается из потери тепла в пространство за счет конвекции и излучения, теплоотдачи к оправке и валкам, из выделения тепла в результате работ пластической деформации и контактных сил трения. Пренебрегая теплоотводом к валкам ввиду кратковременности их контакта с нагретой гильзой, тепловой баланс оправки состоит из количества тепла полученного от нагретого металла, энергии выделившейся в процессе пластической деформации и работы сил трения ($Q_{\text{опр}} = Q_{\text{исх}} + \Delta Q_{\text{гильзы исх}} + \Delta Q_{\text{пласт деф}} + \Delta Q_{\text{трения}}$).

К первой группе факторов относится температура гильзы, поступающей на раскатку. Находясь в непосредственном контакте оправка будет разогреваться тем больше, чем выше исходная температура гильзы.

Во вторую группу входят калибровки валков, геометрические размеры длинной оправки и раскатываемой гильзы, влияющие на процесс формоизменения и режим деформации. Как в случае двухвалковых, так и трехвалковых клетей следствием пластической деформации гильзы будет выделение тепла, часть которого пойдет на разогрев оправки. Следует отметить, что характер изменения температуры, как в цикле раскатки, так и охлаждения практически не будет меняться для оправок различных диаметров. Абсолютная температура разогрева рабочей поверхности длинных оправок связана с их размерами, но для небольших диапазонов

может меняться незначительно. Кроме того на разогрев влияют размеры гильзы, в том числе диаметр, толщина стенки и длина.

Для третьей группы факторов важными являются время контакта с гильзой при раскатке, последующее время охлаждения, а так же режим работы длинной оправки. В зависимости от числа оборотов валков в клетях с уменьшением времени операции раскатки температура оправки так же будет снижаться на определенную величину. Аналогично в случае увеличения. Снижение времени охлаждения длинных оправок водой приведет к их перегреву в цикле работы с увеличением числа раскатанных гильз. Изменение скоростного режима работы контролируемо-перемещаемой оправки в сравнении с плавающей, связано с существенной работой сил трения на границе с гильзой, а значит неизбежно приведет к изменению разогрева рабочей поверхности инструмента.

К четвертой группе имеют отношение технологические смазки, применяемые для уменьшения сил трения на границе оправка-гильза, и оказывающие влияние на разогрев поверхности инструмента. Чем ниже теплопроводность смазки, тем меньше теплопередача от гильзы. Кроме того, чем меньше силы трения на границе контакта, тем меньше их работа и разогрев. На практике возможно изменение температурного поля оправки в зависимости от толщины слоя окалины. В этой связи допущение равенства нулю толщины данного слоя может привести к существенным ошибкам в расчетных значениях. Однако в случае присутствия в технологии операции дезоксидации учетом слоя окалины в расчетах можно пренебречь.

Пятая группа факторов основана на выборе различных материалов для изготовления длинных оправок и так же существенно влияет на распределение температуры по объему инструмента в цикле раскатки. Использование для изготовления оправок различных сплавов приводит к увеличению или уменьшению их температуры при получении черновой трубы в зависимости от теплопроводности и обусловлено физическими

особенностями стали. При этом в случае более низкой теплопроводности рабочая поверхность длинной оправки разогревается больше.

Таким образом, ключевыми технологическими факторами, влияющими на температурное поле длинной оправки, являются:

- начальная температура гильзы;
- калибровки валков, геометрические размеры длинной оправки и раскатываемой гильзы;
- время контакта с гильзой при раскатке, последующее время охлаждения, режим работы длинной оправки;
- технологические смазки, толщина слоя окалины;
- материал для изготовления длинных оправок.

Учитывая недостаточную освещенность в научно-технической литературе влияния перечисленных технологических факторов на температурное поле длинной оправки в цикле раскатки, необходимо провести исследование данного вопроса с целью выявления закономерностей и обобщения результатов.

3.1.2 Математическая постановка задачи расчета температурного поля длинной оправки

За основу была принята методика, предложенная в работе [34], суть которой сводится к описанию взаимодействия оправки с нагретым металлом дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности.

При постановке тепловой задачи процесса горячей непрерывной раскатки гильзы в черновую трубу учитывали следующие характерные особенности:

- деформация гильзы производится в нескольких последовательно расположенных клетях (двухвалковых или трехвалковых) на длинной цилиндрической оправке;

- оправка находится одновременно в очаге деформации каждой из клеток;
- оправка перемещается вдоль очага деформации со скоростью, величина которой может меняться на протяжении всего процесса;
- процесс раскатки заканчивается после выхода заднего конца гильзы из очага деформации последней клетки стана;
- в зоне очага деформации и за ней теплообмен между оправкой и горячим металлом происходит через слой окалины (при наличии операции дезоксидации гильзы не учитывается) и смазки;
- контакт оправки с горячим металлом осуществляется в очагах деформации каждой из клеток стана, с учетом количества выпусков калибра двухвалковых и трехвалковых клеток.

При решении задачи приняты следующие допущения:

- внутренняя теплота пластической деформации $q_{пл}$ равномерно выделяется по всему объему очага деформации с постоянной мощностью. Работа пластической деформации определяется по формуле С. Финка [72]. Оценка повышения температуры за счет энергии деформации производится по зависимости, представленной в работе [73];
- теплота трения $q_{тр}$ выделяется непрерывно и постоянно по величине во времени на середине слоя смазки контактных поверхностей длинной оправки и нагретой гильзы. Работа сил трения вычисляется по зависимостям, представленным в работах [3, 4];
- теплоотвод к валкам из-за кратковременности их контакта с нагретой гильзой не учитывается;
- начальная температура гильзы постоянна по всей поверхности.

С учетом вышеизложенного задача формулируется следующим образом: два бесконечных цилиндрических тела, оправка и гильза, с начальной температурой T_1 и T_2 соответственно в момент времени $\tau = 0$ вступают в тепловое взаимодействие. За промежуток времени $\Delta\tau$ на участке

l_1 , равном расстоянию которое проходит гильза за время $\Delta\tau$, происходит ее обжатие и удлинение (вытяжка). Одновременно происходит смещение гильзы и оправки в направлении раскатки. При этом теплообмен между телами на недеформирующемся участке происходит через воздушный (технологический) зазор, а на деформирующемся - через слой окалины и смазки. После охлаждения длинной оправки водой (в ванной для плавающей и душирующей установке для контролируемо-перемещаемой) тепловое воздействие на него циклически повторяется.

Решение задачи в этом случае сводится к решению системы дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности для длинной оправки и раскатываемой гильзы.

Особенности контакта как плавающей, так и контролируемо-перемещаемой оправки с нагретым металлом заключаются в изменяющихся во времени условиях их взаимодействия. Отличие состоит в более существенной работе сил трения для случая контролируемого перемещения.

В теле длинной оправки передача тепла теплопроводностью сопровождается изменением температуры как во времени так и в пространстве:

$$T = f(x, y, z, \tau), \quad (3.1)$$

где T - температура; x, y, z - координаты точки; τ - время.

Так как рассматриваемое тело имеет форму цилиндра, то целесообразным является переход к цилиндрическим координатам:

$$T = f(r, \varphi, z, \tau), \quad (3.2)$$

где r, φ, z - координаты точки в цилиндрических координатах.

Математическое описание процесса теплопередачи состоит из:

- уравнения теплопроводности для каждого слоя материала (инструмент, хромовое покрытие для контролируемо-перемещаемой оправки, смазка)

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_i}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \right), \quad (3.3)$$

где ρ - плотность;

c - удельная теплоемкость;

λ - коэффициент теплопроводности;

i - номер соответствующего слоя материала.

- граничных условий четвертого рода на границах слоев

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial r}, \quad T_i = T_{i+1}, \quad (3.4)$$

- граничных условий третьего рода на поверхностях раздела “смазка - гильза”

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial \xi} + \alpha_i (T_i - T_{i,z}) = 0, \quad (3.5)$$

где $\xi = r, \varphi, z$;

T_z - температура гильзы;

α - коэффициент теплоотдачи.

- граничных условий третьего рода на поверхностях раздела “смазка - воздух”

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial \xi} + \alpha_i (T_i - T_{i,cp}) = 0, \quad (3.6)$$

где T_{cp} - температура среды (воздуха).

- в случае, если оправка полая, то граничные условия третьего рода на поверхностях раздела “внутренняя поверхность оправки - воздух”

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial \xi} + \alpha_i (T_i - T_{i,cp}) = 0, \quad (3.7)$$

- начальная температура всех точек считается известной.

При расчете температурного поля необходимо учитывать деформационный разогрев, поскольку его влияние, в большинстве случаев, значительно повышает температуру.

Фактически весь период их взаимодействия во времени можно разделить на 4 этапа:

- зарядка оправки в гильзу и их перемещение на линию прокатки. На данном этапе контакт между оправкой и гильзой линейный, по нижней образующей внутренней поверхности гильзы. Кроме того необходимо учесть конвективный теплообмен по остальной поверхности оправки (это касается только той поверхности оправки, которая находится внутри объема гильзы);

- перемещение оправки с гильзой вдоль очага деформации. Этот этап характеризуется увеличением числа участков, условия взаимодействия которых различны. Число участков возрастает от 1, при начале деформирования гильзы валками первой клетки, до 4-9, в зависимости от конструкции непрерывного стана, при выходе переднего конца оправки из последней клетки;

- установившийся процесс раскатки. Этап продолжается до того момента как задний конец гильзы входит в очаг деформации первой клетки. Условия контакта постоянны;

- уменьшение длины контакта оправки и гильзы, связанное с выходом заднего конца гильзы из очага деформации стана. Число участков уменьшается от 4-9 до 1.

Продолжительность этапа во времени различна и зависит многих факторов: диаметр, длина и толщина стенки раскатываемой гильзы, скорость раскатки, скорость транспортировки к стану, возможное наличие технологических простоев. В результате время контакта оправки с нагретым металлом может составлять 10-50с.

Начальная температура оправки составляет приблизительно 100 °С. Она специально подогревается перед первым проходом.

Температура гильзы составляет примерно 1100 °С и зависит от процессов предшествующих данному.

На следующем промежутке времени происходит охлаждение оправки. Она контактирует с рольгангом по которому перемещается, и осуществляет теплообмен с роликами и воздухом.

Кроме того на данном этапе происходит выравнивание температуры по сечению.

В качестве граничных условий принимают:

- граничных условий третьего рода на поверхностях раздела “оправка - ролик”

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial \xi} + \alpha_i (T_i - T_{i,e}) = 0, \quad (3.8)$$

- граничных условий третьего рода на поверхностях раздела “оправка - воздух”

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial \xi} + \alpha_i (T_i - T_{i,sp}) = 0. \quad (3.9)$$

Продолжительность этапа невелика и составляет 5-15 секунд.

Охлаждение плавающих оправок производится в специальных ваннах водой.

Контролируемо-перемещаемые оправки охлаждаются в душирующей установке. Охлаждение в таких установках зонное: участок охлаждения разбит по длине на несколько зон в которых может задаваться индивидуальный график процесса. В зависимости от того насколько нагрета та часть оправки, которая находится в данной зоне, рассчитывается время необходимое для ее охлаждения. В процессе охлаждения длинная оправка лежит на рольганге.

В зависимости от режима работы и охлаждения длинной оправки в качестве граничных условий принимают:

- граничных условий третьего рода на поверхностях раздела “оправка - ролик”

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial \xi} + \alpha_i (T_i - T_{i,e}) = 0, \quad (3.10)$$

- граничных условий третьего рода на поверхностях раздела “оправка – охлаждающая жидкость”

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial \xi} + \alpha_i (T_i - T_{i.ож}) = 0, \quad (3.11)$$

где $T_{i.ож}$ - температура охлаждающей жидкости.

Коэффициент теплоотдачи α при вынужденной конвекции от поверхности длинной оправки к потоку охладителя рассчитывался по зависимостям, описанным в работе [77].

Охлаждение осуществляется до тех пор пока температура рабочей поверхности длинной оправки не станет равна 100 °С. Далее инструмент выдерживается некоторое время, с целью выравнивания температуры по сечению. В это же время на нее наносится слой смазки. Так как все это время оправка находится на рольганге, то задача становится подобной второму этапу.

Важным фактором, влияющим на температурное поле длинной оправки, является толщина слоя окалины, однако при наличии операции деоксидации в технологии производства его влияние на результаты расчетов можно не учитывать.

Для условий раскатки гильзы на контролируемо-перемещаемой оправке коэффициент трения, обеспечиваемый использованием технологической смазки, брался равным 0,1 [68]. Коэффициент трения при применении триполифосфатной смазки, традиционно используемой для плавающей оправки, равен 0,042 [4].

В зависимости от режима работы длинной оправки и количества валков в клети, расчеты производятся в различных контрольных точках. Схемы с указанием данных точек для плавающей и контролируемо-перемещаемой оправок приведены на рисунке 3.1.

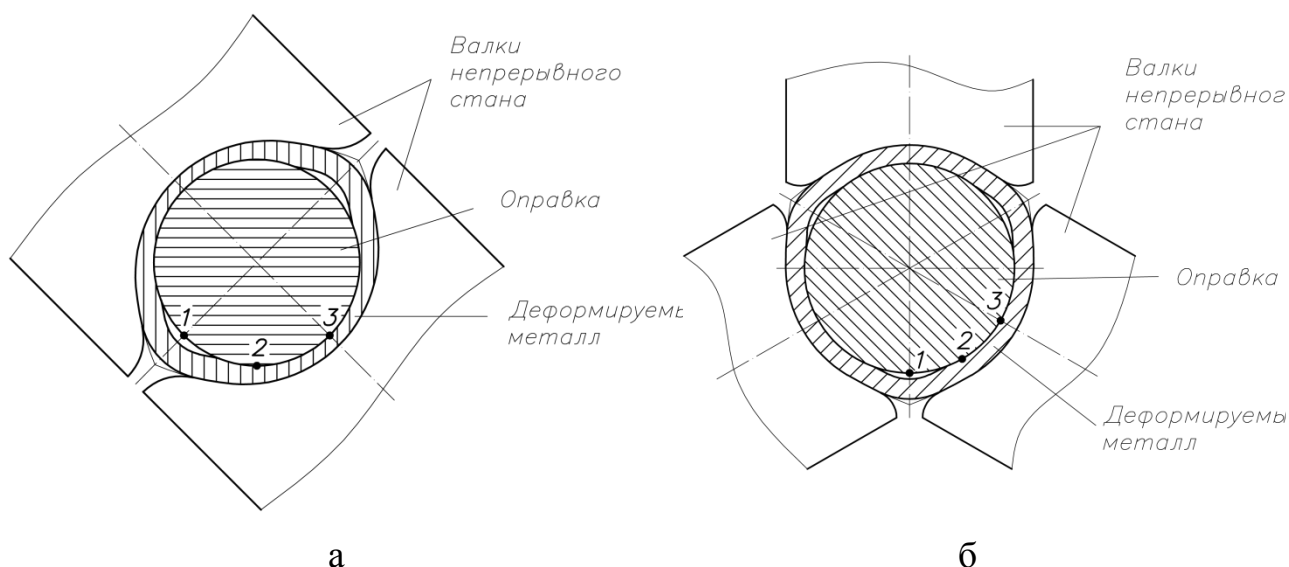


Рисунок 3.1 Схемы расположения контрольных точек на оправке при раскатке гильзы в непрерывных станах с двухвалковыми (а) и трехвалковыми клетями (б): 1 – в области выпуска калибра валков; 2 – в средней точке периметра ручья валка; 3 – по дну калибра.

Расчеты необходимо производить на каждую из 3 контрольных точек (в выпуске калибра, в средней точке периметра, по дну калибра). Такое расположение точек позволяет получить представление о распределении температуры по всему сечению. Контакт оправки и гильзы симметричен, поэтому достаточно рассмотреть одну часть сечения.

3.1.3 Численная реализация решения уравнения нестационарной теплопроводности

Ввиду простоты рассматриваемого объекта - оправки в виде цилиндра, для решения поставленной выше краевой задачи наиболее подходящим является метод конечных разностей. Основная идея этого численного метода заключается в том, что непрерывная область изменения пространственной переменной $0 \leq x \leq R$ заменяется совокупностью дискретно расположенных узловых точек $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}, x_N$.

При равномерном расположении этих точек в расчетной области их координаты равны $x_i = i\Delta x$, где $i=0,1,\dots, N$ - номер узла по пространству, а $\Delta x = R/N$ - шаг по пространству. Аналогично вместо непрерывного изменения температурного поля во времени рассматривают значения температуры в фиксированные моменты времени $\tau_m = m\Delta\tau$, где $m=1,2,\dots$ — номер момента времени, а $\Delta\tau$ - шаг по времени. В плоскости (x, τ) совокупность узловых точек с координатами (x_i, τ_m) образует прямоугольную сетку. При этом расчет температурного поля $T(x, \tau)$ сводится к отысканию сеточной функции T_i^m , приближенно характеризующей температуру в узловых точках.

При замене непрерывной функции $T(x, \tau)$ дискретной сеточной функцией T_i^m необходимо заменить дифференциальное уравнение теплопроводности с соответствующими краевыми условиями системой разностных алгебраических уравнений, связывающих значения сеточной функции в соседних узловых точках. Эта система алгебраических уравнений называется разностной схемой решения исходной краевой задачи. Построение разностных схем производят обычно путем некоторого преобразования исходной дифференциальной задачи теплопроводности.

Преобразование методом контрольного объема, заключается в составлении уравнения теплового баланса для каждой элементарной ячейки сеточной области. Эти уравнения выводятся путем интегрирования уравнения теплопроводности по координате и времени в пределах элементарной ячейки, с последующей заменой получающихся интегралов приближенными разностными выражениями.

Итак, для всех внутренних узлов сетки ($i=1,2,\dots, N-1$) можно записать систему алгебраических разностных уравнений

$$\frac{T_i^{m+1} - T_i^m}{\Delta\tau} = a \left[\frac{T_{i+1}^* - 2T_i^* + T_{i-1}^*}{\Delta x^2} + (k-1) \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_{i+1/2}} \frac{T_{i+1}^* - T_i^*}{\Delta x} + \frac{1}{x_{i-1/2}} \frac{T_i^* - T_{i-1}^*}{\Delta x} \right) \right] + \frac{q_{v,i}^*}{c}, \quad (3.12)$$

в которой

$$x_{i+1/2} = \frac{(x_{i+1} + x_i)}{2}; \quad x_{i-1/2} = \frac{(x_i + x_{i-1})}{2}.$$

Дифференциальное уравнение (3.3) для оси симметрии ($i=0$) аппроксимируем аналогично

$$\frac{T_o^{m+1} - T_o^m}{\Delta\tau} = ak \frac{T_1^* - 2T_o^* + T_{-1}^*}{\Delta x^2} + \frac{q_{v,0}^*}{c}, \quad (3.13)$$

или, принимая во внимание равенство $T_{-1} = T_1$, окончательно получим

$$\frac{T_o^{m+1} - T_o^m}{\Delta\tau} = ak \frac{2T_1^* - 2T_o^*}{\Delta x^2} + \frac{q_{v,0}^*}{c}. \quad (3.14)$$

В формулах (3.12) и (3.14) температура T^* есть некая средняя температура на интервале времени $\Delta\tau$:

$$T^* = (1 - \mu)T^m + \mu T^{m+1}, \quad (3.15)$$

где μ - коэффициент веса, учитывающий вклад температуры на $(m+1)$ -м временном слое T^{m+1} в значение температуры T^* .

При этом значении $\mu=0$ приводит к равенству $T^* = T^m$, и мы имеем так называемую явную разностную схему. Значение $\mu=1$ дает $T^* = T^{m+1}$, и получаем чисто неявную разностную схему. При $\mu=0,5$ разностная схема (3.12) и (3.14) называется разностной схемой Кранка-Николсона.

Значение температуры в $(m+1)$ -й момент времени на внешней границе тела при граничных условиях I рода:

$$T_N^{m+1} = T_w + q_{v,N}^* \frac{\Delta\tau}{c}. \quad (3.16)$$

Для определения T_N^{m+1} при граничных условиях II и III рода применим метод контрольного объема для приграничного слоя толщиной $\Delta x/2$:

а) граничные условия II рода:

$$c \frac{\Delta x}{2} (T_N^{m+1} - T_N^m) = \left[q_w - \lambda \frac{T_N^* - T_{N-1}^*}{\Delta x} \right] \Delta\tau + q_{v,N}^* \Delta\tau; \quad (3.17)$$

б) граничные условия III рода:

$$c \frac{\Delta x}{2} (T_N^{m+1} - T_N^m) = \left[\alpha (T_f - T_N^*) - \lambda \frac{T_N^* - T_{N-1}^*}{\Delta x} \right] \Delta \tau + q_{v,N}^* \Delta \tau. \quad (3.18)$$

В формулах (3.17) и (3.18) температура T^* рассчитывается по выражению (3.15).

Явная разностная схема для расчета температуры T_i^{m+1} использует значения температуры в предыдущий m -й момент времени в узлах $(i-1)$, i и $(i+1)$, т.е. T_{i-1}^m , T_i^m , T_{i+1}^m . В этом случае в формулы (3.12), (3.14), (3.17) и (3.18) вместо температуры T^* необходимо подставить температуру T^m .

Выражая из разностных уравнений (3.12), (3.14), (3.17) и (3.18) неизвестную температуру T_i^{m+1} , получаем:

а) внутренняя граница $i = 0$

$$T_o^{m+1} = (1 - 2fk)T_o^m + 2fkT_1^m + q_{v,0}^m \frac{\Delta \tau}{c}; \quad (3.19)$$

б) внутренние узлы $i = 1, 2, \dots, N-1$

$$T_i^{m+1} = f(1 - I_k^-)T_{i-1}^m + [1 - 2f(1 + 0,5I_k^+ - 0,5I_k^-)]T_i^m + f(1 + I_k^+)T_{i+1}^m + q_{v,i}^m \frac{\Delta \tau}{c}, \quad (3.20)$$

$$\text{где } I_k^- = (k-1) \frac{0,5}{i-0,5}; \quad I_k^+ = (k-1) \frac{0,5}{i+0,5};$$

в) внешняя граница, $i = N$

— граничные условия II рода

$$T_N^{m+1} = (1 - 2f)T_N^m + 2f(T_{N-1}^m + \Delta T) + q_{v,N}^m \frac{\Delta \tau}{c}, \quad (3.21)$$

$$\text{где } \Delta T = q_w \frac{\Delta x}{\lambda};$$

— граничные условия III рода

$$T_N^{m+1} = (1 - 2f(b+1))T_N^m + 2fT_{N-1}^m + 2fbT_f + q_{v,N}^m \frac{\Delta \tau}{c}. \quad (3.22)$$

В формулах (3.19)÷(3.22): k - коэффициент формы тела; $f = a \Delta \tau / \Delta x^2$ - разностный критерий Фурье; $b = \alpha \Delta x / \lambda$ - разностный критерий Био.

Явная разностная схема устойчива, если

$$f \leq \frac{1}{2} \text{ при граничных условиях I и II рода,} \quad (3.23)$$

$$f \leq \frac{1}{2(1+b)} \text{ при граничных условиях III рода.} \quad (3.24)$$

В этом случае, неявных разностных схем, при отсутствии внутреннего источника теплоты ($q_v = 0$), разностные уравнения (3.12), (3.14), (3.17) и (3.18) принимают следующий вид:

а) внутренняя граница $i = 0$

$$\frac{T_o^{m+1} - T_o^m}{\Delta \tau} = 2ak \left[(1 - \mu) \frac{T_1^m - T_o^m}{\Delta x^2} + \mu \frac{T_1^{m+1} - T_o^{m+1}}{\Delta x^2} \right]; \quad (3.25)$$

б) внутренние узлы $i = 1, 2, \dots, N-1$

$$\begin{aligned} \frac{T_i^{m+1} - T_i^m}{\Delta \tau} = & a \left\{ (1 - \mu) \left[\frac{T_{i+1}^m - 2T_i^m + T_{i-1}^m}{\Delta x^2} + (k-1) \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_{i+1/2}} \frac{T_{i+1}^m - T_i^m}{\Delta x} + \frac{1}{x_{i-1/2}} \frac{T_i^m - T_{i-1}^m}{\Delta x} \right) \right] \right. \\ & \left. + \mu \left[\frac{T_{i+1}^{m+1} - 2T_i^{m+1} + T_{i-1}^{m+1}}{\Delta x^2} + (k-1) \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_{i+1/2}} \frac{T_{i+1}^{m+1} - T_i^{m+1}}{\Delta x} + \frac{1}{x_{i-1/2}} \frac{T_i^{m+1} - T_{i-1}^{m+1}}{\Delta x} \right) \right] \right\}; \quad (3.26) \end{aligned}$$

в) внешняя граница $i = N$

— граничные условия II рода

$$c \frac{\Delta x}{2} (T_N^{m+1} - T_N^m) = \left[q_w - \lambda \left((1 - \mu) \frac{T_N^m - T_{N-1}^m}{\Delta x} + \mu \frac{T_N^{m+1} - T_{N-1}^{m+1}}{\Delta x} \right) \right] \Delta \tau; \quad (3.27)$$

— граничные условия III рода

$$c \frac{\Delta x}{2} (T_N^{m+1} - T_N^m) = \left[\alpha (T_f - (1 - \mu) T_N^m - \mu T_N^{m+1}) - \lambda \left((1 - \mu) \frac{T_N^m - T_{N-1}^m}{\Delta x} + \mu \frac{T_N^{m+1} - T_{N-1}^{m+1}}{\Delta x} \right) \right] \Delta \tau. \quad (3.28)$$

Систему алгебраических разностных уравнений (3.25)-(3.28) удобно представить в виде

$$A_i T_{i+1}^{m+1} - B_i T_i^{m+1} + C_i T_{i-1}^{m+1} + P_i = 0, \text{ для } i = 0, 1, \dots, N. \quad (3.29)$$

Выражения для коэффициентов A_i , B_i , C_i и свободного члена P_i в системе (3.29), получаются методами контрольного объема и разностной аппроксимации.

Система разностных уравнений (3.29) представляет собой систему $(N+1)$ линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных T_i^{m+1} , $i=0,1,\dots,N$ с трехдиагональной матрицей коэффициентов перед неизвестными. Для решения такой системы уравнений применяют эффективный метод прогонки.

Суть метода прогонки заключается в том, что решение системы разностных уравнений представляют в виде:

$$T_i^{m+1} = \alpha_i^{m+1} T_{i+1}^{m+1} + \beta_i^{m+1}, \quad i=0,1,\dots,N, \quad (3.30)$$

где α_i^{m+1} и β_i^{m+1} - некоторые вспомогательные коэффициенты, называемые коэффициентами прогонки.

На каждом шаге по времени задача определения температуры сводится сначала к расчету α_i^{m+1} и β_i^{m+1} по рекуррентным формулам (прямая прогонка)

$$\alpha_i^{m+1} = \frac{A_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}^{m+1}}; \quad \beta_i^{m+1} = \frac{C_i \beta_{i-1}^{m+1} + P_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}^{m+1}}, \quad (3.31)$$

а затем к определению температурного поля по формуле (3.30) (обратная прогонка).

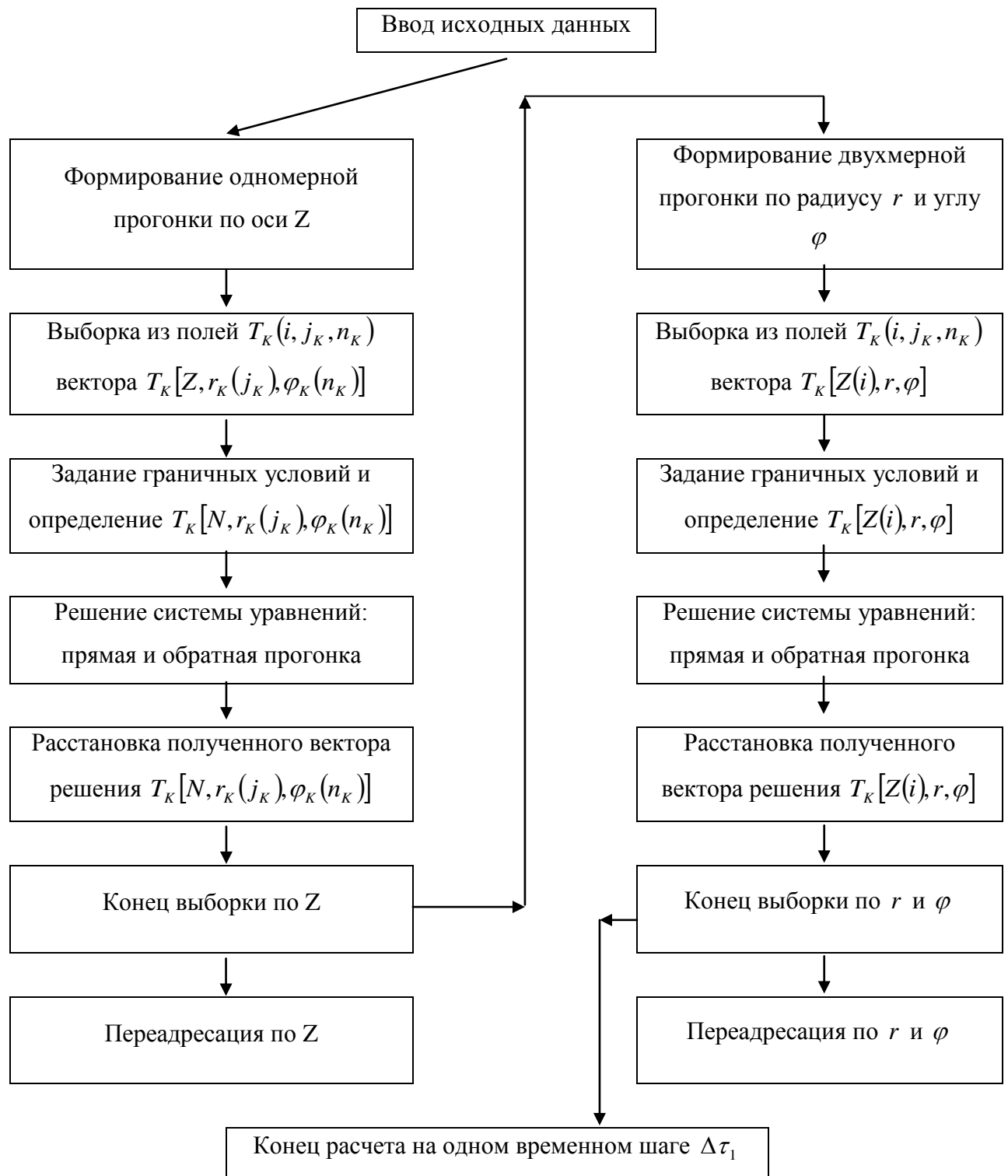


Рисунок 3.2 Блок-схема расчета температурного поля оправки

Полученный расчет температурного поля корректируется в сторону увеличения оценкой повышения температуры за счет энергии пластической деформации и работы сил трения.

Работа пластической деформации определяется по формуле С. Финка [72]:

$$A = P_{cp} \cdot V \cdot \ln(s_0/s_1), \quad (3.32)$$

где P_{cp} - среднее контактное нормальное напряжение;

V - объем металла;

s_0/s_1 - коэффициент обжатия.

s_0 - среднее арифметическое толщин стенок в выпуске и по дну калибра до обжатия в клетки;

s_1 - среднее арифметическое толщин стенок в выпуске и по дну калибра после обжатия в клетки.

Оценка повышения температуры за счет энергии деформации производится по зависимости, представленной в работе [73]:

$$\Delta t_d = \frac{A}{\rho \cdot c}, \quad (3.33)$$

где c – удельная теплоемкость, ρ – плотность.

Работа сил трения вычисляется по зависимостям, представленным в работах [3, 4]:

$$A_i = \frac{Q_m v_{CK} t_{IP}}{F_K}, \quad (3.34)$$

где v_{CK} - скорость скольжения металла по оправке;

t_{IP} - время прокатки;

F_K - поверхность контакта металла с оправкой.

Для решения поставленной задачи была создана компьютерная программа позволяющая автоматизировать процесс расчетов. Это было необходимо, поскольку ее решение сопряжено с большим числом вычислений. Программа создана на языке Pascal в среде Delphi. Она позволяет проводить расчеты согласно описанной выше методики. Скорость расчетов напрямую зависит от точности, что справедливо для любых итерационных расчетов, чем выше точность, тем больше времени требуется.

Посредством разработанной программы можно проводить расчеты для всех типоразмеров длинных оправок, работающих в плавающем или контролируемо-перемещаемом режимах.

3.2 Влияние основных технологических факторов раскатки на температурное поле длинных оправок непрерывных станов

Для определения условий работы длинных оправок в двух и трехвалковых непрерывных станах была выполнена оценка температурного поля инструмента.

В таблице 2.1 Главы 2 представлены исходные данные для проведения сопоставимого анализа. Расчет для схем непрерывных станов с двух и трехвалковыми клетями проводили для труб размером 73×5,5 мм. Сравнивались условия раскатки для двух станов ТПА 80 ОАО "СинТЗ" и RQF 10 3/4" ОАО "ТАГМЕТ" при производстве одного типоразмера бесшовных труб.

Согласно предложенной методики расчета температурного поля длинных оправок выполнен сравнительный анализ разогрева оправок, работающих в рассматриваемых скоростных режимах. Расчет проводили для контрольных точек согласно схеме, представленной на рисунке 3.1.

3.2.1 Исследование тепловых условий работы для плавающей оправки

Расчеты проводились для условий непрерывного стана ТПА 80 ОАО "СинТЗ" в 7 сечениях по длине оправки, которые соответствуют расстоянию 0, 3250, 6500, 9750, 13000, 16250, и 19500 мм от наконечника, и для 12 узлов по сечению соответствующих 4 радиусам 40.5, 30.5, 20.5, 10.5мм на каждую из 3 контрольных точек (в выпуске калибра, в средней точке периметра, по

дну калибра). Такое расположение точек позволяет получить представление о распределении температуры по всему сечению. Контакт оправки и гильзы симметричен относительно оси Y, поэтому достаточно рассмотреть одну половину сечения.

Результаты расчета температурного поля оправки 81 мм в контрольных точках, в зависимости от радиуса оправки, в момент окончания раскатки приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Результаты расчета температурного поля (°C)

Радиус оправки, мм	Контрольные точки оправки	Длина оправки, мм						
		0	3250	6500	9750	13000	16250	19500
40,5	в выпуске калибра	395	400	465	450	455	415	400
30,5		235	235	290	290	280	200	200
20,5		100	100	115	115	115	100	100
10,5		100	100	100	100	100	100	100
40,5	по дну калибра	520	520	495	505	480	445	420
30,5		345	345	400	400	395	405	400
20,5		105	105	120	120	120	100	100
10,5		100	100	100	100	100	100	100
40,5	в средней точке периметра	625	635	675	710	665	640	605
30,5		450	460	500	500	490	465	450
20,5		205	205	220	220	200	180	125
10,5		100	100	100	100	100	100	100

В таблице приведена температура оправки после первого прохода, однако с увеличением количества пропусков, возрастает температура и глубина нагрева.

Учитывая небольшое различие в типоразмерах оправок, используемых при раскатке на непрерывном стане ТПА 80 (диапазон диаметров 63-83 мм), разность соответствующих им температур не превысит 20-25 °C. Данный факт подтвержден соответствующими расчетами. Таким образом, для получения обобщенных результатов по стану достаточно выполнить расчеты для выбранной оправки диаметром 81 мм изготовленной из стали 35ХН2Ф.

Расчетное изменение температуры в сечении оправки соответствующем 9,75 м длины во время раскатки представлено на рисунке 3.3.

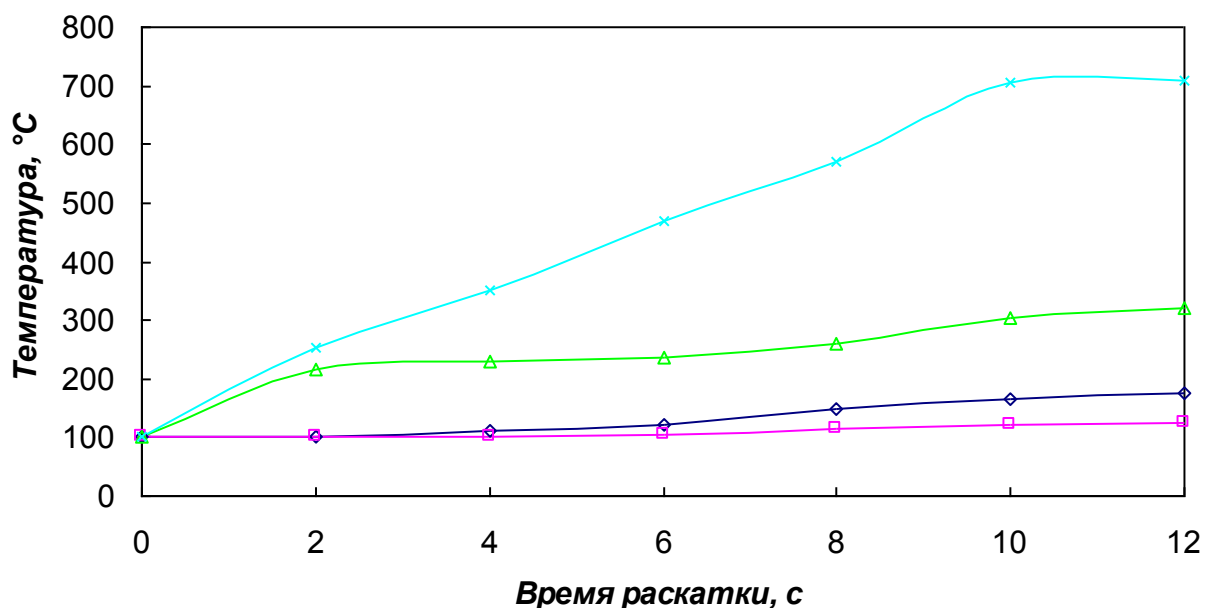


Рисунок 3.3 Расчетное изменение температуры в сечении оправки соответствующем 9,75 м длины во время раскатки:

□ – радиус 10,5 мм; ◇ – радиус 20,5 мм;
 Δ – радиус 30,5 мм; х – поверхность оправки.

Характер кривых нагрева подтверждает факт возникновения неоднородности температурного поля на начальной стадии процесса раскатки. Температура наиболее разогретых участков оправки достигает 710 °C и расположена в диапазоне с 6 по 13 м от наконечника. Максимальная температура наблюдается в средней точке периметра вследствие линейного контакта оправки с нагретой гильзой.

Расчетное распределение температуры по сечению оправки по окончании раскатки представлено на рисунке 3.4.

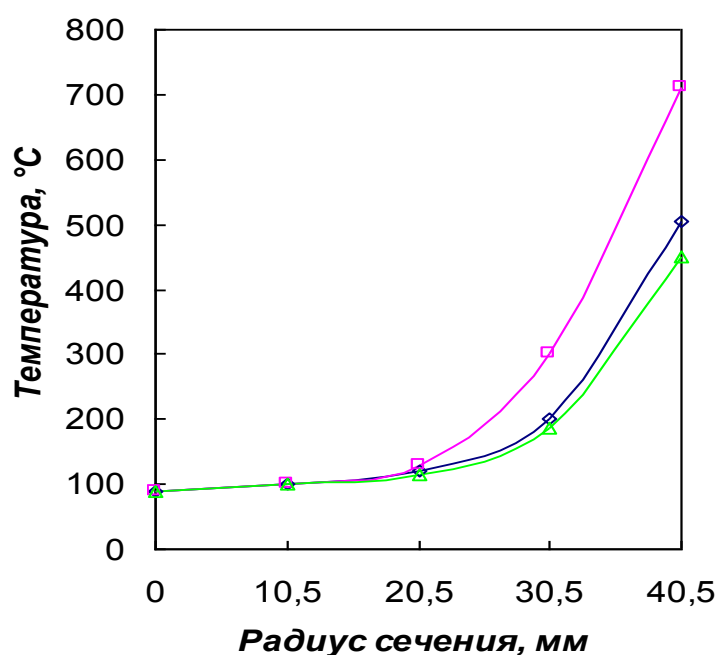


Рисунок 3.4 Расчетное распределение температуры по сечению оправки соответствующем 9,75 м длины после раскатки:

Δ – в выпуске калибра; □ – в средней точке периметра;

◇ – по дну калибра.

Нагрев характеризуется кривыми для радиусов трех точек сечения соответствующего длине 9,75 м от носика оправки. Графики параболического типа аппроксимировано имеют вид $y=1,34 \cdot x^2+90^{\circ}\text{C}$.

Критерием прогрева в исследовании считали глубину слоя, температура в котором изменилась не менее чем на 35 °C, что в свою очередь равно 5 % от максимальной температуры на поверхности оправки во время раскатки. Анализ графика на рисунке 3.3 позволяет сделать вывод о существенной неоднородности прогрева инструмента. В соответствии с выбранным критерием глубина прогрева колеблется в диапазоне 20-25 мм, что составляет 50-62 % от радиуса оправки. Для разработанной методики оценки теплового состояния длинной оправки было введено определение приконтактного слоя – это слой, расположенный у поверхности инструмента и прогреваемый за

время контакта с нагретым металлом не менее, чем на 70 °С, что в свою очередь равно 10 % от максимальной температуры на поверхности оправки после раскатки.

Охлаждение плавающих оправок, традиционно, осуществляется в специальных ваннах с водой. Изменение температуры длинной оправки после извлечения из черновой трубы, транспортировке в течение 6 с по рольгангу и охлаждении в течение 15 с представлено на рисунке 3.5.

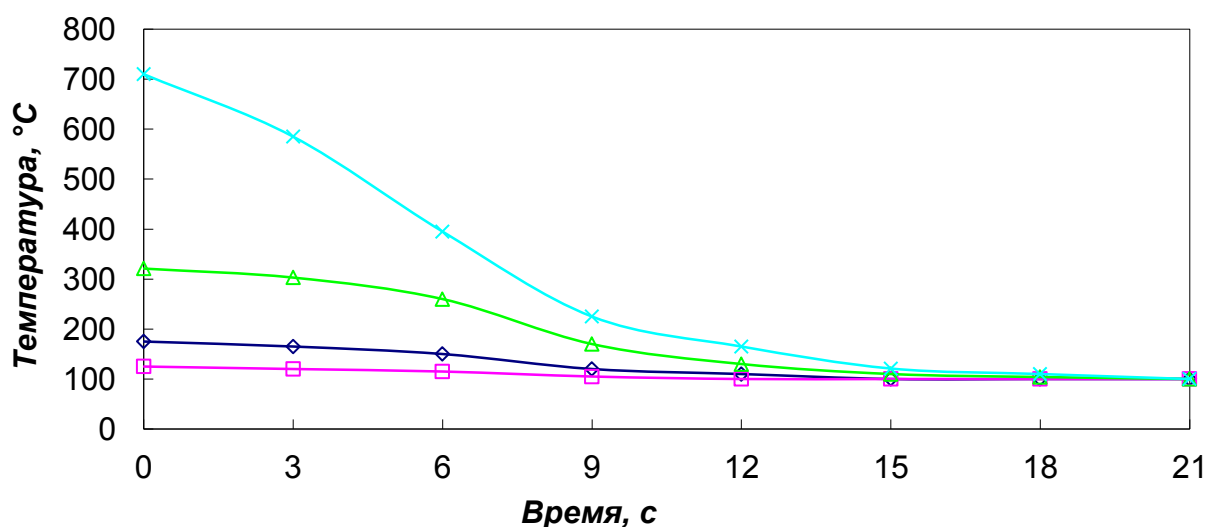


Рисунок 3.5 Изменение температуры в сечении оправки соответствующем 9,75 м длины во время транспортировки и охлаждения:

- – радиус 10,5 мм; ◇ – радиус 20,5 мм;
 Δ – радиус 30,5 мм; х – поверхность оправки.

По характеру изменения температуры рабочей поверхности оправки сделан вывод о резком охлаждении на 264 °С в момент извлечения инструмента вследствие теплоотдачи в окружающую среду. Высокая интенсивность охлаждения просматривается в первые 3 секунды процесса охлаждения в ванне с водой. Далее с 4 по 9 секунду охлаждение происходит по линейному закону. Выравнивание температуры рабочей поверхности близкой к 100 °С наступает на 15 секунде процесса.

3.2.2 Анализ тепловых условий работы для контролируемо-перемещаемой оправки

Для проведения сравнительного анализа температурных полей плавающей и контролируемо-перемещаемой оправок были проведены соответствующие расчеты. Результаты, представленные на рисунке 3.6, показывают, что температура рабочей поверхности оправки при раскатке в трехвалковой клети достигает 805 °С, в то время как для двухвалковой около 710 °С. При этом скорость разогрева оправки для случая контролируемого перемещения и трехвалковой схемы превышает соответствующую ей скорость для плавающего режима с раскаткой в двухвалковых клетях. В середине процесса раскатки гильзы в черновую трубу температура поверхности приконтактного слоя контролируемо-перемещаемой оправки превышает соответствующую ей температуру плавающей на 39,4%. Данное обстоятельство можно объяснить работой сил трения вследствие контролируемого перемещения инструмента [68], а также более тесным охватом тела оправки деформируемым металлом в трехвалковых клетях.

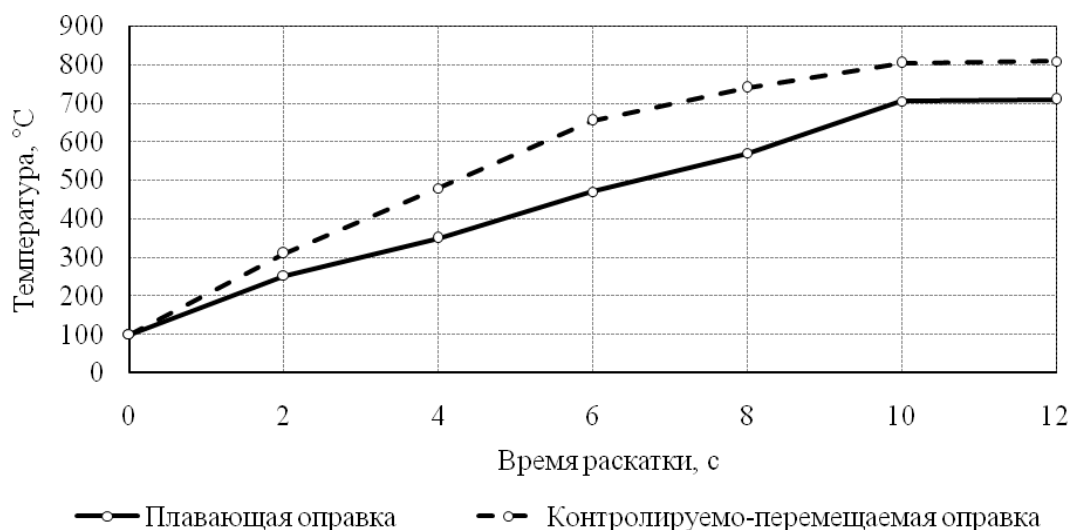


Рисунок 3.6 Разогрев рабочей поверхности плавающей и контролируемо-перемещаемой оправок диаметром 81 мм в средней точке периметра ручья валка.

На рисунке 3.7 представлены графики распределения значений температуры нагрева наружной поверхности оправки диаметром 81 мм в точках по длине окружности сечения по середине инструмента после раскатки гильзы в двух и трехвалковых клетях. Распределение подчиняется гармоническому закону. Период температурных колебаний длинной оправки по длине окружности рассматриваемого сечения ориентировочно в 1,5 раза меньше для случая раскатки в трехвалковой клети, чем в двухвалковой. Это позволяет сделать вывод о существенно большей неравномерности разогрева поверхности оправки при раскатке в трехвалковых клетях и, как следствие, о большем их износе. В среднем температура разогрева поверхности длинной оправки при прокатке в непрерывном стане с трехвалковыми клетями, согласно рассматриваемой схемы деформации, увеличилась на 14,3 %.

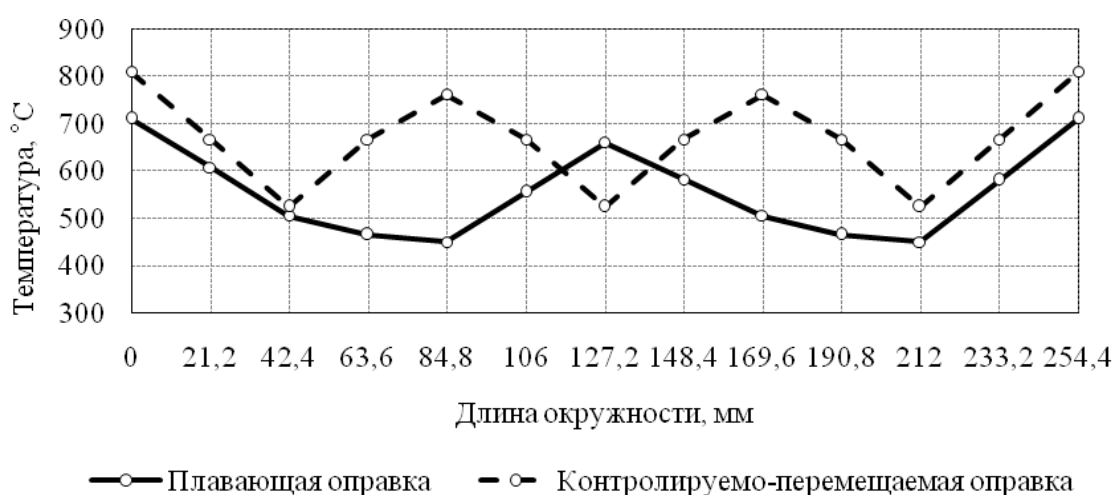


Рисунок 3.7 Распределение температуры нагрева наружной поверхности оправки 81 мм по сечению в середине длинной оправки после раскатки гильзы в двух и трехвалковых клетях

Охлаждение контролируемо-перемещаемых оправок осуществляется водой в душирующей установке по зонам с индивидуальным графиком. Изменение температуры длинной оправки после извлечения из черновой трубы, транспортировке в течение 6 с по рольгангу и охлаждении в течение 15 с представлено на рисунке 3.8.

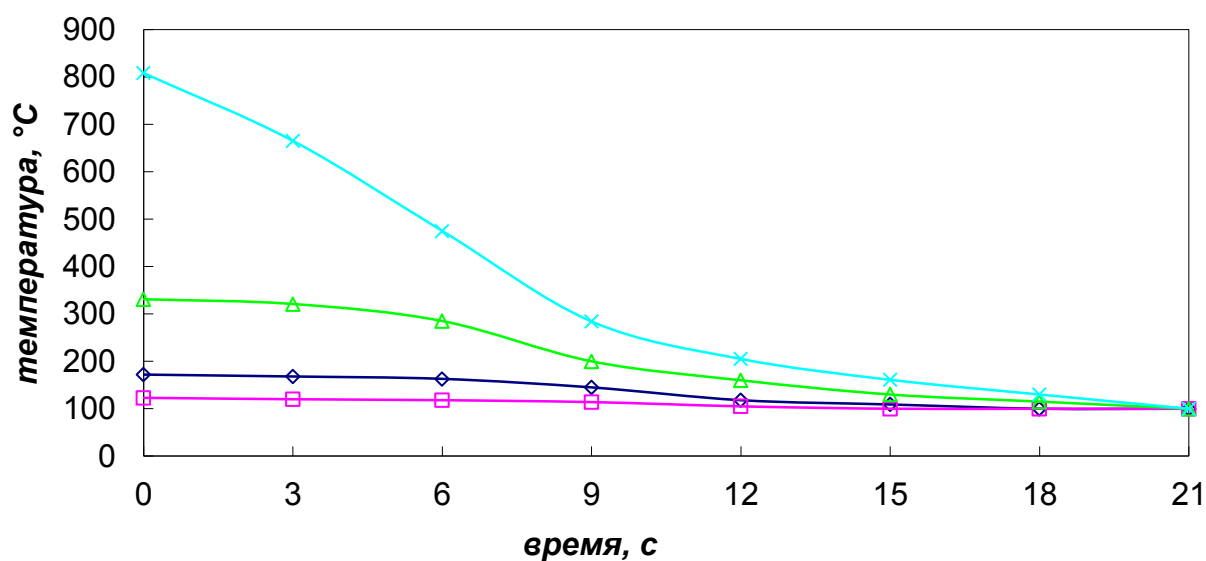


Рисунок 3.8 Изменение температуры в сечении оправки соответствующем 9,75 м длины во время транспортировки и охлаждения:

□ – радиус 10,5 мм; ◇ – радиус 20,5 мм;
 Δ – радиус 30,5 мм; x – поверхность оправки.

Характер изменения температуры рабочей поверхности оправки позволяет сделать вывод о резком охлаждении на 278 °C в момент извлечения инструмента вследствие теплоотдачи в окружающую среду. Процесс охлаждения водой носит равномерный характер на протяжении всего периода, после чего наступает выравнивание температуры рабочей поверхности близкой к 100 °C.

3.2.3 Исследование влияния технологических факторов на температурное поле длинной оправки

Выбор и анализ технологических факторов раскатки, влияющих на температурное поле инструмента, показал, что наиболее значимыми и характерными для нашего исследования являются температура гильзы, время раскатки и диаметр оправки.

3.2.3.1 Изучение влияния температуры гильзы на температурное поле длинной оправки

Для определения характера влияния температуры исходной гильзы на температурное поле плавающей оправки в процессе раскатки в дополнение к уже сделанному ранее расчету для случая 1100 °С, были осуществлены соответствующие расчеты для случаев 1050 °С и 1150 °С. Результаты представлены на рисунке 3.9.

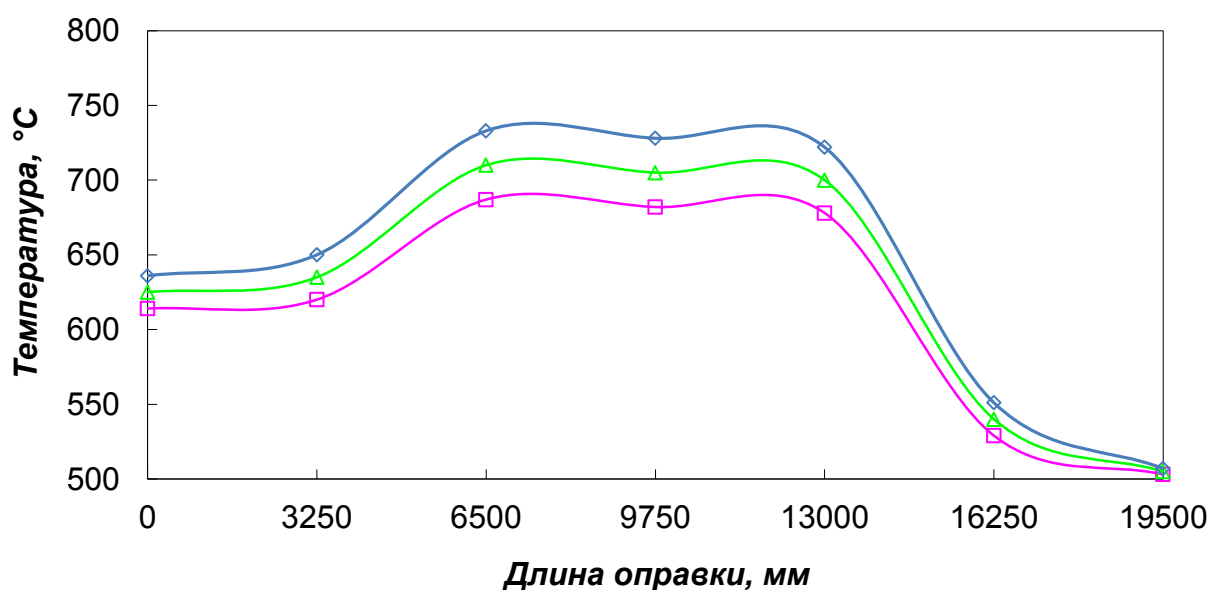


Рисунок 3.9 Влияние температуры гильзы на разогрев длинной оправки:

□ – 1050 °С; ◇ – 1150 °С; Δ – 1100 °С.

Расчеты показали разность температур 11 °С в области наконечника оправки и более существенную разность 23 °С в области максимального разогрева с 6 по 13 м. Данные колебания составляют не более 3 % от максимально разогретой точки поверхности плавающей оправки, а значит не существенно влияют на процесс раскатки. Согласно действующей на ТПА 80 технологии температура черновой трубы на выходе из непрерывного стана

должна быть не ниже 1030 °С. В этой связи рассмотрение задачи использования в раскатке гильз с более широким диапазоном температур не целесообразно.

3.2.3.2 Анализ влияния длительности процесса раскатки на температурное поле длинной оправки

Как указывалось ранее существенное воздействие на тепловое состояние оправки оказывает общее время ее контакта с гильзой при раскатке. Время раскатки зависит от скорости вращения валков. Для оценки влияния этого фактора к ранее рассмотренному варианту 12 с, дополнительно проводился расчет температурного поля длинной оправки с общим временем раскатки 8 с и 16 с. Как видно из результатов, представленных на рисунке 3.10 изменение времени раскатки на 4 с приводит к изменению температуры областей максимального разогрева примерно на 50 °С, что составляет 7 % от максимальной температуры разогрева плавающей оправки и является существенным для исследования.

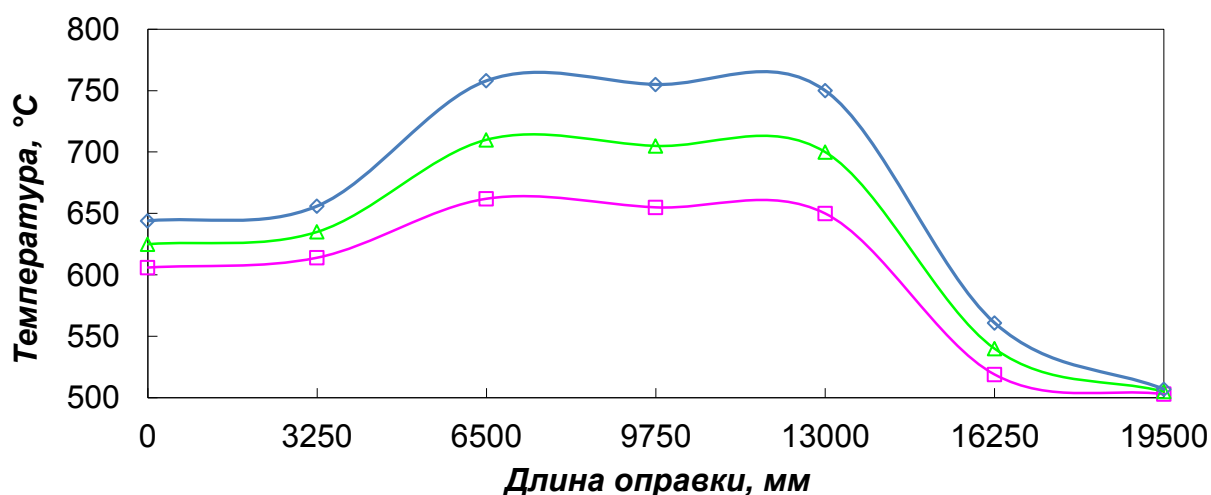


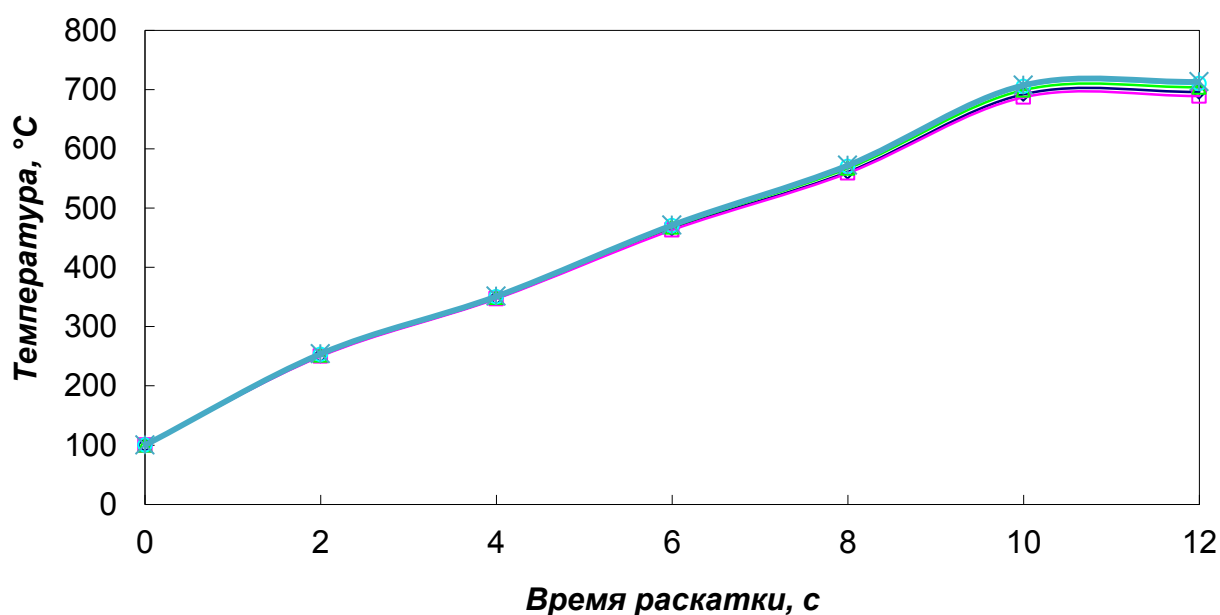
Рисунок 3.10 Влияние общего времени раскатки на разогрев длинной оправки:

□ – 8 с; ◇ – 16 с; Δ – 12 с.

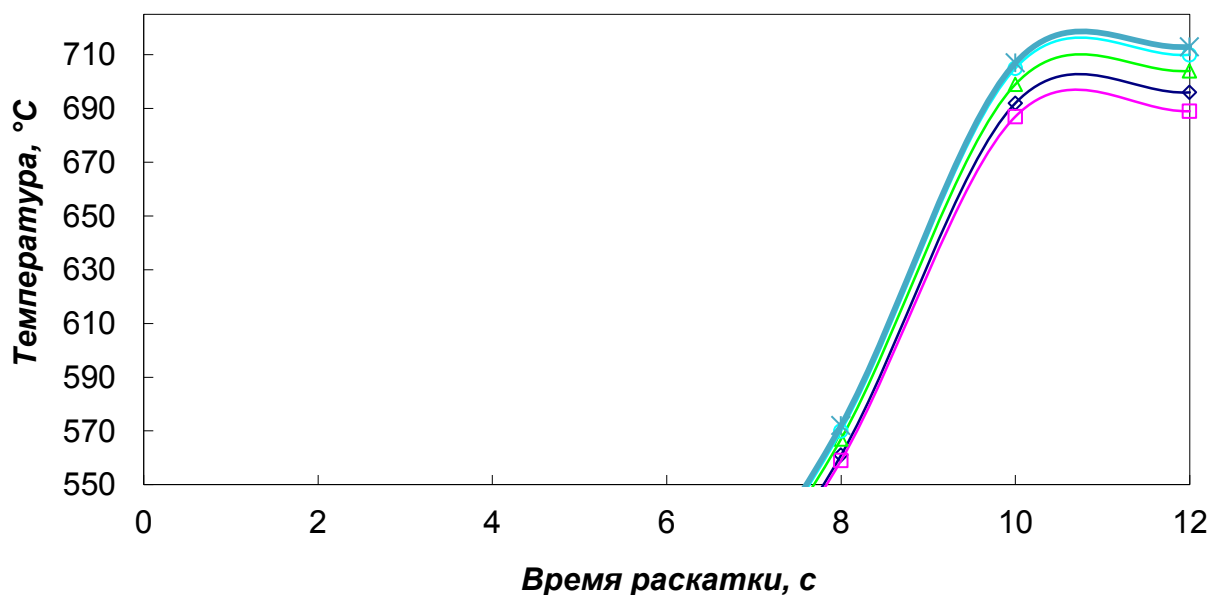
Таким образом, с увеличением числа оборотов валков в клетях непрерывного стана на 30 %, температура оправки увеличивается на величину до 50 °С. Аналогичная ситуация с уменьшением.

3.2.3.3 Исследование влияния диаметра длинной оправки на ее температурное поле

В зависимости от геометрических требований к готовой трубе при раскатке применяются длинные оправки различных диаметров. В условиях ТПА 80 ОАО "СинТЗ" эксплуатируются раскатные оправки диаметров от 63 до 83 мм. Для анализа влияния диаметра плавающей оправки на ее температурное поле в цикле раскатки были осуществлены соответствующие расчеты для диаметров 63, 69, 75, 81, 83 мм. Результаты приведены на рисунке 3.11 (а, б).



а



б

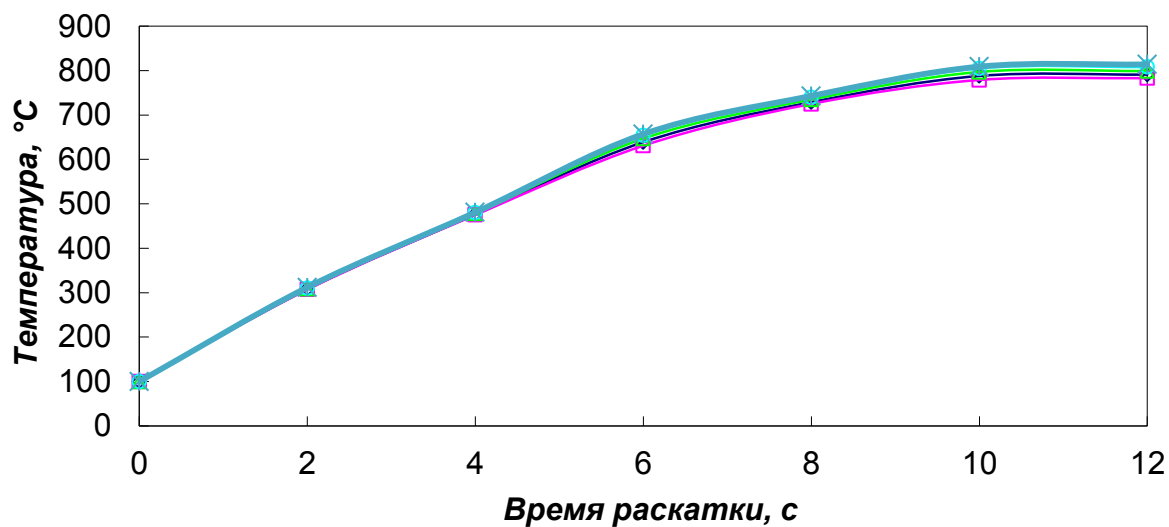
Рисунок 3.11 Влияние диаметра плавающей оправки на ее температурное поле (а - весь цикл раскатки, б - последние 2 секунды):

□ – диаметр 63 мм; ◇ – диаметр 69 мм; Δ – диаметр 75 мм;
о – диаметр 81 мм; х – диаметр 83 мм.

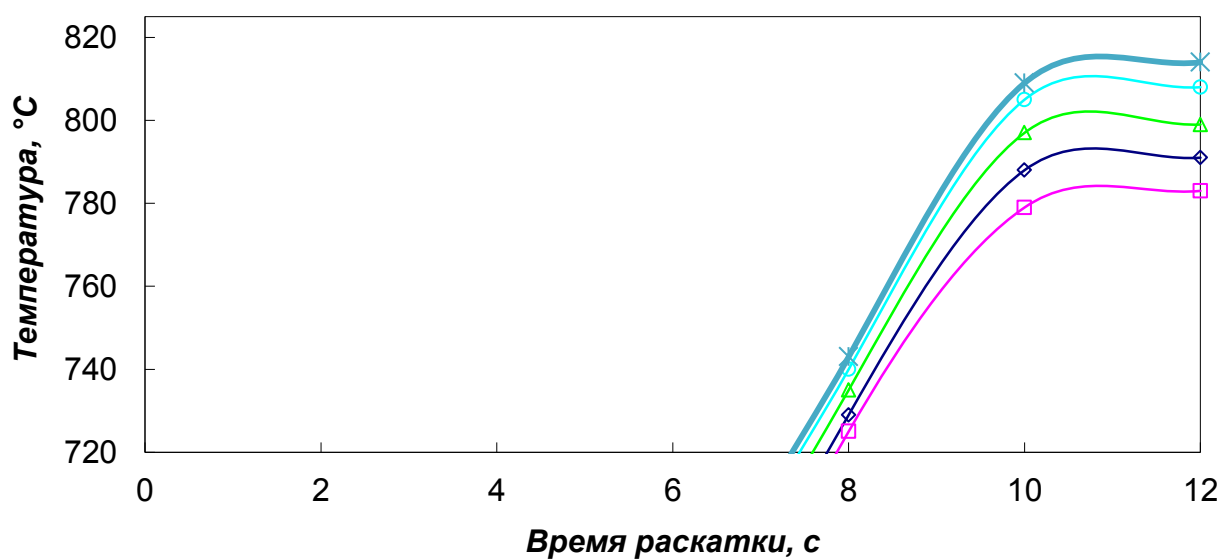
Максимальная разность температур в диапазоне диаметров эксплуатируемых на ОАО "СинТЗ" длинных оправок составила 24 °C и достигается на последних двух секундах процесса раскатки. Стоит отметить тенденцию к увеличению разогрева рабочей поверхности длинной оправки с увеличением ее диаметра. Учитывая изменение температуры лишь на 3 % от максимальной, был сделан вывод, что в условиях ТПА 80 диаметр плавающей оправки не оказывает существенного влияния на ее разогрев. Данное обстоятельство можно объяснить небольшим диапазоном диаметров эксплуатируемых оправок.

Принимая допущения сделанные ранее для сравнения температурных полей плавающей и контролируемо-перемещаемой оправок одинакового

диаметра в двух и трехвалковых клетях, был осуществлен соответствующий расчет. Результаты приведены на рисунке 3.12 (а, б).



а



б

Рисунок 3.12 Влияние диаметра контролируемо-перемещаемой оправки на ее температурное поле (а - весь цикл раскатки, б - последние 2 секунды):

- – диаметр 63 мм; ◇ – диаметр 69 мм; Δ – диаметр 75 мм;
- о – диаметр 81 мм; х – диаметр 83 мм.

Для контролируемо-перемещаемой оправки расчеты показали максимальную разность температур $31\text{ }^{\circ}\text{C}$, что на 32 % больше, чем для плавающей оправки. Столь значимая разность обусловлена существенной работой сил трения.

Сравнение полученных результатов позволяет сделать вывод о большем влиянии диаметра оправки на ее температурное поле для случая контролируемого перемещения.

3.3 Проверка сходимости результатов расчета температурного поля длинной оправки в промышленных условиях

Сходимость результатов расчета температурных полей для плавающей оправки была проверена в промышленных условиях ТПА 80 ОАО "СинТЗ", а для контролируемо-перемещаемой на непрерывном стане PQF 10 3/4" ОАО "ТАГМЕТ".

Оценочное распределение температуры по длине плавающей оправки на поверхности после раскатки и извлечения, учитывающее тепловые потери при транспортировке, представлено на рисунке 3.13. Нагрев характеризуется графиками для трех контрольных точек. Кривые носят подобный характер с шагом $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ между точками по дну калибра и в выпуске калибра, а так же 100°C между точками в средней части периметра и по дну калибра. При расчетах временной интервал с момента окончания раскатки гильзы, процессе ее транспортировки до начала извлечения оправки соответствовал технологическому процессу в условиях ТПА 80 и составил 6 с. Аналогичная оценка теплового состояния после раскатки и извлечения была сделана для контролируемо-перемещаемой оправки на непрерывном стане PQF 10 3/4" ОАО "ТАГМЕТ". Достоверность теоретических расчетов была проверена экспериментальными замерами соответствующих температур в контрольных

точках инструмента пирометром «Raytek Raynger ST» и показала высокую сходимость результатов. Ошибка не превысила 7 %.

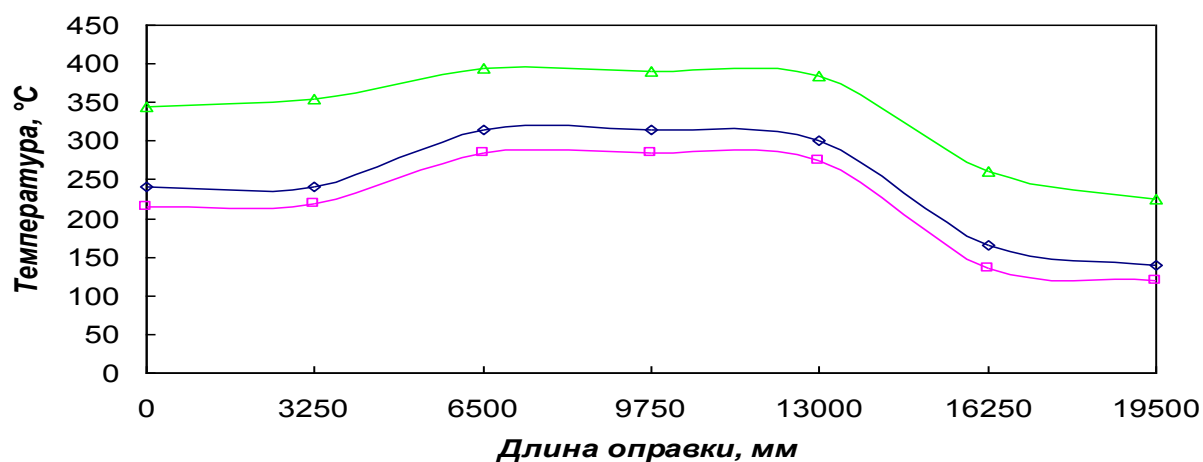


Рисунок 3.13 Оценочное распределение температуры по длине оправки на рабочей поверхности в контрольных точках после раскатки и извлечения:
□ – в выпуске калибра; Δ – в средней точке периметра; ◇ – по дну калибра.

Результаты замеров фактических температур в контрольных точках для плавающей оправки представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Экспериментальные данные температур в контрольных точках на поверхности плавающей оправки

контрольная точка	температура в сечении на поверхности оправки, °С (экспериментальное/расчетное значение)						
	0	3250мм	6500мм	9750мм	13000мм	16250мм	19500мм
в выпуске калибра	215/	220/	285/	285/	275/	135/	120/
	204	233	299	300	261	140	124
по дну калибра	240/	240/	315/	315/	300/	165/	140/
	247	249	333	329	285	176	149
в средней точке периметра	345/	355/	395/	390/	385/	260/	225/
	331	344	414	411	392	254	211

Результаты замеров фактических температур в контрольных точках для контролируемо-перемещаемой оправки представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Экспериментальные данные температур в контрольных точках на поверхности контролируемо-перемещаемой оправки

контрольная точка	температура в сечении на поверхности оправки, °С (экспериментальное/расчетное значение)						
	0	2900мм	5800мм	8700мм	11600мм	14500мм	17500мм
в выпуске калибра	220/	230/	305/	310/	295/	145/	125/
	211	218	311	325	309	142	121
по дну калибра	245/	250/	335/	345/	320/	175/	145/
	249	261	348	362	332	168	142
в средней точке периметра	350/	370/	415/	425/	410/	270/	230/
	346	388	431	446	422	288	243

На рисунке 3.14 представлено изменение температурного поля длинной оправки в цикле раскатки и охлаждения.

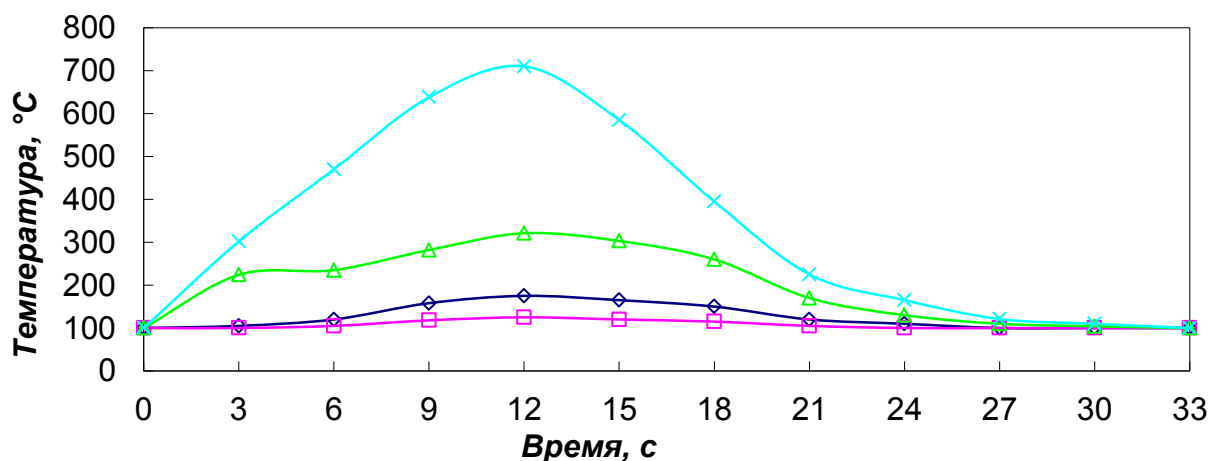


Рисунок 3.14 Изменение температуры в сечении оправки в цикле раскатки и охлаждения:

- – радиус 10,5 мм; ◇ – радиус 20,5 мм;
 Δ – радиус 30,5 мм; х – поверхность оправки.

Проведенное исследование выявило существенную неравномерность разогрева длинных оправок непрерывных станов в цикле раскатки и охлаждения. Данный факт влечет за собой появление термических напряжений, анализ которых, в свою очередь, позволяет дать оценку характера износа технологического инструмента и предсказать его выход из строя.

Глава 4. Исследование влияния технологических факторов на термонапряженное состояние длинных оправок непрерывных раскатных станов

Неравномерность температурного поля длинных оправок в процессе раскатки приводит к появлению термических напряжений, анализ которых позволяет дать оценку характера износа технологического инструмента и предупредить появление дефекта сетка разгара.

4.1 Математическая постановка задачи расчета термических напряжений длинной оправки и ее численная реализация

За основу методики расчета термонапряженного состояния был принят алгоритм, описанный в работе [69].

Температурные напряжения, возникающие в переменном температурном поле находятся решением линейной квазистатической задачи термоупругости в декартовой системе координат. В общем случае, постановка плоской задачи термоупругости заключается в определении восьми функций: три компонента тензора напряжений (σ_x , σ_y , σ_{xy}), три компонента тензора деформаций (ε_x , ε_y , ε_{xy}) и два компонента вектора перемещения (u_x , u_y), удовлетворяющим двум уравнениям равновесия при отсутствии объемных сил:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

А также трем соотношениям между деформациями и напряжениями:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E_1} \cdot (\sigma_x - \nu_1 \cdot \sigma_y) + \alpha_{T1} \cdot (T - T_0) \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E_1} \cdot (\sigma_y - \nu_1 \cdot \sigma_x) + \alpha_{T1} \cdot (T - T_0) \\ \varepsilon_{xy} = \frac{1 + \nu_1}{E_1} \cdot \sigma_{xy} \end{cases} \quad (4.2)$$

где $E_1 = \frac{E}{1-\nu^2}$, $\nu_1 = \frac{\nu}{1-\nu}$, $\alpha_{T1} = \alpha_T \cdot (1 + \nu)$;

E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона, α_{T1} – коэффициент линейного теплового расширения.

И соотношениям между деформациями и перемещениями:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (4.3)$$

Дифференциальное уравнение для напряжений по оси Y получается путем подстановки в уравнение совместимости деформаций их выражения через напряжения. Применяя уравнение равновесия и интегрируя, получаем формулу напряжений, действующих по оси Y :

$$\sigma_y = \frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot (T_{y(cp)} - T_{i(cp)}), \quad (4.4)$$

где

$$T_{y(cp)} = \frac{1}{y} \cdot \int_0^y T dy; \quad (4.5)$$

$$T_{i(cp)} = \frac{1}{y} \cdot \int_0^i T dy. \quad (4.6)$$

Напряжения для оси X получаем аналогичным образом:

$$\sigma_x = \frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot (T_{x(cp)} - T_i). \quad (4.7)$$

В результате решения задачи теплопроводности методом конечных разностей имеются значения T_{ij} в каждый расчётный момент времени. При расчете напряжений, сначала необходимо произвести вычисления средних температур в интервале от 0 до y и от 0 до i , где y – максимальное количество узлов по оси Y , i – текущее значение по координате. Таким образом, необходимо найти численное значение интеграла вида (4.5), (4.6). Для нахождения промежуточных температур в точках между узлами разностной сетки целесообразно использовать метод линейной интерполяции, с коэффициентами:

$$a_i = \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta y}; \quad b_i = T_{i-1} - \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta y},$$

здесь i – номер узла по оси Y ($i=2 \div y$).

Затем осуществляется вычисление средних температур по формуле:

$$T_{y(cp)} = \frac{1}{y_i - y_1} \cdot \sum_{i=2}^n \frac{a_i}{2} \cdot (y_i^2 - y_{i-1}^2) + b_i \cdot (y_i - y_{i-1}). \quad (4.8)$$

И напряжения по формулам (4.4) и (4.7).

Для решения задачи термоупругости используется метод конечных разностей.

Таким образом, алгоритм расчета термических напряжений включает в себя:

1. Задание исходных данных, в том числе:
 - модуль упругости – E , МПа;
 - коэффициент Пуассона – ν ;
 - коэффициент линейного расширения – α_t , 1/К.
2. Расчет коэффициентов интерполяции.
3. Расчет средних температур по формуле (4.8).
4. Расчет термических напряжений.

4.2 Влияние основных технологических факторов раскатки на термонапряженное состояние длинных оправок непрерывных станов

На основании результатов, полученных при исследовании температурного поля, был выполнен расчет напряженного состояния на этапе раскатки. При этом для оправки были приняты следующие физико-механические характеристики:

- модуль упругости $E = 210 \text{ ГПа}$;
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,28$;
- коэффициент линейного расширения $\alpha = 1,13 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$.

Свойства материала оправки принимались постоянными, то есть, не зависели от температуры. Данное допущение вносило определенную погрешность при расчете температурных напряжений, но эта погрешность практически не влияет на оценку запасов прочности. Учет влияния температуры значительно увеличивает время расчета и оправдан лишь в случае, если имеются достоверные числовые данные по изменению физико-механических свойств материала в зависимости от температуры.

При исследовании рассматривались изменения главных напряжений в выбранных контрольных точках. Для изучения напряженного состояния длинных оправок по результатам расчетов были построены графики главных напряжений и интенсивности напряжений.

4.2.1 Исследование термонапряженного состояния плавающей оправки

По средством предложенной методики расчета термических напряжений были осуществлены соответствующие вычисления для условий раскатки на плавающей оправке. Результаты расчета напряженного состояния оправки

диаметром 81 мм в условиях непрерывного стана ТПА 80 в середине процесса раскатки и по его окончании представлены на рисунках 4.1, 4.2.

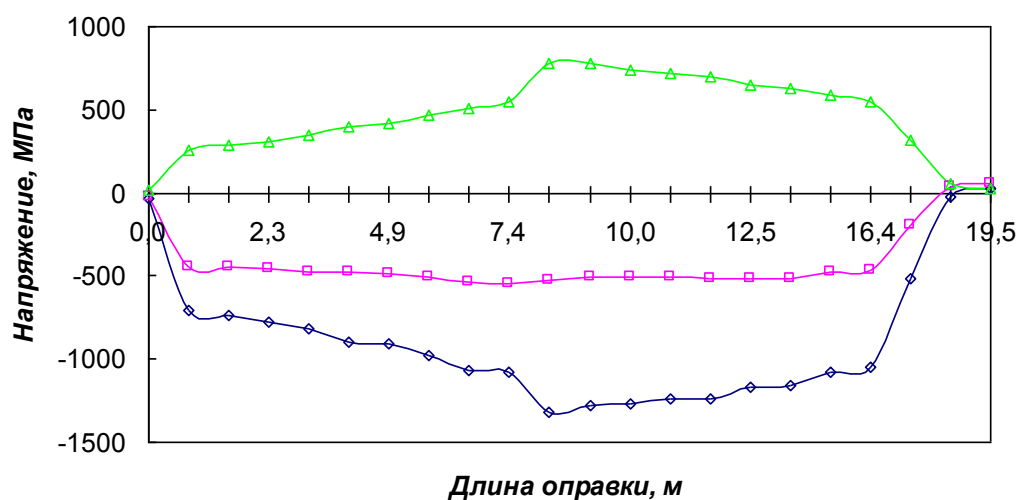


Рисунок 4.1 Изменение интенсивности σ_i и главных σ_1 , σ_3 напряжений по длине плавающей оправки (середина процесса раскатки):

□ – главное напряжение σ_1 ; ◇ – главное напряжение σ_3 ;
 Δ – интенсивность σ_i .

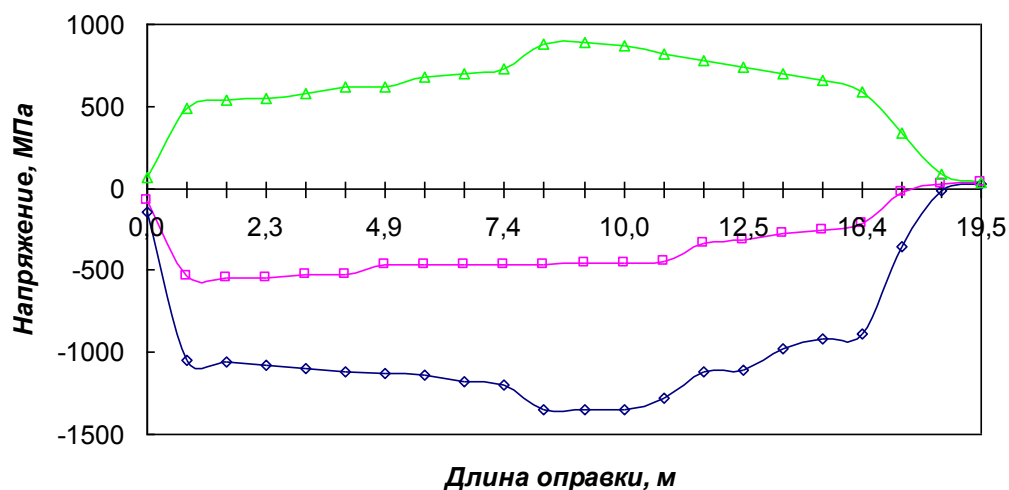


Рисунок 4.2 Изменение интенсивности σ_i и главных σ_1 , σ_3 напряжений по длине плавающей оправки (окончание процесса раскатки):

□ – главное напряжение σ_1 ; ◇ – главное напряжение σ_3 ;
 Δ – интенсивность σ_i .

Проведенный анализ показал, что уровень напряжений, вызванных тепловым воздействием от раскатываемой гильзы в середине процесса, сопоставим с температурными напряжениями после окончания раскатки. В течение процесса раскатки главные напряжения на поверхности рабочей части оправки сжимающие, а при охлаждении (рисунок 4.3) появляются растягивающие. Таким образом, действующие на оправку напряжения изменяются циклически, что приводит к появлению трещин. Термические напряжения максимальны в приконтактном слое, температура которого достигает 710 °С.

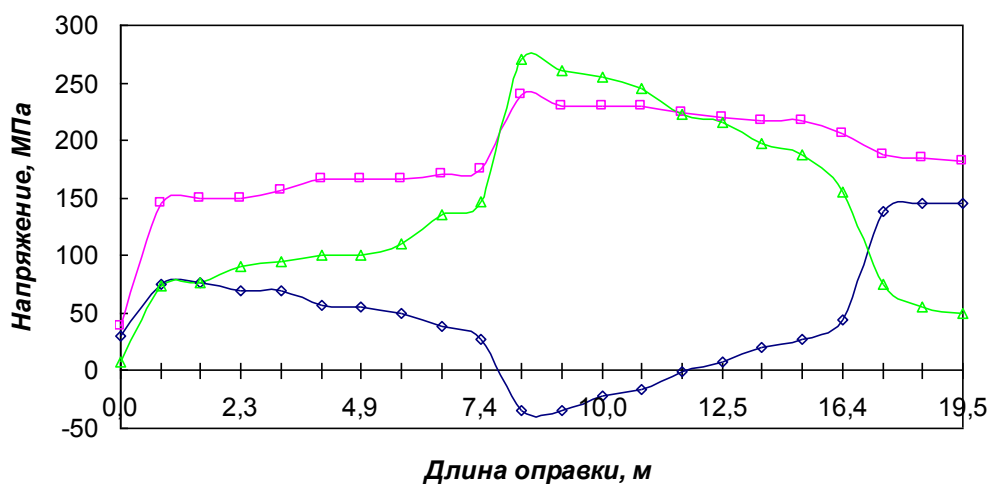


Рисунок 4.3 Изменение интенсивности σ_i и главных σ_1 , σ_3 напряжений по длине плавающей оправки при охлаждении (середина процесса):

- – главное напряжение σ_1 ;
- ◇ – главное напряжение σ_3 ;
- △ – интенсивность σ_i .

Сравнение результатов расчета напряженного состояния оправки в цикле работы показало, что существенная неоднородность появляется именно в процессе охлаждения, а не раскатки. Резкое охлаждение плавающей оправки в ванне с водой и уровень возникающих при этом термических напряжений оказывают существенное влияние на развитие дефекта сетка разгара.

Анализ статистики выхода из строя длинных оправок непрерывного стана ТПА 80 за 2009-2014 годы подтвердил результаты расчетов, в том числе расположение области максимального нагрева и износа инструмента.

4.2.2 Анализ термонапряженного состояния контролируемо-перемещаемой оправки

Аналогично плавающей оправке, были вычислены напряжения для контролируемо-перемещаемой. Результаты расчета напряженного состояния контролируемо-перемещаемой оправки в середине процесса раскатки и по его окончании представлены на рисунках 4.4, 4.5.

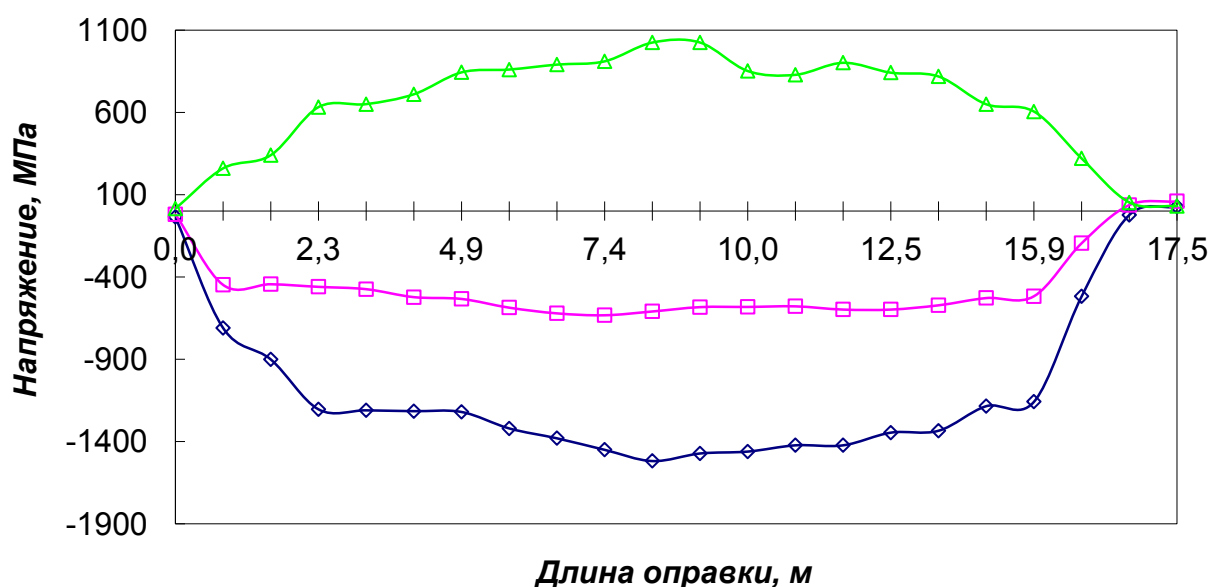


Рисунок 4.4 Изменение интенсивности σ_i и главных σ_1 , σ_3 напряжений по длине контролируемо-перемещаемой оправки (середина процесса раскатки):

- — главное напряжение σ_1 ;
- ◇ — главное напряжение σ_3 ;
- Δ — интенсивность σ_i .

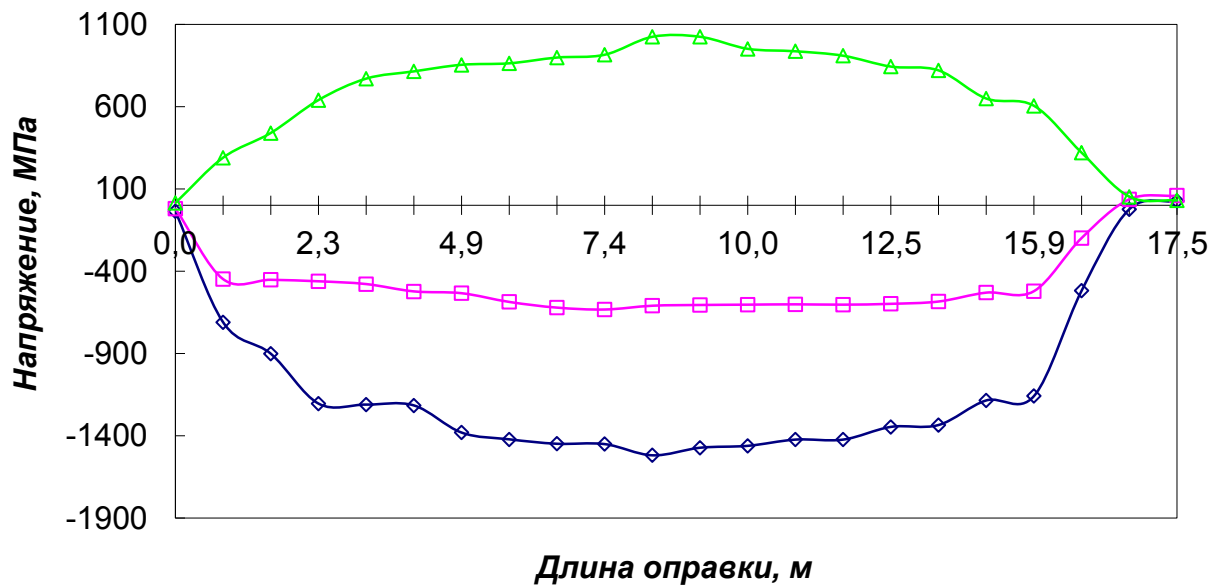


Рисунок 4.5 Изменение интенсивности σ_i и главных σ_1, σ_3 напряжений по длине контролируемо-перемещаемой оправки (окончание процесса раскатки):

□ – главное напряжение σ_1 ; ◇ – главное напряжение σ_3 ;
 Δ – интенсивность σ_i .

Как и в случае плавающей оправки, анализ показал сопоставимый уровень напряжений в середине процесса раскатки и по его окончании. Однако в численном выражении разность интенсивностей напряжений для случая контролируемого перемещения и плавающей оправки достигает 134 МПа, что составляет примерно 15 % от максимального значения.

4.2.3 Исследование влияния технологических факторов раскатки на термонапряженное состояние оправки

В главе 3 было определено, что наиболее значимыми и характерными для нашего исследования технологическими факторами являются температура гильзы, время раскатки и диаметр оправки.

4.2.3.1 Изучение влияния температуры гильзы на термонапряженное состояние длинной оправки

Для определения характера влияния температуры исходной гильзы на термонапряженное состояние длинной оправки в процессе раскатки в дополнение к уже сделанному ранее расчету для случая 1100 °С, были осуществлены соответствующие расчеты для 1050 °С и 1150 °С. Результаты представлены на рисунке 4.6.

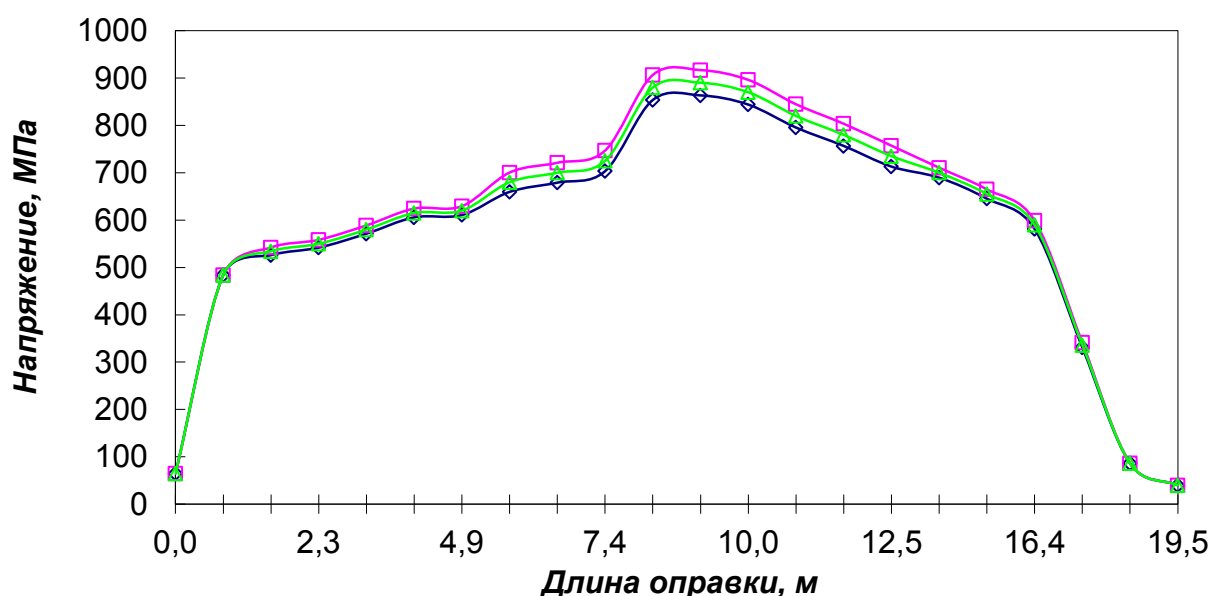


Рисунок 4.6 Влияние температуры гильзы на интенсивность напряжений длинной оправки:

□ – 1150 °С; ◇ – 1050 °С; Δ – 1100 °С.

Расчеты показали разность интенсивностей напряжений 13 МПа в области наконечника оправки и более существенную разность 27 МПа в области максимального разогрева с 6 по 13 м. Данные колебания составляют не более 4 % от максимальной интенсивности напряжений на поверхности плавающей оправки, а значит не существенно влияют на процесс раскатки. В

этой связи рассмотрение задачи использования в раскатке гильз с более широким диапазоном температур не целесообразно.

4.2.3.2 Анализ влияния длительности процесса раскатки на термонапряженное состояние длинной оправки

Существенное воздействие на термонапряженное состояние длинной оправки оказывает общее время ее контакта с гильзой при раскатке. Время раскатки находится в прямой зависимости от скорости вращения валков. Для оценки влияния этого фактора к ранее рассмотренному варианту 12 с, дополнительно проводился расчет термонапряженного состояния длинной оправки с общим временем раскатки 8 с и 16 с.

Как видно из результатов, представленных на рисунке 4.7 изменение времени раскатки на 4 с приводит к изменению интенсивности напряжений в области максимального разогрева примерно на 71 МПа, что составляет 8 % от максимальной интенсивности напряжений на поверхности плавающей оправки и является существенным для исследования.

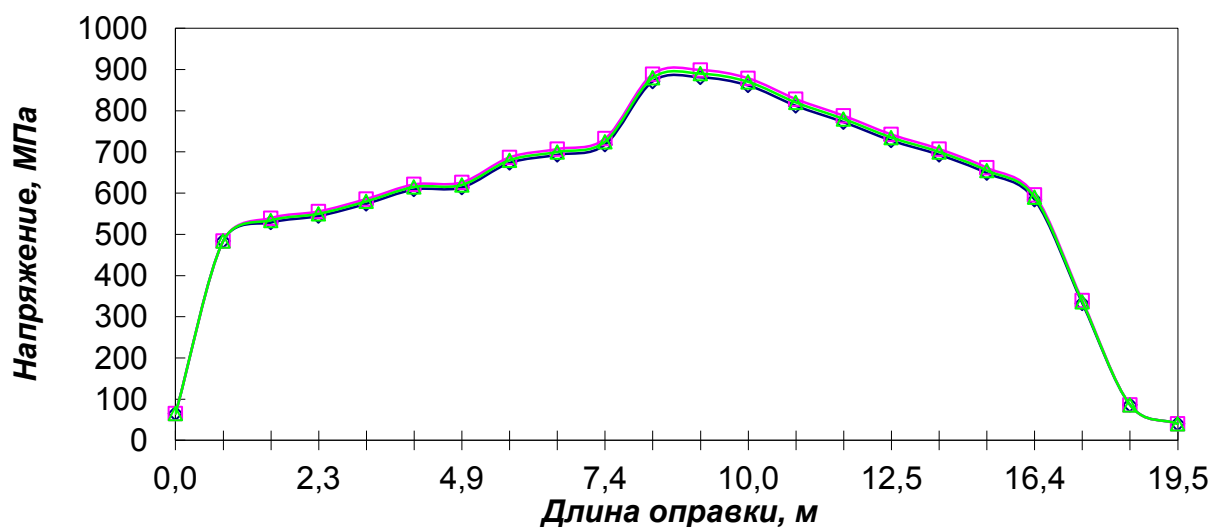


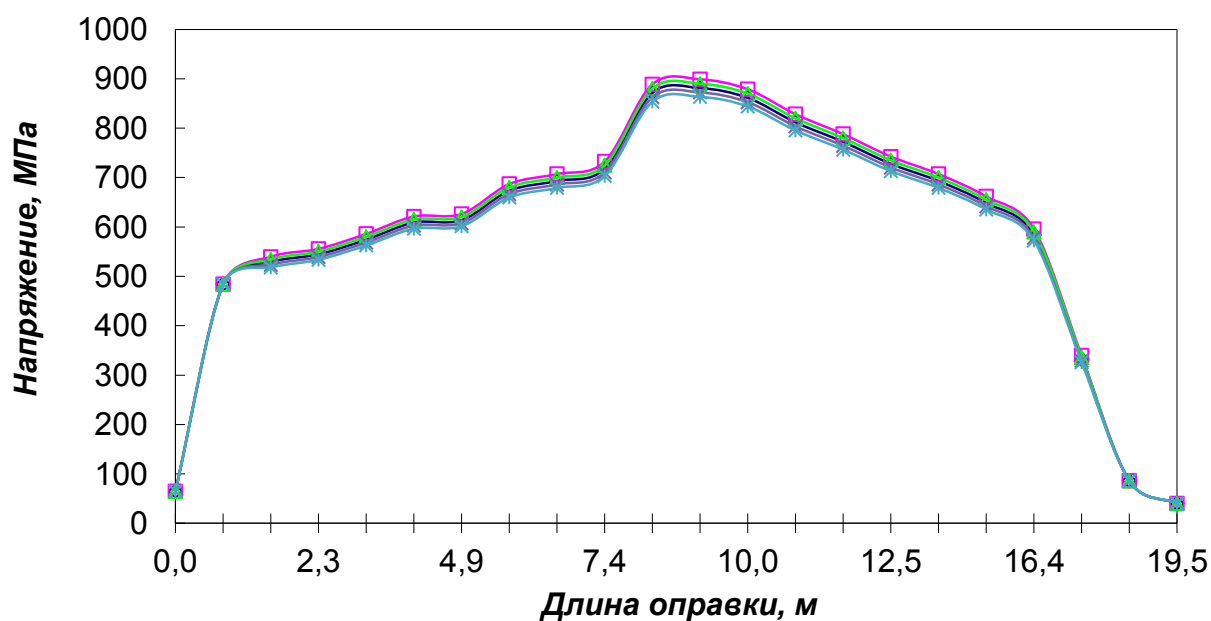
Рисунок 4.7 Влияние общего времени раскатки на интенсивность напряжений длинной оправки:

□ – 16 с; ◇ – 8 с; Δ – 12 с.

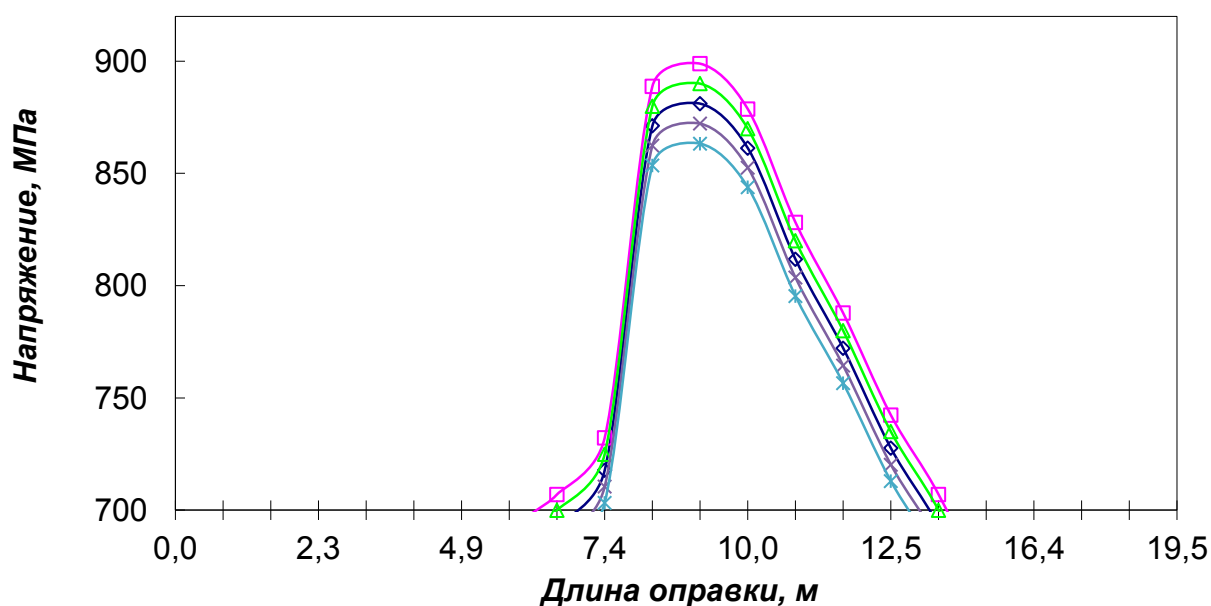
Таким образом, с увеличением числа оборотов валков в клетях непрерывного стана на 30 %, интенсивность напряжений длинной оправки увеличивается на величину до 71 МПа. Аналогичная ситуация с уменьшением.

4.2.3.3 Исследование влияния диаметра длинной оправки на ее термонапряженное состояние

Для анализа влияния диаметра длинной оправки на ее термонапряженное состояние в цикле раскатки были осуществлены соответствующие расчеты для диаметров 63, 69, 75, 81, 83 мм, эксплуатируемых в условиях ТПА 80. Результаты приведены на рисунке 4.8 (а, б).



а



б

Рисунок 4.8 Влияние диаметра длинной оправки на интенсивность напряжений (а - весь диапазон, б - область максимальных значений):

- * – диаметр 63мм; х – диаметр 69мм;
- ◇ – диаметр 75мм; Δ – диаметр 81мм;
- – диаметр 83мм.

Максимальная разность интенсивностей напряжений в диапазоне диаметров длинных оправок, эксплуатируемых на ОАО "СинТЗ", составила 36 МПа. Стоит отметить тенденцию к увеличению интенсивности напряжений на рабочей поверхности длинной оправки с увеличением ее диаметра. Учитывая изменение интенсивности напряжений лишь на 4 % от максимальной, заключаем, что в условиях ТПА 80 диаметр плавающей оправки не оказывает существенного влияния на ее термонапряженное состояние. Данное обстоятельство можно объяснить небольшим диапазоном диаметров эксплуатируемых оправок.

Аналогичные выводы можно сделать для контролируемо-перемещаемой оправки.

Проведенное исследование выявило особенности термонапряженного состояния длинных оправок непрерывных станов с двух и трехвалковыми клетями, а так же влияние на него технологических факторов процесса раскатки.

Для недопущения появления такого дефекта как сетка разгара рекомендованы условия раскатки при которых температура рабочей поверхности и интенсивность напряжений не превысят 710 °С и 890 МПа для плавающей оправки, а так же 805 °С и 1024 МПа для контролируемо-перемещаемой. Минимальная температура рабочей поверхности не должна быть ниже 100 °С, а амплитуда колебаний интенсивности напряжений в цикле работы превысить 640 МПа для плавающей и 760 МПа для контролируемо-перемещаемой оправок. Поддерживать необходимый уровень температуры рабочей поверхности и интенсивности напряжений возможно осуществляя подбор технологических факторов рассмотренных в данной главе.

Глава 5. Исследование условий работы и износа длинных оправок

Основными видами износа длинных оправок являются: сетка разгара, уменьшение диаметра, налипание металла, вмятины рабочей поверхности и обрывы. Оценка термонапряженного состояния плавающей и контролируемо-перемещаемой оправок позволяет определить условия для образования сетки разгара. Рекомендации по определению границ температуры рабочей поверхности и интенсивности напряжений для недопущения образования сетки разгара даны в Главе 4. Одним из характерных видов износа в производственной практике является уменьшение диаметра длинной оправки. Изнашивание оправок в цикле раскатки носит комбинированный характер: механическое и коррозионно-механическое. В производственных условиях уменьшение рабочего диаметра оправки до определенной критической величины является браковочным признаком, после чего инструмент направляется в переточку на меньший размер.

Как было установлено в Главе 1 наиболее перспективным представляется изготовление длинных оправок с использованием обкатки в стане поперечно-винтовой прокатки. Данное утверждение в равной мере относится как к плавающим, так и к контролируемо-перемещаемым оправкам. Опыт изготовления контролируемо-перемещаемых оправок способом обкатки и эксплуатации в условиях РУП "БМЗ" показал удовлетворительный результат. В этой связи исследование уменьшения диаметра длинной оправки, полученной с использованием обкатки, является актуальной задачей.

5.1 Экспериментальное исследование уменьшения диаметра длинных оправок

Хромникельванадиевые стали нашли широкое применение для изготовления оправок способом обкатки. Использование в условиях ТПА 80 ОАО «СинТЗ» в качестве материала для изготовления длинных оправок стали 35ХН2Ф обеспечивает достаточную износостойкость и экономически оправдано при раскатке углеродистых марок сталей. Однако его использование для раскатки средне и высоколегированных марок сталей не показало достаточной стойкости технологического инструмента.

Предметом исследования является длинная оправка из стали 35ХН2Ф, эксплуатируемая в условиях ОАО "СинТЗ". Целью исследования является изучение уменьшения диаметра длинных оправок и разработка рационального режима их работы при раскатке гильз из легированных марок сталей. Исследование этого вида износа длинных оправок проводили в несколько этапов:

- анализировали характеристики материала инструмента, условия работы длинных оправок и технологию их изготовления;
- изучали уменьшение рабочего диаметра при раскатке гильз из углеродистых и легированных сталей;
- оценивали микроструктуру, твердость и шероховатость исходного, обкатанного и изношенного металла длинных оправок.

Химический состав материала длинной оправки представлен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 Химический состав материала длинной оправки

Наименование	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	S	P
35ХН2Ф	0,3÷	0,15÷	0,40÷	0,80÷	1,75÷	0,20÷	0.025	0.025
ТУ 14-104-127	0,37	0,36	0,70	1,20	2,25	0,30		

Сталь 35ХН2Ф хромоникельванадиевая, относится к особо прочным, противостоящим истиранию. Поставляется в виде сортового проката по ГОСТ 4543-71, ГОСТ 259071. Из этой стали изготавливаются шестерни, валы, оправки и другие детали, работающие при температуре 450-750 °С.

Микроструктура металла заготовки стали 35ХН2Ф в двухсоткратном увеличении представлена на рисунке 5.1. Структура характеризуется наличием феррита и перлита с баллом зерна 8-9. Так же наблюдается полосчатость, являющаяся следствием продольной прокатки исходной заготовки в условиях предприятия-изготовителя.

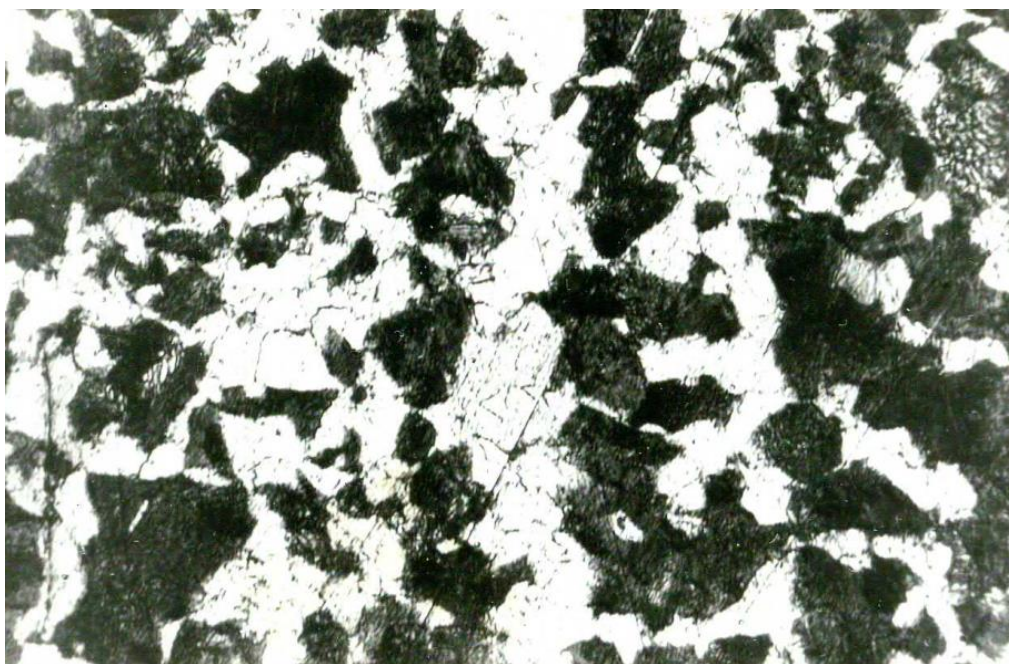


Рисунок 5.1 Микроструктура металла заготовки ст.35ХН2Ф (x200)

В процессе раскатки гильза диаметром 92 мм при температуре 1100 °С задается в непрерывный стан ТПА 80. Раскатка осуществляется в восьми двухвалковых клетях, расположенных перпендикулярно друг относительно друга и под углом 45 градусов к основанию. Краткая техническая характеристика непрерывного стана приведена в таблице 1.1.

Длина плавающей оправки непрерывного стана составляет 19,5 м. В процессе раскатки ее температура достигает 710 °С, интенсивность напряжений 890 МПа. Наиболее разогретый участок длинной оправки

расположен с 6 по 13 м от наконечника. Общее время раскатки на оправке диаметром 81 мм составляет 12 с. Цикл раскатки и охлаждения инструмента связан со значительными перепадами температуры и существенной неоднородностью напряжений по его длине. Охлаждение длинной оправки осуществляется в ванне с водой до температуры близкой к 100 °С.

Технология изготовления длинных оправок в условиях ОАО "СинТЗ" подробно описана в Главе 1.

Раскатная оправка, эксплуатируемая в непрерывном стане ТПА 80 представлена на рисунке 5.2.

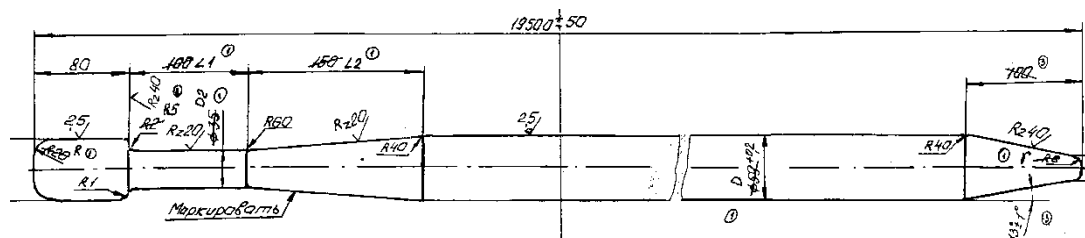


Рисунок 5.2 Длинная оправка непрерывного стана ТПА 80

Параметры и масса оправок представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 Параметры и масса длинных оправок

D	D1	D2	D3	L1	L2	R	r	Масса, кг
59	56	35	20	100	150	20	8	322
63	63	40	30	130	250	20	14	446
64	63	40	30	130	250	20	14	488
65	63	40	30	130	250	20	14	504
66	63	40	30	130	250	20	14	519
67	63	40	30	130	250	20	14	535
68	63	40	30	130	250	20	14	551
69	63	40	30	130	250	20	14	567
70	63	40	30	130	250	20	14	583
71	63	40	30	130	250	20	14	617

72	63	40	30	130	250	20	14	635
73	73	50	30	130	250	25	14	668
74	73	50	30	130	250	25	14	655
75	73	50	30	130	250	25	14	673
76	73	50	30	130	250	25	14	690
77	73	50	30	130	250	25	14	709
78	73	50	30	130	250	25	14	729
79	73	50	30	130	250	25	14	745
80	73	50	30	130	250	25	14	764
81	73	50	30	130	250	25	14	783
82	73	50	30	130	250	25	14	802
83	73	50	30	130	250	25	14	822

В процессе изготовления длинные оправки подвергаются обкатке с припуском 1 мм от номинального диаметра в пять пропусков. Температура оправки после первого пропуска находится в пределах от 750 до 730 °С. Обкатка инструмента способом поперечно-винтовой прокатки сопровождается упрочнением поверхностного слоя. На каждом этапе изготовления длинных оправок способом обкатки были осуществлены замеры твердости ее рабочей поверхности на темплетях (свидетелях) с вычислением среднего арифметического значения. Фактические изменения твердости поверхности в процессе изготовления длинных оправок 81 мм в условиях ОАО «СинТЗ» представлены на рисунке 5.3. Замеры сделаны на стационарном твердомере EMCO-TEST M4U 075G3, Австрия. Результаты показали закономерное увеличение твердости от 179 до 330 НВ с увеличением количества пропусков при изготовлении инструмента.

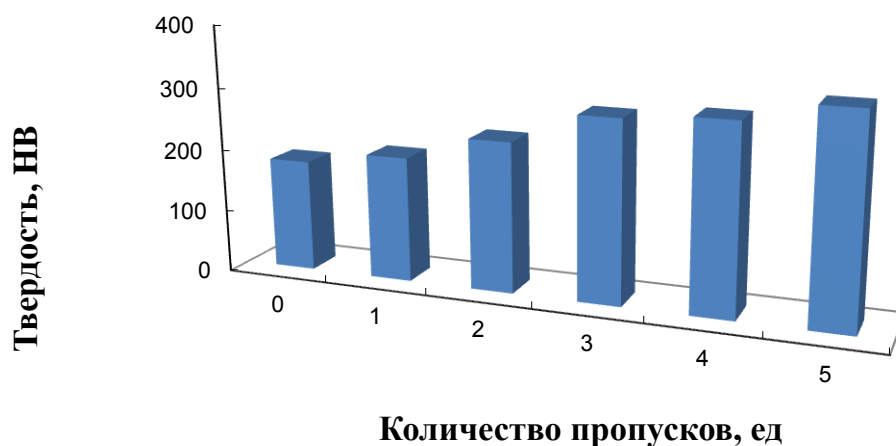


Рисунок 5.3 Изменение твердости поверхности при изготовлении длинных оправок

Так же на всех этапах обкатки раскатных оправок проводились замеры шероховатости ее рабочей поверхности. Замеры производились с шагом 0,5 м и последующим вычислением среднего арифметического значения. Замеры шероховатости проводились портативным измерителем TR200 (показатель измерения R_a). Фактические изменения шероховатости поверхности в процессе изготовления длинных оправок 81 мм в условиях ОАО «СинТЗ» представлены на рисунке 5.4.

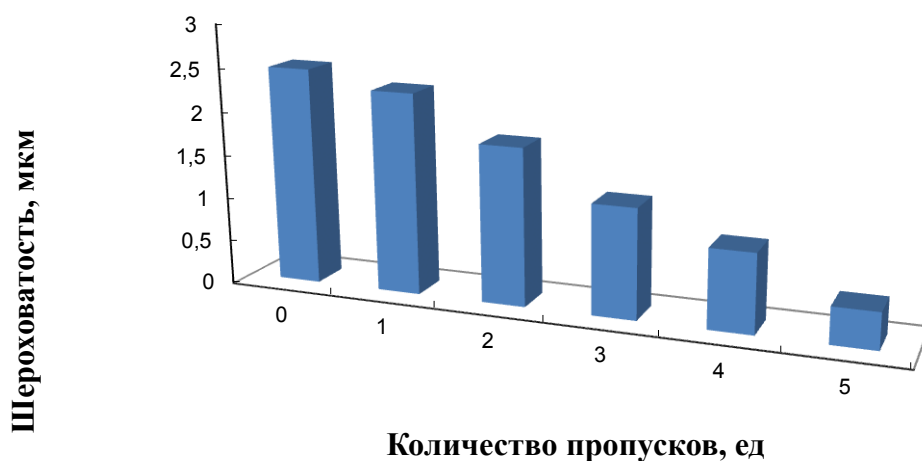


Рисунок 5.4 Изменение шероховатости поверхности при изготовлении длинных оправок

Установлено, что в процессе обкатки происходит уменьшение величины шероховатости с 2,5 до 0,4 мкм.

От изготовленной длинной оправки в исходном состоянии был взят темплет в середине ее длины и произведены замеры твердости от центра к рабочей поверхности по радиусу с шагом 10 мм. Результаты представлены на рисунке 5.5. Максимальная твердость достигает 320 НВ и зафиксирована в поверхностном упрочненном слое оправки, глубина которого составляет 1-1,5 мм. Минимальное значение твердости в сечении достигается в центре и составляет 200 НВ.

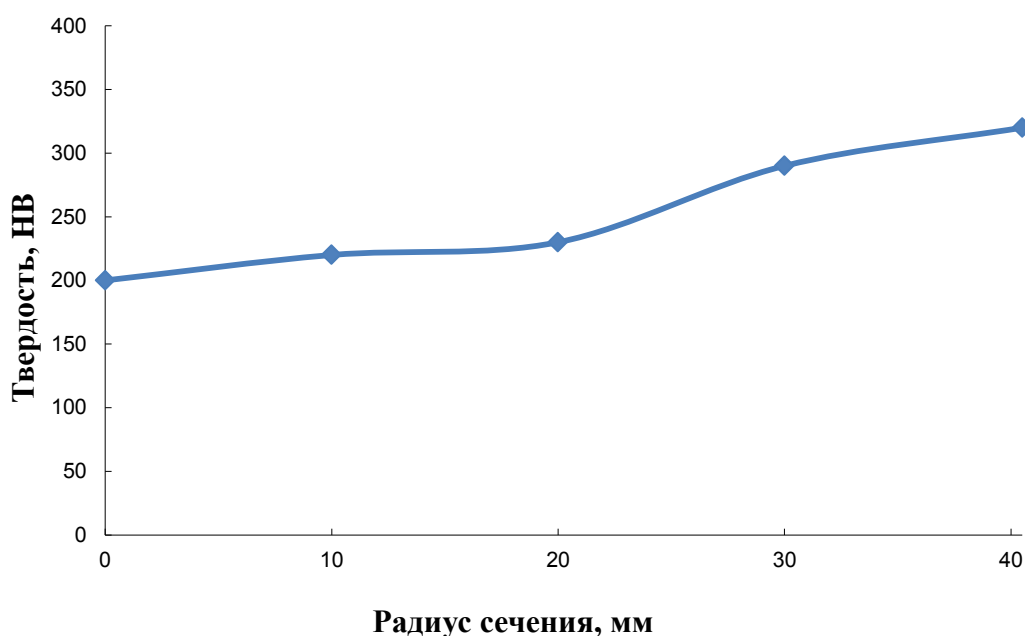
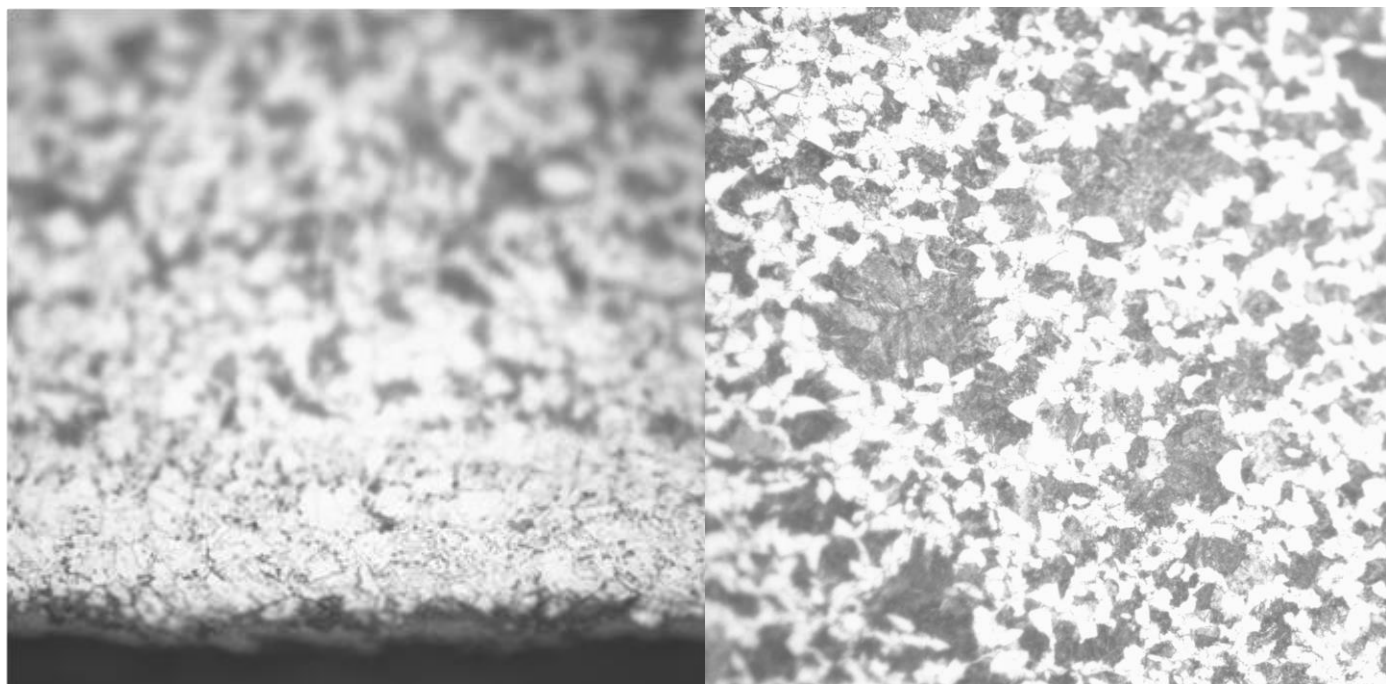


Рисунок 5.5 Твердость в сечении исходной оправки

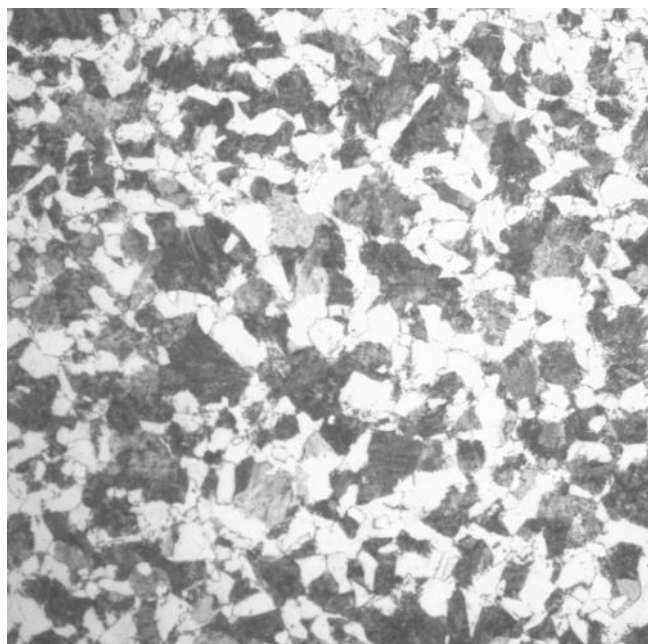
Микроструктура в продольном сечении исходной оправки диаметром 81 мм из стали 35ХН2Ф, изготовленной в условиях ОАО «СинТЗ», представлена на рисунке 5.6 (а-в) в двухсоткратном увеличении. Результаты приведены для поверхностного слоя и в глубину по радиусу на 5, 10 мм. На поверхности наблюдается обезуглероженный слой глубиной не более 0,2 мм

от нагрева в газовой печи. Так же на снимках просматривается уменьшение балла зерна от 9 к 8 металла длинной оправки от поверхности к центру. Феррито-перлитная структура металла наблюдается по всему объему оправки. Микроструктура металла начиная с глубины 10 мм к центру оправки практически не меняется.



а) поверхностный слой

б) глубина 5 мм



в) глубина 10 мм

Рисунок 5.6 Микроструктура исходной оправки (x200)

Для изучения уменьшения диаметра длинных оправок были произведены соответствующие замеры инструмента, а так же шероховатости поверхности после раскатки гильз из углеродистых и легированных сталей. Шероховатость измерялась по длине с шагом 0,5 м портативным измерителем TR200.

При раскатке гильз из стали 20 в количестве 800 штук микрометром "Micromar" с точностью 0,001 мм осуществлялись замеры фактических диаметров оправки в трех сечениях: два метра от наконечника, в середине и на пятнадцатом метре от наконечника. Замер в каждом сечении проводился три раза. Результат брался как среднее арифметическое промежуточных замеров. Уменьшение рабочего диаметра вычислялось как разность между номинальным и фактическим ($\Delta D = D_{\text{ном}} - D_{\text{факт}}$). Полученные результаты, представленные на рисунке 5.7, показали, что кампания длинных оправок до их отбраковки может быть условно разделена на две части: до 280 пропусков, по видимому, происходит незначительная пластическая деформация металла оправки, сопровождающаяся дополнительным упрочнением ее рабочей поверхности при продольной прокатке, затем процесс изнашивания замедляется.

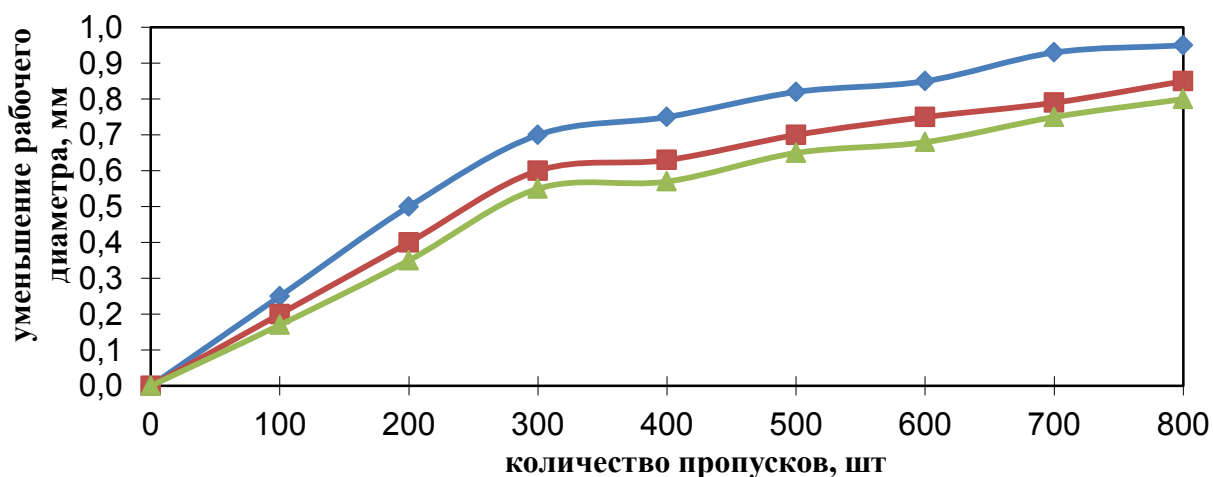


Рисунок 5.7 Уменьшение рабочего диаметра оправки при раскатке углеродистых сталей:

□ – 2 м от наконечника; ◇ – середина оправки; Δ – 15 м от наконечника.

Максимальное уменьшение диаметра наблюдается в области наибольшего разогрева инструмента.

Шероховатость рабочей поверхности в процессе раскатки 800 штук гильз из углеродистой стали 20, представленная на рисунке 5.8, меняется в диапазоне от 0,25 до 4 мкм. После 280 пропусков равномерность распределения шероховатости на рабочей поверхности сопоставима с исходной, что подтверждает гипотезу о не значительной пластической деформации инструмента. В интервале пропусков от 280 до 800 наблюдается увеличение как абсолютного значения, так и неравномерности распределения величины шероховатости на поверхности оправки. Максимальная шероховатость наблюдается в области наибольшего разогрева оправки с 6 по 13 м от наконечника.

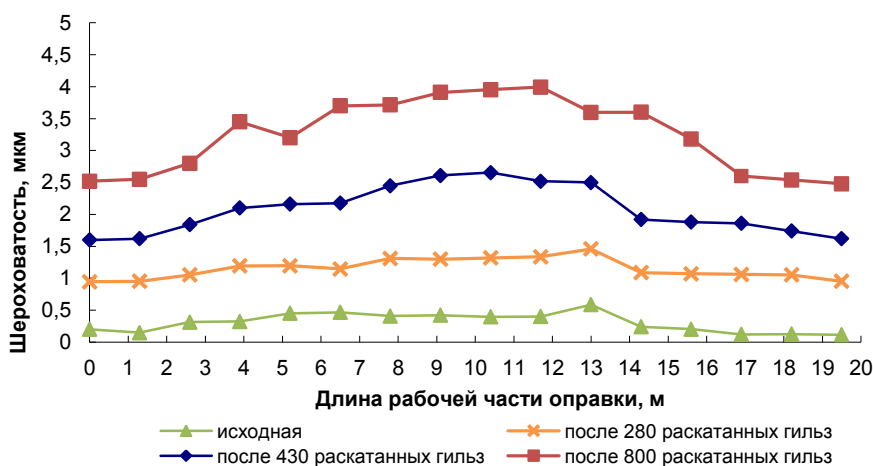


Рисунок 5.8 Изменение шероховатости рабочей поверхности оправки при раскатке углеродистых сталей

На рисунке 5.9 представлены результаты замеров рабочих диаметров оправки при раскатке гильз из стали 32ХГ. Как видно, после 150 раскатанных гильз рабочий диаметр оправки в среднем сечении уменьшился на 1 мм, что является браковочным признаком. Скорость уменьшения данного показателя при раскатке легированной стали 32ХГ существенно выше, чем для стали 20. Результаты замеров шероховатости рабочей поверхности оправки,

представленные на рисунке 5.10, показали существенную неравномерность распределения данного показателя по длине инструмента, что возможно обусловлено изменением характера изнашивания от преимущественно пластической деформации к микрорезанию.

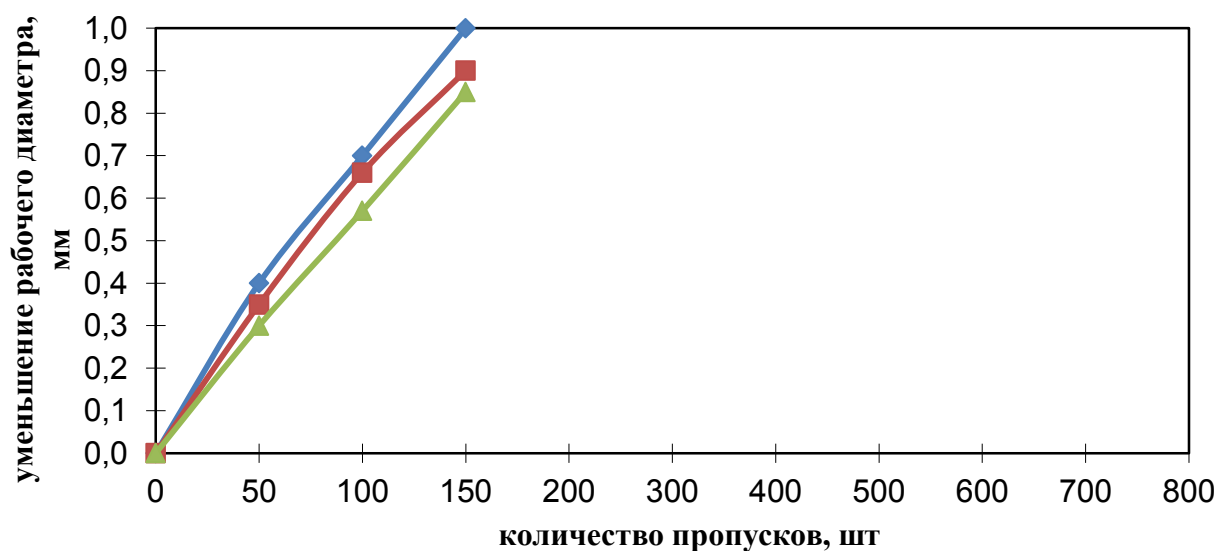


Рисунок 5.9 Уменьшение рабочего диаметра оправки при раскатке легированных сталей:

□ – 2 м от наконечника; ◇ – середина оправки; Δ – 15 м от наконечника.

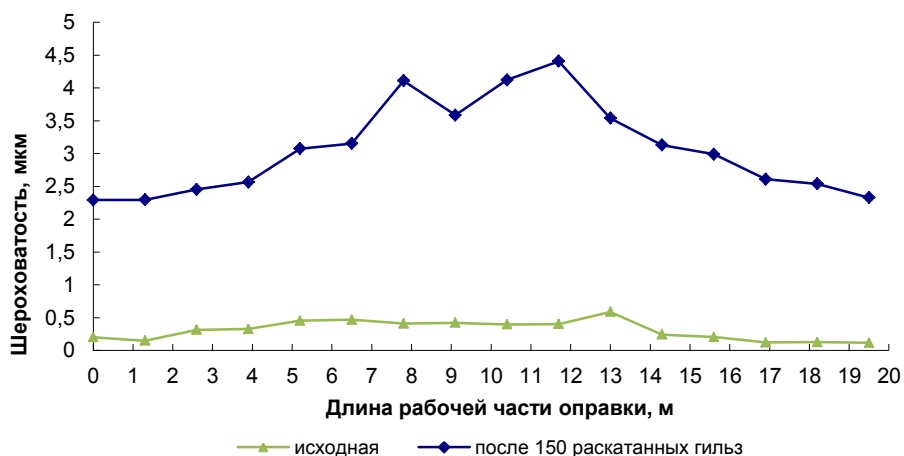


Рисунок 5.10 Изменение шероховатости рабочей поверхности оправки при раскатке легированных сталей

Проведенный анализ процесса уменьшения рабочего диаметра длинной оправки при раскатке гильз из углеродистых сталей позволил установить количество пропусков - 280, после которых интенсивность износа существенно снижается. Выявленное замедление интенсивности износа оправки послужило основанием для проведения опытной комбинированной раскатки 280 гильз из стали 20, с дальнейшей раскаткой 32ХГ до браковочного признака.

На рисунке 5.11 представлены результаты замеров диаметров оправки при комбинированной раскатке гильз из стали 20 в количестве 280 пропусков и 180 штук 32ХГ.

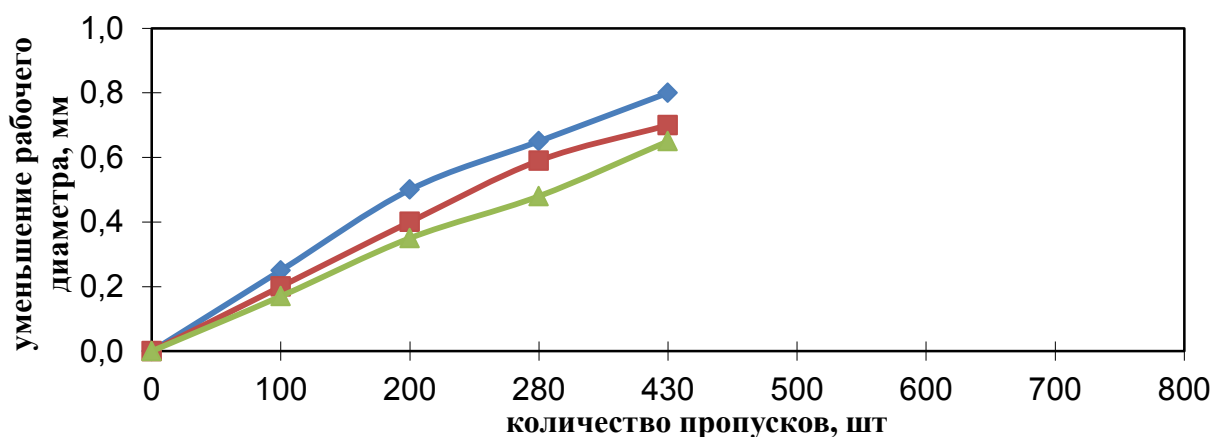


Рисунок 5.11 Уменьшение рабочего диаметра оправки при комбинированной раскатке углеродистых и легированных сталей:

□ – 2 м от наконечника; ◇ – середина оправки; Δ – 15 м от наконечника.

Представленное на рисунке 5.12 изменение шероховатости на рабочей поверхности плавающей оправки при комбинированной раскатке, подтверждает эффективность предложенного режима эксплуатации инструмента. В сравнении со штатным режимом (не комбинированным), дополнительное упрочнение поверхности оправки при предварительной раскатке обеспечило более равномерное распределение и меньшую по абсолютному значению шероховатость инструмента после раскатки 180 штук гильз из стали 32ХГ.

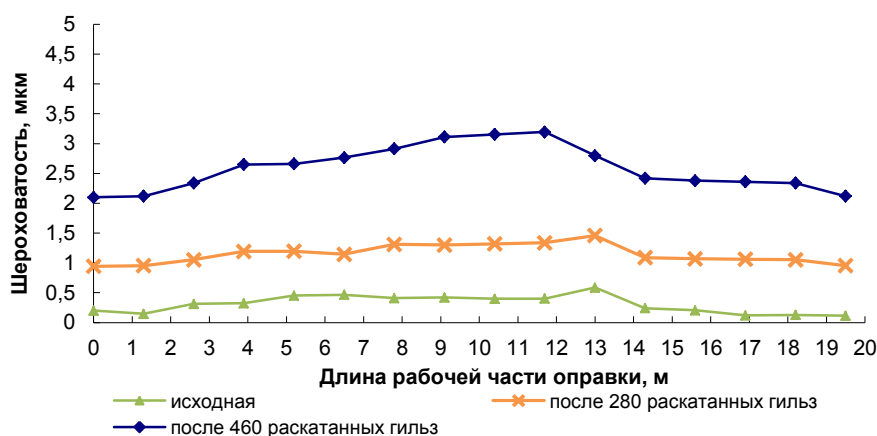


Рисунок 5.12 Изменение шероховатости рабочей поверхности оправки при комбинированной раскатке углеродистых и легированных сталей

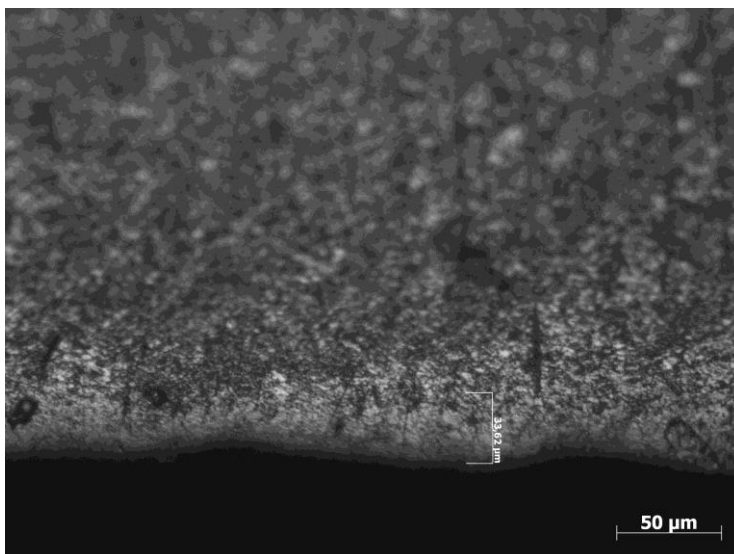
Таким образом с целью разработки рационального режима работы технологического инструмента была проведена прокатка с использованием опытной оправки №1 диаметром 81 мм на которой раскатывались гильзы сначала из углеродистой марки стали 20 в количестве 280 пропусков, затем из легированной марки стали 32ХГ в количестве 180 пропусков, и опытной оправки №2 на которой изначально раскатывались только гильзы из легированной марки стали 32ХГ в количестве 150 пропусков.

В целом, сравнение результатов замеров показало существенно большую шероховатость рабочей поверхности опытной оправки №2 после 150 раскатанных гильз из легированных сталей. В области максимального разогрева разность величин шероховатости для оправок №1 и 2 достигает до 66%. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о меньшем износе и большей стойкости опытной оправки №1.

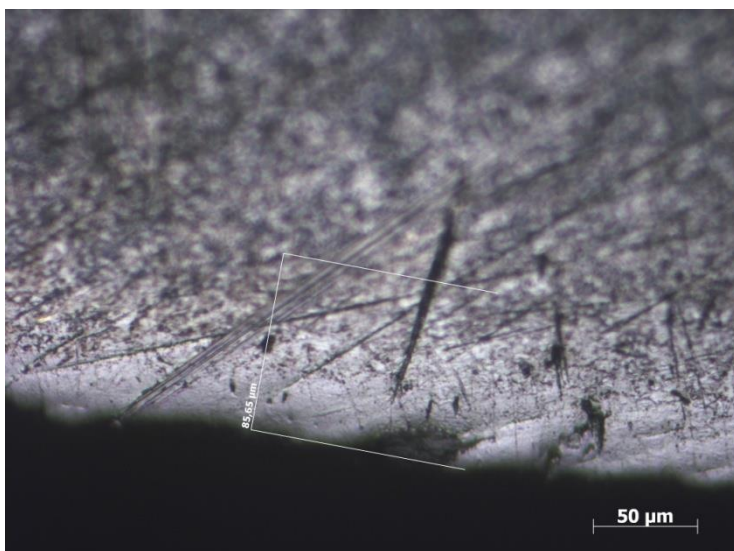
На рисунке 5.13 представлена эволюция микроструктуры металла исходной, а так же опытных оправок №1 и 2 после раскатки в двухсоткратном увеличении. На поверхности изношенных оправок наблюдается обезуглероженный слой, что подтверждается падением твердости рабочей поверхности инструмента.



а) микроструктура металла исходной оправки ст.35ХН2Ф 81 мм, феррит-перлит



б) опытная оправка №1
раскатка:
гильз ст.20 - 280 пропусков;
гильз ст.32ХГ - 180 пропусков
глубина изношенного слоя – 33,62μm



в) опытная оправка №2
раскатка:
гильз ст.32ХГ - 150 пропусков;
глубина изношенного слоя– 85,65μm

Рисунок 5.13 Эволюция микроструктуры металла оправки в процессе экспериментальной раскатки (x200)

Глубина изношенного поверхностного слоя для опытной оправки №1 составила 33,62 μm , что на 61 % меньше, чем для оправки №2 - 85,65 μm . Кроме существенно меньшего износа поверхности опытной оправки №1, при работе в предложенном рациональном режиме, ее микроструктура выглядит более равномерной. Данные факты позволяют сделать вывод о большей стойкости образца №1, что в свою очередь подтверждает эффективность предложенного режима раскатки и пропорции числа предварительно раскатанных гильз из углеродистых сталей к легированным.

По окончании промышленного эксперимента осуществлялись замеры твердости рабочей поверхности опытных оправок №1 и 2 по длине с шагом 0,5 м. Фактическое распределение твердости по длине рабочей поверхности длинной оправки 81 мм из стали 35ХН2Ф представлено на рисунке 5.14.

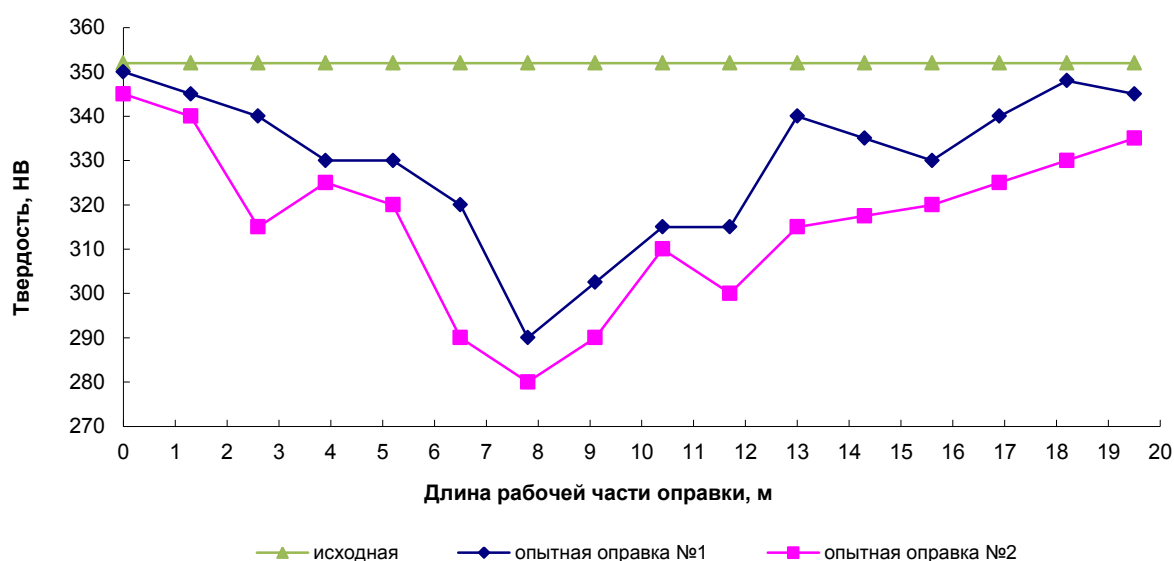


Рисунок 5.14 Изменение твердости рабочей поверхности по длине оправки

Анализ результатов замеров показал, что исходная твердость рабочей поверхности снижается до 290 НВ для опытной оправки №1 и до 280 НВ для опытной оправки №2, на участках, находящихся на расстоянии с 6 по 9 м от

наконечника оправки, что полностью совпадает с результатами расчета температурного поля в части наиболее разогретых участков.

Таким образом, экспериментально выявлено уменьшение износа длинной оправки при раскатке труб из легированных марок сталей после предварительной эксплуатации инструмента на гильзах из углеродистых. Определено рациональное количество пропусков при предварительной раскатке гильз из углеродистых марок сталей – 280, рациональное соотношение числа пропусков при предварительной раскатке и числа пропусков при раскатке гильз из 32ХГ - 60/40 % ($\pm 5\%$).

Анализ результатов исследования уменьшения диаметра оправки и ее шероховатости косвенно подтверждает гипотезу о дополнительном упрочнении рабочей поверхности инструмента в процессе раскатки гильз из углеродистых сталей.

Повышение износостойкости можно объяснить характером действия сил трения и направлением течения металла на рабочей поверхности оправки. При изготовлении инструмента способом обкатки силы трения действуют по винтовой линии, а значит течение металла на поверхности оправки происходит по соответствующей траектории. Можно предположить, что в процессе раскатки происходит пластическая деформация инструмента в осевом направлении.

Таким образом, при предварительной раскатке углеродистых сталей сначала преобладает незначительная пластическая деформация инструмента, следствием которой является дополнительное упрочнение поверхности оправки. При дальнейшей раскатке легированных сталей, по видимому, преобладает абразивное изнашивание микрорезанием, о чем косвенно свидетельствует увеличение шероховатости.

5.2 Исследование особенностей теплового и термонапряженного состояния длинных оправок с наплавленным слоем

Одним из эффективных способов восстановления длинных оправок является наплавка областей повышенного износа. Степень сопротивления износу и разогрев в процессе эксплуатации восстановленных оправок зависят от материала наплавки, его теплопроводящих свойств и толщины слоя.

С целью продления срока службы технологического инструмента широко применяется наплавка областей повышенного износа высокопрочными сплавами. Учитывая выявленный характер распределения температуры по длине и объёму, рекомендовано производить наплавку в области максимального разогрева оправки. Был рассмотрен вариант оправки диаметром 81 мм с износостойким покрытием толщиной 2 мм. Для определения температурного поля наплавленной оправки произведены соответствующие расчеты.

В качестве наплавочного материала хорошо зарекомендовал себя сплав ЭП-567, химический состав которого приведен в таблице 5.3.

Таблица 5.3. Химический состав проволоки ЭП-567

Марка стали	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W	Fe
ЭП-567 (ХН65МВ)	0,03	0,15	1,0	0,02	0,02	14,5-16,5	основа	15-17	3,0-4,5	< 1,0

Расчеты проводились для контрольных точек на внешней поверхности (рисунок 3.1) и под наплавленным слоем (в средней точке периметра). Тепловое и термонапряженное состояние оправок рассчитывалось со следующими значениями физико-механических свойств жаростойкого сплава на никелевой основе ЭП-567 (ХН65МВ): модуль упругости – 170 ГПа; модуль сдвига – 68 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,25; коэффициент

линейного расширения – $1,1 \cdot 10^{-5}$ 1/К; коэффициент теплопроводности – 25 Вт/(мК); удельная теплоемкость – 510 Дж/(кгК); плотность – 7200 кг/м³.

Расчетные температуры рабочей поверхности наплавленной и штатной оправок представлены на рисунке 5.15. Разность температур на рабочей поверхности длинной оправки 81 мм с наплавкой и без нее составляет 5–15 °С.

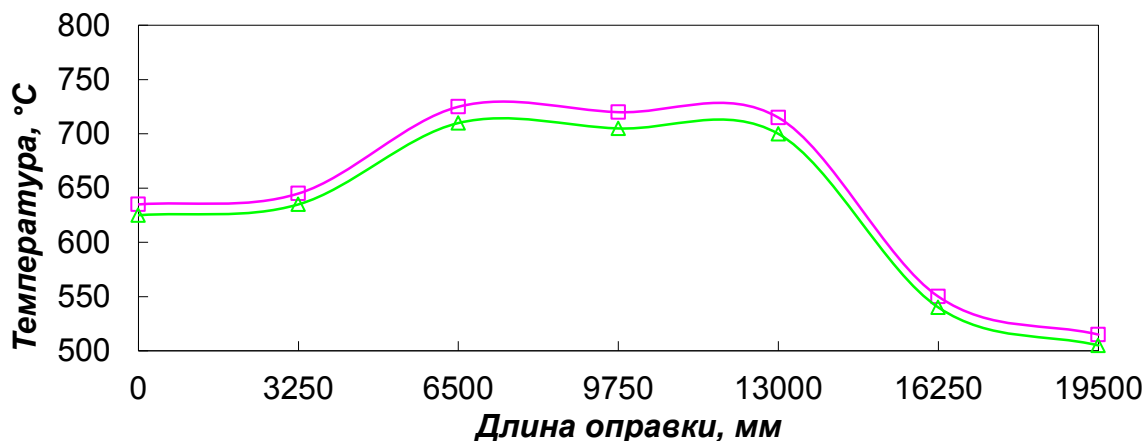


Рисунок 5.15 Расчетная температура рабочей поверхности оправки в средней точке периметра после раскатки:

□ – с наплавкой; Δ – без наплавки.

Анализ результатов расчета показал, что характер распределения температуры по длине наплавленной оправки аналогичен цельной оправке. В то же время величина температуры на наплавляемых участках длинной оправки выше. Это объясняется тем, что коэффициент теплопроводности материала наплавки на 10 % меньше основной стали 35ХН2Ф.

Расчетные температуры в среднем поперечном сечении наплавленной и штатной оправок представлены на рисунке 5.16. Разность температур в месте соединения наплавки толщиной 2 мм с основным металлом 35ХН2Ф для цельной и наплавленной оправок составляет 25 °С.

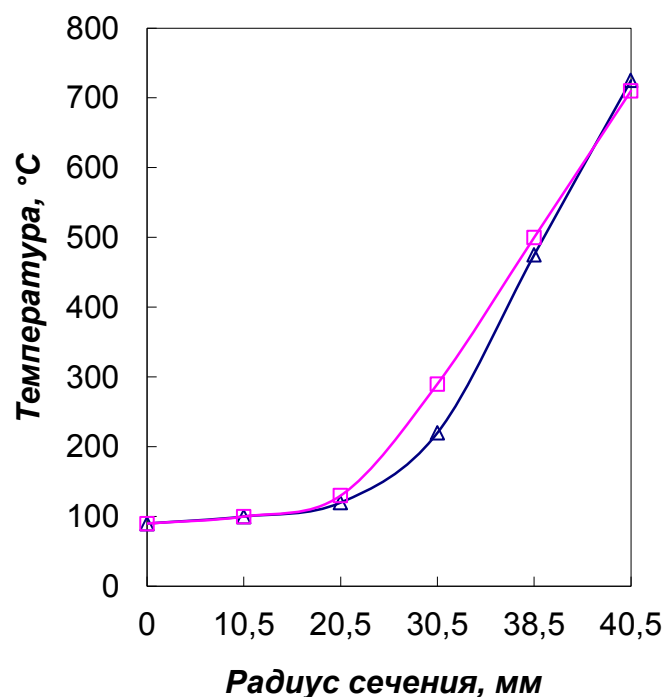


Рисунок 5.16 Расчетная температура в среднем сечении оправки после раскатки:

□ – без наплавки; Δ – с наплавкой.

При соединении металлов с различными физическими свойствами, работающих совместно при повышенных температурах, необходимо учитывать уровень напряжений возникающих на границе их соединения, ввиду повышения вероятности ее разрушения. Особое внимание было уделено области соединения наплавленного слоя ЭП-567 с основным металлом 35ХН2Ф, что обусловлено её пониженными прочностными свойствами. Разность температур по сечению между точками на рабочей поверхности оправки и соответствующей ей на границе наплавленного слоя для толщины наплавки 2 мм составляет около 200 °С. Основной задачей исследования напряженного состояния являлась оценка уровня температурных напряжений для прогнозирования возможного отслоения или разрушения наплавленного слоя. При решении физико-механические свойства материала принимались постоянными.

Термонапряженное состояние длинной оправки по окончании раскатки с толщиной наплавки 1,5 мм представлено на рисунке 5.17.

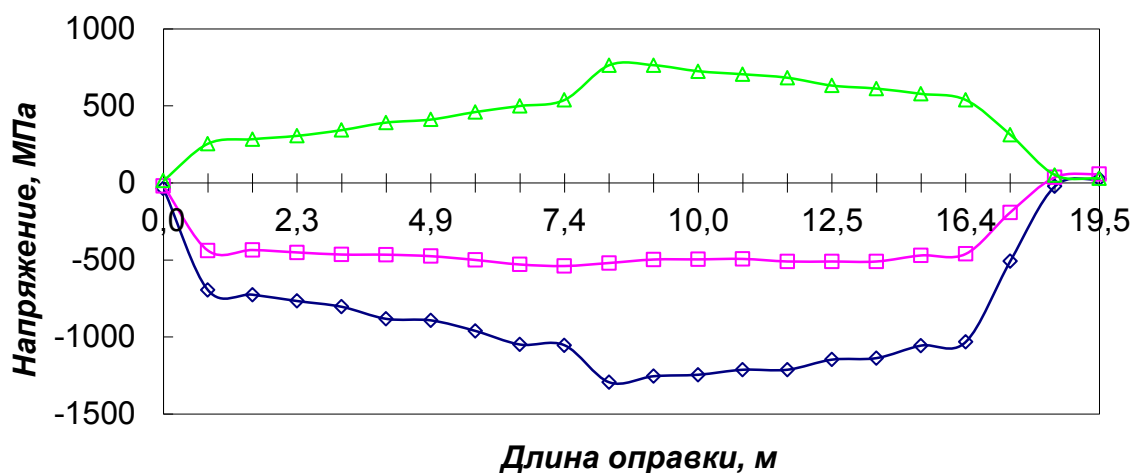


Рисунок 5.17 Изменение интенсивности σ_i и главных σ_1 , σ_3 напряжений по длине рабочей части оправки с наплавкой 1,5 мм:

- — главное напряжение σ_1 ;
- ◇ — главное напряжение σ_3 ;
- Δ — интенсивность σ_i .

Термонапряженное состояние длинной оправки по окончании раскатки с толщиной наплавки 2 мм представлено на рисунке 5.18. Результаты расчетов показали, что толщина наплавки оказывает влияние на напряженное состояние оправок. С ее увеличением от 1,5 до 2 мм интенсивность напряжений на рабочих поверхностях снижается.

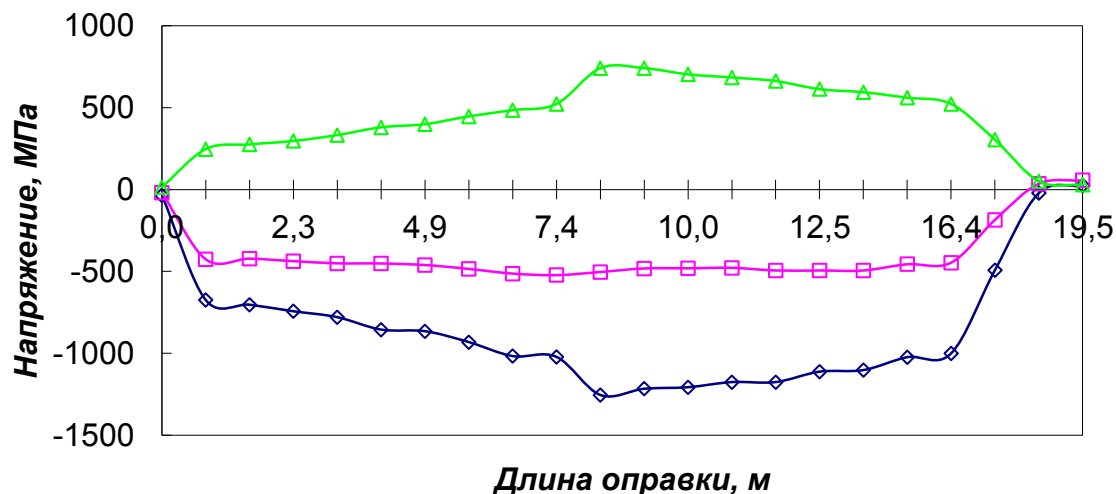


Рисунок 5.18 Изменение интенсивности σ_i и главных σ_1, σ_3 напряжений по длине рабочей части оправки с наплавкой 2 мм:

- – главное напряжение σ_1 ;
- ◇ – главное напряжение σ_3 ;
- Δ – интенсивность σ_i .

Изменения интенсивностей напряжений на границе наплавки и основного металла для случаев толщин слоя 1,5 и 2 мм представлены на рисунке 5.19. При сравнении интенсивностей напряжений на границе соединения, отмечается снижение максимального значения σ_i на 30 МПа для наплавки с толщиной 2 мм. Это обусловлено замедлением теплообмена, связанным с появлением слоя материала имеющего более низкие, чем сталь 35ХН2Ф теплопроводящие свойства и большую теплоемкостью. При этом температурное поле в поверхностных слоях оправки становится более равномерным.

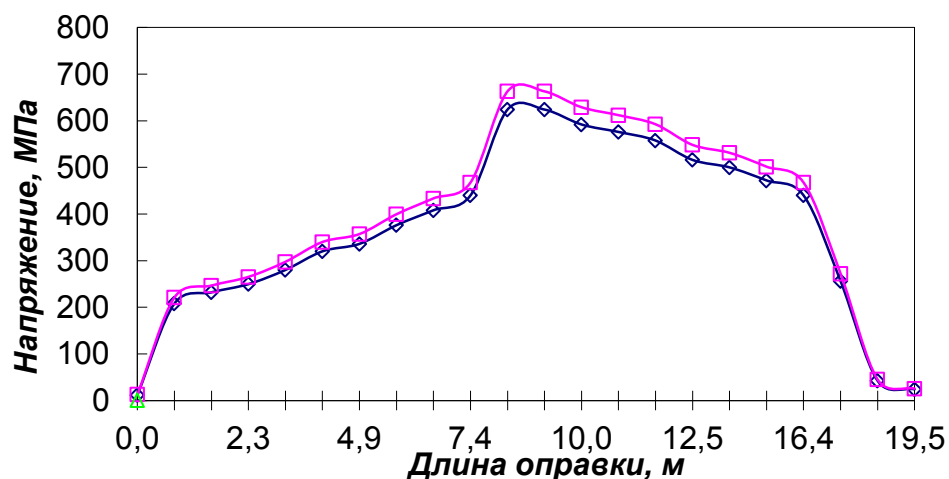


Рисунок 5.19 Изменение интенсивности σ_i напряжений на границе наплавки и основного металла:

- – наплавка 1,5 мм;
- ◇ – наплавка 2 мм.

Таким образом, при восстановлении изношенных длинных оправок наплавкой сплава ЭП-567 толщиной 2 мм, выявлено замедление теплообмена, связанное с появлением слоя материала имеющего более низкие, чем сталь оправки теплопроводящие свойства и большую теплоемкостью. При этом температурное поле в поверхностных слоях оправки становится более равномерным, что положительно скажется на ее сопротивлении износу и стойкости в целом.

При восстановлении изношенных длинных оправок наплавкой, установлено, что увеличение толщины наплавленного слоя с 1,5 до 2 мм оказывает существенное влияние на напряжения рабочей поверхности и границы соединения материалов. Вероятность растрескивания и отслаивания наплавки толщиной 2 мм меньше, так как значение интенсивности напряжений слоя 1,5 мм приближается к временному сопротивлению соединения. При этом увеличение толщины дает положительный эффект, так

как температура увеличивается незначительно, а уровень напряжений существенно снижается.

Стоит отметить, что рекомендации по наплавке областей повышенного износа длинных оправок в первую очередь даны для контролируемо-перемещаемых оправок, стоимость которых в себестоимости готовых труб доходит до 20 %. Кроме того, производственный опыт наплавки рабочей поверхности оправок показал свою эффективность только для диаметров от 150 мм, так как на малых размерах инструмента при его циклической эксплуатации возникает недопустимая кривизна по длине.

5.3 Разработка рекомендаций по повышению износостойкости длинных оправок и предложений для снижения производственных издержек

Проведенный сравнительный анализ деформационных, энергосиловых и кинематических параметров процесса раскатки гильз в непрерывных станах с двух и трехвалковыми клетями на плавающей и контролируемо-перемещаемой оправках, выявленные особенности теплового и термонапряженного состояния инструмента в цикле работы, а так же результаты исследования уменьшения его диаметра, позволяют сформулировать следующие рекомендации:

1) Обеспечивать условия раскатки при которых температура рабочей поверхности и интенсивность напряжений не превысят 710 °С и 890 МПа для плавающей оправки, и 805 °С и 1024 МПа для контролируемо-перемещаемой. Минимальная температура рабочей поверхности не должна быть ниже 100°С, а амплитуда колебаний интенсивности напряжений в цикле работы превысить 640 МПа для плавающей и 760 МПа для контролируемо-перемещаемой оправок. Выполнение данных условий предотвратит появление дефекта сетки разгара.

2) Эксплуатировать длинные оправки, изготовленные с использованием способа обкатки в стане поперечно-винтовой прокатки, в комбинированном режиме раскатки гильз из углеродистых не менее 280 пропусков и легированных сталей. Рациональное соотношение числа пропусков при предварительной раскатке и числа гильз из легированных сталей составляет примерно 60/40 % ($\pm 5\%$). Предложенный режим эксплуатации инструмента позволит увеличить количество раскатанных гильз из легированных марок сталей до уменьшения диаметра оправки на величину браковочного признака.

Полученные результаты исследования, анализ научно-технической литературы и производственный опыт позволяют сделать общие технико-экономические предложения для снижения производственных издержек:

- продолжить работу по подбору материалов для изготовления длинных оправок, с учетом выявленного интервала температур эксплуатации инструмента;

- рассмотреть возможность изготовления контролируемо-перемещаемых оправок способом обкатки для уменьшения затрат на инструмент при обеспечении качества бесшовных труб;

- исследовать целесообразность совершенствования технологии изготовления оправок на основе комбинации винтовой и продольной прокаток;

- для снижения затрат на инструмент и уменьшения себестоимости готовых труб рассмотреть экономическую целесообразность изготовления составных и оправок с наплавкой областей повышенного износа. Определить диапазон диаметров контролируемо-перемещаемых оправок для которых целесообразно проводить наплавку областей повышенного износа, исключив при этом кривизну по длине инструмента в цикле раскатки;

Увеличение доли производства труб из легированных марок сталей подтверждает актуальность данных рекомендаций и предложений. Решение

соответствующих задач позволит существенно сократить производственные издержки и обеспечить высокое качество и конкурентоспособность производимых в РФ бесшовных труб.

Основные результаты и выводы

1. Проведен сравнительный анализ деформационных, энергосиловых и кинематических параметров раскатки на плавающей и контролируемо-перемещаемой оправках в непрерывных станах с двух и трехвалковыми клетями. Большие величины сил трения при раскатке на контролируемо-перемещаемой оправке в сравнении с плавающей, обеспечивают благоприятное напряженное состояние деформируемого металла, и позволяют прокатывать не только углеродистые, но и легированные марки стали. Раскатка гильз в трехвалковых клетях характеризуется более равномерной деформацией и тесным охватом длинной оправки в сравнении с двухвалковыми.

2. Разработана новая методика определения температурного поля длинных оправок. С использованием метода конечных разностей произведен расчет температурных полей и определены основные закономерности влияния технологических факторов раскатки на уровень температур в объеме плавающей и контролируемо-перемещаемой оправок. Установлена существенная неоднородность распределения температуры по длине и сечению оправки в цикле раскатки и охлаждения. Уровень нагрева рабочей поверхности оправки для случая контролируемого перемещения и трехвалковой схемы достигает 805 °С и превышает соответствующую ей температуру 710 °С для плавающего режима с раскаткой в двухвалковых клетях, что связано с работой сил трения в следствие удержания инструмента. На основании промышленных экспериментов установлена сходимость полученных результатов.

3. На основе результатов расчета температурного поля произведена оценка термонапряженного состояния плавающей и контролируемо-перемещаемой оправок. Установлены закономерности влияния технологических факторов раскатки на термонапряженное

состояние длинной оправки. Интенсивность напряжений на рабочей поверхности оправки для случая контролируемого перемещения и трехвалковой схемы достигает 1024 МПа и превышает соответствующую ей интенсивность 890 МПа для плавающего режима с раскаткой в двухвалковых клетях. Охлаждение плавающей оправки в ванне с водой и смена знака возникающих при этом термических напряжений увеличивают вероятность образования сетки разгара. Установлены диапазоны температур и интенсивности напряжений на рабочей поверхности оправки равные 100-805 °С, 264-1024 МПа для контролируемо-перемещаемой и 100-710 °С, 250-890 МПа для плавающей, обеспечение которых при эксплуатации инструмента позволит предупредить появление сетки разгара.

4. Проведено промышленное исследование уменьшения диаметра длинных оправок. Экспериментально определено количество пропусков при раскатке углеродистых сталей – 280, после которых происходит существенное замедление интенсивности уменьшения диаметра оправки. Разработан рациональный комбинированный режим работы длинных оправок, позволяющий увеличить количество раскатанных гильз из легированных сталей после предварительной эксплуатации инструмента на углеродистых. Рациональное соотношение числа пропусков при предварительной раскатке и числа пропусков при раскатке гильз из легированных марок сталей - 60/40 % ($\pm 5\%$). В процессе предварительной раскатки углеродистых сталей происходит незначительная пластическая деформация инструмента, сопровождающаяся упрочнением рабочей поверхности, а при дальнейшей деформации легированных преобладает абразивное изнашивание.

5. Установлены особенности теплового и термонапряженного состояния длинных оправок с наплавкой рабочей поверхности. Характер распределения температуры по длине наплавленной оправки аналогичен цельной, а температура на соответствующих участках длинной оправки выше

на 5-15 °С. Увеличение толщины наплавленного слоя с 1,5 до 2 мм приводит к снижению максимального значения интенсивности напряжений на 30 МПа.

Список использованной литературы

- 1 Данилов Ф.А., Глейберг А.З., Балакин В.Г. Горячая прокатка и прессование труб. – М.: Металлургия. 1972, 576 с.
- 2 Трубное производство: Учебник для ВУЗов / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: МИСиС, 2011, 970 с.
- 3 Чикалов С.Г. Производство бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки. – Волгоград: Комитет по печати и информации, 1999, 416 с.
- 4 Данченко В.Н., Чус А.В. Продольная прокатка труб. – М.: Металлургия, 1984, 136 с.
- 5 Анализ и пути совершенствования процессов горячей раскатки труб. / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, В.К. Михайлов, Е.С. Бабина // Сталь.– 2002.– № 12.– С. 44-47.
- 6 Технология RQF для производства стальных бесшовных труб / Н. Теллен, П. Ринальди, Д. Миланезе и др. // Черные металлы.– 2005.– № 4.– С. 47-52.
- 7 Современная технология для производства бесшовных труб на заводе в Тяньцзине. / Н. Теллен, П. Ринальди, Д. Миланезе и др. // Металлургическое производство и оборудование.– 2005.– № 1.– С. 40-50.
- 8 Садыков В.В., Чикалов С.Г. Развитие российского рынка труб и металлургического машиностроения // Сталь.– 2007.– № 11.– С. 121-124.
- 9 Новый цех по производству бесшовных труб в Казстане / С. Деplано, Л. Бираджи, О. Мышкин и др. // Металлургическое производство и технология.– 2005.– № 2.– С. 24-32.
- 10 Jan Kazanecki. Wytwarzanie rur bez szwu. Kraków: Wydawnictwa AGH, 2003, 622 с.
- 11 Совершенствование методики расчета геометрических параметров очага деформации при прокатке бесшовных труб в непрерывных станах с

трехвалковыми клетями / А.А. Терещенко, Н.И. Фартушный, А.В. Гончарук и др. // Производство проката.– 2007.– № 9.– С. 20-23.

12 Чекмарев А.П., Ваткин Я.Л. Основы прокатки труб в круглых калибрах. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1962, 222 с.

13 Матвеев Ю.М., Ваткин Я.Л. Калибровка инструмента трубных станов. – М.: Металлургия, 1970, 480 с.

14 Чекмарев И.А. Разработка научных основ и рациональной технологии непрерывной прокатки труб. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва, 1978, 44 с.

15 Чекмарев И.А. Исследование непрерывной прокатки труб на длинной оправке. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Днепропетровск, 1960, 22 с.

16 Современное состояние и перспективные производства труб на установках с непрерывными оправочными станами / А.А. Шевченко, Я.Л. Ваткин, Г.И. Гуляев и др. // Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами. Материалы научно-технической конференции 1967 года.– Д.: ВНИТИ, 1968.– С. 8-21.

17 Прокатка труб на непрерывных станах с регулируемой скоростью оправки / А.П. Чекмарев, Я.Л. Ваткин, В.Н. Данченко и др. // Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами. Материалы научно-технической конференции 1967 года. – Д.: ВНИТИ, 1968.– С. 27-33.

18 Опыт калибровки валков непрерывных станов / А.А. Шевченко, Я.Л. Ваткин, А.П. Савкин и др. // Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами. Материалы научно-технической конференции 1967 года. – Д.: ВНИТИ, 1968. – С. 78-83.

19 Гульянов Ю.Н., Нодев О.Э., Столетний М.Ф. Рациональная деформация металла в непрерывном стане / Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами. Материалы научно-технической конференции 1967 года.– Д.: ВНИТИ, 1968.– С. 83-88.

20 Ваткин Я.Л., Данченко В.Н. Об оптимальном диаметре валков непрерывных станов / Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами. Материалы научно-технической конференции 1967 года.– Д.: ВНИТИ, 1968.– С. 106-110.

21 К вопросу о выборе оптимального диаметра валков непрерывного трубопрокатного стана / Г.Н. Павлушкин, П.И. Тетельбаум, Ф.И. Орлов и др. // Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами. Материалы научно-технической конференции 1967 года.– Д.: ВНИТИ, 1968. – С. 111-114.

22 Данченко В.Н. Развитие теории процессов непрерывной прокатки труб // Развитие теории процессов производства труб.– Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – С. 94-133.

23 Блинов Ю.И. Продольная прокатка труб в многовалковых калибрах. – Челябинск: Металл, 1992, 240 с.

24 Шевченко А.А., Кириченко А.Н. Возможности увеличения производительности непрерывных оправочных станов путем изменения параметров прокатки и перераспределения их по клетям// Производство бесшовных труб.– М.: Металлургия, 1975, № 2.– С. 35-41.

25 Лавров П.П. Определение основных параметров при прокатке труб в непрерывном стане на длинной оправке. // Труды ВНИИМЕТМАШ.– М., 1963, № 8.–С. 193-212.

26 А.С. Никитин, Н.С. Копытин, Г.Н. Павлушкин и др. Математическое моделирование переходных процессов в непрерывном оправочном стане. //

Теория прокатки. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции. Теоретические проблемы прокатного производства.— М., Metallurgy, 1975.— С. 443-446.

27 Чекмарев И.А. Некоторые вопросы теории прокатки труб на длинной оправке в непрерывном стане // Теория прокатки. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции. Теоретические проблемы прокатного производства.— М., Metallurgy, 1975. — С. 348-352.

28 Особенности деформации труб при непрерывной прокатке на длинной оправке / Г.И. Гуляев, И.П. Савкин, И.А. Чекмарев и др. // Производство труб: Сб.— М.: Metallurgy, 1971, № 26.— С. 31-36.

29 Исследование деформации трубы при прокатке в круглом калибре на длинной оправке / Я.Л. Ваткин, А.А. Шевченко, Г.И. Гуляев и др. // Обработка металлов давлением. Научные труды ДМЕТИ.— М.: Metallurgy, 1967, № 53.— С. 169-177.

30 Онищенко И.И., Куценко П.И., Куценко А.И. Теория непрерывной прокатки. — Запорожье: ЗГИА, 1998, 470 с.

31 Онищенко И.И. Взаимодействие трубы и оправки при непрерывной прокатке // Известия ВУЗов.— 1981.— № 3.— С. 97-102.

32 Технология непрерывной безоправочной прокатки труб. / Г.И. Гуляев, П.Н. Ившин, И.Н. Ерохин и др. — М.: Metallurgy, 1975, 264 с.

33 Вавилкин Н.М., Сербин В.А. Особенности кинематических параметров раскатки на непрерывном стане // Изв. вузов. Черная металлургия.— 2006.— № 7.— С. 33-35.

34 Вавилкин Н.М., Бухмиров В.В., Ширяев В.К., Уткин Ю.Н., Сербин В.А. К оценке теплового состояния длинных оправок непрерывного стана // Изв. вузов. Черная металлургия.— 2006.— № 5.— С. 20-23.

35 Совершенствование математической модели расчета энергосиловых параметров ТПА 159-426. / Ю.Н.Уткин, М.В. Буняшин, И.И. Лубе и др. — Сталь, 2007, № 4, С. 57-60.

36 Ершов Ю.Л., Тартаковский Б.И. PQF/MPM – особенности проектирования непрерывного оправочного стана. // Теория и практика металлургии. – № 5-6. – 2009.– С. 3-14.

37 Цикл докладов фирмы Маннесманн Демаг Меер для симпозиума по изготовлению и окончательной обработке бесшовных труб. Т.1: Новые технологии изготовления труб фирмы Маннесманн Меер. – М. 1981, 62 с.

38 Повышение качества трубной заготовки за рубежом / Ю.А. Дубровская, А.Е. Сочнев, Л.Н. Скоробогатская и др. // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». Вып. 5.– М., 1981. – С. 23-45.

39 Непрерывнолитые круглые заготовки / В.Я. Генкин, А.Т. Есаулов, М.И. Староселецкий и др.– М.: Металлургия, 1984, 143 с.

40 Повышение качества трубной заготовки для горячедеформированных бесшовных труб / Г.Г. Шепель, П.П. Навныко, О.А. Симоненко и др. // Сталь.– 2002.– № 8.– С. 84-85.

41 Минаев А.А., Захур М., Коновалов Ю.В. Специфика использования катаной и непрерывнолитой заготовки для производства труб // Производство проката.– 2005.– № 4.– С. 29-37.

42 Мирсалимов В.М., Емельянов В.А. Напряженное состояние и качество непрерывного слитка. – М.: Металлургия, 1990, 151 с.

43 Корн Р. Заготовки для производства бесшовных труб // Производство труб.– М.: Металлургия, 1980.– С. 95-103.

44 Непрерывнолитые трубные заготовки из легированной стали / П.Н. Ткачев, Ю.Е. Кан, Е.П. Мавтевоян и др. // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». Вып. 16.– М., 1987.– С. 49-51.

45 Опыт использования непрерывнолитой заготовки из углеродистой стали при производстве бесшовных труб. / К.Л. Марченко, В.Ю. Кузнецов, М.М. Фадеев и др. // Сталь.– 2003.– № 8.– С. 53-54.

46 М.И. Гольдштейн и др. Специальные стали. – М.: Металлургия, 1985. – 408с.

- 47 Шевакин Ю.Ф., Глейберг А.З. Производство труб. – М.: Металлургия. 1968г., 440 с.
- 48 Лубе И.И. Исследование и совершенствование технологии горячей прокатки труб из непрерывнолитой заготовки на агрегатах с непрерывным станом. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, 2010, 21 с.
- 49 Пфайфер Г. Косовалковые и непрерывные трубопрокатные станы // Производство труб.– М.: Металлургия, 1980.– С. 39-50.
- 50 Технология производства труб. / И.Н. Потапов, А.П. Коликов, В.Н. Данченко и др. – М.: Металлургия, 1994, 528 с.
- 51 Ходерны Б., Корек З. Стальные трубы. Технология производства и применение: Пер. с польск. М.: Металлургия, 1979. 277 с.
- 52 Яловой Н.И., Тылкин М.А., Полухин П.И., Васильев Д.И. Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением. – М.: Высшая школа, 1973.- 631 с.
- 53 Гольдфарб Э.М. Теплотехника металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1967г.
- 54 Жуковский В.С. Основы теории теплопередачи. – Энергия, 1969г.
- 55 Ключников А.Д., Иванцов Г.П. Теплопередача излучением в огнетехнических установках. – Энергия, 1970г.
- 56 Якоб М. Вопросы теплопередачи. – ИЛ, 1960г.
- 57 Михеев М.А. Основы теплопередачи. – Госэнергоиздат, 1966г.
- 58 Тайц Н.Ю. и др. Изв. вузов. Черная металлургия.– 1964.– № 7.
- 59 Иванцов Г.П. Журнал технической физики, 1937, т. III, вып.10.
- 60 Няшин Ю.И. и др. Система уравнений неизотермической прокатки. – Сб. трудов УПИ. Прокатное производство. Свердловск, 1968г.
- 61 Г. И. Марчук. "Методы вычислительной математики." – М., "Наука", 1988. – 608 с.

- 62 Ю. Б. Радвогин. "Экономичные алгоритмы численного решения многомерного уравнения теплопроводности." – ДАН, 2003, т. 388, №3, 295 – 297.
- 63 Приклонский В.И. Численные методы. – МГУ.: Физфак, 1999.-146с.
- 64 Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978.-512 с.
- 65 Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Наука, 1987г.
- 66 Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
- 67 Федоренко Р.П. Введение в вычислительную физику. – М.: изд.-во МФТИ, 1994. - 528 с.
- 68 Условия работы перемещаемых с заданной скоростью раскатных оправок непрерывных трубопрокатных станов. / Б.А. Романцев, Е.Н. Панюшкин, С.В. Кондратьев, Н.Е. Панюшкин, А.В. Гончарук // Производство проката.– 2014.– № 3.– С. 19-22.
- 69 Вавилкин Н.М., Бухмиров В.В. Прошивная оправка. М.: МИСИС, 2000. –128с.
- 70 Тавадзе Ф.Н. Металлография железа. т.1, – М.: Металлургия, 1972г.
- 71 Медведев М.И., Лоскутов П.А., Ратнер А.Г. Бесшовные трубы (Некоторые особенности прессования и непрерывной прокатки). – М.: Металлургия, 1980.- 156 с.
- 72 Павлов И.М. Определение работы по теоретическим формулам // Металлург, 1932. -№ 8. – с. 12-16.
- 73 Стукач Л.Г. Сталь, 1955.-№7.-с.626-629.
- 74 Андреюк Л.В., Тюленев Г.Г. Сталь, 1972.-№9.-С.825-828.
- 75 Тюленев Г.Г., Борисов Ю.А., Кокорина Р.П., Антипов В.Ф. Бюллетень института Черметинформация, 1975.-№15.-С.39.
- 76 Андреюк Л.В., Тюленев Г.Г., Прицкер Б.С. Сталь, 1972.-№6.-С.522-523.

77 Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплоотдача: Учебник для вузов. - М.:Энергоиздат, 1981. - 416 с.

78 Матвеев Ю.М., Выдрин В.Н., Финкельштейн Я.С. и др. Условия работы и стойкость оправок непрерывного стана трубопрокатного агрегата 30-102. // "Сталь", 1965, №10, с.930-934.

79 Данченко В.Н., Чекмарев И.А., Гринев А.Ф. и др. Износ валков и оправок непрерывного трубопрокатного стана. В сб. "Металлургия и коксохимия", республиканский межведомственный научно-технический сборник. №41. Обработка металлов давлением. Издательство "Техника", Киев, 1974, с. 71-75.

80 Носко В.С., Черненко Э.Н., Панюшкина И.Н., Шевченко М.П. Исследование влияния некоторых факторов на стойкость длинных оправок. Республиканский межведомственный научно-технический сборник "Металлургия и коксохимия", №34, Обработка металлов давлением. Издательство "Техника", Киев, 1973, с. 82-85.

81 Долинская Л.А., Черненко Э.Н. Стойкость длинных оправок для непрерывного стана. // "Сталь", 1968, №8, с. 724-727.

Приложение 1. Акты внедрения результатов исследований в технологические процессы производства бесшовных труб на ОАО "СинТЗ"

«УТВЕРЖДАЮ»
Технический директор ОАО «СинТЗ»
 Ю.В. Бодров
10 декабря 2009г.
АКТ



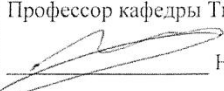

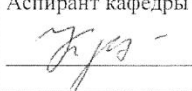
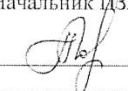
внедрения математической модели расчета теплового состояния оправок, учитывающего материал инструмента, и режима раскатки с контролируемым перемещением на непрерывном стане для сортамента труб, выпускаемых на ТПА-80 ОАО «СинТЗ».

В 2008-2009г.г. аспирантом МИСиС и сотрудниками ОАО «СинТЗ» была выполнена работа по анализу действующих на ТПА-80 ОАО «СинТЗ» проектных математических моделей раздела непрерывного стана, на основании которой определены направления их совершенствования.

Для непрерывного стана разработана новая математическая модель, которая позволяет:

- рассчитывать кинематические и деформационные параметры прокатки гильзы при контролируемом перемещении оправки;
- рассчитывать тепловое поле оправки непрерывного стана, учитывающее материал инструмента;
- рассчитывать энергосиловые и деформационно-скоростные параметры прокатки с учетом межклетевых сил натяжения, неизбежно возникающих в процессе непрерывной прокатки.

Элементы математической модели, рассчитанные по разработанной методике, были опробованы для труб размером 73х5,5мм и показали достаточную сходимость результатов с фактическими показателями работы стана.

От МИСиС	От ОАО «СинТЗ»
Профессор кафедры ТиОТП, д.т.н.  Н.М. Вавилкин	Начальник технического отдела, к.т.н.  А.И. Грехов
Аспирант кафедры ТиОТП  А.В. Красиков	Начальник ЦЗЛ, к.т.н.  П.Ю. Горожанин



«УТВЕРЖДАЮ»

Технический директор ОАО «СинТЗ»

Д.В. Овчинников

« 30 » 03 2010г.

АКТ

экспериментального исследования температурного поля и стойкости длинной оправки
непрерывного стана ТПА-80 ОАО «СинТЗ».

В 2008-2010гг аспирантом МИСиС и сотрудниками ОАО «СинТЗ» для непрерывного стана ТПА-80 была выполнена математическая постановка задачи расчета температурного поля длинной оправки, выбран численный метод решения дифференциального уравнения теплопроводности, определены начальные, граничные условия и основные допущения. На этом основании выполнен расчет температурного поля и напряженного состояния длинной оправки при раскатке сталей марок 38Г2СФ, 32Г2, 32ХГ.

Для проверки адекватности разработанной математической модели проведено экспериментальное исследование и получены следующие результаты:

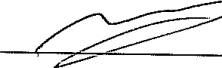
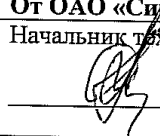
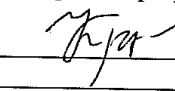
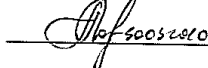
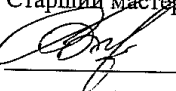
1) фактические замеры температуры оправки Ø81мм на поверхности в контрольных точках (1 – в выпуске калибра; 2 – вне выпуска калибра; 3 – на нижней образующей) после окончания раскатки и ее извлечения составили:

Контрольные точки оправки	Длина оправки, мм						
	0	3250	6500	9750	13000	16250	19500
Точка 1, °С	215	220	285	285	275	135	120
Точка 2, °С	240	240	315	315	300	165	140
Точка 3, °С	345	355	395	390	385	260	225

2) фактическая стойкость оправок Ø81мм при раскатке труб 73х5,5мм из сталей 38Г2СФ, 32Г2, 32ХГ без принудительного снятия при однократном использовании без последующей переточки составила:

№ комплекта	Стойкость, тн/комплект	Стойкость, тн/оправку
1	2 680	111,7
2	2 832	118
3	2 596	108,2
4	2 675	111,5
5	2 698	112,4

Элементы математической модели, рассчитанные по разработанной методике, показали достаточную сходимость результатов с фактическими показателями работы стана, что подтверждает ее адекватность и возможность применения на производстве.

От «МИСИС»	От ОАО «СпирТЗ»
Профессор кафедры ТиОТП, д.т.н.  Н.М. Вавилкин	Начальник технического отдела, к.т.н.  А.И. Грехов
Аспирант кафедры ТиОТП  А.В. Красиков	Начальник ЦЗЛ, к.т.н.  П.Ю. Горожанин
	Старший мастер цеха Т-3  В.С. Виноградов

УТВЕРЖДАЮ:

Технический директор-
первый заместитель
управляющего директора
ОАО «СинТЗ»



Д.В. Овчинников

» 07 2010г.

АКТ

исследования длинных оправок непрерывного стана ТПА-80
в условиях ЦЗЛ ОАО «СинТЗ»

В 2008-2010гг в рамках проведения исследования и разработки рациональных режимов работы технологического инструмента непрерывных трубных станов аспирантом НИТУ «МИСиС» Красиковым А.В. и сотрудниками ОАО «СинТЗ» было проведено исследование условий работы и механизма износа оправок Ø81мм непрерывного стана ТПА-80.

Расчетным путем при использовании программы, разработанной НИТУ «МИСиС», определена глубина слоя поверхностного упрочнения материала длинных оправок до 0,2 мм и количество проходов, при котором происходит упрочнение - 280.

На ТПА-80 проведена опытная прокатка с использованием оправок Ø 81 мм при раскатке гильз сначала из углеродистых марок сталей 10,20 в количестве 280 проходов, затем из легированных марок сталей в количестве 150 проходов. Величина износа рабочей поверхности опытных оправок составила 0,8 мм при средней величине износа серийных оправок 1 мм.

1. Цель исследования – определение причин повышения износостойкости оправки.

2. Методика исследования

- 2.1 Исследование макроструктуры;
- 2.2 Замер твердости поверхности оправки;
- 2.3 Исследование микроструктуры;
- 2.4 Химический анализ материала оправки на соответствие стали 35ХН2Ф по ТУ 14-104-127.

3. Результаты исследования и их анализ

3.1 При исследовании макроструктуры установлено, что центральная пористость, ликвационный квадрат и точечная неоднородность соответствует требованиям ТУ 14-104-127. Выявленная горячим травлением сетка травильных трещин свидетельствует о напряженном состоянии металла оправки после раскатки труб из легированных марок сталей.

3.2 Твердость поверхности оправки составила 32÷36 HRC, что соответствует требованию ТИ 161-ТЗ-1725 (30÷40 HRC)

3.3 Микроструктура обкатанного слоя на глубину 0,15-0,20 мм состоит из бейнита с размером зерна 10 балла по ГОСТ 5639, микроструктура на глубине до 1 мм состоит из бейнита с размером зерна 9 балла, в центральной части оправки перлит и феррит.

3.4 Химический состав материала оправки представлен в таблице.

Таблица

Наименование	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	S	P
оправка	0,34	0,26	0,55	0,99	1,75	0,22	0,009	0,016
35ХН2Ф	0,3÷	0,15÷	0,40÷	0,80÷	1,75÷	0,20÷	-	-
ТУ 14-104-127	0,37	0,36	0,70	1,20	2,25	0,30	-	-

По результатам химического анализа материал оправки соответствует ТУ.

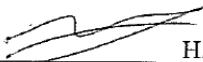

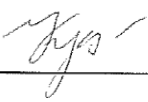

3.5 В результате проведения работы выявлено повышение износостойкости оправок при раскатке труб из легированных марок сталей после предварительной их эксплуатации на трубах из углеродистых марок сталей.

4. Выводы

4.1 Выявлено уменьшение износа длинной оправки при раскатке труб из легированных марок сталей после предварительной эксплуатации инструмента на углеродистых трубах. Повышение износостойкости связано с увеличением плотности и движением дислокаций в образовавшейся стабильной субструктуре поверхностного слоя оправки в процессе ее предварительного использования.

4.2 Определена глубина упрочненного поверхностного слоя оправок до 0,2 мм, оптимальное количество проходов при предварительной раскатке углеродистых труб – 280, оптимальное соотношение числа проходов при предварительной раскатке и числа проходов при раскатке труб из легированных сталей - 65/35%.

4.3 Результаты проведенного на ТПА-80 эксперимента по использованию опытных оправок Ø 81 мм при раскатке труб из углеродистых и легированных марок сталей подтверждают результаты, полученные расчетным путем.

От «МИСИС»	От ОАО «СпирТЗ»
Профессор кафедры ТиОТП, д.т.н.  Н.М. Вавилкин	Начальник технического отдела, к.т.н.  А.И. Грехов
Аспирант кафедры ТиОТП  А.В. Краси́ков	Начальник ЦЗЛ, к.т.н.  П.Ю. Горожанин

Приложение 2. Акт внедрения результатов исследований в учебный процесс на кафедре ТОТП НИТУ "МИСИС"



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и инновациям,

проф., д.т.н.

М. Р. Филонов

«16» октября 2014 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Красикова Андрея Владимировича в учебный процесс на кафедре ТОТП НИТУ «МИСиС»

Настоящий акт подтверждает использование в учебном процессе результатов работы Красикова А.В. на тему «Исследование процесса раскатки труб на агрегатах с непрерывными станами с целью повышения износостойкости оправок», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Представленные в диссертации результаты сравнительного анализа деформационных, энергосиловых и кинематических параметров раскатки на плавающей и контролируемо-перемещаемой оправках в непрерывных станах с двух и трехвалковыми клетями, а так же результаты исследований теплового и термонапряженного состояния плавающей и контролируемо-перемещаемой оправок в зависимости от технологических факторов раскатки с применением современных САПР использованы в учебном процессе на кафедре технологии и оборудования трубного производства в рамках курса «Технология производства бесшовных и сварных труб» при выполнении лабораторных работ, подготовке курсовых и дипломных проектов студентами, обучающимися по специальности «Обработка металлов давлением».

Результаты работы рассмотрены и рекомендованы к внедрению на заседании расширенного научного семинара кафедры ТОТП от 15 октября 2014 г. (протокол №21).

Начало использования объекта внедрения – декабрь 2014 г.

Зав. кафедрой ТОТП,
проф., д.т.н.

Б.А. Романцев

Инженер

А.В. Красиков