



Журнал индексируется системами РИНЦ и Google Scholar.
Сведения о журнале публикуются в международной системе «Ulrich's Periodicals Directory»

Редакционная коллегия

Главный научный редактор

Корчунов А.Г. – «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор, доктор технических наук.

Заместитель главного научного редактора

Анцупов В.П. – «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор, доктор технических наук.

Бобарикин Ю.Л. – «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», доцент, кандидат технических наук, г. Гомель, Республика Беларусь.

Горбатюк С.М. – Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов», профессор, доктор технических наук.

Кузьминов А.Л. – «Череповецкий государственный университет», профессор, доктор технических наук.

Нижегородов В.В. – главный механик ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Раскатов Е.Ю. – «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор, доктор технических наук.

Трофимов В.Н. – «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор, доктор технических наук.

Ответственный редактор

Слободянский М.Г. – «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кандидат технических наук.

Журнал основан в 2012 г.
Периодичность выхода – 2 номера в год.

Адрес редакции:
455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.
Тел.: (3519) 29-85-07, 29-84-51
Website: www.momz.magtu.ru
E-mail: momz-magtu@yandex.ru;
momz-magtu@mail.ru

Журнал отпечатан издательским центром
МГТУ им. Г.И. Носова, 455000,
г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.
Выход в свет 01.07.2016. Заказ 309.
Тираж 300 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

Э.А. Гарбер, Д.Л. Шалаевский, А.В. Митрофанов Оптимизация технологического режима широкополосного стана горячей прокатки по критерию «минимум расхода энергии»	3
Е.А. Пузик, А.А. Филатов Методика определения пьезокоэффициента вязкости в нагруженной контактной зоне подшипников качения	10
М.Р. Байгузин, С.С. Пилипенко, А.П. Потапенков Разработка гидравлического редукторно-мультипликаторного привода металлургических машин	14
Н.Т. Баскакова К вопросу организации ремонтных работ металлургического оборудования	18
С.Л. Ровин Конструкция ротационных наклоняющихся печей: моделирование и расчет	30
Н.С. Климов, В.Н. Трубников, С.А. Сергеев Надежность цепных муфт	47
З.С. Гельманова, М.К. Ибатов, К.А. Ногаев Необходимость и возможность создания сервисного ремонтного обслуживания на примере АО «АрселорМиттал Темиртау»	53
Ю.А. Офицеров, В.В. Черешнев, В.Н. Черкасов, А.А. Сакир, Р.В. Терехов Повышение эксплуатационной надежности и долговечности прокатных валков непрерывного стана холодной прокатки	60
К.Н. Соломонов, Н.И. Федоринин, Л.И. Тищук Методика построения линии раздела течения металла для кусочно-линейного контура	68
А.К. Иванюк, Ю.П. Сердобинцев Расчет и корректировка коэффициента продольного изгиба труб, испытывающих внешнее сжатие.....	74
Р.Н. Савельева, Е.С. Иванова Прогнозирование долговечности элементов главного привода рабочих клетей и способы повышения их ресурса.....	80



УДК 621.771

Э.А. Гарбер, Д.Л. Шалаевский
ФГБОУ ВПО "Череповецкий государственный университет"
г. Череповец, Россия
E-mail: mamz2011@mail.ru
А.В. Митрофанов
ПАО "Северсталь"
г. Череповец, Россия
Дата поступления 04.04.2016

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ПО КРИТЕРИЮ «МИНИМУМ РАСХОДА ЭНЕРГИИ»

Аннотация

Изложена методика расчета технологических режимов чистовой группы клетей широкополосного стана горячей прокатки, оптимизированных по критерию энергоэффективности. Обоснован выбор в качестве инструментов оптимизации увеличения температуры подката и перераспределения обжатий между клетями. Результаты расчетов подтверждены опытными прокатками на стане 2000.

Ключевые слова: горячая прокатка, энергоэффективность, режим прокатки.

Экономия энергии при прокатке – одна из актуальных задач современного листопрокатного производства. Наименее затратный метод ее решения – оптимизация параметров режима прокатки.

В работе [1] представлены результаты исследования, которые показывают, что для повышения эффективности производства стальных полос и листов и снижения издержек на крупных предприятиях целесообразно уменьшать разнообразие сортамента в общем портфеле заказов. Однако в условиях конкуренции на рынке металлопродукции отказ от производства стального проката небольшими партиями нецелесообразен.

В работах [2, 3] исследовано влияние режимов нагрева и деформаций стальных слябов в черновой группе клетей на энергоемкость технологического процесса. Для этого была разработана имитационная модель участка "печь - черновая группа непрерывного широкополосного стана". Оптимизация производилась методом "крутого восхождения" с ограничениями по максимальной и минимальной допустимым температурам нагрева. В работе установлено, что такой способ повышения эффективности производства теоретически позволит на 7%

сократить суммарные затраты на нагрев и прокатку стальных горячекатаных полос. В литературе, однако, отсутствуют сведения о практическом использовании такой технологии, не представлены опытные данные, подтверждающие возможность уменьшения издержек.

В работе [4] изложена методика совершенствования технологических режимов 6-ти клетевой чистовой группы 1700 полунепрерывного стана 2800/1700 с целью уменьшения разнотолщинности полос и опасных контактных напряжений в очагах деформации рабочих клетей. Испытания усовершенствованных режимов показали, что, помимо достигнутой цели, удалось уменьшить суммарную мощность двигателей на 2,8-7,6%, однако оптимизационная модель с критерием энергоэффективности при этом не использовалась, резервы возможной экономии энергии не проанализированы.

Цель данного исследования состояла в разработке и проверке в условиях действующего стана методики расчета режима горячей прокатки широких стальных полос, оптимизированного по критерию "минимум расхода энергии".

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- выбрать наиболее достоверную математическую модель взаимосвязанных энергосиловых и технологических параметров процесса горячей прокатки, оценить ее погрешность;

- дополнить выбранную модель алгоритмом оптимизации режима по указанному критерию;

- рассчитать оптимизированные режимы прокатки действующего стана, определив при этом возможную экономию электроэнергии;

- выявить основные группы сортамента, на которых эффект снижения энергопотребления будет максимальным;

- провести промышленную апробацию рассчитанных энергосберегающих режимов горячей прокатки в чистовой группе клетей стана 2000 ПАО "Северсталь".

Чтобы выбрать достоверную модель взаимосвязанных технологических и энергосиловых параметров, проанализировали наиболее известные методики расчета усилий и мощности прокатки [5, 6, 7, 8, 9].

В результате анализа было решено в основу модели положить современную теорию энергосилового расчета широкополосных станов, разработанную в 2000 - 2015 г.г. учеными - прокатчиками череповецкой научной школы, изложенную в учебнике [9].

Ее основные отличия от классической теории [5; 7], существенно уменьшающие погрешности расчета, состоят в следующем:

- контактные напряжения между полосой и валками в очаге деформации рассчитываются отдельно на упругих и пластическом участках, причем на упругих участках, вместо условия пластичности, использован основной закон теории упругости.

- теоретически обосновано допущение об отсутствии при горячей прокатке скольжения между полосой и валками, на основании чего принято, что вся контактная поверхность в очаге деформации представляет собой зону прилипания, при этом касательные контактные напряжения на

пластическом участке зависят не от коэффициента трения, а от сопротивления чистому сдвигу материала полосы.

Подробное обоснование и изложение указанной методики с примерами расчетов контактных напряжений, сил прокатки и мощности двигателей главного привода дано в работе [9], поэтому в данной статье оно не приводится. Для оценки достоверности выбранной модели выполнили расчет мощности двигателей главных приводов стана 2000 ПАО "Северсталь" для 2380 режимов прокатки полос, охватывающих практически весь профильный и марочный сортамент этого стана (см. таблицу 1).

Таблица 1. Марочный и профильный сортамент полос, для которых произведен расчет мощности двигателей главных приводов чистовой группы рабочих клетей стана 2000

Марки стали	08Ю, 40, 45, 20, 01ЮТ, 07ГБЮ, 09Г2, 09Г2С и др.
Толщины полос, мм	1,4 - 16
Ширины полос, мм	900 - 1700

Погрешности расчета мощности главных приводов представлены в виде гистограммы на рисунке 1.

Статистическая обработка этих данных показала, что коэффициент множественной детерминации $R_2 = 0,838$, средняя погрешность расчета мощности составила 7,27%, причем наибольшее количество расчетов имели погрешность 4-5%, а для 70% рассчитанных режимов погрешности не превысили 12%. Применение методик [5-8] для расчета мощности при прокатке на стане 2000 полос того же сортамента дало в 3-5 раз большие погрешности.

Убедившись в достоверности выбранной модели взаимосвязанных технологических и энергосиловых параметров, мы дополнили ее алгоритмом оптимизации технологических режимов по критерию "минимум расхода энергии".

Разработанный алгоритм базируется на следующих положениях, вытекающих из

особенностей напряженно-деформированного состояния (НДС) полосы в процессе горячей прокатки стальных полос [4; 10]:

1. Чем выше температура прокатываемой полосы, тем меньше ее сопротивление деформации, поэтому для экономии энергии прокатку, начиная с черновой группы

клетей, целесообразно вести при максимально допустимой температуре, ограничивая ее, исходя из требований, предъявляемых к качеству полосы - его внутренней структуре, механическим свойствам и состоянию поверхности.

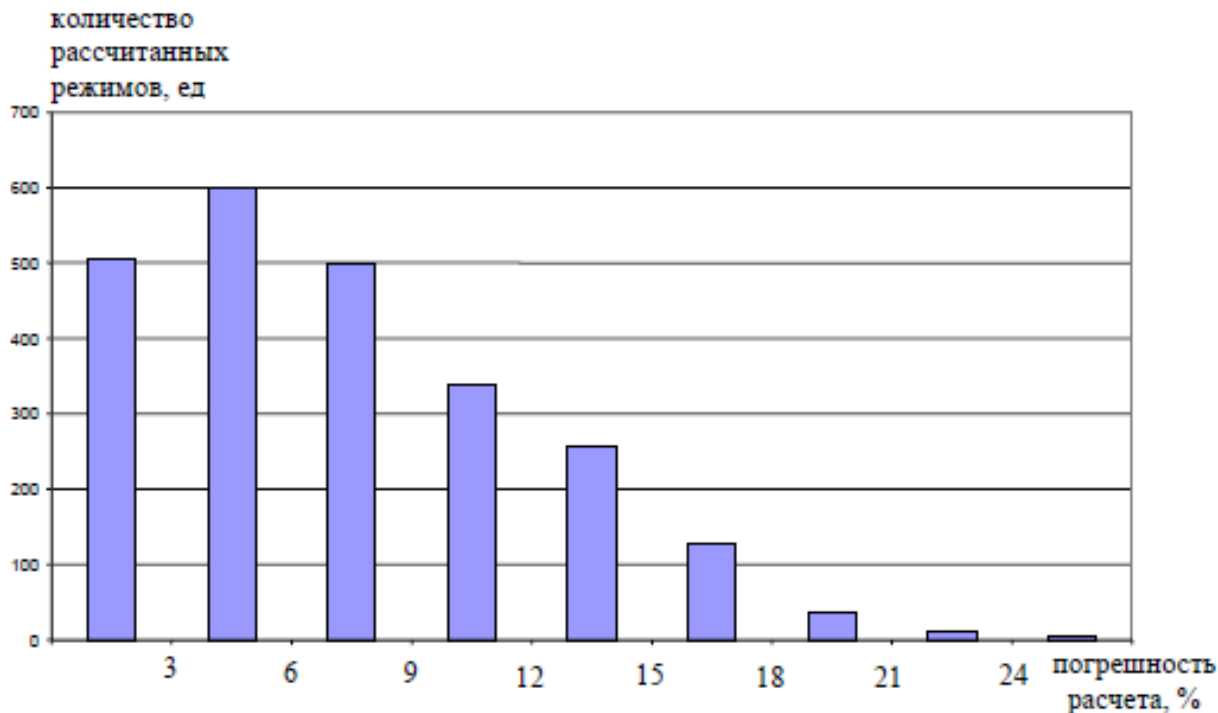


Рисунок 1. Погрешности расчета по методике [9] мощности главных приводов чистовой группы клетей стана 2000

2. Поскольку температура полосы в первой клетке чистовой группы максимальна и минимальна в последней клетке, для экономии суммарной энергии, расходуемой двигателями главных приводов чистовых клетей, целесообразно так распределить между ними суммарное обжатие, чтобы частное обжатие в первой клетке было максимально возможным, ограничив его лишь условиями сохранения прочности оборудования и предельно допустимой паспортной мощностью двигателей главного привода.

В результате такого подхода максимально возможная часть суммарного обжатия будет осуществляться при минимальном сопротивлении деформации, благодаря чему уменьшится доля суммарного обжатия во всех остальных клетях, где сопротивление деформации более высокие из-за наклепа и пониженной температуры.

Исходя из указанных выше базовых положений, мы разработали компьютерный алгоритм оптимизации режимов прокатки полос в чистовой группе клетей стана 2000 применительно к сортаменту, приведенному в табл. 1.

В качестве критерия оптимизации каждого режима мы приняли: "минимум суммарной мощности двигателей главного привода всех рабочих клетей". Алгоритм оптимизации, приняв в качестве исходных технологические параметры действующего режима прокатки (температуру полосы, распределение обжатий между клетями, межклетевые натяжения, скорость полосы), последовательно выполняет следующие операции:

1. Сравнение исходной температуры полосы перед чистовой группой клетей с максимально допустимыми технологиче-

скими ограничениями, и при наличии резерва - увеличение ее до максимально возможной.

2. Многовариантное перераспределение частных обжатий между всеми клетями, кроме последней, и выбор из всех вариантов такого распределения, которое соответствует принятому критерию оптимизации. Обжатия в последней клетке остаются исходным, т.к. оно в наибольшей степени влияет на механические свойства полос.

Для эффективного выполнения данной операции был использован симплексный метод оптимизации [11], предусматривающий специальные итерационные процедуры, сущность которых состоит в следующем.

На первом шаге, отталкиваясь от исходного режима, формируется группа так называемых "опорных" режимов прокатки, количество которых равно числу клетей, участвующих в распределении обжатий (для стана 2000 - 6 режимов). Для всех "опорных" режимов по модели взаимосвязанных технологических и энергосиловых

параметров рассчитывается суммарная мощность главных приводов рабочих клетей, результаты расчетов сравниваются между собой, и "опорный" режим обжатий с максимальной суммарной мощностью заменяется новым, в котором распределение обжатий рассчитывается по специальной формуле, обеспечивающей меньшую суммарную мощность.

Далее указанная процедура повторяется до тех пор, пока в последнем из рассчитанных режимов суммарная мощность не станет больше, чем в предпоследнем. На этом итерационные процедуры заканчиваются, а режим с минимальной суммарной мощностью признается отвечающим критерию оптимизации.

Описанный алгоритм был применен для корректировки 122 режимов прокатки полос, охватывающих большую часть марок сталей и профилеразмеров сортамента стана 2000. В таблице 2 в качестве примера приведены параметры исходного режима прокатки в чистовой группе клетей.

Таблица 2. Исходный режим прокатки в чистовой группе клетей стана 2000 полос из стали 08пс с размерами поперечного сечения 2,3x1292 мм (скорость прокатки на выходе из последней клетки 9,5 м/с, температура полосы на входе в шестую клетку 10800°С)

Номер клетки	Толщина полосы, мм		Относительное обжатие, %	Средняя температура полосы, °С	Сопротивление деформации, МПа	Мощность главного привода, МВт
	на входе в клетку	на выходе из клетки				
6	35,69	20,61	42,2	999	128	4,791
7	20,61	10,2	50,5	988	157	6,125
8	10,2	6,35	37,7	968	166	5,583
9	6,35	4,58	27,9	938	172	4,983
10	4,58	3,42	25,3	906	192	4,879
11	3,42	2,61	23,7	873	200	5,840
12	2,61	2,3	11,9	856	235	4,199
Суммарная мощность двигателей главного привода						36,4

Увеличив температуру полосы на входе в чистовую группу клетей на 300 °С (с 1080 до 1110 °С) и пересчитав с помощью симплексного метода оптимизации распределение частных обжатий между клетями, мы получили оптимизированный режим, параметры которого приведены в таблице 3.

Таблица 3. Оптимизированный режим прокатки в чистой группе клетей стана 2000 полос из стали 08пс с размерами поперечного сечения 2,3x1292 мм (скорость прокатки на выходе из последней клетки 9,5 м/с, температура полосы на входе в шестую клеть 11100°С)

Номер клетки	Толщина полосы, мм		Относительное обжатие, %	Средняя температура полосы, °С	Сопротивление деформации, МПа	Мощность главного привода, МВт
	на входе в клеть	на выходе из клетки				
6	35,69	17,18	51,8	1006	126	4,791
7	17,18	9,0	47,6	992	145	5,728
8	9,0	5,73	36,3	971	155	4,973
9	5,73	4,2	26,7	938	163	4,294
10	4,2	3,17	24,5	904	181	4,364
11	3,17	2,61	17,7	857	204	3,901
12	2,61	2,3	11,9	840	234	4,199
Суммарная мощность двигателей главного привода						32,25

Из сопоставления данных таблиц 2 и 3 видно, что совместное влияние увеличения температуры полос на входе в чистовую группу клетей и перераспределение между ними частных обжатий позволило снизить суммарную мощность двигателей главного привода с 36,4 МВт до 32,25 МВт, т.е. на 11,4 %.

Применение симплексного метода оптимизации подтвердило второе из вышеизложенных базовых положений, на которых основывается разработанный алгоритм оптимизации режима прокатки: перераспределение частных обжатий привело к существенному – почти на 10 % (с 42,2% до 51,8%) – увеличению частного обжатия в 6-й клетки (первой в чистой группе), сравнительно небольшому уменьшению частных обжатий в 7-й, 8-й, 9-й, 10-й клетях (на 0,8 – 2,9%) и значительному – на 6% - уменьшению частного обжатия в 11-й клетки (предпоследней в чистой группе).

Совместное влияние увеличения температуры полосы на входе в чистовую группу клетей и перераспределение частных обжатий привело к уменьшению сопротивления деформации полосы в 7-й – 10-й клетях чистой группы и – как следствие – к уменьшению загруженности двигателей главных приводов этих клетей, что иллюстрируют графики на рисунках 2 и 3.

В режиме прокатки, приведенном в табл. 2 и 3 это обеспечивало в конечном итоге снижение затрат энергии на 11,4%.

Мы проанализировали также влияние на расход энергии корректировки межклетевых натяжений и установили, что при отношении $\sigma_{мк}/\sigma_{ф} \leq 0,15-0,18$ (где $\sigma_{мк}$ – межклетевое удельное натяжение, $\sigma_{ф}$ – сопротивление деформации) это влияние несущественно.

В режимах, приведенных в таблицах 2 и 3, это отношение находится в диапазоне 0,06-0,18. Увеличение отношения $\sigma_{мк}/\sigma_{ф}$ свыше 0,18-0,2 нежелательно, т.к. из-за неустойчивости режима прокатки, вызванной продольной и поперечной разнотолщиной подката, возникает вероятность обрыва полос.

Далее было проанализировано влияние на экономию энергии суммарного обжатия в чистой группе клетей, определяющего толщину готовых полос.

Результаты этого анализа, представленные на рисунке 4, показали, что наибольший эффект экономии (10-14%) достигается при прокатке полос минимальных толщин ($h_{12} = 1,8-6,0$ мм), что объясняется максимальным количеством возможных вариантов перераспределения обжатий. При прокатке полос толщиной 8-12 мм расчетная экономия составила 9-11%, при прокатке более толстых полос экономия уменьшается до 5-8%.

Для проверки в промышленных условиях изложенных результатов была проведена опытная прокатка на стане 2000 двух полос из стали 09Г2С размерами 12x1500 мм. Первая полоса была произведена с использованием действующих на стане температурных и деформационных режимов, вторая - с использованием оптимизированных.

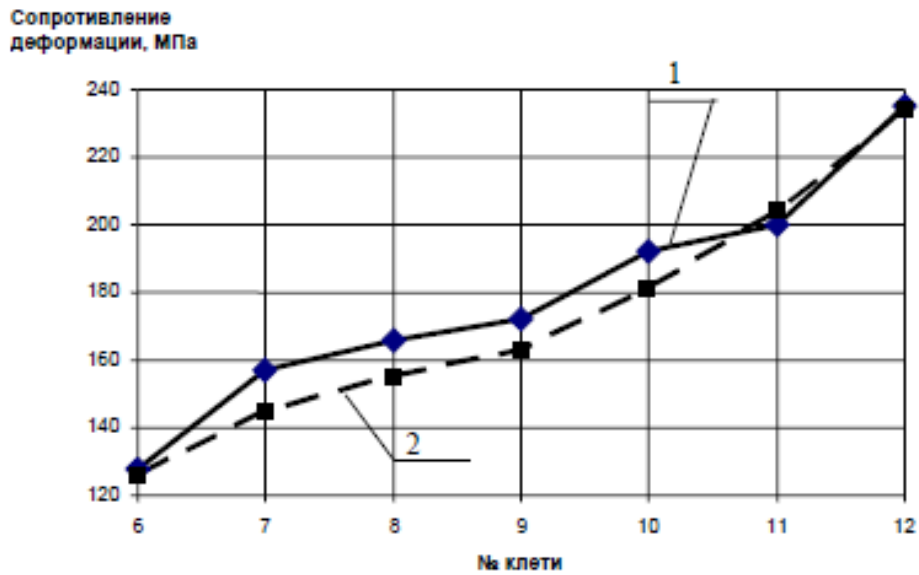


Рисунок 2. Изменение сопротивления деформации по клетям чистовой группы при прокатке по исходному (1) и оптимизированному (2) режимам

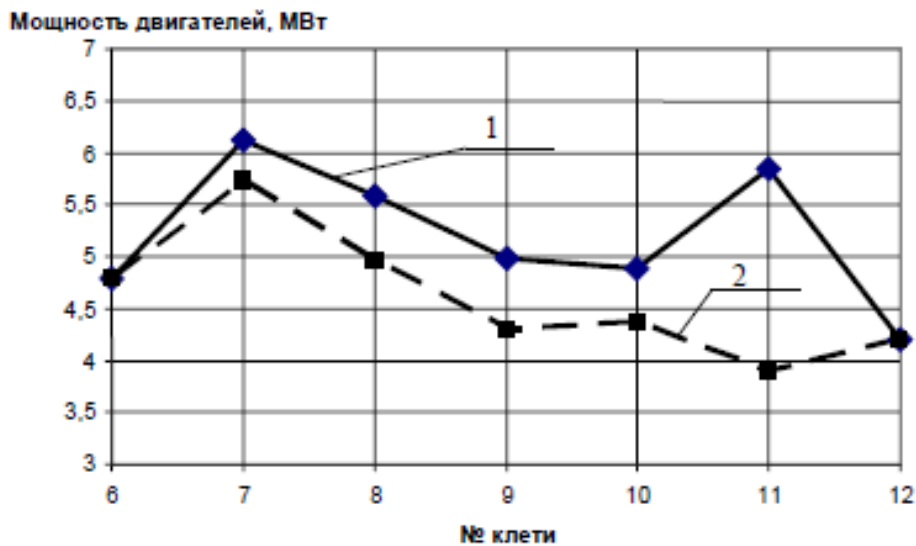


Рисунок 3. Загруженность по мощности двигателей главных приводов клеток чистовой группы при прокатке по исходному (1) и оптимизированному (2) режимам

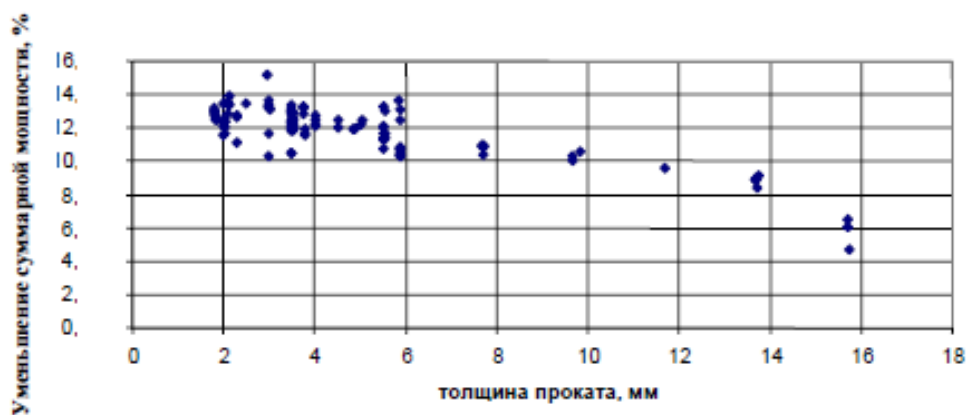


Рисунок 4. Зависимость эффекта снижения суммарной мощности привода чистовой группы клеток от толщины готового проката

Согласно показаниям цеховых измерительных приборов, фактическое уменьшение удельного расхода энергии при оптимизации режима прокатки составило 9%, что подтвердило достоверность теоретических расчетов и послужило основанием принятого в цехе решения внедрить изложенную методику в промышленную технологию.

Заключение

Разработана и проверена в промышленных условиях математическая модель оптимизации режимов горячей прокатки стальных полос в чистовой группе рабочих клетей широкополосного стана по критерию «минимум расхода энергии».

Установлено, что наиболее эффективный метод оптимизации – максимально возможное увеличение температуры полосы перед чистовой группой клетей и перераспределение между ними суммарного обжатия таким образом, чтобы максимальное частное обжатие было в первой клетке, а минимальное – в двух последних.

Библиографический список

1. J. Storck Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability Product variety, flexibility and energy use in hot rolling mills, pp 80-85, Springer, 2011
2. Генкин А.Л. Энергосберегающее управление листопрокатных комплексом "печи-стан" // Сталь. - 2011. - №3. - С.34 - 40.
3. Генкин А.Л. Моделирование и оптимизация процесса горячей прокатки полос. - М.: ЛЕНАНД, 2012 – 170 с.
4. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Тарасов П.А. Эффективные режимы горячей прокатки тонких полос на широкополосных станах // Производство проката, 2009, №1, С. 10-16.
5. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
6. Николаев В.А. Теория и практика процессов прокатки. Запорожье. ЗГИЛ, 2002 -232с.
7. Никитин Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки: учебное пособие. МГТУ им. Баумана, 2009 – 399с.
8. Василев Я.Д., Минаев А.А. Теория продольной прокатки: учебник для магистров ВУЗов. Донецк: УНИТЕХ, 2010, 456 с.
9. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А. Теория прокатки: учебник. – Старый Оскол: «Тонкие наукоемкие технологии», 2015 – 312 с.
10. Рудской А.И., Лунев В.А. Теория и технология прокатного производства. Учеб. пособие. – Спб.: Наука, 2008. – 527 с.
11. Саутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической промышленности. Л: Химия, 1975, 48 с.



УДК 621.771.07

Е.А. Пузик
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: ekshalimova@mail.ru

А.А. Филатов
ГНЦ РФ АО АХК «ВНИИМЕТМАШ»
г. Москва, Россия
e-mail: smm93@list.ru
Дата поступления 18.04.2016

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЬЕЗОКОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ В НАГРУЖЕННОЙ КОНТАКТНОЙ ЗОНЕ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Аннотация

Описана методика определения пьезокоэффициента вязкости смазочного материала, которая, в отличие от существующих, позволяет определить значения данного коэффициента с учётом влияния высоких температур, генерируемых в масляном слое, разделяющем контактирующие тела в нагруженной зоне. Приведены результаты обработки экспериментальных данных и аналитические зависимости, позволяющие определить значения пьезокоэффициента вязкости смазочного материала для четырёх классов вязкости смазочного материала.

Ключевые слова: пьезокоэффициент вязкости минерального масла, коэффициент толщины масляной плёнки, эластогидродинамический расчёт, подшипник качения.

Введение

Целью эластогидродинамического (ЭГД) расчёта является выбор марки минерального масла, при котором достигается максимальный ресурс подшипника качения в условиях действующих внешних нагрузок и скоростей качения контактирующих поверхностей. Это возможно обеспечить формированием на контакте максимальной толщины масляного слоя, на величину которого существенное влияние оказывают вязкость и минерального масла. В настоящее время в литературе отсутствуют методики экспериментального определения пьезокоэффициента вязкости непосредственно в зоне контакта тел качения. Для определения величины пьезокоэффициента вязкости используется, предложенная более полувека назад корреляционная формула Вустера [1]:

$$\alpha = (0,6 + \lg v_t) * 10^{-2}, \quad (1)$$

где α - пьезокоэффициент вязкости, 1/МПа;
 v_t - кинематическая вязкость смазочного материала, мм²/с.

Проблема в использовании данной зависимости заключается в том, что необходимо знание вязкости минерального масла непосредственно в зоне контакта, что является отдельной проблемой.

В данной работе предлагается оригинальная методика экспериментального определения значения пьезокоэффициента вязкости непосредственно в нагруженной зоне контакта подшипников качения.

В результате проявления термоэффекта входной зоны, как показано в экспериментальных исследованиях [2, 3, 5], температура в зоне контакта подшипника качения может в несколько раз превышать температуру смазочного материала в узле трения, и поэтому необходимо знание фактических значений вязкости и пьезокоэффициента вязкости смазочного материала (СМ). Именно они определяют толщину масляной плёнки на контакте, величина которой влияет на коэффициент толщины масляной плёнки λ . Данный параметр является характеристикой режима трения, реализуемого в подшипнике качения, и определяет его ресурс [3]:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}}, \quad (2)$$

где h - толщина масляной плёнки на контакте трущихся поверхностей, мкм;

R_{a1}^2 и R_{a2}^2 - шероховатость контактирующих поверхностей, мкм.

В соответствии с формулой (2), при заданных характеристиках шероховатости поверхностей, величина коэффициента толщины масляной плёнки λ возрастает с ростом толщины масляной плёнки h . В связи с этим, уменьшение количества контактов микровыступов трущихся поверхностей приводит к повышению ресурса подшипника качения.

Значение толщины масляной плёнки определяется по формуле Ратнера, а значение коэффициента толщины масляной плёнки λ по зависимостям работы [3]. Необходимо отметить, что наиболее существенное влияние на пьезокоэффициент вязкости СМ, вязкость СМ и параметр λ оказывает температура масляного слоя разделяющего контактирующие тела в нагруженной зоне.

В работе [3] приведены рассчитанные по формуле Вустера значения пьезокоэффициента вязкости в зависимости от температуры минерального масла в узле трения, а не от температуры смазочного слоя непосредственного в зоне контакта, и охватывают ограниченное количество марок минеральных масел. Для минеральных масел: ИР 100 КВ 100, марки ТНК 522 КВ 220, марки Mobilgear 320 КВ 320, марки 460ПВ КВ 460, наиболее широко применяемых узлах трения прокатного оборудования, значения пьезокоэффициентов вязкости отсутствуют.

Для решения задачи по определению пьезокоэффициента вязкости минеральных масел были разработаны испытательный стенд (ИС) [9] и рассматриваемая методика.

Технические характеристики ИС приняты на основе физического моделирования режима ЭГД-смазки в подшипниках качения [6, 7].

Особенностью данного ИС является возможность фиксации, возникающего в подшипнике качения момента трения только от действия смазочного материала по методике представленной в работе [8],

исключая момент трения от действия нагрузки. Это позволяет, используя известную зависимость из работы [4], определить фактическую вязкость минерального масла на контакте в подшипнике качения

$$M = 10^{-7} f_0 (vn)^{2/3} D_0^3, \quad (3)$$

где $M = M_{\text{тр.см}}$ - измеренная величина момента трения в подшипнике качения от действия смазочного материала.

Принимая $v = v_\phi$, после преобразования получим зависимость для расчёта фактической вязкости минерального масла в зоне контакта трущихся поверхностей подшипника качения в зависимости от момента трения $M_{\text{тр.см}}$

$$v_\phi = M_{\text{тр.см}}^{\frac{3}{2}} \cdot K, \quad (4)$$

$$K = (n^{\frac{2}{3}} \cdot f_0 \cdot 10^{-7} \cdot D_0^3)^{-3/2},$$

где v_ϕ - фактическая вязкость смазочного материала на контакте поверхностей в подшипнике качения, мм²/с;

D_0 - средний диаметр подшипника, мм;

f_0 - коэффициент, зависящий от типа подшипника и условий смазывания;

n - частота вращения подшипника, мин⁻¹;

Одновременно, фактическую вязкость минерального масла можно найти воспользовавшись зависимостью Баруса:

$$v_\phi = v_t e^{\alpha p}, \quad (5)$$

где v_ϕ - фактическая кинематическая вязкость СМ, мм²/с при давлении p , МПа;

v_t - кинематическая вязкость СМ при температуре t на контакте в ПК, м²/с;

α - пьезокоэффициент вязкости СМ, 1/МПа.

Тогда пьезокоэффициент вязкости СМ:

$$\alpha = \frac{\ln v_\phi - \ln v_t}{p}. \quad (6)$$

Подставив в полученное выражение зависимость (4), получим выражение для определения пьезокоэффициента вязкости СМ в зависимости от величины момента трения в подшипнике качения от действия смазочного материала:

$$\alpha = \frac{1.5 \ln M_{\text{тр.см.}} + \ln K - \ln v_t}{p}. \quad (7)$$

Полученная зависимость позволяет получать значения пьезокоэффициента вязкости минерального масла, значение которого соответствует условиям реализуемым

в нагруженной зоне контакта подшипника качения.

Исследования, проведённые на ИС с использованием разработанной методики, позволили установить значения пьезокоэффициентов вязкости непосредственно в зоне контакта подшипника качения для минеральных масел классов вязкости КВ 460, КВ320, КВ220, КВ100 в зависимости от температуры минерального масла собственно в узле трения.

По результатам экспериментов для исследованных классов вязкости минеральных масел получена корреляционная зависимость для расчёта пьезокоэффициента вязкости:

$$\alpha = A \cdot T_{\text{вх}}^{A_x} \quad (8)$$

где $T_{\text{вх}}^{A_x}$ - температура минерального масла в узле трения °С ;

A, A_x - эмпирические коэффициенты для исследуемых КВ минеральных масел, табл. 1

Таблица 1

Значения эмпирических коэффициентов для определения пьезокоэффициента вязкости СМ

КВ СМ	при $U_{\Sigma}=2.9$ м/с		при $U_{\Sigma} 7.92$ м/с	
	A	A_x	A	A_x
КВ 100	0.0303	-0.111	0.0233	-0.039
КВ 220	0.0354	-0.38	0.0281	-0.086
КВ 320	0.0304	-0.09	0.0299	-0.102
КВ 460	0.0406	-0.16	0.0334	-0.126

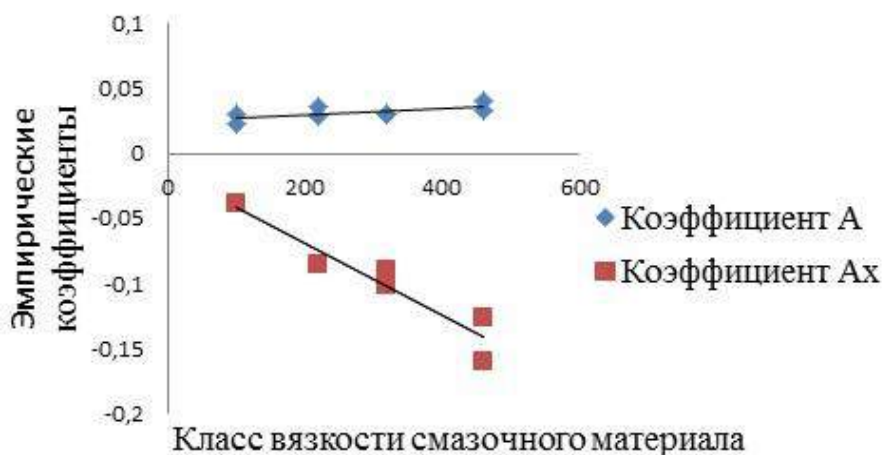


Рисунок 1. Зависимости эмпирических коэффициентов A и A_x от класса вязкости минерального масла.

После обработки экспериментальных данных и аппроксимации линий тренда были получены линейные функции с достоверностью результатов для коэффициента A 88%, для коэффициента A_x 89% (рисунок 1):

$$A = 3 \cdot 10^{-5} \cdot \text{КВ} + 0,0245, \quad (9)$$

$$A_x = -0,0003 \cdot \text{КВ} - 0,014,$$

Было выполнено сравнение значений пьезокоэффициента вязкости минерального масла при его температуре в узле трения, и при температуре смазочного слоя в зоне контакта, приведённое на рисунке 2.

Фактически реальное значение пьезокоэффициента вязкости в 1,5 раза ниже значения, определённого при температуре минерального масла в узле трения, и эта разница снижается с ростом температуры минерального масла в узле трения.

Заключение

Разработанная методика экспериментального определения пьезокоэффициента вязкости минерального масла и полученные экспериментальные зависимости показали, что использование зависимости Вустера по расчёту пьезокоэффициента вязкости без учёта фактической температуры масляной плёнки на контакте, ведёт к завышенным расчётным значениям толщины масляной плёнки. В свою очередь это, может привести к принятию неверного решения при выборе марки минерального масла, не обеспечивающей достижение максимального ресурса подшипников качения в конкретных условиях эксплуатации подшипниковых опор рабочих валков клетей «КВАРТО».

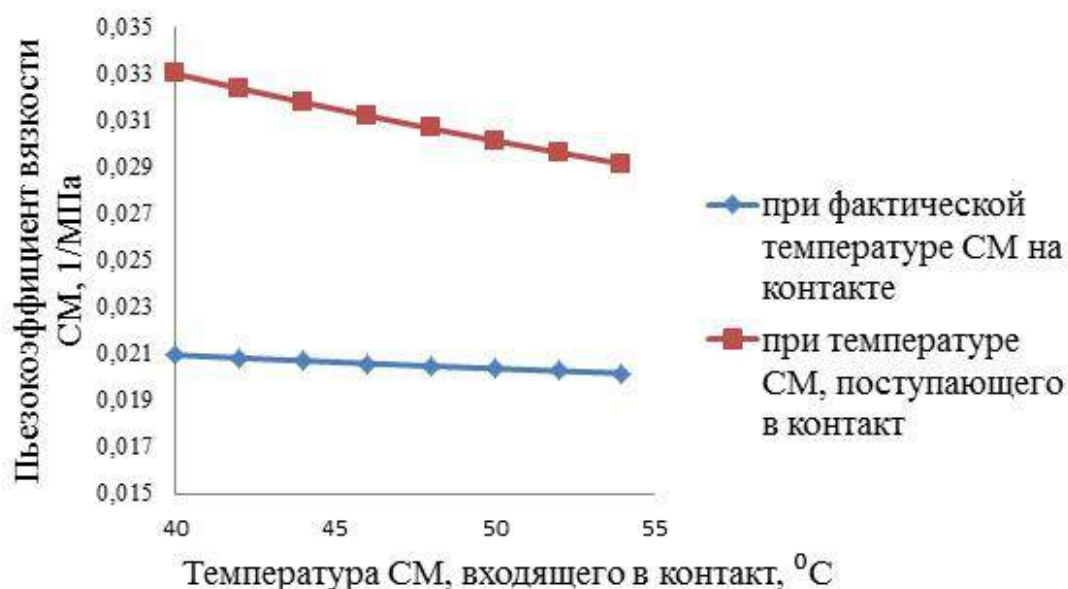


Рисунок 2. Сравнение значений пьезокоэффициента вязкости минерального масла класса вязкости KV460 при температуре в узле трения и при температуре непосредственно в зоне контакта

Библиографический список

- 1 Применение методов подобия и размерностей в экспериментальном исследовании контактно-гидродинамического трения / Мишарин Ю.А. // Машиноведение: научно-технический журнал / Академия наук СССР (АН СССР). — Москва: Наука, 1965. № 5. —С 89-100.
- 2 Аналитическо-экспериментальное определение параметров ЭГД-смазки в подшипниках качения опор рабочих валков стана 2000 горячей прокатки. / Жиркин Ю.В., Пузик Е.А.// Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.- 2010.- № 4. - С. 52-56.
- 3 Коднир Д.С, Жильников Е.П., Байбородов Ю.И. Эластогидродинамический расчёт деталей машин.- М.: Машиностроение, 1988.-160с.
- 4 Перель Л.Я. Филатов А.А. Подшипники качения: расчёт, проектирование и обслуживание опор: Справочник. — Машиностроение, 1992, - 606 с.
- 5 Повышение долговечности подшипниковых опор прокатных клетей «кварто» при их техническом обслуживании / Жиркин Ю.В., Пузик Е.А. Филатов А.А.//Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, - 2015. - №3 - С.83-88
- 6 Физическое моделирование режима смазки подшипниковых узлов рабочих валков прокатных цехов/ Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И., Дудоров Е.А. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2007. - № 4. С. 54-56
- 7 Zhirkin Yu.V., Mironenkov E.I., Dudorov E.A. Lubrication of working-roller bearings in rolling mills // Steel in Translation. 2007. T. 37. № 4. С. 350-352
- 8 Методика определения момента сопротивления в подшипниках качения / Мироненков Е.И, Жиркин, Ю.В., Пузик Е.А., Султанов Н.Л.// Материалы 68-й международной научно-технической конференции: сб. докл. - Магнитогорск: ГОУ ВПО "МГТУ", 2010. С. 273-275.
- 9 Стенд для определения вязкости смазочного материала: пат. 159511 Российская Федерация, от 22 января 2016. Опубликовано 10.02.2016 Бюл. № 4.



РАЗРАБОТКА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕДУКТОРНО-МУЛЬТИПЛИКАТОРНОГО ПРИВОДА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН

Аннотация

В статье описан перевод простого насосного привода в разряд редукторно-мультипликаторного. Данное решение обеспечивает значительное снижение рабочего давления и установочной мощности насосов.

Разработаны варианты двухскоростного и трехскоростного насосного редукторно-мультипликаторного привода с использованием блочных дозаторов, выполняющих функции гидравлического редуктора при холостом ходе и функции гидравлического мультипликатора - при рабочем ходе.

Ключевые слова: гидравлический привод, редуктор, мультипликатор, блочный дозатор, снижение давления, снижение мощности, рабочий ход, холостой ход.

Гидравлический привод машин имеет широкое распространение, благодаря своим преимуществам, к которым относятся надежность функционирования, возможность непосредственного получения поступательного движения и другие [1]. Наиболее часто используются насосный и насосно-аккумуляторный приводы поступательного движения.

Важным достоинством насосного привода является его более высокий к.п.д. (0,6...0,85). Другие преимущества – отсутствие постоянно высокого давления в системе, малые габариты, простое управление [1,2]. Существенным недостатком этого привода является значительная установочная мощность насосов, которая не полностью используется на значительном интервале рабочего цикла. Для компенсации этого недостатка по возможности предусматривают кратковременную работу приводных электродвигателей насосов с перегрузкой, устанавливают насосы с несколькими ступенями давления и подачи, используют маховичный привод, снабжают привод мультипликатором и наполнительным баком.

Известно также, что эксплуатационные показатели простого насосного привода с насосами постоянной подачи можно повысить, сделав его редукторно-мультипликаторным [3,4]. Такой привод имеет равномерную загрузку насосов, меньшее рабочее давление насосов и как результат этого, меньшую установочную мощность приводных двигателей насосов. Указанный эффект имеет место как в одноцилиндровом приводе [3], так и в двухцилиндровом приводе [4]. В первом случае при холостом ходе используется одинарный гидравлический редуктор, при рабочем ходе – одинарный мультипликатор. Во втором случае при холостом ходе используется простой двоярный редуктор, при рабочем ходе – простейший двоярный мультипликатор. Во втором случае дополнительно обеспечивается синхронизация работы двух силовых цилиндров силового блока.

Указанный эффект можно получить, используя в схемах управления приводом блочные редукторы-мультипликаторы (блочные дозаторы), которые при холостом ходе выполняют функции редуктора, при рабочем ходе – функции мультипликатора [5, 6]. Использование одного устройства

вместо двух потребует меньших затрат на изготовление и при эксплуатации привода.

В одноцилиндровом приводе (рис. 1, а) используется одинарный блочный дозатор 4, основу которого составляют два соосно установленных цилиндра 9 и 10 с диаметрами плунжеров d и D ($d < D$), соответственно. При подаче жидкости в цилиндр 10 и вытеснении её из цилиндра 9 дозатор работает как мультипликатор с коэффициентом мультипликации (усиления) k_M , с равным:

$$k_M = D^2/d^2. \quad (1)$$

При подаче жидкости в цилиндр 9 с вытеснением её из цилиндра 10, дозатор работает как редуктор с коэффициентом редукции k_P , равным:

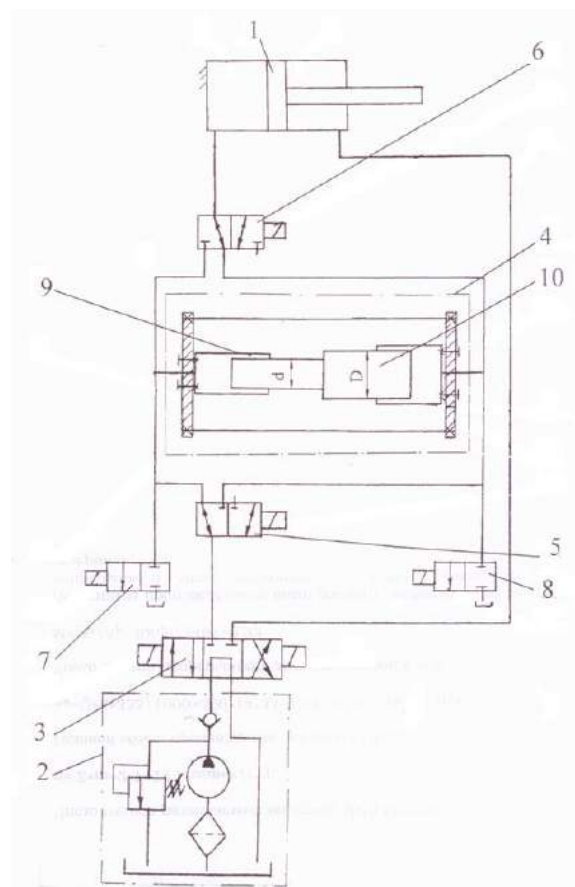
$$k_P = d^2/D^2. \quad (2)$$

При этом, в соответствии с (1) и (2) k_M и k_P связаны зависимостью

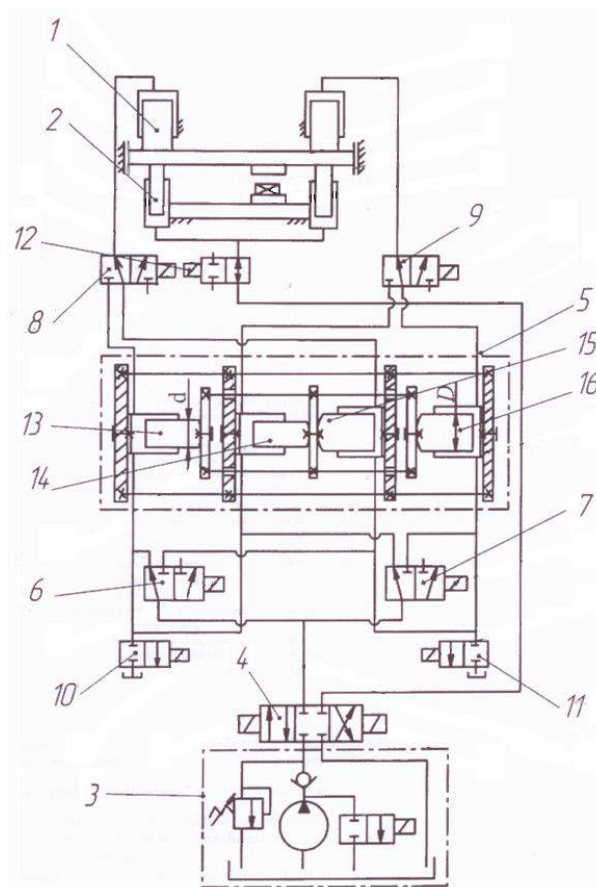
$$k_M \cdot k_P = 1. \quad (3)$$

В двухцилиндровом приводе (рис. 1, б) используется двоянный блочный дозатор 5, основу которого составляют четыре соосно установленных плунжерных цилиндра, два из которых 13 и 14 с диаметром плунжеров d и два 15 и 16 с диаметром D ($D > d$). Плунжеры всех цилиндров жёстко связаны между собой, образуя блок подвижных элементов, все корпуса цилиндров образуют неподвижный блок. Если при работе входными являются цилиндры 13 и 14, то дозатор работает как редуктор, если входными являются цилиндры 15 и 16, то дозатор работает как мультипликатор. При этом коэффициенты мультипликации и редукции определяются зависимостями (1) и (2), соответственно, а их взаимосвязь – зависимостью (3).

Варианты схем с блочными дозаторами представлены на рисунке 1. [5, 6].



а



б

Рисунок 1. Схемы трёхскоростного (а) и двухскоростного (б) редукторно-мультипликаторных приводов с блочными редуктор-мультипликаторами (дозаторами)

В приводе с одноцилиндровым силовым блоком (рис. 1, а) используется силовой цилиндр 1, насосная станция 2, реверсивный золотник 3, блочный дозатор 4, два двухпозиционные трёхходовые золотники 5 и 6 и два отсечные золотники 7 и 8. Переключает привод с прямого хода на обратный реверсивный золотник. Схема обеспечивает трёхскоростной режим работы привода при прямом ходе.

Первая ступень скорости V_{HP} (редукторная) обеспечивается подачей жидкости от золотника 3 через золотник 5 в полость цилиндра 9 дозатора 4, с последующим вытеснением её из полости цилиндра 10 через золотник 6 в поршневую полость силового цилиндра. При этом скорость V_{HP} и давление P_{HP} , развиваемое насосом, будут определяться как:

$$V_{HP} = \frac{V}{k_p} \quad P_{HP} = \frac{P_x}{k_p}, \quad (4)$$

где $V = \frac{Q_H}{F}$ - скорость поршня при подаче жидкости в силовой цилиндр непосредственно от насоса; Q_H - подача насоса; F - площадь поршня силового цилиндра; $P_x = \frac{R_x}{F}$ - давление в силовом цилиндре при холостом ходе; R_x - усилие холостого хода.

Вторая ступень скорости V (насосная) после переключения золотника 6 обеспечивается подачей жидкости через золотники 5 и 6 в поршневую полость силового цилиндра. При этом жидкость V и давление P_H , развиваемое насосом:

$$V = \frac{Q_H}{F} \quad P_H = \frac{R_p}{F}, \quad (5)$$

где R_p - усилие рабочего хода на данном перемещении.

Зависимости (5) справедливы для простого насосного привода на всей величине прямого хода.

Третья ступень скорости V_{HM} (мультипликаторная) обеспечивается подачей жидкости через золотник 5, после его переключения, в полость цилиндра 10 дозатора с последующим вытеснением её из полости цилиндра 9 через золотник 6 в поршневую по-

лость силового цилиндра. При этом скорость V_{HM} и максимальное давление P_{HM} , развиваемое насосом:

$$V_{HM} = \frac{V}{k_M} \quad P_{HM} = \frac{P_{max}}{k_M}, \quad (6)$$

где $P_{max} = \frac{R_{max}}{F}$ - максимальное давление в силовом цилиндре при рабочем ходе; R_{max} - максимальное усилие рабочего хода.

Возврат подвижного блока дозатора в исходное положение происходит при обратном ходе поршня силового цилиндра. При этом жидкость от реверсивного золотника после его переключения подаётся в штоковую полость силового цилиндра 1 и вытесняется из поршневой полости в полость цилиндра 9 или 10 дозатора (зависит от конечной позиции блока плунжеров дозатора по отношению к исходной). Жидкость из противоположного дозатора сливается при этом через отсечный золотник 7 или 8, соответственно.

В приводе с двухцилиндровым блоком (рис. 1, б) используются два силовых цилиндра 1, два возвратных - 2; насосная станция 3, реверсивный золотник 4, сдвоенный блочный дозатор 5, четыре трёхходовые трёхпозиционные золотники 6, 7, 8 и 9, три отсечных золотника 10, 11 и 12.

Привод с прямого хода на обратный переключает реверсивный золотник 4. Схема обеспечивает двухскоростной режим работы при прямом ходе.

Первая ступень скорости V_{HP} обеспечивается подачей жидкости от золотника 4 через золотники 6 и 7 в полости цилиндров дозатора 13 и 14, соответственно, с последующим вытеснением её из полостей цилиндров 15 и 16 в силовые цилиндры 1 раздельно через золотники 8 и 9. При этом V_{HP} и давление P_{HP} , развиваемое насосом определяется зависимостями (4), в которых $V = \frac{Q_H}{2F}$ - скорость прямого хода при подаче жидкости от насосов непосредственно в силовые цилиндры; $P_x = \frac{R_x}{2F}$ - среднее давление в силовых цилиндрах при холостом ходе.

Вторая ступень скорости $V_{нм}$ обеспечивается подачей жидкости через золотники 6 и 7, после их переключения, в полости цилиндров 15 и 16 дозатора с последующим вытеснением её из полостей цилиндров 13 и 14, отдельно через золотники 8 и 9, также после их переключения, в силовые цилиндры. При этом скорость $V_{нм}$ и давление $P_{нм}$, развиваемое насосом будут определяться зависимостями (6), в которых

$$P_{\max} = \frac{R_{\max}}{2F}$$

среднее максимальное давление в силовых цилиндрах при рабочем ходе.

Возврат подвижных элементов дозатора в исходное положение осуществляется с использованием жидкости сливаемой из силовых цилиндров при обратном ходе, когда жидкость от насоса через реверсивный золотник подаётся в возвратные цилиндры 2. Взаимодействие элементов схемы в этом случае подобно трёхскоростному приводу.

Заключение

Перевод простого насосного привода в разряд редукторно-мультипликаторного с использованием блочных дозаторов обеспечивает значительное снижение рабочего давления и установочной мощности насосов.

Снижение рабочего давления насосов позволяет разрабатывать насосные приводы на основе недорогих насосов среднего давления – шестерённых и пластинчатых. Особенно эффективно использование редукторно-мультипликаторного привода при относительно большом значении холостого хода и относительно низком его давлении, а также при плавном возрастании давления рабочего хода. Использование блочных дозаторов значительно снижает состав элементов привода.

Библиографический список

1. Добринский Н.С. Гидравлический привод прессов / Н.С. Добринский. – М.: Машиностроение, 1975.-222 с.
2. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. – М.: Машиностроение, 1991.-384 с.
3. Разработка и исследование гидравлического редукторно-мультипликаторного привода металлургических машин / А.П. Потапенков, С.С. Пилипенко, Ю.Г. Серебренников и др. // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2009. - №8. – С.54-59.
4. Разработка и исследование двухцилиндрового гидропривода металлургических машин / А.П. Потапенков, С.С. Пилипенко, С.М. Степанов и др. // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2011. - №2. – С.58-62.
5. Гидравлический пресс: пат. РФ №2206456 / А.П. Потапенков, В.М. Чернобай, О.В. Миняков: Норильский индустр. ин-т: Заявл. 03.06.1999; опубл. 20.06.2003.
6. Гидравлический пресс: пат. РФ №2258609 / А.П. Потапенков, В.М. Чернобай, С.С. Пилипенко и др.: Норильский индустр. ин-т: Заявл. 23.06.2003; опубл. 20.08.2005.



УДК 658.58:657.471

Н.Т. Баскакова
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: baskakovant@bk.ru
Дата поступления 08.04.2016

К ВОПРОСУ ОРГАНИЗАЦИИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация

В статье рассмотрены направления организации ремонтных работ металлургического оборудования в зависимости от предлагаемых стратегий ремонтов. Выбор стратегии ремонтов должен происходить исходя из необходимого уровня надежности критичных для деятельности предприятия производственных и технологических процессов и ограничений выделенных средств. Инновационные подходы к планированию ремонтов металлургического оборудования позволят повысить эффективность деятельности ремонтной службы и оптимизировать затраты на ремонт и техническое обслуживание.

Ключевые слова: планирование, ремонт и техническое обслуживание, металлургическое оборудование, оптимизация, затраты.

Введение

В современных условиях высокой конкуренции, мирового финансового кризиса и обострения экологических проблем важнейшей задачей любого промышленного предприятия выступает обеспечение бесперебойного устойчивого функционирования основного технологического оборудования [1].

Под устойчивостью функционирования основного технологического оборудования понимают его способность выпускать продукцию в запланированном объеме и заданной номенклатуре, а в случае аварии (повреждения) восстанавливать производство в минимально короткие сроки.

Обеспечение устойчивого функционирования основного технологического оборудования обусловлено рядом причин, основными из которых являются следующие:

– высокий износ основных производственных фондов, особенно на предприятиях химического комплекса, нефтегазовой, металлургической и горнодобывающей промышленности и снижение темпов обновления этих фондов;

– повышение технологической мощности производства, рост объемов

транспортировки, хранения и использования опасных веществ, материалов и изделий, а также накопление отходов производства, представляющих угрозу населению и окружающей среде.

Технологическое оборудование на предприятии, в виду его износа, требует постоянного технического обслуживания. Восстановление его работоспособности и эксплуатационных свойств достигается путем ремонта и уходом за оборудованием. Основу для этого на промышленных предприятиях составляет система технического обслуживания и ремонта основных фондов, представляющая собой совокупность взаимосвязанных положений, средств, организационных решений, направленных на поддержание и восстановление качества эксплуатируемых машин, механизмов, сооружений, зданий и других элементов основных фондов. Причем в ходе ремонта необходимо не только восстанавливать первоначальное состояние оборудования, но и значительно улучшать его основные технические характеристики за счет модернизации и других видов обновления основных средств [2].

Особенности организации системы технического обслуживания и ремонта

Сущность ремонта заключается в сохранении и качественном восстановлении работоспособности оборудования путем замены или восстановления изношенных деталей и регулировки механизмов согласно системе технического обслуживания и ремонта (ТОиР), основанной на применении ГОСТ 18322-78 «Система технического обслуживания и ремонта техники».

Термины и определения. (Equipment maintenance and repair system. Terms and definitions).

Система технического обслуживания и ремонта представляет собой совокупность взаимосвязанных средств, документации технического обслуживания и ремонта и исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления качества изделий, входящих в эту систему (рисунок 1).



Рисунок 1. Состав и структура системы технического обслуживания и ремонта

Основными показателями системы ТОиР являются следующие.

Технического обслуживания - комплекс операций или операция по поддержанию работоспособности или исправности изделия при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортированию.

Ремонт - комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности изделий и восстановлению ресурсов изделий или их составных частей.

Метод технического обслуживания (ремонта) или способ обслуживания (ремонта) - совокупность технологических и организационных правил выполнения операций технического обслуживания (ремонта).

Процессный и ситуационный подходы к организации системы ТОиР основан на следующих этапах:

- **ситуационный подход**: проведение диагностики надежности и ремонтпригодности оборудования, структурного анализа выявления «узких мест», техническая диагностика оборудования, прогнозирование технического состояния.

- **процессный подход**: анализ и прогнозирование уровня надежности оборудования. Анализ видов, последствий и критичностью отказов, управление надежностью;

- выбор системы критериев «узких мест» при детализации описания оборудования;

- выбор и разработка стратегии ремонтов и амортизационной политики, расчет оптимального срока эксплуатации и даты замены;

▪ *проектный подход* к выполнению больших ремонтов (планирование ремонтов);

▪ оценка эффективности управленческого решения:

- по оптимизации материально-технического снабжения, номенклатуры, расположения и уровня запасов пр.;

- реализация планово-предупредительного технического обслуживания (ТО) согласно ремонтной документации (РД),

- регулирование работ по ТОиР по результатам мониторинга фактического состояния, ремонтпригодности и наработки на отказ. Выбор оптимальной структуры ремонтного цикла, видов ТО и параметров цикла.

Процедура мониторинга фактического состояния оборудования должна базироваться на следующих показателях системы ТОиР.

Производственные показатели:

– степень загрузки основных агрегатов, доля плановых и неплановых остановок;

– степень унификации оборудования - количество типов и марок оборудования;

– показатели надежности оборудования: наработка на отказ; количество отказов по группам оборудования; среднее время восстановления работоспособности

оборудования; коэффициент технического использования;

– среднее время поиска технической и эксплуатационной информации;

– уровень подготовки персонала.

Финансовые показатели:

• первоначальная стоимость основных фондов, степень износа оборудования;

• численность персонала ремонтной службы;

• фонд оплаты труда ремонтного персонала;

• затраты на ТОиР, затраты на ТОиР на единицу продукции, на 1 МВт установленной мощности;

• доля затрат на ТОиР в себестоимости продукции по видам;

• доля плановых и аварийных работ в общем числе ремонтов по количеству, трудоемкости, стоимости;

• стоимость запасов цеховых складов по ремонтной номенклатуре запасных частей;

• годовой бюджет ТОиР (точность его составления, % отклонения от факта);

• затраты на автоматизацию процесса ТОиР.

Основные характеристики показателей системы технического обслуживания и ремонта приведены в табл.1.

Таблица 1

Показатели системы технического обслуживания и ремонта

Показатель	Понятие
1. Средняя продолжительность технического обслуживания (ремонта)	Математическое ожидание продолжительности одного технического обслуживания (ремонта) данного вида за определенные период эксплуатации или наработку
2. Средняя трудоемкость технического обслуживания (ремонта)	Математическое ожидание трудоемкости одного технического обслуживания (ремонта) данного вида за определенные период эксплуатации или наработку
3. Средняя стоимость технического обслуживания (ремонта)	Математическое ожидание стоимости одного технического обслуживания (ремонта) данного вида за определенные период эксплуатации или наработку
4. Средняя суммарная продолжительность технических обслуживаний (ремонтов)	Математическое ожидание суммарной продолжительности технических обслуживаний (ремонтов) за определенный период эксплуатации или наработку
5. Средняя суммарная трудоемкость технических обслуживаний (ремонтов)	Математическое ожидание суммарной трудоемкости технических обслуживаний (ремонтов) за определенный период эксплуатации или наработку
6. Средняя суммарная стоимость технических обслуживаний (ремонтов)	Математическое ожидание суммарной стоимости технических обслуживаний (ремонтов) за определенный период эксплуатации или наработку

Показатель	Понятие
7. Удельная суммарная продолжительность технических обслуживаний (ремонтов)	Отношение средней суммарной продолжительности технических обслуживаний (ремонтов) к заданной наработке
8. Удельная суммарная трудоемкость технических обслуживаний (ремонтов)	Отношение средней суммарной трудоемкости технических обслуживаний (ремонтов) к заданной наработке
9. Удельная суммарная стоимость технических обслуживаний (ремонтов)	Отношение средней суммарной стоимости технических обслуживаний (ремонтов) к заданной наработке
10. Коэффициент готовности	Вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение изделия по назначению не предусматривается
11. Коэффициент технического использования	Отношение математического ожидания суммарного времени пребывания изделия в работоспособном состоянии за некоторый период к математическому ожиданию суммарного времени пребывания изделия в работоспособном состоянии и простоях, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период
12. Готовность парка изделий	Отношение числа работоспособных изделий к общему числу изделий парка в рассматриваемый момент времени

Регулирование и настройка системы ТОиР осуществляется через:

- формирование механизма учета и выявления причин отказов оборудования;
- формирование механизма контроля соблюдения правил эксплуатации оборудования;
- формирование механизма контроля качества ремонта и надежности технического обслуживания оборудования.

Согласно ГОСТ 18322-78 «Система технического обслуживания и ремонта техники». «Термины и определения» выделяются следующие классификационные признаки терминов, используемых при организации системы ТОиР (рис.2 - рис.4).

Рассмотрим классификацию видов и методов технического обслуживания и ремонтов, и их характеристики.

Виды технического обслуживания согласно ГОСТ 18322-78 подразделяются на следующие направления (рис.2 – рис.3).

Техническое обслуживание при использовании означает техническое обслуживание при подготовке к использованию по назначению, использовании по назначению, а также непосредственно после его окончания.

Техническое обслуживание при ожидании означает техническое обслуживание при ожидании к использованию.

Техническое обслуживание при хранении означает техническое обслуживание при подготовке к хранению, хранении, а также непосредственно после его окончания.

Техническое обслуживание при транспортировании означает техническое обслуживание при подготовке к транспортированию, транспортировании, а также непосредственно после его окончания.

Периодическое техническое обслуживание означает техническое обслуживание, выполняемое через установленные в эксплуатационной документации значения наработки или интервалы времени.

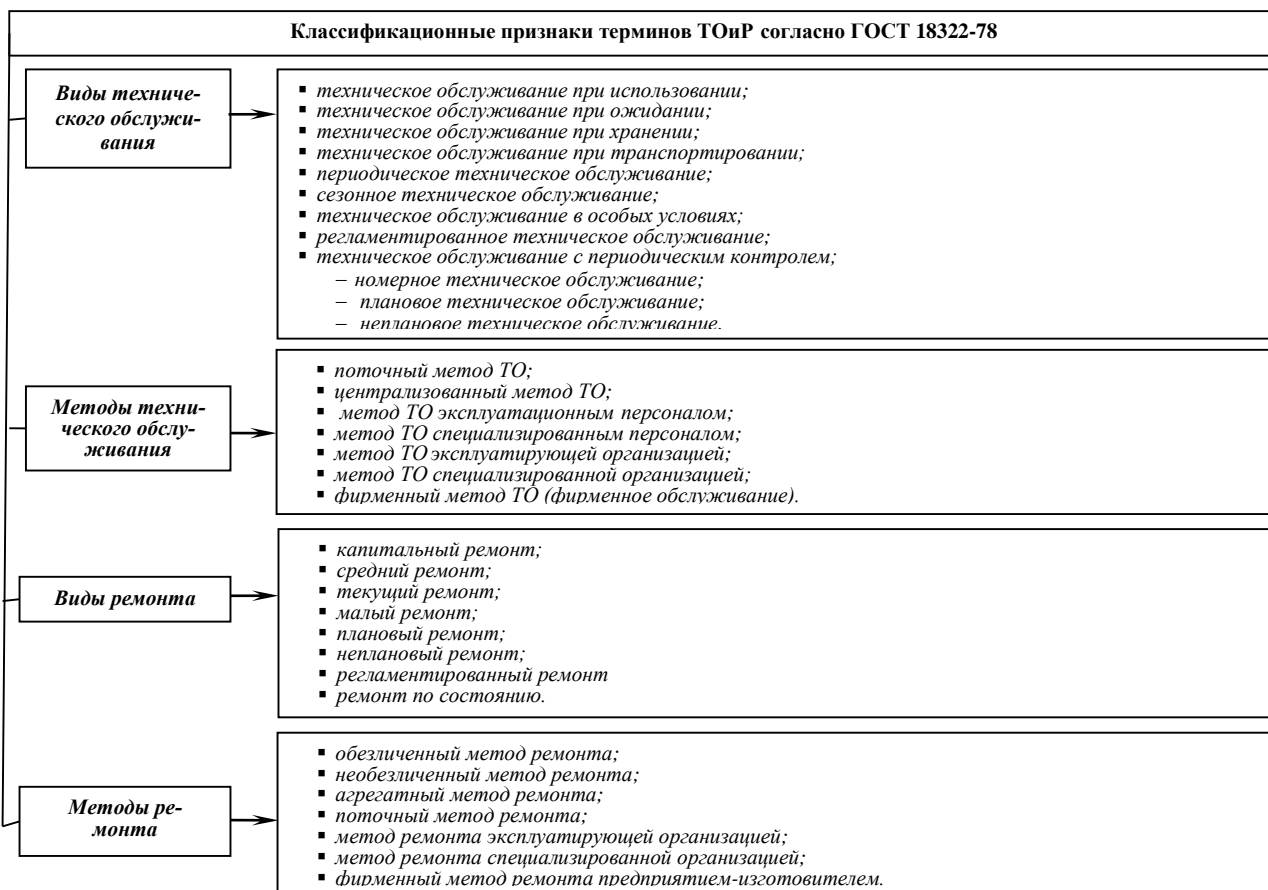


Рисунок 2. Классификация ТО и ремонтов системы технического обслуживания и ремонта по ГОСТ 18322-78



Рисунок 3. Классификация ТО системы технического обслуживания и ремонта по ГОСТ 18322-78

Сезонное техническое обслуживание означает техническое обслуживание, выполняемое для подготовки изделия к использованию в осенне-зимних или весенне-летних условиях.

Техническое обслуживание в особых условиях означает техническое обслуживание, выполняемое в особых климатических условиях. Примерами особых условий являются природные или другие условия, указанные в отраслевой документации, характеризующиеся экстремальными значениями параметров.

Регламентированное техническое обслуживание означает техническое обслуживание, предусмотренное в нормативно-технической или эксплуатационной документации и выполняемое с периодичностью и в объеме, установленными в ней, независимо от технического состояния изделия в момент начала технического обслуживания.

Техническое обслуживание с периодическим контролем означает техническое обслуживание, при котором контроль технического состояния выполняется с установленными в нормативно-технической или эксплуатационной документации периодичностью и объемом, а объем остальных операций определяется техническим состоянием изделия в момент начала технического обслуживания.

Техническое обслуживание с непрерывным контролем означает техническое обслуживание, предусмотренное в нормативно-технической или эксплуатационной документации и выполняемое по результатам непрерывного контроля технического состояния изделия.

а) номерное техническое обслуживание означает техническое обслуживание, при котором определенному объему работ присваивается определенный порядковый номер;

б) плановое техническое обслуживание означает техническое обслуживание, постановка на которое осуществляется в соответствии с требованиями нормативно-технической или эксплуатационной документации;

в) неплановое техническое обслуживание означает техническое обслуживание, постановка на которое осуществляется без предварительного назначения по техническому состоянию.

Методы выполнения технического обслуживания согласно ГОСТ 18322-78 подразделяются на следующие виды.

Поточный метод технического обслуживания означает метод выполнения технического обслуживания на специализированных рабочих местах, с определенной технологической последовательностью и ритмом.

Централизованный метод технического обслуживания означает метод выполнения технического обслуживания персоналом и средствами одного подразделения организации или предприятия.

Децентрализованный метод технического обслуживания означает метод выполнения технического обслуживания персоналом и средствами нескольких подразделений организации или предприятия.

Метод технического обслуживания эксплуатационным персоналом означает метод выполнения технического обслуживания персоналом, работающим на данном изделии, при использовании его по назначению.

Метод технического обслуживания специализированным персоналом означает метод выполнения технического обслуживания персоналом, специализированным на выполнении операций технического обслуживания.

Метод технического обслуживания эксплуатирующей организацией означает метод выполнения технического обслуживания персоналом предприятия (хозяйственный способ).

Метод технического обслуживания специализированной организацией означает метод выполнения технического обслуживания организацией, специализированной на операциях технического обслуживания.

Фирменный метод технического обслуживания (Фирменное обслуживание)

ние) означает метод выполнения технического обслуживания предприятием-изготовителем.

В соответствии с характером выполняемых работ и степенью восстановления ресурса, различают следующие виды ремонта: малый, средний, текущий, капитальный (рисунок 2, рисунок 4).

Капитальный ремонт (К) выполняется для восстановления исправности и полного, или близкого к полному восстановлению ресурса изделия с заменой или восстановлением любых его частей, включая базовые. (Значение, близкое к полному ресурсу, устанавливается в нормативно-технической документации).

В объем капитального ремонта входят следующие работы:

- объем работ текущего ремонта;
- замена или восстановление всех изношенных агрегатов, узлов и деталей;
- выверка и центровка оборудования;

- послеремонтные испытания.

Для выполнения капитального ремонта на предприятии должны иметься ТУ на каждое наименование ремонтируемого оборудования.

Средний ремонт (С) производится для восстановления неисправности и частичного ресурса изделий с заменой или восстановлением составных частей ограниченной номенклатуры и контролем технического состояния составных частей, выполняемом в объеме, установленном в нормативно-технической документации. (Значение частично восстанавливаемого ресурса устанавливается в нормативно-технической документации).

Текущий ремонт (Т) осуществляется для восстановления или обеспечения работоспособности изделия и состоит в замене и (или) восстановлении отдельных частей изделия (устранении неисправностей).



Рисунок 4. Классификация ремонтов системы технического обслуживания и ремонта по ГОСТ 18322-78

В зависимости от конструктивных особенностей оборудования, характера и объема проводимых работ текущие ремонты могут подразделяться на первый текущий ремонт (T_1), второй текущий ремонт (T_2) и т.д.

Текущие ремонты (T_1 , T_2) – как правило, выполняются силами специализированных ремонтных и наладочных предприятий. При текущих ремонтах производят замену изношенных деталей, регулирование узлов машин и механизмов для обеспечения их нормальной эксплуатации до следующего планового ремонта.

Дополнительные текущие ремонты (T_3 и T_4) могут предусматриваться заводом-изготовителем для отдельных видов оборудования.

Перечень обязательных работ, подлежащих выполнению при текущем ремонте, должен быть определен в ремонтной документации цеха (подразделения).

При текущем ремонте, как правило, выполняются:

- работы регламентированного ТО;
- замена (или восстановление) отдельных узлов и деталей;
- ревизия оборудования;
- проверка на точность.

Малый (мелкий) ремонт (М) включает в себя детальный осмотр, смену и замену износившихся частей, выявление деталей, требующих замены при ближайшем плановом ремонте (среднем, капитальном) и составление дефектной ведомости для него (ремонта), проверку на точность, испытание.

Плановый ремонт - ремонт, остановка на который осуществляется в соответствии с требованиями нормативно-технической документации.

Неплановый ремонт - ремонт, остановка на который осуществляется без предварительного назначения.

Регламентированный ремонт - плановый ремонт, выполняемый с периодичностью и в объеме, установленными в эксплуатационной документации, независимо от технического состояния изделия в момент начала ремонта.

Ремонт по техническому состоянию – ремонт, при котором контроль технического состояния выполняется с периодичностью и в объеме, установленными в нормативно-технической документации, а объем и момент начала ремонта определяется техническим состоянием изделия.

Различают следующие методы (виды организации) ремонта по сохранению принадлежности ремонтируемых частей: обезличенный, необезличенный и агрегатный метод ремонта.

При обезличенном методе (обезличенный ремонт) не сохраняется принадлежность восстанавливаемых составных частей к определенному экземпляру ремонтируемой техники (изделий).

При необезличенном методе сохраняется принадлежность восстанавливаемых составных частей к определенному экземпляру техники (его иногда называют индивидуальным методом).

Агрегатный метод ремонта - обезличенный метод ремонта, при котором неисправные агрегаты заменяются новыми или заранее отремонтированными. **Под агрегатом** понимается сборочная единица, обладающая свойствами полной взаимозаменяемости, независимой сборки и самостоятельного выполнения определенной функции в изделиях различного назначения, например, электродвигатель, редуктор, насос и т. д.

Различают также следующие методы ремонта по организации их выполнения.

Поточным методом организации ремонта называют такой метод, при котором ремонт выполняют на специализированных рабочих местах с определенным технологической последовательностью и ритмом.

Метод ремонта эксплуатирующей организацией метод выполнения ремонта персоналом предприятия (хоз. способ).

Метод ремонта специализированной организацией - метод выполнения ремонта организацией, специализированной на операциях ремонта.

Фирменный метод ремонта (фирменный ремонт) - метод выполнения ремонта предприятием-изготовителем.

Другие варианты классификации приведены на рисунке 5.

Суть *тупикового метода* заключается в том, что отдельные сборочные единицы могут ремонтироваться на специальных производственных участках.

При *агрегатно-обезличенном методе* организации ремонта неисправные агрегаты заменяются новыми или заранее отремонтированными.

При *последовательно-агрегатном методе* конструктивно обособленные сборочные единицы ремонтируются последовательно на одной единице оборудования во время перерывов (в нерабочее время, без остановки производства).

Поточно-узловым методом называют сочетание поточного и агрегатного методов.

Метод организации ремонта по техническому состоянию подразумевает осуществление контроля технического состояния с периодичностью и в объеме, установленными в технических условиях, эксплуатационной и ремонтной документации.

При этом объем и момент необходимости ремонта определяется техническим состоянием объекта основных средств.

Ремонт оборудования может осуществляться с применением следующих стратегий ремонта:

- регламентированная;
- смешанная;
- по техническому состоянию;
- по потребности.

Сущность стратегии регламентированного ремонта заключается в том, что ремонт выполняется с периодичностью и в объеме, установленном в эксплуатационной документации независимо от технического состояния составных частей оборудования в момент начала ремонта.

Сущность смешанной стратегии ремонта заключается в том, что ремонт выполняется с периодичностью, установленной в НТД, а объем операций восстановления формируется на основе требований эксплуатационной документации с учетом технического состояния основных частей оборудования.



Рисунок 5. Классификация ремонтных работ

Сущность стратегии ремонта по техническому состоянию заключается в том, что контроль технического состояния выполняется с периодичностью и в объеме, установленном в НТД, а момент начала ремонта и объем восстановления определяется техническим состоянием составных частей оборудования.

Сущность стратегии ремонта по потребности заключается в том, что ремонт оборудования производится только в случае отказа или повреждения составных частей оборудования.

Ремонт оборудования производится в соответствии с действующим на предприятии ППО оборудования.

Организационная подготовка проведения ремонтных работ может быть выполнена с применением одного из следующих методов: централизованным, децентрализованным и смешанным.

Централизованная система – это метод выполнения технического обслуживания основных средств персоналом и средствами специализированного предприятия или собственными подразделениями.

Децентрализованная система присутствует на предприятиях с крупносерийным и массовым производством продукции, когда в цехах находится значительное количество оборудования. Ремонтные работы, включая и изготовление части сменных деталей, осуществляются средствами и силами цеховых ремонтных служб [1].

Смешанная система характеризуется тем, что ремонтные работы выполняются не только цеховой ремонтной службой, но и службами головного предприятия. Не исключается также организация технического обслуживания оборудования в одних цехах по централизованному методу, в других – по децентрализованному.

По времени проведения различают следующие виды технического обслуживания: периодическое, регламентированное, сезонное.

Периодическое техническое обслуживание выполняется через установленные в эксплуатационной документации значения наработки или интервалы времени.

Регламентированное техническое обслуживание предусматривается в нормативно-технической и эксплуатационной документации и выполняется с периодичностью и в объеме, установленным в ней, независимо от технического состояния в момент его начала.

Сезонное техническое обслуживание осуществляется для подготовки изделия к использованию в осенне-зимних и весенне-летних условиях.

Техническое обслуживание может быть плановым, если постанова на него изделий осуществляется в соответствии с требованиями нормативно-технической документации или эксплуатационной документации, а внеплановым – без предварительного назначения по техническому состоянию.

По нашему мнению, в представленных классификациях не отражен классификационный признак «по процессам планирования ремонтов, связанных с оценкой состояния оборудования». Значимость этого классификационного признака обусловлена тем, что современные подходы к разработке вариантов стратегии организации ТОиР базируются на теории ограничений. В связи с этим в классификации ремонтных работ (рис. 5) добавлен признак классификации «вариант стратегии организации ремонтов».

Таким образом, с добавленным классификационным признаком совершенствуется базовая классификация ТОиР – использование новаций фундаментальных теорий.

Существуют следующие подходы – по вариантам стратегии организации ремонтов [3]:

- **бездействие**, когда не устраняется поломка оборудования, из-за отсутствия средств согласно выделенному бюджету. Стратегия нереагирования предполагает отсутствие каких-либо действий, связанных с ремонтом оборудования. Такая стратегия возможна у малобюджетных предприятий или при наличии резервного оборудования;

- **обслуживание «по событию» или по факту поломки**, когда устраняется по-

ломка оборудования. Такой подход используется при относительно низких затратах на ремонт. Стратегия ТОиР «по событию» имеет право на существование, если себестоимость ремонта относительно низкая, а брак продукции, полученный в результате поломки оборудования, не высок и не повлияет на непрерывность производственного цикла и выполнение обязательств перед заказчиками;

- **регламентное или плановое обслуживание** проводится вне зависимости от состояния оборудования, имеет самую высокую надежность, но и самую высокую стоимость ремонта, так как реальное состояние оборудования может и не требовать ремонта. Стратегия планового (регламентного) обслуживания и ремонта оборудования дает самый высокий процент готовности оборудования, но затраты на данный вид обслуживания очень высоки, и часто необоснованны;

- **обслуживание «по фактическому состоянию»** предполагает оценку состояния оборудования и прогноз вывода оборудования на ТОиР, не только предупреждает проблемы, но и совершенствует оборудование;

- **обслуживание «мирового класса»** означает выявление и устранение дефектов, которые снижают производительность предприятия, увеличивают объем промышленных отходов и создают угрозу аварий, сопровождающихся загрязнениями окружающей среды.

Первые два подхода не учитывают реальное состояние оборудования, что приводит к созданию аварийных ситуаций, а, следовательно, к внеплановым ремонтам оборудования и отсутствию системности планирования. Третий подход приводит к формированию излишних запасов запасных частей. Четвертый и пятый подходы требуют определения узких мест и детализации мероприятий по ТОиР, способных привести к необоснованным потерям и упущенной выгоде, а также к загрязнению окружающей среды.

Для крупных промышленных предприятий с непрерывным производственным циклом и с большим количеством про-

изводственного оборудования наиболее эффективной является стратегия ТОиР «концепция производственного планирования на основе эффективного использования ограничений», формируемая путем оптимизации затрат на техническое обслуживание и ремонт основных производственных фондов (ОПФ) основе определения узких мест и упущенной выгоды из-за их простоев.

Несовершенство существующих систем планирования, учета и контроля затрат на ТОиР приводит к росту затрат на ремонты, повышению себестоимости продукции и, как следствие, тормозит развитие предприятия с точки зрения его конкурентоспособности. Необходим новый подход в планировании затрат на ремонтно-эксплуатационное обслуживание оборудования. И такой подход существует - это система обслуживания и ремонта «мирового класса» с использованием теории ограничений.

Направления совершенствования организации системы ТОиР

Анализ классификационных признаков организации ремонтных работ направлен на учет принципов системности и ситуационности, использовании новаций в организации системы ТОиР и стратегию ремонтных работ на предприятии. По принципу системности при выборе варианта стратегии организации ТОиР необходимо учитывать альтернативные подходы (агрессивный и консервативный). Такое направление анализа позволяет, в свою очередь, разрабатывать политику деятельности ремонтной службы [4].

Первая и самая сложная задача - выбор оптимальной модели организации сервиса на предприятии. Методология управления ремонтами, ориентированная на решение практических проблем, может базироваться на широком спектре стратегий. При этом под **стратегией ремонтов** понимаются подходы к организации и оценке эффективности работ по ТОиР.

Стратегия Total Productive Maintenance (TPM) – Управление профилактическим обслуживанием. Используемая в настоящее время система TPM, созданная в Японии в 60-70 годах, направлена

на повышение эффективности работы оборудования за счет самостоятельного обслуживания его операторами агрегатов, охватывает процессы организации ремонтных работ и почти не затрагивает процессы их планирования.

Стратегия «Lean production (LP) – Бережливое производство» – представляет собой подход к управлению организацией, направленный на повышение качества работы за счет сокращения потерь. Эта стратегия основана на принципах *TPM* и фокусируется на устранении неоправданных потерь в процессе производства, что ведет к снижению издержек производства.

Стратегия «World Class Manufacturing (WCM) – Производство мирового класса» – устойчивый термин, появившийся в середине 80-х годов XX века и обозначающий компанию, успешно и стабильно работающую, развивающуюся, конкурирующую на своем рынке. Производство мирового класса означает превосходство или равенство с конкурентами в инновациях, качестве, цене, гибкости, дисциплине поставок и сервисе.

Стратегия управления деятельностью предприятий на основе «The Theory of Constraints-(ТОС) – Теория ограничений», в свою очередь, нацелена на максимизацию скорости генерации дохода. Метод управления на основе ограничений, разработанный Э. Голдратом [5, 6, 7, 8], может быть применен для управления любой операционной системой, включая и управление ТООР, которое позволяет определить упущенную выгоду из-за простоев так называемых «узких мест» – ограничений, уменьшающих объем выпуска продукции.

Использование стратегии «Бережливого производства» без учета ограничений не позволяет концентрировать ресурсы на устранение проблем, вызванных наличием «узких мест». В рамках теории ограничений основной задачей WCM будет поиск и устранение «узких мест» производственного процесса в целом. Основное внимание в системе должно уделяться оборудованию, которое оказывает максимальное влияние на результаты деятельности предприятия, и

сосредоточению дефицитных экономических ресурсов на объектах, отказ которых может вызвать наибольшие проблемы.

Одной из самых эффективных стратегий, позволяющих предприятию оптимизировать свою программу по обслуживанию и ремонту активов, является **стратегия «Reliability-Centered Maintenance (RCM) – Обслуживание, ориентированное на надежность»** [9-12]. Стратегия RCM основана на постулате, согласно которому поддержание единицы оборудования в безупречном состоянии не является самоцелью, целью же является обеспечение надежности критичных для деятельности предприятия производственных и технологических процессов.

RCM-анализ дает возможность предсказывать отказ по целой совокупности параметров. Он помогает отказаться от плановых, порой неэффективных, операций. Реально ремонтируется только то оборудование, которое действительно в этом нуждается

Переход к наиболее эффективным **стратегиям планирования и обслуживания** помогает высвободить резервы снижения затрат и роста прибыли.

Библиографический список

- 1 Баринов А.А. Управление ремонтом и техническим обслуживанием оборудования // Экономика и жизнь. 2009. № 31.
- 2 Жиркин Ю.В. Надежность, эксплуатация и ремонт металлургических машин. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2002. – 330 с.
- 3 Уинстон Лиде, Пол А. Монус Совершенствование без планового техобслуживания // Стандарты и качество. Деловое совершенство. 2006. №7. – С.12 – 14.
- 4 Баскакова Н.Т. Инновационные подходы в планировании ремонтов металлургического оборудования на основе теории ограничений: Монография. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2014. – 133 с.

- 5 Goldratt Eliyahu M. The haystack syndrome: sifting information out of the data ocean. – NY.: North River Press, 1990. – 262 p.
- 6 Goldratt Eliyahu M., Cox Jeff. The Goal: process of ongoing improvement. – NY.: North River Press, 1992. – 271 p.
- 7 Noreen E., Smith D., Mackey James T. The theory of constraints and its implications for management accounting. – NY.: North River Press, 1995. – 187 p.
- 8 Goldratt Eliyahu M., Fox Bob E. The race. – NY.: North River Press, 1986. – 179 p.
- 9 Детмер У. Теория ограничений Голдратта: системный подход к непрерывному совершенствованию. - Издательство Альпина Бизнес Букс, 2008 - 443 с.
- 10 Лубуж П. «World Class Manufacturing: инструмент выживания»// Strategy.ru осень 2011. 2011. – С. 40-43
- 11 Шухгальтер М. / Проблемы экономики ремонта оборудования на российских промышленных предприятиях / М. Шухгальтер// Экономика и жизнь. 2009. №26. – С. 20-27
- 12 Евстафьев И.Н. Организация сбора данных для выбора оптимальной стратегии управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования // Металлург. 2009. №3. – С. 30-33.



УДК 621.745

С.Л. Ровин

Научно-производственное республиканское
унитарное предприятие «Технолит»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: technolit@tut.by
Дата поступления 22.04.2016

КОНСТРУКЦИЯ РОТАЦИОННЫХ НАКЛОНЯЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ

Аннотация

Ротационные наклоняющиеся печи (РНП) – новый тип топливных печей, обеспечивающий наиболее эффективный нагрев и переработку (рециклинг) дисперсных металлоотходов. В отличие от традиционно применяемых в литейных и металлургических цехах дуговых, индукционных, отражательных и шахтных плавильных печей РНП не требуют предварительной подготовки дисперсного сырья: удаления влаги, очистки от масел, гомогенизации, окомковывания и т.д.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования движения материалов и газового неизотермического потока в РНП, даны рекомендации по расчету и конструированию ротационных наклоняющихся печей.

Апробированные технические решения расширяют сферы применения РНП в литейном и металлургическом производстве, открывают перспективу создания рентабельного малотоннажного рециклинга образующихся на предприятиях дисперсных отходов черных и цветных металлов.

Ключевые слова: ротационные наклоняющиеся печи, рециклинг, дисперсные металлоотходы, процессы тепломассообмена, компьютерное моделирование.

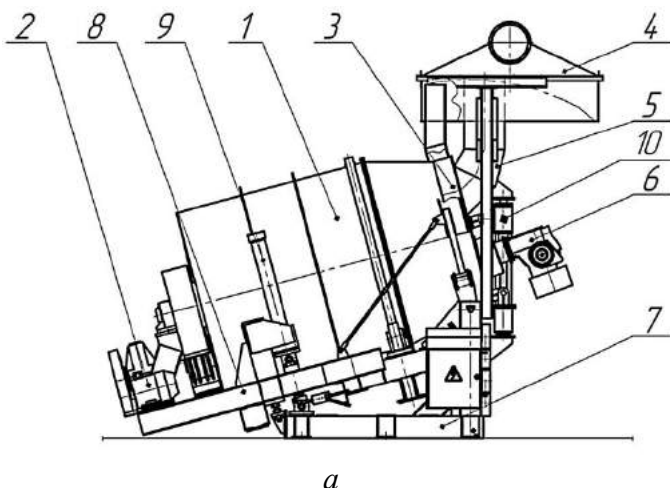
Введение

Ротационные наклоняющиеся плавильные печи (РНП), появившись относительно недавно – в 90-х годах прошлого столетия, благодаря существенным техно-

логическим преимуществам нашли широкое применение во вторичной металлургии алюминиевых, медных, свинцовых и других цветных сплавов, как наиболее эффективный агрегат для рециклинга дисперсных

отходов [1]. РНП успешно позволяют переработать не только металлические – мелкий скрап, высечку, обрезь, стружку и т.п., но и многокомпонентные отходы, состоящие в основном из соединений металлов, – шламы, аспирационную пыль, шлаки и т.д. (рисунок 1). Так, в процессах получения черного свинца из аккумуляторного лома РНП составляют сегодня около 60% всего парка плавильных агрегатов [2].

Термический к.п.д. (т.к.п.д.) ротационных наклоняющихся печей при нагреве дисперсных материалов, например стружки, в 2-3 раза превышает т.к.п.д. индукционных и дуговых печей, а также традиционных короткобарабанных, и в 4-5 раз т.к.п.д. печей отражательного типа. РНП обеспечивают возможность ведения методического режима обработки, как по температуре, так и по составу атмосферы печи,



что позволяет не только переплавлять шихтовые материалы, но и восстанавливать металлы из оксидов, сульфатов, сульфидов и других соединений [3].

Шлак в таких печах перегрет и имеет высокую активность. Печи позволяют в случае необходимости провести доводку сплава и его рафинирование перед разливкой. Ротационные печи могут работать на жидком и газообразном топливе, а в качестве восстановителей использовать любые углеродосодержащие материалы, в том числе дисперсные отходы вплоть до лигнина. Достоинством таких печей являются относительно низкие инвестиционные затраты, компактность, удобство обслуживания и высокая степень управляемости металлургических процессов.



Рисунок 1. Ротационная наклоняющаяся печь:

- а* – общий вид (1 – корпус печи; 2 – привод вращения; 3 – крышка поворотная; 4 – зонт; 5 – дымоход; 6 – горелка; 7 – рама опорная; 8 – рама поворотная; 9 – привод наклона печи; 10 – опорная стойка и привод поворота крышки);
б – РНП для производства черного свинца из аккумуляторного лома емкостью 3,5 тонны

РНП наилучшим образом отвечают задаче переработки дисперсных влажных, загрязненных маслами и случайными неметаллическими примесями металлоотходов, позволяя исключить необходимость их предварительной подготовки: сушки, очистки, гомогенизации, окомковывания и т.д.

Исследования и практические результаты, полученные белорусскими учеными

(НП УП «Технолит», ГГТУ им. П.О. Сухого, БНТУ), свидетельствуют о перспективе использования РНП и для рециклинга дисперсных железосодержащих отходов, как достойной альтернативе известным методам получения железа для стран и регионов с развитым машиностроением, не имеющих собственных ГОКов и полномасштабного металлургического производства [3].

Основная часть

1. Движение материала.

Движение дисперсного материала во вращающихся (ротационных) печах определяется силами аутогезии (межчастичных связей), внутреннего трения в слое, силами адгезии и внешнего трения на границе «материал-футеровка», силами инерции (в том числе центробежными) и силой тяжести. Кроме того, на верхний слой частиц активно действуют аэродинамические силы вращающегося скоростного потока газов.

При увеличении скорости вращения корпуса печи, интенсивность перемешивания повышается. Чем больше силы аутогезии и сцепление материала с поверхностью футеровки, тем выше поднимается материал при повороте печи и тем интенсивнее разрушается (сдвигается и обрушивается) слой. В первом приближении для понимания механики движения материалов в ротационных печах различного типа может быть использована известная модель, описывающая поведение шаров во вращающемся барабане (рисунок 2) [4].

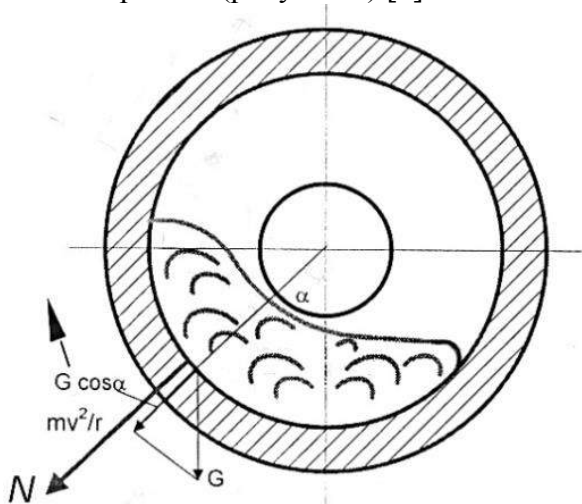


Рисунок 2. Схема распределения сил, действующих на материал в шаровой модели

На частички массой (m), расположенные в непосредственной близости от поверхности барабана, действует радиальная сила N , возникающая от действия центробежной силы и радиального вектора веса:

$$N = \frac{m \cdot v^2}{r} \pm m \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

где m – масса рассматриваемой частички материала, кг;

v – мгновенная линейная скорость частички материала, м/с;

r – расстояние от оси вращения до частички (в данном случае – внутренний радиус барабана), м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

α – угол поворота (смещения частички) относительно вертикальной оси, град.

Во время вращения барабана, сила N вызывает трение между частицами материала и поверхностью барабана, в результате чего, происходит «прилипание» частиц к поверхности ($F_{TP} = N \cdot K_{TP}$, где K_{TP} – коэффициент трения) их подъем и ускорение. Силы межчастичного взаимодействия и адгезии материала к поверхности печи в шаровой модели не учитываются.

С увеличением угла α радиальная компонента веса уменьшается и меняет знак после того, как частицы перейдут через горизонтальную ось ($\alpha = 90^\circ$, $\cos \alpha = 0$). В зависимости от скорости, раньше или позже, частица теряет контакт с поверхностью барабана и падает или соскальзывает вниз по поверхности слоя.

При критической скорости ($v_{кр}$) центробежная сила уравнивает вес частички. Если достигнута или превышена эта скорость, материал не отрывается от внутренней поверхности барабана даже в верхней точке, когда $\cos \alpha = 1$

$$\frac{m \cdot v_{кр}^2}{r} = m \cdot g, \text{ отсюда } v_{кр} = \sqrt{g \cdot r} \quad (2)$$

Чтобы такая ситуация имела место для печи с внутренним радиусом $r=1$ м, скорость вращения должна быть не менее 30 об/мин. В тоже время ротационные нагревательные и плавильные печи имеют скорость вращения, как правило, не более 3–6 об/мин. Поэтому центробежные силы не играют здесь определяющую роль.

На практике подъем материала и его обрушение (соскальзывание) в большей мере зависят от степени наполнения печи, сил внутреннего трения в слое и внешнего трения на границе «материал – поверхность печи». Под действием этих сил при вращении печи дисперсные материалы занимают сегмент, соответствующий углу 120–160°. Часть слоя, увлекаемая подложкой (поверх-

ностью футеровки), достигает точки отрыва (угол $90-120^\circ$ к вертикали) и под действием силы тяжести скатывается (соскальзывает) по поверхности слоя.

Существенное значение имеет также форма частиц материала, которая у большинства металлоотходов существенно отличается от шаровидной. Так, например, характерными элементами стружки и окарины являются пластинки (чешуйки), имеющие коэффициент формы (f_ϕ) от 1,5-2 до 7-7,5 [5].

В сечении слоя, перпендикулярном оси вращения печи, образуется так называемый «чечевицеобразный» профиль. Эта

форма наблюдается как в промышленных печах, так и на имитационных моделях (рисунок 3).

В общем случае в поперечном сечении слоя можно выделить две характерных зоны. Первую – циркуляционную зону образует периферия, примыкающая к свободной поверхности слоя и поверхности, соприкасающейся с корпусом печи. Материал в этой зоне движется наиболее активно: захватывается поверхностью печи, поднимается вверх, отрывается в верхней точке от стенки печи, обрушивается и скользит по свободной поверхности слоя.

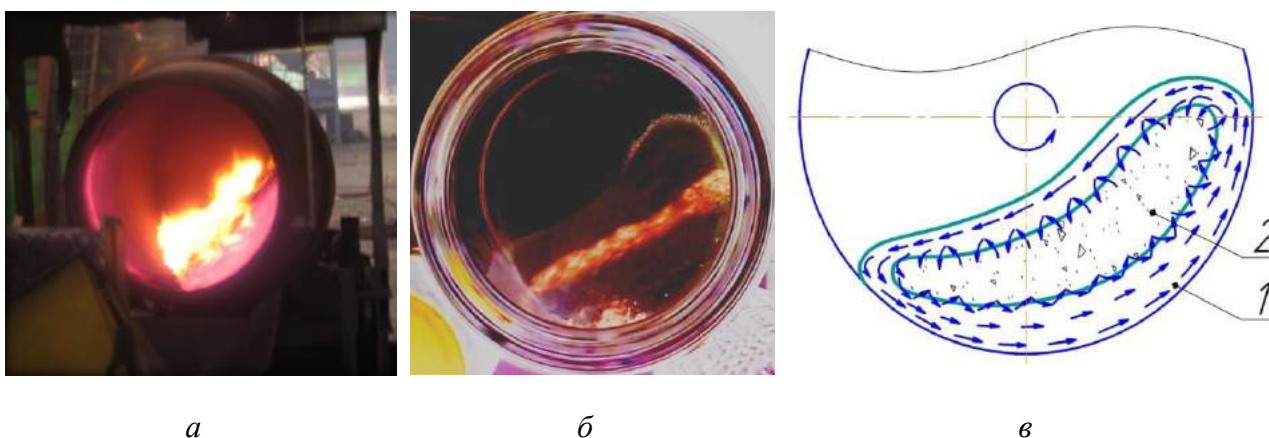


Рисунок 3. Положение дисперсного материала при вращении:
а – высокотемпературный нагрев стружки в РНП; *б* – имитационная модель;
в – схема поперечного сечения слоя материала в ротационной печи
 (1 – циркуляционная зона; 2 – центральная зона (ядро))

Вторая – центральная зона образуется внутри слоя. В этой зоне, формирующей ядро слоя, материал движется медленнее. Частицы покидают этот слой, увлекаемые материалом, движущимся в циркуляционной зоне. В свою очередь материал из циркуляционной зоны тоже переходит (выпадает) в центральную зону. Таким образом, происходит постоянный переход материала из зоны в зону. Решающее влияние на размеры центральной зоны и перемешивание материала оказывают силы аутогезии и геометрия частиц материала.

В верхней части сечения слоя имеет место характерное утолщение – «вал», образующийся в результате отрыва от поверхности печи и остановки или замедления движения материала. В средней части сво-

бодной поверхности образуется характерная впадина: скорость движения частиц в момент обрушения или соскальзывания увеличивается, затем по ходу скольжения по поверхности материала уменьшается, а угол наклона свободной поверхности слоя приближается к углу естественного откоса материала. Прогиб (впадина) на свободной поверхности слоя тем глубже, чем выше скорость вращения печи.

В нижней части свободной поверхности (поверхности скольжения) скорость движения материала уменьшается, что приводит к образованию второго «вала», аналогичного верхней части сечения. Частицы, достигшие поверхности печи, вновь подхватываются и устремляются по образующей вверх.

Нагрев дисперсных материалов сопровождается значительными изменениями состояния их поверхности и адгезионных свойств, уменьшением внутреннего трения в слое и внешнего трения на поверхности печи. Зачастую меняется и дисперсность материала, например, дисперсность чугунной стружки и окалины при высокотемпературном нагреве в РНП увеличивается в 2-3 раза. Это приводит к изменению профиля слоя: угол подъема и сектор, занимаемый материалом, уменьшаются, положение и конфигурация слоя приближаются к форме и положению, которое занимает жидкость (расплав) в подобных условиях [3].

В РНП помимо движения в плоскости, перпендикулярной оси вращения печи, материал перемещается и в продольном

направлении. Это происходит благодаря углу наклона (12-18°) оси печи к горизонтальной плоскости, что заставляет материал продвигаться по спирали к днищу печи, а затем снова – вперед к горловине (рисунок 4). Дополнительные движения усиливают процессы разрушения и перемешивания внутри слоя материала.

В сечении, перпендикулярном оси вращения, частицы, находящиеся во внешнем слое, перемещаются непрерывно: в зоне, примыкающей к поверхности печи, они двигаются по окружности за счет сил адгезии и внешнего трения, а на свободной поверхности слоя скользят под действием сил гравитации и инерции, преодолевающих силы аутогезии.

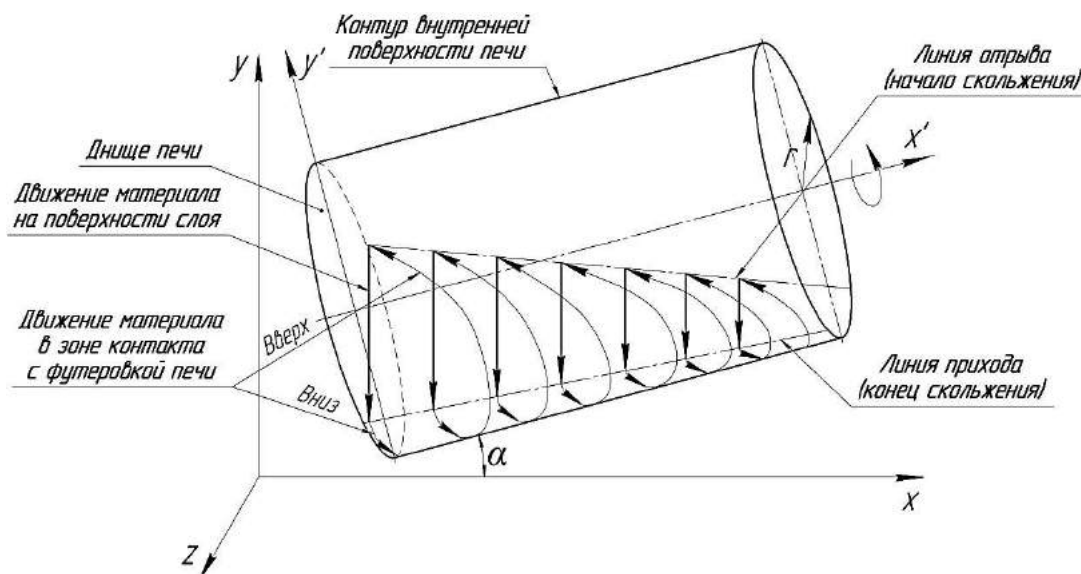


Рисунок 4. Траектория движения частиц дисперсного материала в РНП

В продольном направлении (вдоль оси вращения) от горловины печи к ее днищу частицы материала перемещаются пульсационно – в момент обрушения слоя или скольжения по его поверхности. Таким образом, материал перемещается к днищу печи, где накапливаясь, образует «придонный вал». После достижения критического уровня верхний слой от днища сдвигается к горловине, создавая встречное движение материала в осевом направлении.

В результате материал в РНП совершает винтовое возвратно-поступательное движение, обеспечивающее активное пере-

мешивание, как в радиальном, так и в продольном направлении, в отличие от однонаправленного движения в барабанных печах традиционного типа.

Скорость движения частиц, находящихся на поверхности печи (v_n^1), определяется скоростью вращения печи и условиями трения на границе «материал – футеровка»:

$$v_n^1 = k \cdot (\omega \cdot r), \quad (3)$$

где k – коэффициент, учитывающий проскальзывание материала по поверхности печи ($k \leq 1$);

ω – угловая скорость вращения печи, рад./с.

Скорость движения материала, скользящего по свободной поверхности слоя, определяется перепадом высот (ΔH) между точкой начала скольжения (отрыва) и точкой его завершения, профилем поверхности, углом наклона оси печи к горизонту (α), а также силами инерции, тяжести и аутогезии. В общем случае для скорости движения частиц по свободной поверхности в осевом направлении (v_o^{11}) можно записать:

$$v_o^{11} = \sqrt{\Delta H \cdot a_o \cdot \sin \alpha} . \quad (4)$$

Для скорости движения в плоскости, перпендикулярной оси вращения (v_n^{11}):

$$v_n^{11} = \sqrt{\Delta H \cdot a_n \cdot \cos \alpha} , \quad (5)$$

где a_o и a_n – осевая и радиальная составляющие ускорения (a) движения частицы по свободной поверхности слоя. В первом приближении можно записать:

$$a = g - \gamma g , \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения;

γ – коэффициент трения движения частицы по свободной поверхности слоя, γ зависит от сил межчастичного сцепления, состояния поверхности частичек, их формы, размеров и других факторов.

Описанный характер движения подтверждается исследованиями поведения материала, помещенного в прозрачную емкость – имитационную модель, соответствующую РНП по соотношению основных геометрических параметров, пространственному расположению и динамическим характеристикам ($Re_{мод} \approx Re_{РНП}$). На рисунке 5 с использованием имитационной модели показано перемещение поверхностного прогретого слоя материала в процессе вращения печи – выделены мгновенные положения слоя, соответствующие количеству совершенных оборотов и текущему углу поворота корпуса печи.

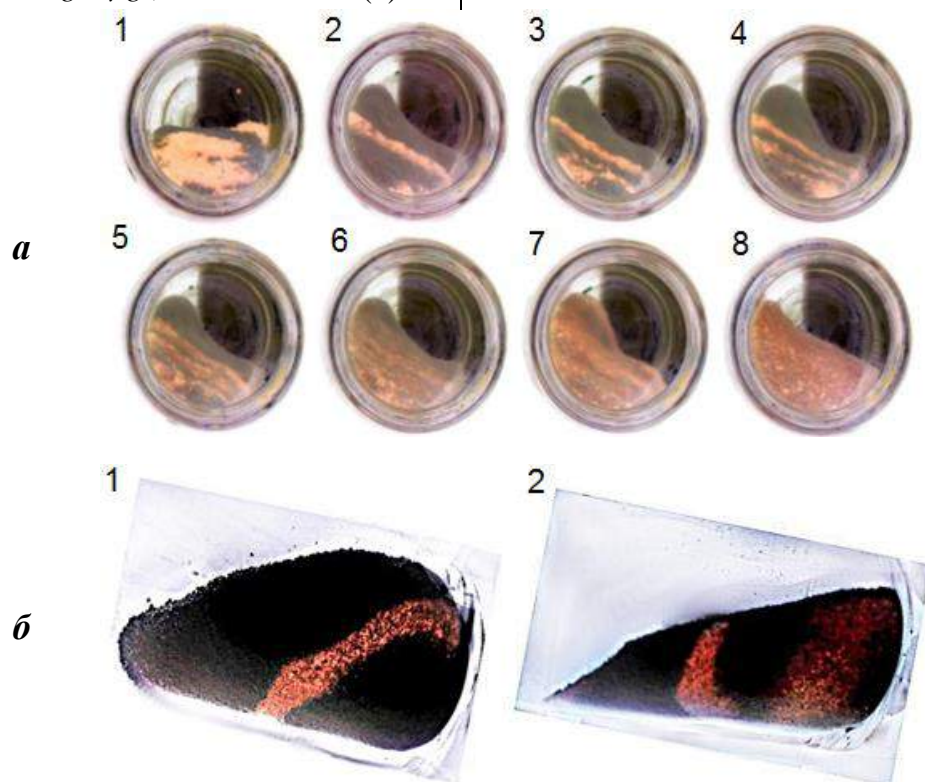


Рисунок 5. Перемещение нагретого слоя в имитационной модели РНП:

- a* – вид со стороны горловины модели (1 – исходное положение, верхний слой прогрет; 2 – положение слоя через 1 оборот после начала вращения; 3 – через 1,5 оборота; 4 – 3 оборота; 5 – 5 оборотов; 6 – 7 оборотов; 7 – 9 оборотов; 8 – 10 оборотов, вращение остановлено, прогретый слой равномерно распределился в общем объеме материала);
- б* – поверхность материала, примыкающая к прозрачной стенке модели (1- через 1 оборот после начала вращения; 2 – через 3 оборота)

Для количественной оценки параметров движения материала в РНП было проведено компьютерное моделирование процесса с помощью прикладного программного пакета (ППП) CD-Adapco Star CCM+11 (рисунки 6, 7). Моделирование позволило определить характер распределения скоростей в сечении слоя материала и их изменение в зависимости от параметров слоя, внутреннего трения и условий на границе «материал-поверхность печи».

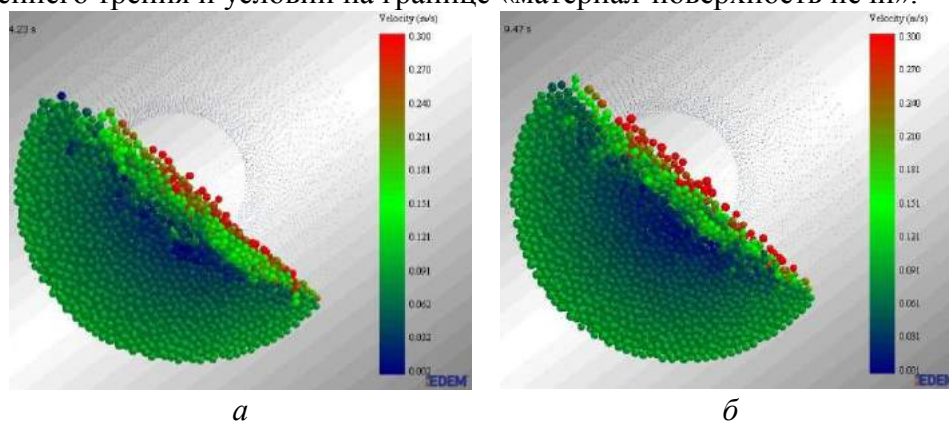


Рисунок 6. Мгновенное поле скоростей в поперечном сечении слоя материала (ось вращения РНП наклонена к горизонту под углом $\alpha=15^{\circ}$, внутренний радиус печи $r = 0,6$ м, скорость вращения $n=2$ об/мин): а – $\tau=4,23$ с; б – $\tau=9,47$ с.

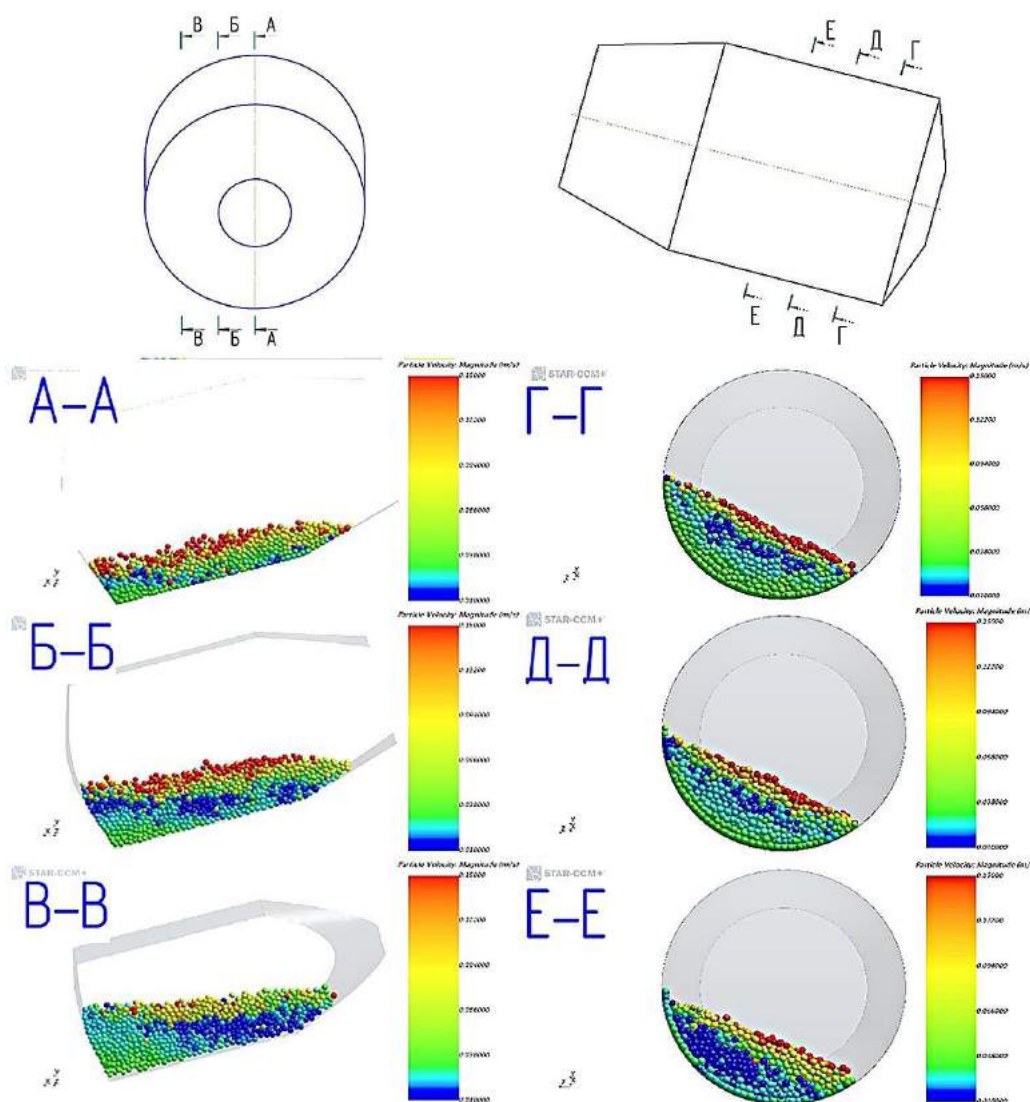


Рисунок 7. Поле скоростей в различных продольных и поперечных сечениях РНП ($\alpha=15^{\circ}$, $r = 0,45$ м, $n = 1$ об/мин)

В результате моделирования было выявлено, что скорости частиц на свободной поверхности слоя могут в 3 и более раз превышать скорости движения частиц, находящихся на поверхности печи. Моделирование подтвердило, что в радиальном (поперечном) сечении слоя материала условно могут быть выделены относительно неподвижное ядро и активно циркулирующая вокруг него периферийная зона. При этом скорости движения частиц в ядре и на периферии слоя могут отличаться в десятки и даже сотни раз, однако четкой границы между зонами не существует. Поле скоростей в сечении слоя, размеры и форма ядра, а также его расположение относительно свободной поверхности слоя изменяются во времени (рисунок 6).

Кроме того, распределение скоростей меняется в зависимости от расстояния рассматриваемого сечения относительно днища или горловины печи (рисунок 7). Уменьшение сил внешнего трения при уменьшении толщины слоя и связанное с этим проскальзывание материала приводит к смещению зоны низких скоростей к поверхности печи. Чем дальше рассматриваемое сечение от днища печи тем ближе ядро слоя к ее поверхности.

2. Движение газовых потоков

Наиболее эффективным способом передачи тепла полидисперсному материалу является продувка слоя горячими газами. Для того, чтобы уменьшить сопротивление слоя и обеспечить контакт горячих газов со всеми элементами (частицами) слоя материал должен быть переведен в подвижное (взвешенное) состояние. Эти условия в полной мере обеспечиваются при переработке полидисперсных материалов в ротационных печах.

В общем случае тепло во вращающихся печах, в том числе РНП, передается шихтовому материалу: излучением от факела и стен печи, теплопроводностью от стен печи при соприкосновении с материалом и внутри слоя, конвекцией от потока горячих газов. При этом наиболее существенную роль играет конвекция [6,7].

Однако ограничения по скорости движения газа-теплоносителя (v_z), которая

из-за опасности уноса дисперсного материала не может превышать скорость витания частиц ($v_{вит}$), не позволяют получить высокий коэффициент конвективной теплоотдачи (α_k), который возрастает пропорционально $\sqrt{v_z}$, и реализовать в полной мере преимущества динамического продуваемого слоя в традиционных короткобарабанных плавильных печах, где газы движутся линейно вдоль оси печи от горловины к хвостовой части.

В РНП газы совершают сложное вращательное петлеобразное (возвратно-поступательное) движение. Движение газов в нижней и верхней части рабочего пространства происходит навстречу друг другу, при этом потоки активно перемешиваются.

Переход от прямого движения газового потока в короткобарабанных печах к петлеобразному в РНП позволяет значительно в 1,5-2 раза увеличить т.к.п.д. процесса нагрева и плавки дисперсного материала и снизить пылеунос.

Во вращающихся печах, где используется механическое перемешивание материала, тепло- и массообмен в значительной степени зависит от соотношения толщины внешней динамической продуваемой части слоя и его относительно неподвижной внутренней части, границу между которыми определяет скорость фильтрации газа (v_ϕ). Толщину динамического продуваемого слоя можно определить по сопротивлению ($\Delta p_{сл}$), которое не должно быть больше скоростного напора потока газов в печи. Скорость газов в РНП обычно $v_z \approx 10-25$ м/с. Отсюда:

$$\Delta p_{сл} \leq \frac{136v_z^2 \rho_g}{273+t}, \quad (7)$$

где ρ_g – плотность газов, кг/м³;
 t – температура газов, °С.

Эмпирические уравнения, определяющие интенсивность теплообмена в динамическом слое, полученные для соотношений характерного размера слоя (h) и частиц (d) $h/d \geq 40$ и порозности слоя $\epsilon_{сл} \geq 0,4$, в критериальном виде могут быть записаны следующим образом:

$$Nu_{сл} = \frac{\alpha_{сл} d}{\lambda_g} = 6,9 Re^{0,47}, \quad (8)$$

$$\alpha_{cl} = \alpha_n \left(1 + 4 \left(\frac{v_m}{v_\phi}\right)^{0,36}\right), \quad (9)$$

где α_{cl} – коэффициент теплообмена (теплотдачи) в динамическом слое, Вт/(м²·К);

α_n – коэффициент теплообмена в неподвижном слое, Вт/(м²·К);

v_m – скорость движения материала, м/с.

Градиент температур в динамическом продуваемом слое уменьшается в 10-15 и более раз с 3000-5000 К/м до 100-200 К/м, при этом объемный коэффициент теплопередачи (α_v) увеличивается с 3-4 Вт/(м³·К) в неподвижном слое до 1000-3000 Вт/(м³·К) в динамическом слое.

Петлеобразное движение газов в РНП приводит к осаждению частиц у днища печи и в циркуляционной зоне перед крышкой. За счет подсасывающего действия факела частицы снова увлекаются в поток газов. Благодаря сложному петлеобразному движению газов в РНП, в отличие от прямоточных барабанных печей, линейные скорости во вращающемся потоке могут достигать 20-25 м/с. Соответственно увеличивается и скорость фильтрации (v_ϕ) и глубина продуваемого слоя.

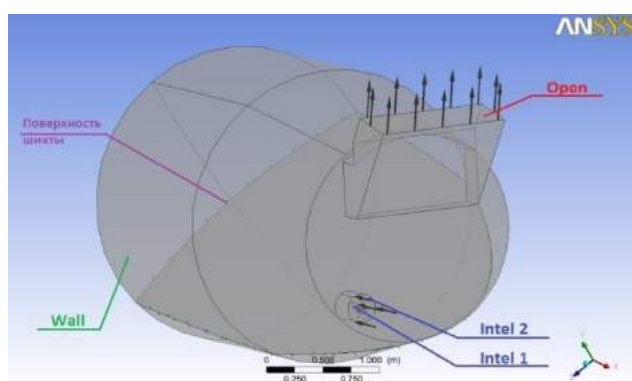
Течение газов в ротационных печах отличается большой сложностью и несимметричностью, сочетанием прямых и обратных токов, наличием циркуляционных зон, изменением параметров во времени и в пространстве.

Исследования и количественная оценка движения газовых неизотермических потоков в РНП выполнялись с использованием компьютерного моделирования на базе расчетных моделей, учитывающих нестационарные режимы движения и теплообмена.

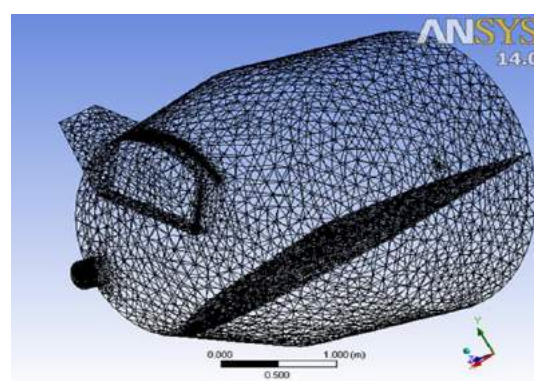
Расчётная область представляет собой рабочее пространство печи с полной загрузкой (рисунок 8). Горелка – двухпроводная низкого давления. Основным топливом является природный газ (метан), в качестве окислителя применяется воздух в соотношении 1/10. В исследовании моделировались следующие процессы: горение газовой смеси, турбулентность в реагирующей среде, движение газового потока, конвективный и лучистый теплообмен.

Результатами численного моделирования являются поля температур, скоростей, давлений, траектории движения газового потока, концентрации топлива, окислителя, продуктов реакции, а также конвективные и лучистые потоки.

Моделирование осуществлялось с помощью ППП Solid Works Flow Simulation и ANSYS CFX [8,9]. Движение газового потока описывалось с помощью системы уравнений Навье-Стокса для реальных неизотермических потоков, уравнений неразрывности, сохранения энергии и состояния, а изменения температуры – в соответствии с уравнением Фурье-Кирхгофа.



а



б

Рисунок 8. Трехмерная модель ротационной печи (а) и расчетная конечноэлементная сетка (б)

Тепловой баланс проверялся путем совместного решения для тех же исходных данных уравнения Фурье с граничными условиями III и IV рода для динамического слоя материала при замене коэффициента теплопроводности материала (λ) на приведенный коэффициент теплопередачи ($\alpha_{пр}$) для продуваемого слоя.

Для решения системы уравнений были приняты следующие допущения: фазовое состояние материала не изменяется, характер движения газового потока турбулентный, газ сжимаемый.

Дифференциальная система уравнений Навье-Стокса сохранения массы, импульса и энергии для нестационарного пространственного течения в декартовой системе координат ($x_i, i = 1, 2, 3$), вращающейся вокруг оси, проходящей через ее начало, имеет следующий вид [6, 7]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) = S_i \quad (11)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P)u_k + q_k) - \tau_{ik} u_i = S_k u_k + Q_H \quad (12)$$

где t – время; u – скорость потока; ρ – плотность потока; P – давление потока; S_i – внешние массовые силы; E – полная энергия единичной массы потока; Q_H – тепло, выделяемое источником в единичном объеме потока; τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений; q_k – диффузионный тепловой поток.

При проведении компьютерного моделирования ставилась задача определения оптимальных геометрических параметров рабочего пространства печи, выбора места расположения и поворота горелки, длины факела и расхода топлива.

На рисунках 9-12 представлены некоторые результаты моделирования движения газового потока в рабочем пространстве РНП при различных вариантах установки горелок [3].

При расположении горелки в нижней правой четверти крышки и вращении печи против часовой стрелки (рисунок 9) видно, что факел горячих газов, встречаясь со слоем материала на входе в печь, отклоняется, образуя многочисленные вихри. Слой, прилегающий к крышке печи, прогревается меньше, чем у днища. Образующиеся вихревые потоки препятствуют проникновению нагретого потока вглубь материала. Эффективность нагрева снижается, увеличиваются потери тепла (рисунок 10).

Наиболее рациональным при заданном направлении вращения печи (против часовой стрелки) является расположение горелки внизу слева, то есть со стороны, где слой материала минимален, с поворотом под углом $7,5^\circ$ к поверхности материала. При этом пламя не упирается в слой, обеспечивается максимальная настильность пламени, поток по дуге омывает всю поверхность материала, максимально передавая тепло и проникая глубоко в слой между его частицами (рисунки 11, 12).

Такое расположение горелки позволяет повысить эффективность теплообменных процессов и, соответственно, сократить продолжительность цикла плавки в целом.

Как показали исследования для печей большой емкости (с объемом рабочего пространства 15-20 м³) наиболее рациональным является установка двух горелок с направлением факела по касательной к поверхности материала.

Эффективная работа РНП возможна только при условии, что газовый поток омывает днище печи. Для этого динамический напор газового потока должен быть выше суммы сопротивления потоку, включая сопротивление пересыпающегося слоя материала. Короткий факел не обеспечивает необходимый прогрев задней части печи и днища, где находится основная часть материала в РНП. Это значительно снижает эффективность нагрева материала, увеличивает время его нагрева и плавки.

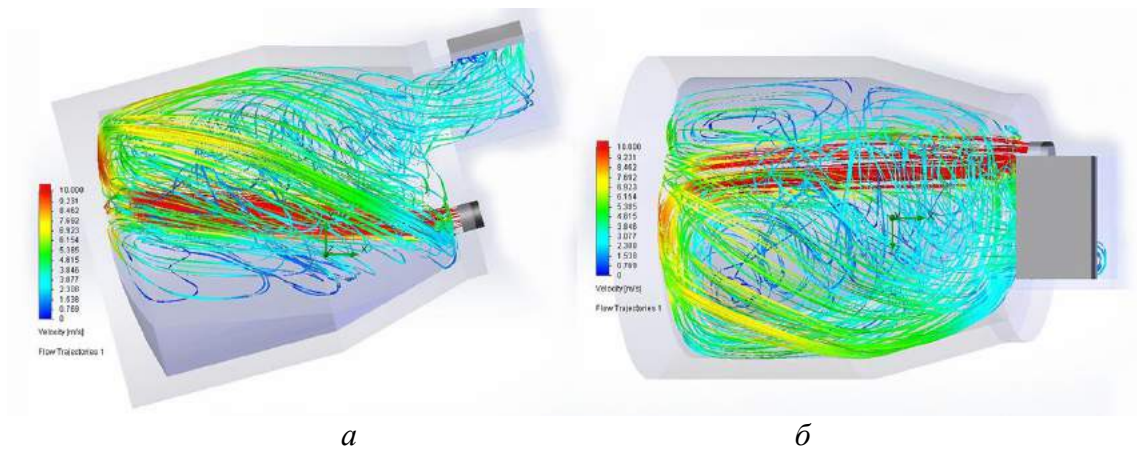


Рисунок 9. Траектории движения и скорости потоков при расположении горелки справа: *а* – вертикальное сечение печи; *б* – горизонтальное сечение

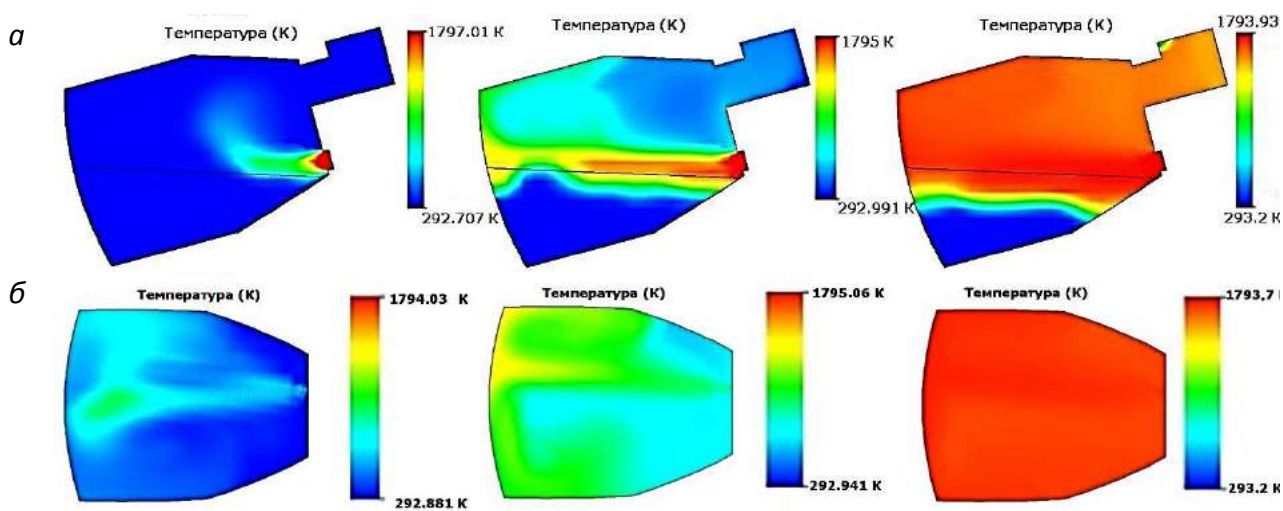


Рисунок 10. Распределение температур в ротационной печи, горелка справа: *а* – вид сбоку – распределение температур по сечению печи, совпадающему с осью горелки; *б* – вид сверху – распределение температур в горизонтальных сечениях

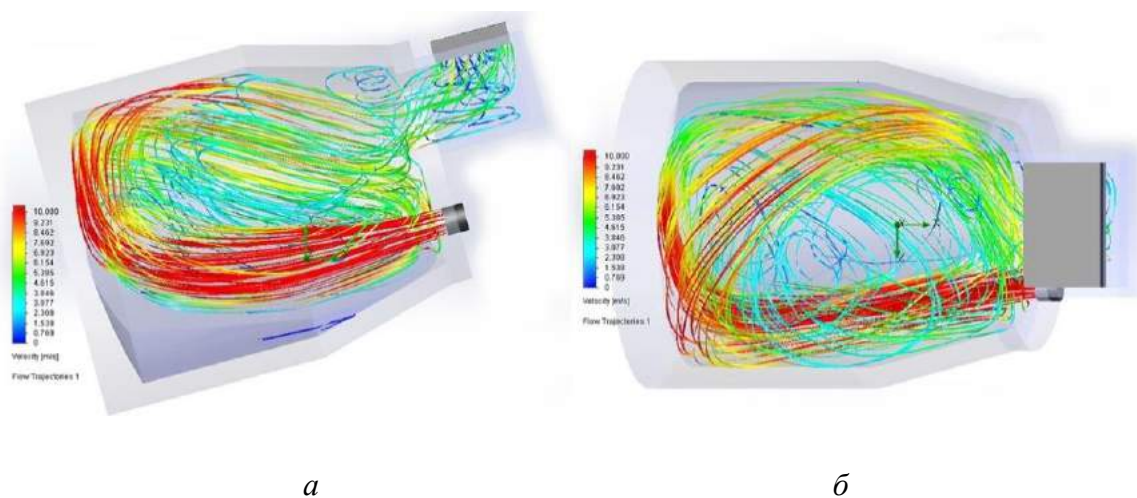


Рисунок 11. Траектории движения и скорости потоков при расположении горелки слева: *а* – вертикальное сечение; *б* – горизонтальное сечение

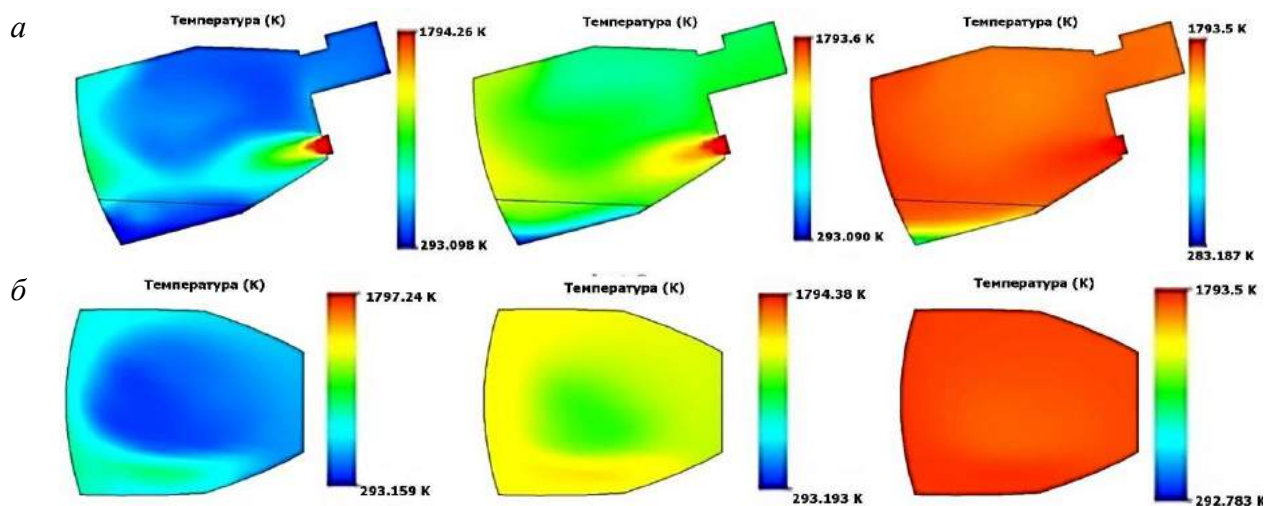


Рисунок 12. Распределение температур в ротационной печи, горелка слева:
a – вид сбоку – сечение по горелке; *б* – вид сверху – распределение температур в горизонтальных сечениях.

Взаимодействие газового потока с дисперсным материалом, как и конфигурация потоков в печи, зависит не только от режимов работы горелок, вращения печи и скорости потока, но и от расположения горелок: в центре или со сдвигом в сторону вращения печи или в противоположную, от числа горелок, угла ввода газов относительно поверхности материала (угла атаки).

Результаты компьютерного моделирования были подтверждены данными натурных испытаний и замерами, проводившимися при апробации РНП различного назначения и емкости.

3. Требования к конструкции РНП.

Моделирование аэродинамики и теплообменных процессов, исследование процессов движения дисперсных материалов в ротационных наклоняющихся печах и опыт их эксплуатации позволили сформировать основные требования к геометрическим параметрам рабочего пространства печей такого типа, расположению и углу наклона горелочных устройств, скорости вращения и углу наклона корпуса при разогреве и расплавлении шихтовых материалов, пределам качания печи от рабочего положения до положения слива расплава и т.д.

Для РНП оптимальным с точки зрения эффективности теплообменных процессов и удобства обслуживания является рабочее

пространство, имеющее форму цилиндра с горловиной в виде усеченного конуса и сферическим дном при следующем соотношении основных параметров (рисунок 13):

- соотношение диаметра (D) и длины (L) рабочего пространства печи: $D/L = 0,55-0,65$;
- соотношение длины цилиндрической ($L_{ц}$) и конечной части ($L_{к}$): $L_{ц}/L_{к}=2-2,5$;
- соотношение диаметра горловины (d) к диаметру цилиндрической части (D): $d/D=0,66-0,77$ (меньшие значения для печей больших объемов от 5 м^3 и выше);
- задняя стенка печи должна иметь форму сферы (выполняется по шаблону) с радиусом (R), примерно равным диаметру цилиндрической части печи (D).

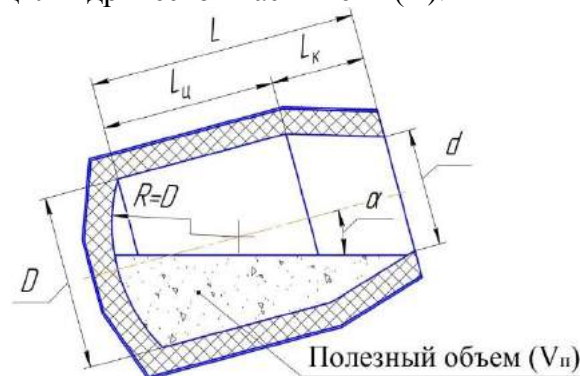


Рисунок 13. Геометрия рабочего пространства ротационной наклоняющейся печи

Привод наклона печи должен обеспечивать следующие пределы качания корпуса: в рабочем положении ось вращения должна находиться под углом $\alpha = (12-18)^\circ$ к горизонту, в положении слива расплава и скачивания шлака печь должна быть наклонена под углом $\alpha = -(20-35)^\circ$.

Горелка должна располагаться в нижней четверти крышки печи, противоположной направлению вращения корпуса. Ось горелочного устройства должна находиться под углом $\alpha = (7-10)^\circ$ к поверхности материала. Учитывая, что в процессе нагрева наклон поверхности материала изменяется, в печах, разработанных УП «Технолит», предусмотрена возможность регулировки положения горелки и управления, таким образом, направлением вектора газового потока (углом атаки) в зависимости от стадии процесса: нагрев и обработка материалов в твердой фазе, расплавление и проведение жидкофазных процессов. Длина факела при работе горелки на номинальной мощности должна составлять не менее L .

При оптимальной конструкции печи ее полезный объем (V_{II}) составляет $\sim 28-33\%$ от общего объема рабочего пространства печи (V_p).

РНП, предназначенные для переработки оксидных металлоотходов, должны быть оснащены газогорелочными устройствами с регулируемым соотношением «газ-воздух» от $\alpha = 1,05-1,10$ при разогреве печи и шихтовых материалов, до $\alpha = 0,6-0,7$ при проведении восстановительных процессов. Для переработки железосодержащих отходов печь должна быть оборудована системой обогащения дутья кислородом (до 28-30 % O_2 в дутье).

4. Расчет основных элементов конструкции РНП

Расчет привода печи. При вращении ротационной печи мощность привода вращения (N) расходуется в первую очередь на полезную работу – подъем материала на определенную высоту, выше которой слой разрушается, и на преодоление сил внутреннего трения при перемешивании материала, а также – на преодоление «вредных» сопротивлений. К последним относятся: трение скольжения между поверхностями

цапф опорных роликов и вкладышей подшипников, трение качения бандажей по опорным роликам, трение в приводном механизме и трение торца корпуса печи о крышку.

Обрабатываемый материал (шихта) в печи располагается несимметрично, вызывая постоянно действующий и направленный в сторону противоположную вращению печи момент веса материала (G_M). Плечом этой силы является расстояние от центра тяжести материала до вертикали, проходящей через ось вращения печи (рисунок 14).

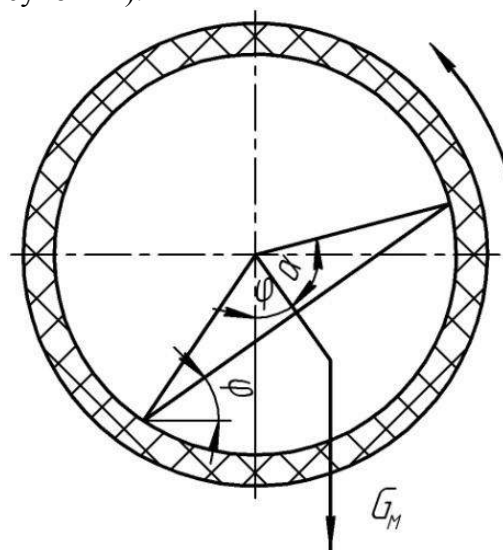


Рисунок 14. Схема расположения материала в печи

Следовательно, мощность (N_1), необходимая для преодоления момента веса материала, равна:

$$N_1 = \frac{G_M v_0}{102}, \text{ кВт} \quad (13)$$

$$N_1 = \frac{F_M L \rho_M v_0}{102}, \text{ кВт} \quad (14)$$

где F_M – площадь сечения (кругового сегмента), занятого материалом, m^2 ;

L – длина корпуса или его части одного диаметра, m ;

ρ_M – насыпная плотность материала, $кг/м^3$;

v_0 – линейная скорость центра тяжести площади сечения материала, $м/с$.

Так как площадь сечения материала в печи по форме близка к круговому сег-

менту, то линейная скорость его центра тяжести при вращении печи может быть представлена выражением [4]:

$$v_0 = \frac{\pi n}{30} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{св}^3 \sin^3 \alpha}{k_3 \cdot \pi \cdot R_{св}^2} \cdot \sin \varphi, \text{ м/с} \quad (15)$$

Для чугунной стружки и окалины угол α в зависимости от исходного содержания влаги, масел и СОЖ может составлять от 55 до 70°.

При нагреве материала его вес уменьшается за счет потери влаги, органических примесей и т.п. При этом, как правило, снижается внешнее и внутреннее трение, соответственно, уменьшается угол подъема материала (φ) и угол α , центр тяжести слоя стремится к вертикальной оси, а момент веса к нулю, для расчета мощности привода целесообразно использовать начальные характеристики загружаемых в печь материалов:

1) коэффициент заполнения материалом (k_3) для РНП при ее наклоне к горизонту, равном 12° составляет 0,28, при наклоне 15° – $k_3 = 0,33$;

2) средняя насыпная плотность материала (ρ_m) для чугунной стружки ~ 1600 кг/м³, для окалины ~ 2000 кг/м³;

3) угол естественного откоса в исходном состоянии для окалины и чугунной стружки ~ 38-43°, угол подъема (φ) при вращении футерованной печи со скоростью 1-3 об/мин. – 45-55°.

Трение качения бандажа по роликам незначительно по сравнению с трением скольжения цапф роликов о вкладыши подшипников, поэтому нет необходимости его вычислять отдельно, а целесообразнее учитывать повышением коэффициента трения скольжения. Тогда мощность (N_2), необходимая для преодоления трения в подшипниках роликов и бандажей о ролики, может быть найдена из уравнения:

$$N_2 = \frac{P_{мп} v_{ц}}{102}, \text{ кВт} \quad (16)$$

Сила трения ($P_{мп}$) и окружная скорость цапф ($v_{ц}$) соответственно равны:

$$P_{мп} = 1000 f G / \cos 30^\circ = 1160 f G \quad (17)$$

и

$$v_{ц} = \frac{\pi r_{ц} n}{30} \cdot \frac{D_б}{D_p} \quad (18)$$

где f – коэффициент скольжения между цапфами роликов и вкладышами подшипников; $r_{ц}$ – радиус цапф роликов, м; n – число оборотов печи в минуту; $D_б$ – диаметр бандажей, м; D_p – диаметр опорных роликов, м; G – общий вес вращающейся части печи, тонн-сил.

Потери на преодоление трения в приводном механизме и уплотнительных устройствах учитываются при указании КПД механизма. Величина его зависит от конструкции приводного механизма, правильности его монтажа и эксплуатации, и в среднем равна 0,9 для механизма закрытого типа, 0,85 для смешанного и 0,8 для открытого [4].

При определении необходимой мощности для вращения печи в расчетное уравнение подставляют нормальное число оборотов. Однако в момент пуска печи необходима мощность выше нормальной на преодоление силы инерции вращающейся части печи. Учитывая это, мощность электродвигателя печи следует выбирать на 20-25% выше той, которая определяется суммой результатов, найденных из выражений 13 и 16:

$$N = 1,25(N_1 + N_2) \quad (19)$$

Наблюдения за работой вращающихся печей показывают, что мощность, потребляемая ими (или нагрузка на привод), с увеличением срока эксплуатации значительно возрастает. Поэтому не будет ошибкой принять двукратный запас мощности при выборе привода.

Расчет корпуса печи. Во время работы корпус ротационной печи испытывает переменные деформации и напряжения, продольные и поперечные изгибающие моменты, тепловые расширения, динамические нагрузки и т.п.

Наибольшие нагрузки испытывают подбандажные обечайки и днище печи. Ошибки в расчете корпуса и его деформирование ведет к разрушению футеровки и остановке печи.

Учитывая сложный переменный во времени разнонаправленный характер действующих нагрузок, расчет корпуса на

прочность и жесткость носит приближенный характер и осуществляется, исходя из следующих предпосылок:

- основными напряжениями в сечениях корпуса являются нормальные напряжения, вызываемые действующими изгибающими моментами;

- в каждом сечении корпуса действуют продольно и поперечно направленные изгибающие моменты;

- действием на корпус крутящего момента можно пренебречь потому, что касательные напряжения малы по сравнению с напряжениями нормальными, возникающими в результате изгиба.

Так как толщина стенки корпуса меньше 1/20 радиуса кривизны его сечения, при расчете корпуса на прочность применима гипотеза двухосного напряженного состояния, при котором приведенные нормальные напряжения могут быть определены по уравнению:

$$\sigma_{np} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}, \quad (20)$$

где σ_1 – нормальные кольцевые напряжения, вызываемые продольно направленными моментами; σ_2 – нормальные меридиональные напряжения, возникающие под действием поперечно направленных изгибающих моментов.

Из-за вращения корпуса нормальные напряжения в его сечениях меняются по симметричному циклу, поэтому за основную механическую характеристику металла при определении напряжений должен приниматься его предел выносливости (σ_{-1}), вычисляемый по уравнению:

$$\sigma_{np} < \sigma_{-1} = 0,4\sigma_{вр}, \quad (21)$$

где $\sigma_{вр}$ – временное сопротивление, для углеродистых сталей $\sigma_{вр} = 360 \div 460$ МПа.

При расчете корпуса РНП, особенно печей большой емкости, следует принимать во внимание следующие моменты:

- стальные листы, применяемые для изготовления корпуса, сначала вальцуются в холодном состоянии, затем свариваются в отдельные обечайки, которые тоже свариваются между собой, возникающие при этих операциях внутренние напряжения в корпусе в дальнейшем не снимаются;

- действительное распределение усилий на отдельные участки корпуса из-за неточностей, допускаемых при его сборке, а также из-за неравномерного износа сопряженных деталей печи при ее эксплуатации не может совпадать с идеализированным распределением усилий, определенным при расчете;

- при работе корпус печи находится под действием не только механических усилий, но и тепловых воздействий, часто изменяющихся по своей интенсивности;

- в практических условиях из-за неизбежных неточностей монтажа вращение корпуса не протекает плавно, а сопровождается вибрациями и биениями;

- при сборке корпуса его отдельные обечайки не подвергаются никаким предварительным испытаниям;

- внутренняя и внешняя поверхности корпуса подвержены коррозии;

- корпус печи является ее главной частью, причем самой крупной, сложной и дорогой, дефекты и поломки корпуса вызывают вынужденную остановку всей печи, приводят к преждевременному разрушению футеровки и потерям тепла.

Учитывая выше перечисленное, коэффициент запаса прочности при расчете корпуса не должен выбираться меньше четырех [4].

Основная внешняя нагрузка, испытываемая корпусом, складывается из его собственного веса, веса футеровки и загруженного в печь материала. Собственный вес и вес футеровки равномерно распределены по длине корпуса и его окружности. На корпус действуют также сосредоточенные нагрузки – это вес зубчатого венца и бандажа. Вес загруженного в печь материала вплоть до его перехода в жидкую фазу (расплавления), вносит динамическую составляющую в испытываемые корпусом нагрузки.

При работе печи материал смещается в сторону вращения печи, поэтому и равнодействующая нагрузок на корпус смещена от вертикали, проходящей через ось вращения корпуса.

Под действием перечисленных внешних нагрузок в поперечных сечениях корпуса возникают продольно направленные

опорные и межопорные изгибающие моменты.

Опорные изгибающие моменты корпуса могут быть определены при помощи уравнения трех моментов или методом последовательных приближений.

Расчет стойки поворотной. Конструктивной особенностью РНП является относительно большой диаметр горловины печи, и соответственно большой вес футерованной крышки. Учитывая это стойка, удерживающая крышку, испытывает значительные изгибающие моменты, статические и динамические нагрузки, особенно в печах большой емкости (рисунок 15). Так в РНП полезной емкостью 3,75 м³ диаметр поворотной крышки составляет около 2 м, а вес с учетом футеровки и навесного оборудования превышает 3т, при этом изгибающий момент, действующий на опорную стойку, достигает 85000 Н·м.

Прочностной расчет и оптимизация конструкции стойки поворотной крышки были выполнены с помощью программного комплекса SolidWorks Premium: построены эпюры напряжений, перемещений, деформаций, запаса прочности. Наиболее нагруженным узлом является место стыковки оси стойки с опорным фланцем и зона установки верхнего радиального подшипника.

На рисунке 16 приведены результаты расчета нагрузки (максимальных напряжений) и запаса прочности, выполненного для различных вариантов конструкции стойки. При сохранении варианта, применяемого для печей меньшей емкости ($V_{П}=1-2$ м³), напряжения в узле достигают значения 1038 МПа, а запас прочности опускается ниже критического уровня ($n_{кр} = 1,5$) до 1,32 (рисунок 17.а). Установка в верхней части второго радиального подшипника позволила снизить максимальные напряжения в узле до 576 МПа и повысить запас прочности до 1,63 (рисунок 17.б). Для увеличения надежности работы узла в условиях реального производства был использован вариант с измененной конструкцией опорного фланца и увеличенным диаметром радиальных подшипников, который позволил снизить максимальные напряжения в узле до 335 МПа и обеспечил почти четырехкратное увеличение запаса прочности по сравнению с первым вариантом – до 4,67.

Использование методов компьютерного моделирования при конструировании новых видов оборудования позволяет существенно ускорить и повысить качество проектных работ, снизить риски и сократить затраты на освоение новой техники.

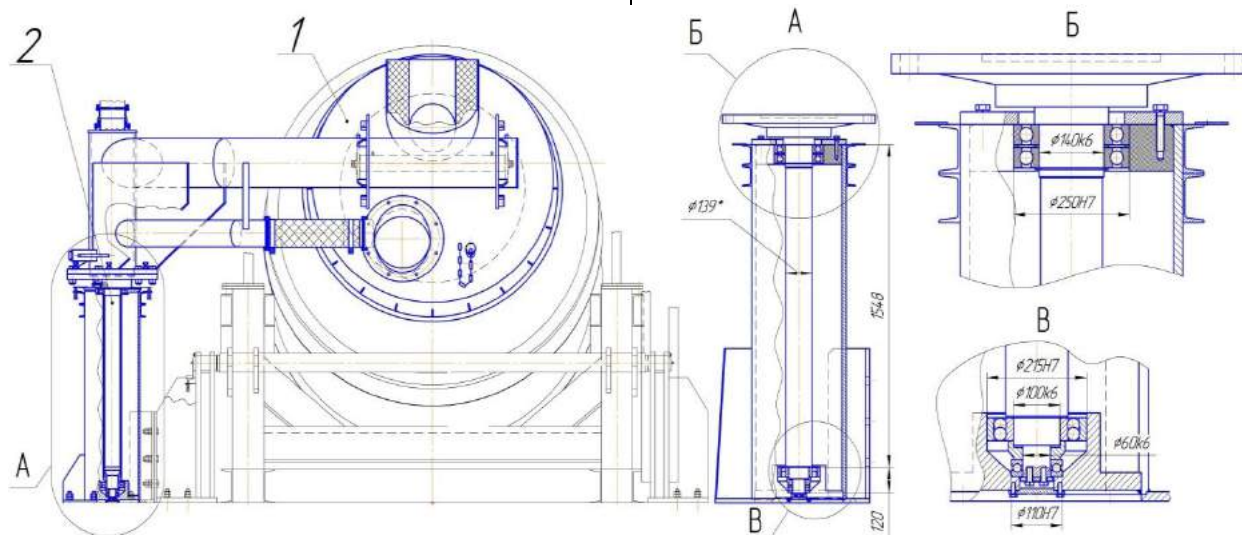


Рисунок 15. Поворотная крышка в сборе с опорной стойкой

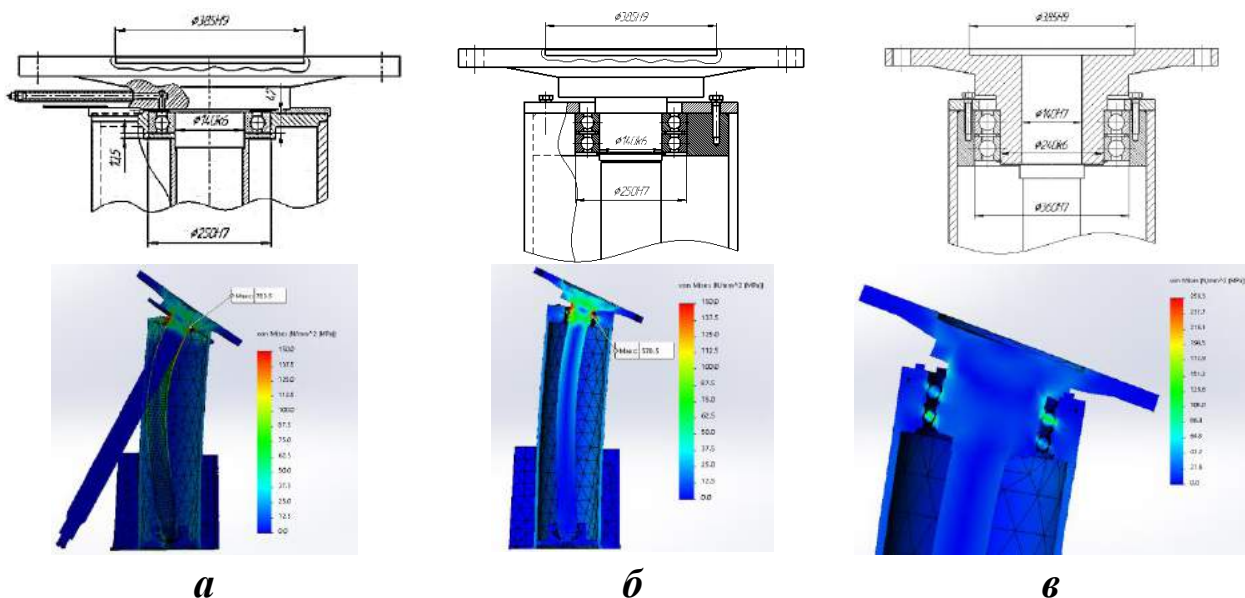


Рисунок 16. Оптимизация конструкции стойки крышки РНП:

а – традиционная конструкция – максимальные напряжения в узле 1038 МПа, коэффициент запаса прочности 1,32; *б* – узел улучшенной конструкции – максимальные напряжения в узле 578 МПа, коэффициент запаса прочности 1,63; *в* – узел, принятый к применению – максимальные напряжения 335 МПа, коэффициент запаса прочности 4,67.

Заключение

Выполнено комплексное исследование движения дисперсного материала и неизотермических газовых потоков в наклоняющихся ротационных печах (РНП). Получены новые данные об особенностях и закономерностях теплообменных процессов в ротационных печах. Установлено, что движение газов в РНП характеризуется сложным циркуляционным режимом. Циркуляции происходят в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Циркуляционные скорости более чем в 3-5 раз превышают поступательную скорость газового потока. Это явление приводит к интенсификации процессов теплообмена и соответственно массопереноса.

Характер движения газов в РНП и эффективность работы печи существенно зависят от скорости и направления (угла атаки) факела газовых горелок, а также от их расположения и параметров. РНП является тепловым агрегатом с возможностью управления вектором скорости потока газов, что позволяет в процессе плавки или нагрева, не меняя конструктивных параметров печи, в широких пределах изменять (регулировать) интенсивность технологических процессов.

Установлено, что материал в РНП совершает сложное винтовое возвратно-поступательное движение, перемешиваясь как в поперечном, так и в продольном сечении, что приводит к интенсивному конвективному переносу. Скорости движения частиц в пределах одного сечения отличаются в 100 и более раз и непостоянны во времени. Вращение слоя дисперсного материала превышает скорость вращения печи более чем в 3 раза.

Проведённое компьютерное моделирование позволило получить данные о скоростях и траекториях движения газовых потоков и материалов в РНП, а также о протекании тепло-массообменных процессов внутри агрегата. На основе полученных результатов определены параметры эффективной и экономичной работы ротационных наклоняющихся печей, разработаны рекомендации по их проектированию.

Найденные закономерности и разработанные технические решения прошли успешную апробацию при модернизации действующих и внедрении новых ротационных печей.

Библиографический список

1. Новичков С.Б. Теория и практика переработки отходов алюминия в роторных

- наклонных печах: дис. д-ра техн. наук / С.Б. Новичков. - Иркутск, 2008. - 348 с.
2. Тарасов А.В. и др. Metallургическая переработка вторичного свинцового сырья. – М.: Гинцветмет, 2003. – 224 с.
 3. Ровин С.Л. Рециклинг металлоотходов в ротационных печах. – Минск: БНТУ, 2015. – 382с.
 4. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление, экология. – М.: Теплотехник, 2004. – 544с.
 5. Ровин Л.Е., Ровин С.Л. Классификация и свойства дисперсных металлоотходов//Литье и металлургия, 2015. – №2. – С.5–13.
 6. Лисиенко В.Г., Лобанов В.И., Китаев Б.И. Теплофизика металлургических

процессов. – М.: Металлургия, 1982. – 240с.

7. Зобнин Б.Ф, Казяев М.Д., Китаев Б.И. и др. Теплотехнические расчеты металлургических печей.– М.: Металлургия, 1982. – 360с.
8. Алямовский А.А. Solid Works. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб.: БВХ-Петербург, 2005. – 800с.
9. Sonavane Y., Specht E. Numerical Analysis of the heat transfer in the wall of rotary kiln using finite element method «ANSYS»: Germany, Magdeburg, 2009. – 186 p.



УДК 621.855

Н.С. Климов, В.Н. Трубников
 ФГБОУ ВО «Курская государственная
 сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова»
 г. Курск, Россия
 E-mail kgsha.pma@mail.ru

С.А. Сергеев
 ОДПО фонд «Повышение
 квалификации и научных исследований»
 г. Курск, Россия
 E-mail ssa-cib@yandex.ru
 Дата поступления 13.05.2016

НАДЕЖНОСТЬ ЦЕПНЫХ МУФТ

Аннотация

Выявлены основные причины выхода из строя цепных муфт и сформулированы главные критерии их надежности. Указаны факторы, влияющие на работоспособное состояние цепных муфт, виды и характер износа их элементов. Описан один из главных критериев надежности цепных муфт – износостойкость основных элементов (цепи и звездочек). Разработана методика определения критерия нагруженности контакта. Установлена зависимость между увеличением среднего шага цепей, продолжительностью работы и критерием нагруженности муфты. Описаны виды и характер поломок элементов цепных муфт. Представлен метод расчета на прочность цепных муфт.

Ключевые слова: цепная муфта, надежность, работоспособность, износ, прочность.

Введение

Перед машиностроением стоят задачи значительного повышения качества промышленной продукции при непрерывном росте ее объема, а также создания новых конкурентоспособных образцов. Наиболее эффективным направлением в решении

этих задач является улучшение эксплуатационных показателей механизмов и машин. Уже на стадии проектирования новых машин должна быть обеспечена их надежность, исключено отрицательное влияние работы передаточных механизмов (в том

числе муфт) на технологический процесс [1].

Муфты, используемые во многих машинах и механизмах – ответственные узлы, часто определяющие надежность всего машинного агрегата. Стоимость муфты невелика по сравнению со стоимостью основного оборудования, однако выход из строя муфты увеличивает время простоя оборудования, что приводит к значительным материальным потерям. Цепные муфты являются муфтами общего назначения и широко распространены в различных отраслях машиностроения [2].

Основная часть

Факторы, влияющие на работоспособное состояние цепных муфт. На работоспособность муфт влияют следующие группы факторов:

- параметры звездочек: шаг, число и профиль зубьев; материал и твердость рабочих поверхностей; точность изготовления; способ соединения с валами;
- параметры цепи: тип, конструкция, шаг, масса; материал, твердость рабочих поверхностей деталей, точность изготовления; предельная (разрушающая) нагрузка;
- точность монтажа соединяемых узлов: радиальное и угловое смещения осей валов;
- условия эксплуатации муфты: величина и характер передаваемой нагрузки; частота вращения; смазка; температура;
- тип муфты (например, у муфт цепных однорядных (МЦО) и муфт цепных с промежуточным валом (МЦПВ) коэффициент концентрации нагрузки и КПД – параметры, существенно влияющие на работоспособность цепных муфт).

Виды и характер износа элементов муфт. В цепных муфтах изнашиваются элементы шарнира (валик и втулка), ролики и зубья звездочек [3]. Износ этих деталей обусловлен силами трения, которые возникают при относительных перемещениях по-

лумуфт, связанных с радиальными и угловыми смещениями осей соединяемых валов.

В процессе изнашивания изменяется контактный шаг [4], что приводит к нарушению нормального зацепления шарниров цепи с зубьями звездочек и увеличению нагрузки, действующей на элементы муфты, вследствие повышения ее динамичности и неравномерности распределения между деталями. Одновременно с этим уменьшаются сечения самих деталей. Все это снижает прочность основных элементов муфты и прежде всего цепи.

При износе элементов шарниров цепь может выйти из строя вследствие непрерывного увеличения шага звеньев до предельного значения, при котором появляется опасность ее разрыва или нарушения зацепления и соскакивания со звездочек [5].

Износ роликов наблюдается с внутренней и наружной стороны. Как показывает метрологическое исследование, основным является износ с наружной стороны [6].

Зубья звездочек изнашиваются в местах соприкосновения с шарнирами цепи [7]. В отличие от передач износ зубьев звездочек в муфтах более локализован. Интенсивность изнашивания при прочих равных условиях зависит от мощности потерь на трение. Наибольшей мощностью обладают силы трения между роликами и зубьями полумуфт. Практика эксплуатации цепных муфт показывает, что наибольший износ наблюдается у зубьев звездочек и с наружной поверхности роликов. При этом существенное влияние на износ оказывает радиальное смещение осей валов.

Износостойкость цепных муфт. Одним из главных критериев надежности цепных муфт является износостойкость их основных элементов – цепи и звездочек [8]. Поэтому важно располагать методом расчета этих элементов на износ. Имеющийся метод расчета цепей [9], разработанный применительно к передачам, не может быть непосредственно использован для муфт, поскольку условия работы цепи в передаче и муфте различные. При расчете муфт используют лишь основные положения этого метода – интенсивность износа деталей

определяется удельной мощностью потерь на трение между ними. Тогда для создания обоснованного расчета на износ необходимо найти (например, экспериментальным путем) зависимость между удельной мощностью сил трения и линейным значением износа.

Среднюю удельную мощность потерь на трение можно представить:

$$\omega_{y\delta} = f p_m^n v_{sm}, \quad (1)$$

где p_m – среднее значение давления в сопряжении деталей; n – показатель степени; в дальнейших расчетах $n = 1$; v_{sm} – средняя скорость скольжения трущихся поверхностей; f – коэффициент трения скольжения.

Все величины, входящие в формулу (1) кроме коэффициента f , для каждого сопряжения в муфте могут быть легко определены. Поэтому в дальнейших расчетах будет использован критерий нагруженности контакта:

$$k = \omega_{y\delta} / f = p_m v_{sm}.$$

Применительно к цепным передачам эту величину называют критерием износа [2].

Следовательно, критерий k , пропорциональный, при установившемся режиме трения (смазывания) характеризует интенсивность изнашивания деталей сопряжения.

Поскольку значительная часть мощности сил трения преобразуется в тепло, при эксплуатации муфты ее элементы нагреваются. Температура при установившемся режиме работы будет тем выше, чем больше значение k . В целях обеспечения надежной работы муфты в течение требуемого срока службы интенсивность изнашивания и температура деталей должны быть не выше заданного уровня.

Методика определения критерия нагруженности контакта k основывается на явлении увеличения ΔP среднего шага цепи при износе элементов шарниров. На рисунке 1 показаны графики, характеризующие закономерность увеличения среднего шага цепей во времени. Если не учитывать

приработку трущихся поверхностей, то зависимость между ΔP и продолжительностью работы L_h будет прямолинейной. Чем больше значение k , тем больше ΔP при одной и той же наработке. На графике (рисунок 2, а) приведены экспериментальные данные об увеличении среднего шага приводных цепей при различных k , соответствующих определенной наработке (например, $L_{h0} = 1000$ ч) [3].

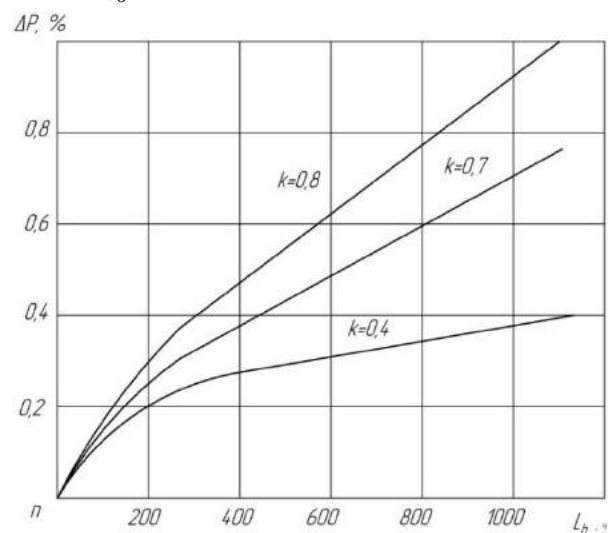


Рисунок 1. Зависимость между увеличением среднего шага цепей, продолжительностью работы и критерием нагруженности муфты

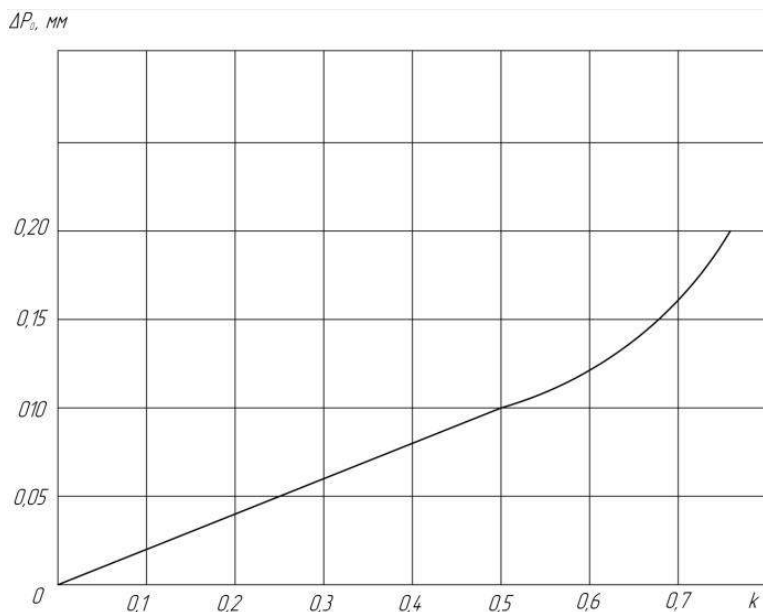
На практике удобнее применять кривые зависимости $k = f(\Delta P_0)$ (рисунок 2, б). Тангенс угла между прямолинейным участком этих кривых (или касательными к этим кривым) и осью абсцисс характеризует износостойкость цепей. Величину k_ξ называют критерием износостойкости:

$$\tan \delta = \frac{k}{P_0} = k_\xi. \quad (2)$$

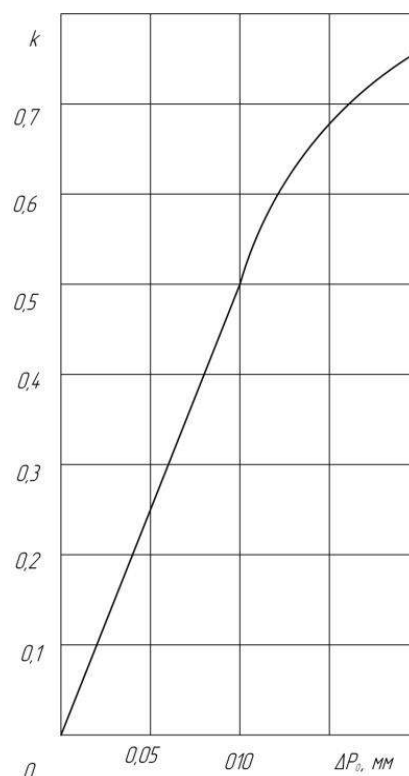
Для контакта трущихся поверхностей с учетом изложенного ранее можно записать:

$$k_\xi = \frac{k}{\Delta l_0},$$

где Δl_0 – линейное значение износа за определенную наработку (например, за время $\Delta l_0 = 10^3$ ч).



а



б

Рисунок 2. Зависимость между критерием нагруженности муфты и увеличением среднего шага цепи: а – график зависимости $\Delta P_0 = f(k)$; б – график зависимости $k = f(\Delta P_0)$

Значение критерия зависит от физико-механических свойств трущихся поверхностей, качества и способа подачи смазки. С его помощью возможно не только объективно оценить износостойкость сопряжения с принятой системой смазки, но и определить с некоторым приближением его ресурс:

$$L_k = \frac{[\Delta l] k_\xi L_{k0}}{k}, \quad (3)$$

где $[\Delta l]$ – допускаемое значение износа за срок службы L_h . Для цепных передач ресурс определяют по формуле:

$$L_k = \frac{L_{h0} ([\Delta P] - h - \Delta P_h) k_\xi}{k}, \quad (4)$$

где $L_{k0} = 1000$ ч; $[\Delta P]$ – предельно допустимое увеличение шага цепи за время работы L_h ; h – дополнительное увеличение среднего шага, возникающее в начале работы цепи вследствие приработки трущихся поверхностей шарнира; ΔP_h – первоначальное положительное отклонение среднего шага от номинального значения.

Из формул (3) и (4) следует, что срок службы сопряжения при всех прочих одинаковых условиях тем больше, чем больше критерий износостойкости k_ξ и меньше критерий нагруженности контакта k .

В связи с изложенным становится очевидной последовательность определения, на примере цепных передач, допустимого значения критерия нагруженности контакта k . При известной закономерности увеличение во времени среднего шага цепи:

$$\Delta P_0 = \frac{10^3 ([\Delta P] - h - \Delta P_h)}{L_h}.$$

С учетом выражения (2) нагруженность контакта:

$$k = \Delta P k_\xi = \frac{10^3 ([\Delta P] - h - \Delta P_h) k_\xi}{L_h}.$$

По аналогии для любого сопряжения:

$$k = \Delta l_0 k_\xi = \frac{[\Delta l] k_\xi L_{h0}}{L_h}. \quad (5)$$

Значения критерия износостойкости и приработки h можно получить только в результате проведения соответствующих экспериментальных исследований.

Таким образом, методика расчета цепных передач на износ может быть использована с некоторыми уточнениями для расчета любого сопряжения в рассматриваемых типах муфт. Для этого необходимо располагать экспериментальными данными о критерии износостойкости каждого сопряжения, в том числе и шарниров цепи. Относительные перемещения смежных звеньев, обуславливающие износ в шарнирах, зависят лишь от радиальных смещений осей соединяемых муфтой валов. В передачах шарниры изнашиваются вследствие относительных перемещений звеньев при входе и выходе из зацепления и при поперечных колебаниях ветвей контура. Это свидетельствует о большей износостойкости шарниров цепи в муфте, чем в передаче.

Виды и характер поломок элементов цепных муфт. В муфтах, работающих с обильным смазыванием, основным видом повреждений являются поломки деталей цепи, причем эти разрушения носят усталостный характер.

В МЦО наблюдаются прежде всего поломки роликов, что обусловлено спецификой их нагружения – ролик оказывается зажатым между зубьями полумуфт и втулками цепи. В связи с этим в роликах возникают значительные напряжения изгиба, вызывающие усталостные разрушения. Возможны также поломки втулок.

Для муфт цепных двухрядных (МЦД) наиболее характерными являются поломки промежуточных пластин и роликов. Разрушения промежуточных пластин имеют место в тех случаях, когда они посажены на валики с зазором. Такие повреждения обусловлены неравномерным распределением нагрузки между пластинами и, главным образом, высоким уровнем напряжений в их проушинах. Коэффициент концентрации напряжений на контуре отверстия в пластине $K_\sigma \geq 4$.

При эксплуатации муфт цепных повышенной компенсирующей способностью (МЦПКС) наблюдаются те же самые разрушения элементов цепей, что и в передаче.

Так, например, при использовании в муфтах однорядных роликовых цепей наиболее характерными являются поломки втулок. У многорядных цепей, применяемых в МЦПКС, самые слабые элементы – промежуточные пластины, которые, как известно, посажены на валики с зазором. Поскольку установлено [2], что соединение с натягом пластин и роликов существенно увеличивает (более чем на 45 %) их сопротивление усталости, то перспективным является использование в муфтах цепей, у которых обеспечено такое соединение.

Для МЦПВ характерны те же самые поломки цепей, что и для МЦД.

Прочность цепных муфт. Важный критерий надежности цепных муфт – прочность их основных элементов, причем в большинстве случаев решающее значение имеет не статическая прочность, а сопротивление усталости. Условия работы цепей в муфтах (кроме МЦПКС) и цепных передачах существенно отличаются. Поэтому имеющийся метод расчета на прочность, созданный применительно к передачам [1], использовать непосредственно для муфт нельзя.

Разработанный для муфт метод основан на экспериментальных данных, полученных в условиях, близких к эксплуатационным. Параметры, характеризующие испытываемые муфты и условия их работы, называют базовыми. С учетом данных о нагрузочной способности базовой муфты можно записать:

$$[M_T] = [M_T]_0 \prod_{i=1}^k C_i^{\alpha_i} \quad (6)$$

где $[M_T]$, $[M_T]_0$ – допустимый вращающий момент из условия обеспечения сопротивления усталости цепи соответственно для проектируемой и базовой муфт;

$\prod_{i=1}^k C_i^{\alpha_i}$ – произведение корректирующих коэффициентов $C_i^{\alpha_i}$, представляющих собой отношения значений параметров проектируемой и базовой муфт (k – число сравниваемых параметров; α_i – показатель сте-

пени влияния i -го параметра на сопротивление усталости муфты). Методика определения

величины $\prod_{i=1}^k C_i^{\alpha_i}$ приведена в [2].

Нагрузочная способность проектируемой муфты может быть найдена и в соответствии с условием:

$$\sigma_{\max} = \dots \leq [\sigma], \quad (7)$$

где σ_{\max} – расчетное напряжение в наиболее слабой детали цепи; $[\sigma]$ – допустимое напряжение для этой детали.

При определении σ_{\max} используют результаты предыдущих исследований, прежде всего анализа НДС элементов муфт. Допустимое напряжение может быть найдено с учетом $[M_T]_0$ по той же самой методике, что σ_{\max} . С другой стороны, $[\sigma]$ можно определить на основе данных по механическим характеристикам материала деталей приводных цепей.

Кроме того, цепи, используемые в муфтах, можно рассчитывать на прочность на основе данных об их сопротивлении усталости, полученных применительно к передачам. Для этого используют условие

$$F_{c \max} = \dots \leq [F_C], \quad (8)$$

где $F_{c \max}$ – расчетное натяжение цепи в муфте, определяемое при силовом расчете [2]; $[F_C]$ – допустимое натяжение цепи в проектируемой муфте;

$$[F_C] = F_{\lim b} K_L K_M / [n_r], \quad (9)$$

где $F_{\lim b}$ – предельная усталостная нагрузка для данной цепи, соответствующая базовому числу циклов и найденная применительно к передачам; K_L – коэффициент долговечности; K_M – коэффициент, учитывающий особенность нагружения элементов цепи в муфте по сравнению с передачей; $[n_r]$ – допустимый запас сопротивления усталости, назначаемый в зависимости от степени ответственности муфты.

Если в формуле (9) принять $[n_r] = 1$, то соотношение между предельной усталостной нагрузкой на цепь в базовой муфте и передаче выразится зависимостью:

$$F_{M \lim b} = F_{\lim b} K_M.$$

Откуда:

$$K_M = F_{M \lim b} / F_{\lim b}.$$

Коэффициент K_M определяют также в соответствии с результатами силового расчета $F_{\lim b}$ через параметры муфты. Например, для МЦО

$$K_M = \frac{2M_{T \lim b}}{P_z F_{1 \lim b}} \operatorname{tg}(\gamma - f_1),$$

где $M_{T \lim b}$ – предельная усталостная нагрузка (вращающий момент) для базовой муфты.

При известном $M_{T \lim b}$ допустимый вращающий момент для базовой муфты:

$$[M_T]_0 = \frac{M_{T \lim b}}{[n_r]}.$$

Заключение

Таким образом, для создания метода расчета на прочность цепных муфт необходимо располагать достоверными данными о предельной усталостной нагрузке $M_{T \lim b}$ для базовых муфт, которые могут быть получены лишь в результате испытаний в условиях, близких к эксплуатационным. Прочность муфты оценивают также с использованием условия (7) или (8). Для этого используют результаты исследования напряженно-деформированного состояния деталей приводных цепей и данные о механических характеристиках материалов этих деталей.

Библиографический список

1. Сергеев, С.А. Повышение эффективности автоматизированного проектирования цепных муфт на основе создания их математической модели / С.А. Сергеев // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Московский государственный технологический университет. 2007.

2. Сергеев, С.А. Цепные муфты: анализ и синтез / С.А. Сергеев // монография. – Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2011. 398 с.
3. Червяков, Л.М. Системный подход к проектированию цепных муфт / Л.М. Червяков, С.А. Сергеев, Т.В. Дмитракова // Технология металлов. 2011. №12. С. 45-48.
4. Sergeev, S.A. Parametric optimization of chain-transmission sprockets / S.A. Sergeev, D.V. Moskalev // Russian Engineering Research. 2009. Т. 29. №5. С. 452-455.
5. Червяков, Л.М. Виды повреждений цепных муфт и критерии их надежности / Л.М. Червяков, С.А. Сергеев // Ремонт, восстановление, модернизация. 2011. №4. С. 38-42.
6. Сергеев, С.А. Методология проектирования цепных муфт / С.А. Сергеев, Л.М. Червяков, И.П. Емельянов // монография. – LAP LAMBERT Academic Publishing. Серия «Современное машиностроение». – Saarbrücken, Germany, 2011. – 325с.
7. Сергеев, С.А. Стенд для испытания цепных муфт // Вестник машиностроения. 2009. №1. С. 84-85.
8. Учаев П.Н., Сергеев С.А. Коэффициент полезного действия цепных муфт // Вестник Брянского государственного технического университета. 2009. №3. С. 70-73.
9. Sergeev, S.A. Development of computer aided design of chain coupling / International Journal of Advanced Studies. 2015. Т. 5. № 4. С. 55-59.



УДК 334.7

З.С. Гельманова, М.К. Ибатов, К.А. Ногаев

Карагандинский государственный
индустриальный университет
г. Темиртау, Республика Казахстан
E-mail: zoyakgiu@mail.ru
Дата поступления 20.04.2016

НЕОБХОДИМОСТЬ И ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ СЕРВИСНОГО РЕМОНТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ АО «АРСЕЛОРМИТТАЛ ТЕМИРТАУ»

Аннотация

В статье рассматриваются модели организации сервисного обслуживания на металлургических предприятиях. Отмечены особенности перехода к организации ремонтного обслуживания на АО «АрселорМиттал Темиртау». Определены возможные варианты ее организации и обоснован наиболее приемлемый вариант сервисного обслуживания по ремонту металлургического оборудования. Для устранения возникающих проблем разработан международный стандарт, призванный обеспечить общее руководство аутсорсингом для любой организации вне зависимости от сферы деятельности.

Ключевые слова: аутсорсинг; управление аутсорсингом; потенциал аутсорсинга; модели организации сервиса; организация сервисной службы.

Проводимая на большинстве металлургических предприятий модернизация оборудования, применение большого количества сложнейших дорогостоящих электрогидравлических систем существенно усложнило задачу его технического обслуживания. Традиционные подходы к организации сервиса такого оборудования зачастую оказываются малоэффективными.

Известно, что на сталепрокатных заводах Западной Европы издержки одного часа остановки прокатного стана составляют в среднем 125000 ЕВРО. Время устранения аварии составляет от 0,5 до 8 часов. Следовательно, издержки на каждую аварию составляют от 62500 до 1000000 ЕВРО. Даже на станах с самой оптимальной настройкой и управлением может быть до

12 аварий в течение производственного года, при этом минимум двухзначное число составляет процент причин, связанных с неисправностями механического и гидравлического оборудования.

Главная задача сервисных служб состоит в том, чтобы обеспечить работоспособность обслуживаемого оборудования и своевременно, с минимальными затратами, предупредить аварию. Для этой цели в современном мире все чаще используется модель аутсорсинга.

В контексте ИСО9001:2008 «процесс аутсорсинга» является процессом, который организация идентифицировала как необходимый для системы менеджмента качества, но который будет выполняться внешней стороной под управлением данной организации [1].

Производственный аутсорсинг подразумевает, что компания отдает часть своей цепочки производственных процессов или целиком весь цикл производства сторонней компании. Кроме того, возможен вариант продажи части своих подразделений другим компаниям и дальнейшее взаимодействие с ними уже в рамках аутсорсинга [2].

Эксперты международной консалтинговой компании Deloitte Touche Tohmatsu, исследование Global Outsourcing and Insourcing Survey прогнозируют, что восходящая тенденция в области динамики спроса на аутсорсинговые услуги будет сохраняться, благодаря чему оборот рассматриваемого рынка в среднесрочной перспективе будет расти на 12-26% в год [3].

Согласно п.2.2 ИСО/ТС 176/SC 2\№630R2 «Руководство по применению процессов аутсорсинга»: «... если организация выбирает процесс аутсорсинга (постоянно или временно), который влияет на соответствие продукции требованиями, она не может ни игнорировать этот процесс, ни исключить его из СМК» [4]. Организация должна демонстрировать, что она осуществляет достаточное управление, чтобы гарантировать, что этот процесс выполняется в соответствии с требованиями ИСО 9001:2008, и требованиями СМК организации. Степень этого управления будет зависеть, в том числе, от важности процесса аутсорсинга, производственного риска и

компетентности поставщика услуг удовлетворять требованиям к процессу [1].

По мнению специалистов, на долю Германии приходится 13% общемирового рынка аутсорсинга, 42% – на компании из США, 17% – из Великобритании. В настоящее время европейский бизнес отдает подрядчикам объем работ, составляющий едва ли не половину мирового аутсорсингового бизнеса. К числу преимуществ, получаемых от аутсорсинга, можно отнести:

- снижение себестоимости функций, передаваемых аутсорсеру. Последний, как правило, осуществляет выполнение порученных ему функций дешевле вследствие специализации в узкой предметной области и благодаря эффекту масштаба, достигаемого при выполнении однотипных операций одновременно для множества клиентов;

- повышение качества и надежности выполнения переданных на аутсорсинг функций, так как при решении сходных задач компании-аутсорсеры уже накопили большой опыт и могут использовать новейшие технологии и высококвалифицированный персонал;

- возможность привлечь сотрудников заказчика, обслуживавших ранее выполнение делегированной аутсорсеру функции, которые хорошо знают специфику своей компании;

- усиление концентрации внутрикорпоративного внимания на основных целях компании (производство металла) путем делегирования второстепенных функций аутсорсерам, что дает самой компании возможность сфокусироваться на удовлетворении потребностей клиентов и развитии технологий; концентрация на основных функциях к тому же позволяет проводить оптимальный реинжиниринг, повышая эффективность работы компании постоянным улучшением таких показателей, как стоимость, качество, сервис и временные затраты;

- снижение рисков благодаря тому, что аутсорсеры инвестируют средства одновременно в большое количество компаний-клиентов. Компания-заказчик же на развитом рынке аутсорсинга имеет возмож-

ность выбрать именно тех аутсорсеров, которые обладают наибольшим опытом в данной области.

Однако нужно учитывать, что при передаче на аутсорсинг могут возникнуть некоторые негативные моменты:

– При передаче на аутсорсинг сразу нескольких важных функций возникает реальный риск утечки информации и появления нового конкурента, использующего опыт и знания компании, заказывавшей аутсорсинг. Снизить этот риск можно, заказав аутсорсинг различных аспектов бизнеса разным аутсорсерам, хотя это и увеличивает издержки. Кроме того, первостепенное значение имеет нахождение добросовестных партнеров, отлично зарекомендовавших себя на рынке услуг, и грамотное заключение с ними контрактов с фиксацией всех необходимых условий.

– Другой опасностью является потеря контроля над собственными ресурсами, отрыв руководства от части деятельности компании, вследствие чего оно может принимать неадекватные решения. При работе с аутсорсерами может упасть производительность собственных сотрудников, так как они могут расценить аутсорсинг, сопровождающийся передачей части персонала сторонней компании и увольнениями, как измену.

– Компания в случае неожиданного отказа от услуг аутсорсера или его банкротства, риск которого всегда существует, может столкнуться еще с одной неприятностью – необходимостью срочно искать новых партнеров или начать самостоятельно выполнять функции, ранее бывшие на аутсорсинге, в отсутствие необходимых знаний и опыта из-за длительного пользования услугами чужих специалистов вместо обучения своих.

– Помимо перечисленных недостатков возможно и увеличение издержек при передаче второстепенных функций как расплата за стремление сосредоточиться на основной деятельности, и даже снижение качества при недобросовестности аутсорсера. Эти проблемы особенно остро стоят на неразвитых рынках, в условиях недостаточно сильной конкуренции, когда аутсорсер, заключив контракт, будет «накручивать»

цены и не очень тщательно следить за качеством выполнения работы, понимая, что клиент не сможет найти другого поставщика услуг, т. е. когда аутсорсер будет фактически монополистом на рынке. В рамках управления аутсорсингом, необходимо грамотно оценить важность деловых отношений, для того, чтобы можно было постоянно уравнивать амбиции и интересы сторон, а также устойчиво справляться с неудачами и спорными ситуациями [2].

Аутсорсинг как модель ведения бизнеса решает определенные задачи в зависимости от ситуации и стратегии. Чаще всего толчок к ее принятию дают серьезные изменения, происходящие в организации: создание новой компании, реструктуризация, слияние, диверсификация, развитие новых направлений, выход на новые рынки. В таких случаях сконцентрироваться на основных бизнес-процессах и передать профессиональному партнеру вспомогательные функции было бы правильно и логично.

В настоящее время в мире существует несколько моделей организации сервисного обслуживания на металлургических предприятиях. Рассмотрим их подробнее с точки зрения пяти ключевых моментов:

1. Кто является собственником сервисного предприятия?
2. Кто осуществляет текущее техобслуживание?
3. Кто закупает запасные части?
4. Насколько комплексно производится техобслуживание?
5. Как формируется бюджет аутсорсинговой компании?

Яркий пример классического аутсорсинга представляет собой модель организации сервиса на металлургических заводах в США. Металлургические предприятия заключают контракты на сервисное обслуживание со специализированными фирмами, такими как, например, Millcraft SMS Service (MSS). MSS – это совместное предприятие Millcraft и SMS Demag, обслуживает 29 интегрированных и мини-сталепрокатных заводов. Таким образом, отвечая на первый вопрос, можно сказать, что собственник – сама аутсорсинговая компания, независимая от владельцев металлургического оборудования.

Эта компания обеспечивает интегрированный мониторинг состояния, включающий проверку деформации компонентов, диагностику муфты привода, температуры подшипников и мониторинг вибрации, крутящего момента, мониторинг застывания и т. п. Мониторинг осуществляется как онлайн с помощью датчиков состояния, так и с помощью переносных диагностических устройств, проверяющих состояние оборудования с определенной периодичностью. Сервисное предприятие MSS планирует и выполняет все виды ремонтов оборудования, включая капитальные, планирует и закупает необходимые запасные части. Однако текущее техобслуживание осуществляется работниками металлургической компании. С точки зрения формирования бюджета, в данном случае он формируется как годовая абонентская плата, которая может корректироваться с помощью либо бонуса за хорошую работу, либо штрафа в случае увеличения простоев по вине аутсорсинговой компании.

На металлургических заводах Германии и других стран западной Европы несколько другой подход, который может быть классифицирован как ИТ (информационно-технологический) аутсорсинг. Обслуживающий персонал остается в штате предприятия и осуществляет текущее техобслуживание и мелкие ремонты. Однако наиболее ответственные узлы и агрегаты подключаются к так называемой системе «телесервис». Это предполагает установку специальных датчиков состояния, информация с которых поступает на сервер, также установленный на предприятии. В случае возникновения нештатной ситуации специалисты с помощью Интернета могут связаться с центральным сервером SMS Demag и получить консультацию в любое время суток. Если этого оказывается недостаточно, то специалисты SMS Demag могут в кратчайшее время прибыть на это предприятие для устранения аварийной ситуации и анализа и устранения причин, ее вызвавших. Планирование капитальных ремонтов и закупки запасных частей осуществляется самим предприятием, однако с использованием и при поддержке системы управления техобслуживанием (PPMS), разработанной

на SMS Demag. Расчеты с SMS Demag как аутсорсинговой компанией осуществляются в виде абонентской платы.

Кроме того, для проведения крупных ремонтов привлекаются специализированные аутсорсинговые компании, бюджет которых формируется каждый раз отдельно в зависимости от сложности и объема работ.

В России, на таких предприятиях, как ОАО «Северсталь» (г. Череповец), наблюдается тенденция перевода обслуживающего персонала в отдельные дочерние предприятия. Созданная группа компаний «Северстальмаш», включающая: «Домна-ремонт» (реконструкция и обслуживание аглодоменного и сталеплавильного производств); «Стоик» (реконструкция и обслуживание прокатного оборудования); «Энергоремонт» (ремонт и модернизация промышленного энергогенерирующего оборудования); «Электроремонт» (ремонт и модернизация промышленного электрического оборудования); «Металлургремонт» (строительные, ремонтные, монтажные работы на промышленных и гражданских объектах, выпуск продукции строительного направления).

Но при этом собственник у основного и дочернего предприятий остается один. Закупка запасных частей по-прежнему может остаться в руках головной компании. Текущее техобслуживание осуществляется работниками металлургической компании с частичным привлечением специализированных фирм для обслуживания отдельных агрегатов. Другой подход осуществлен на ОАО «ММК» (г. Магнитогорск), сервисным обеспечением занимается «Магнитогорский сервисный центр» (МСЦ). Центр – это совместное предприятие с независимым капиталом, которое обслуживает определенные виды оборудования, в частности гидравлическое. Одним из учредителей МСЦ является фирма SMS Demag.

Основная цель создания центра – повышение коэффициента полезного действия гидрофицированного оборудования, обеспечение его безаварийной работы, повышение качества техобслуживания и снижение затрат предприятий на его проведение.

И наконец, в настоящее время повышается интерес к форме аутсорсинга, связанной не с постоянным присутствием специалистов на объекте, а с периодическим обслуживанием оборудования по согласованному плану.

Переходя к вопросу организации ремонтного обслуживания на АО «АрселорМиттал Темиртау», необходимо отметить ряд моментов:

1. На данном предприятии в настоящее время происходит переход от смешанной формы организации ремонтов к централизованной, что означает концентрацию всех видов производимых ремонтов в одном подразделении, на данный момент эти функции выполняет Единое ремонтно-механическое управление (ЕРМУ).

2. В настоящее время у названного выше подразделения имеются ряд проблем, значительно снижающих потенциальную эффективность его работы. Во – первых, ЕРМУ охватывается всего 65% объемов ремонтов от ремонтных ведомостей. Во – вторых, на предприятии наблюдается недостаточный уровень качества ремонтов из-за нехватки специалистов и запчастей. И в – третьих, отмечается низкая степень организации и мотивации труда ремонтных рабочих, что связано с отсутствием прямой зависимости между результатами труда работников и их заработной платой.

3. Для решения обозначенных выше проблем планируется реализовать поэтапную программу, которая будет включать в себя следующие шаги:

– Шаг 1: На базе существующих ремонтных цехов создать централизованную ремонтную базу, за счет перевода персонала из других подразделений АО «АрселорМиттал Темиртау».

– Шаг 2: создать базу для организации сервисного ремонтного обслуживания

4. На первом этапе планируется осуществить перевод ремонтных рабочих из остальных служб АО «АрселорМиттал Темиртау» в ЕРМУ и произвести дальнейшую оптимизацию численности ЕРМУ.

В результате появится возможность дополнительного привлечения ремонтного персонала основных цехов на ремонты смежных цехов, использования дежурного

персонала для привлечения к ремонтам оборудования, создания постоянно действующих дежурных бригад во всех цехах производства, а также подготовки организационной и технической базы для создания сервисного центра. Ниже с помощью рисунка 1 проиллюстрировано решение задач первого этапа. Как видно из рисунка 1, организационная структура ремонтной службы ЦРМО-1 после перевода в нее рабочих по ремонту с аглодоменного производства была оптимизирована через применение ряда преобразований: упразднена должность заместителя начальника цеха, численность работников механической службы была сокращена на 3 человека.

5. На втором этапе необходимо на основе наработок по прокатным цехам и сталеплавильного производства перевести в единую ремонтную базу механиков оставшихся подразделений; перевести из основных цехов финансирование по закупкам сменного механического оборудования в единое ремонтное управление; создать единую структуру по закупкам сменного оборудования и калькуляции ремонтных работ; подготовить организационно-техническую базу для перевода механического оборудования комбината на сервисное обслуживание. В результате появится возможность организации независимой сервисной службы ремонта, а, следовательно, исключения непрофильного бизнеса из деятельности АО «АрселорМиттал Темиртау» и повышения капитализации и прозрачности проведения ремонтов, оптимизации затрат на ремонтные программы, повышения эффективности использования ресурсов и решения проблемы дефицита квалифицированных кадров.

6. Решение задач второго этапа требует тщательного рассмотрения вариантов организации сервисной службы вне состава АО «АрселорМиттал Темиртау». Ниже на рисунке 2 показана схема принятия решения по организации самостоятельной сервисной службы путем аутсорсинга ремонтного производства.

Оценивая ЕРМУ по данной схеме можно сказать, что его позиция скорее нестратегическая, т.к. ремонтное хозяйство

влияет на количество и качество производимой продукции не прямо, а опосредованно. Кроме того, у данного подразделения отмечается отсутствие конкурентных преимуществ, так как осуществление ремонтных работ подразделениями АО «АрселорМиттал Темиртау» недостаточно профессионально и эффективно. Исходя из

этих двух положений для АО «АрселорМиттал Темиртау» целесообразно создать на базе ЕРМУ отдельную сервисную службу, целью работы которой будет профессиональный, качественный ремонт с минимальными затратами на него.

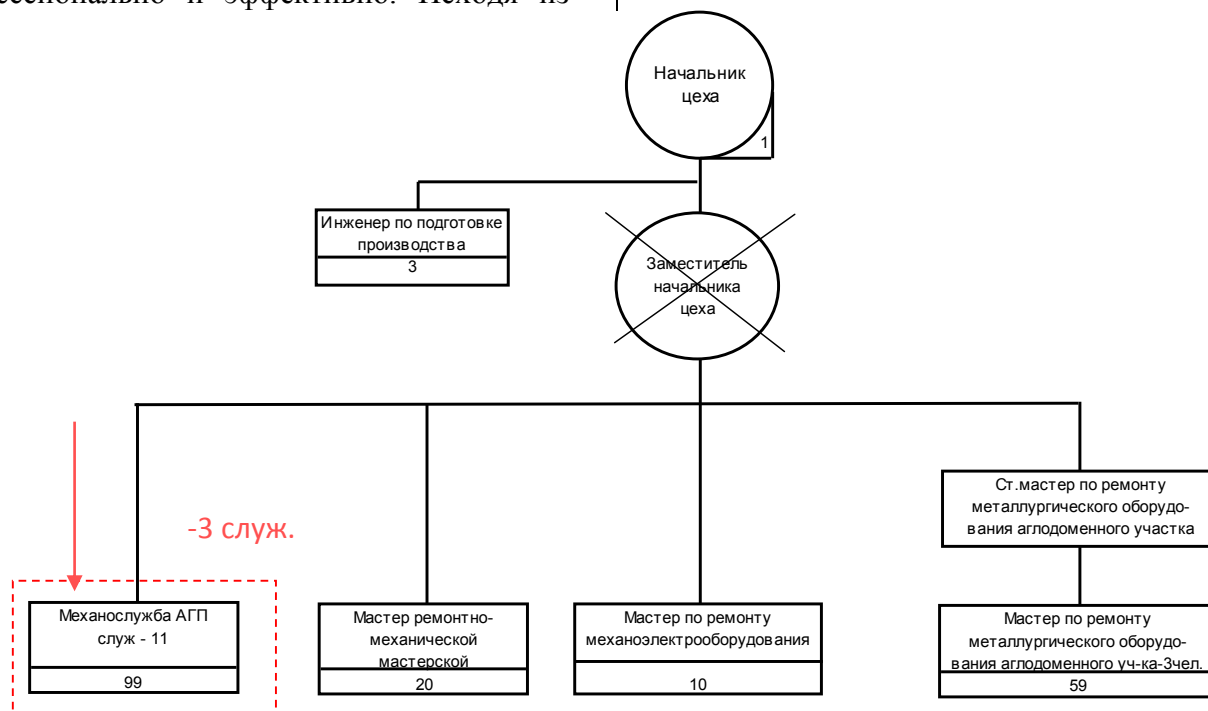


Рисунок 1. Оптимизация организационной структуры ЦРМО-1 АО «АрселорМиттал Темиртау»

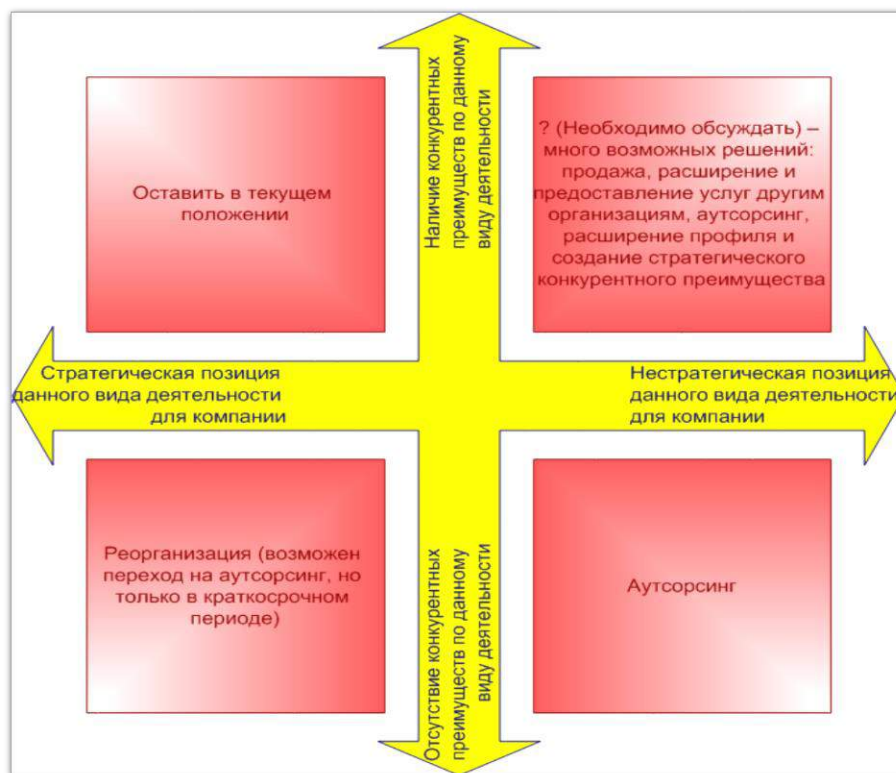


Рисунок 2. Схема принятия решения по аутсорсингу

После принятия принципиального решения о создании самостоятельной сервисной службы, необходимо определиться с возможными вариантами ее организации, основные из которых рассмотрены в таблице 2.

Таблица 2

Варианты организации сервисной ремонтной службы

Создание независимой сервисной компании	«+»	капитализация и прозрачность	высококвалифицированное обслуживание	снижение затрат и повышение эффективности.
	«-»	снижение контроля над собственными ресурсами	риск утечки конфиденциальной информации конкурентам	определенная зависимость от сервисной компании
Создание совместной сервисной компании	«+»	наличие контрольного пакета гарантирует от принятия не выгодных для собственника решений	мотивация персонала в повышении эффективности обслуживания	снижение затрат на обслуживание
	«-»	риск утечки конфиденциальной информации конкурентам		
Создание дочерней сервисной компании	«+»	контроль над собственными ресурсами 100%	нет риска утечки конфиденциальной информации конкурентам	нет зависимости от сервисной компании
	«-»	затраты при организации дочерней компании возрастают	мотивация персонала в повышении эффективности отсутствует	

Заключение

Исходя из предложенных вариантов и существующих условий, для АО «Арселор-Миттал Темиртау» наиболее приемлемым является создание дочерней сервисной компании по ремонту металлургического оборудования, что подтверждается решением принятым правлением предприятия.

В целом можно отметить следующие перспективы решения задач второго этапа:

- снижение себестоимости ремонтных мероприятий на 5-7%, вследствие специализации в узкой предметной области и благодаря эффекту масштаба, достигаемого при выполнении однотипных операций одновременно для множества клиентов;

- повышение уровня качества и надежности выполнения ремонта на 35-40%, за счет использования накопленного опыта и высококвалифицированного персонала;

Кроме того, в качестве планируемого дополнительного эффекта можно отметить:

- усиление концентрации внутрикорпоративного внимания на основных целях компании (производство металла), что дает самой компании возможность сфокусироваться на удовлетворении потребностей клиентов и развитии технологий;

- снижение рисков при проведении ремонтных работ, вследствие повышения их организационно-технического уровня.

Библиографический список

1. ИСО 9001:2008 Системы менеджмента качества. Требования.
2. Руководство по применению процессов аутсорсинга. 2016. 20 июня. URL: <http://www.klubok.net/PNphpBB2-viewtopic-t-194.html>
3. Хейвуд Дж.Б. Аутсорсинг: в поисках конкурентного преимущества: перевод с англ. Дж.Б.Хейвуд.- Москва; 2004.- 176с.
4. ИСО/ТС 176/SC 2/№630R 2 Руководство по применению процессов аутсорсинга



УДК 621.771

**Ю.А. Офицеров, В.В. Черешнев,
В.Н. Черкасов, А.А. Сакир, Р.В. Терехов**
ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»
г. Липецк, Россия
E-mail: info@nlmk.com
Дата поступления 13.05.2016

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ НЕПРЕРЫВНОГО СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Аннотация

Представлены результаты разработки и внедрения режимов эксплуатации рабочих валков стана холодной прокатки в зависимости от величины использованного закаленного слоя, а также мероприятия по восстановлению работоспособности валков, получивших повреждения в клети. Внедрение новых режимов позволило существенно увеличить ресурс и снизить расход валков непрерывного стана 1400 холодной прокатки.

Ключевые слова: валки, закаленный слой, перевалка, шлифовка, легирование, надежность, ресурс.

Введение

Эксплуатация прокатных валков стана холодной прокатки осуществляется в условиях крайне высоких контактных нагрузок, что связано с необходимостью получения проката требуемой геометрии, с определенным уровнем механических свойств и заданной чистотой поверхности.

Характерной особенностью эксплуатации рабочих валков непрерывного четырехклетевого стана 1400 холодной прокатки ПАО «НЛМК» является производство широкого спектра сортаментных групп проката, определяющего существенные различия динамических нагрузок и механизма износа рабочей поверхности бочки, различный уровень повреждаемости, аварийных отказов и, в конечном итоге, показатель эффективности использования закаленного слоя рабочих валков.

Состояние вопроса и постановка задачи

Существующий мировой уровень развития черной металлургии не позволяет полностью исключить наличие внутренних дефектов на горячекатаном подкате и приводит к повреждениям прокатных валков в клети.

Воздействие вышеуказанного фактора приводит к повышенному расходу

прокатных валков и отрицательно влияет на формирование себестоимости готового металлопроката.

Увеличение эксплуатационной надежности и долговечности рабочих валков станов холодной прокатки возможно в результате реализации комплекса организационно-технических мероприятий, направленных на совершенствование технологии подготовки и эксплуатации валков: оптимизации режимов шлифовки и межперевалочных сроков, дифференцированного назначения валков различных исполнений для прокатки определенного сортамента, своевременной диагностики дефектов закаленного слоя, поддержания необходимого оборотного парка валков [1].

Во многом срок службы рабочих валков определяется химическим составом прокатываемых сталей, требованиями к качеству поверхности прокатываемых полос, существующим назначением валков для прокатки определенного сортамента по мере использования рабочего слоя в процессе эксплуатации и соответствующими режимами восстановления работоспособности валков, получивших повреждения в клети [2].

Качественные характеристики рабочих валков формируются на стадии изго-

товления и не могут обеспечивать максимальную эффективность их использования в стане для производства любой сортовой группы проката.

Применяемые на стане 1400 рабочие валки различных поставщиков по исполнению (марка валковой стали, способ отливки,ковки, термообработки) и качественным характеристикам (глубина закаленного слоя, твердость рабочей поверхности бочки) в состоянии поставки имеют в целом аналогичные показатели (таблица 1).

Химический состав сталей, применяемых на стане 1400 рабочих валков, постав-

щиков «А» и «Б» по массовой доле легирующих элементов различается незначительно (таблица 2).

Кроме валков указанных поставщиков, на стане 1400 применяются рабочие валки, изготовленные поставщиком «В» способом переточки списанных валков больших типоразмеров с последующей повторной закалкой.

Материал поставляемых валков, а также валков, используемых для переточки и перекалки – ковкая сталь марок 60Х2СМФ и 9Х2МФ.

Таблица 1

Технические характеристики рабочих валков, применяемых в непрерывном четырехклетевом стане 1400 ПАО «НЛМК»

Поставщик	Исполнение валков	Марка валковой стали	Способ термообработки	Твердость бочки в состоянии поставки*	Глубина закаленного слоя на радиус валка, не менее	Разброс твердости по поверхности бочки, не более*
А	стальные кованые	60Х2СМФ	ТПЧ	870÷895 LD	20 мм	20 LD
Б	стальные кованые	9Х2МФ	ТПЧ	858÷896 LD	20 мм	25 LD
*- Измерение твердости производится прибором «EQUOTYP» с ударным устройством D, шкала HLD						

Таблица 2

Химический состав применяемых рабочих валков

Марка валковой стали	Массовые доли основных легирующих элементов, %					
	С	Mn	Si	Cr	Mo	V
60Х2СМФ	от 0,57	от 0,20	от 1,05	от 1,80	от 0,25	от 0,10
	до 0,65	до 0,70	до 1,30	до 2,10	до 0,35	до 0,25
9Х2МФ	от 0,85	от 0,20	от 0,20	от 1,70	от 0,20	от 0,10
	до 0,95	до 0,70	до 0,60	до 2,10	до 0,30	до 0,20

Таким образом, возможность повышения эффективности эксплуатации рабочих валков путем их вариативного назначения для прокатки различного сортамента проката в зависимости от качественных характеристик валков, полученных в процессе изготовления, практически отсутствует.

Вместе с тем, известно дифференцированное распределение служебных характеристик рабочих валков одного исполнения по мере использования в процессе эксплуатации всей глубины закаленного слоя бочки [1].

На основании вышеизложенного, актуальными направлениями повышения надежности и долговечности рабочих валков стана 1400 следует считать оптимизацию использования закаленного слоя за счет дифференцированного назначения валков для прокатки различного сортамента по мере расходования закаленного слоя и внедрение эффективных технических решений для восстановления работоспособности валков, получивших повреждения в процессе эксплуатации [3].

Определение критериев назначения рабочих валков в клеть для прокатки различного сортамента

Сортамент проката непрерывного четырехклетевого стана 1400 ПАО «НЛМК» включает как низкоуглеродистую сталь марок 08Ю, 08пс, так и электротехнические анизотропную (трансформаторную) сталь и изотропную (динамную) сталь различных групп легирования.

Углеродистая сталь марок 08Ю и 08пс обладает высокой пластичностью при прокатке.

Основным признаком, определяющим группу электротехнической изотропной стали, является доля содержания в химическом составе массовой доли легирующего элемента - кремния (Si).

На стане 1400 ПАО «НЛМК» производят электротехническую изотропную сталь 0, 1, 2, 3 и 4 групп легирования.

Содержание кремния в составе прокатываемых на стане 1400 различных марок стали представлено в таблице 3.

Таблица 3

Массовая доля кремния в сталях, прокатываемых на непрерывном четырехклетевом стане 1400 ПАО «НЛМК»

Сортамент проката	углеродистая конструкционная		электротехническая изотропная, группы легирования					электротехническая анизотропная	
	08Ю	08пс	0	1	2	3	4	ЭЗА	0504Д
Массовая доля кремния в составе стали, %	от 0,05	от 0,05	от 0,05	от 0,40	от 0,80	от 2,00	от 3,00	от 3,00	от 3,00
	до 0,15	до 0,17	до 0,35	до 0,80	до 1,75	до 2,30	до 3,15	до 3,25	до 3,25

Назначение рабочего валка для прокатки определенного сортамента должно обеспечивать решение следующих задач: большую долговечность валка за счет наиболее эффективного использования рабочего слоя, высокое качество поверхности и плоскостность прокатываемых полос, повышение коэффициента готовности и производительности прокатного стана за счет

уменьшения количества внеплановых перевалок.

В качестве критериев назначения рабочих валков стана 1400 для производства определенного сортамента в настоящей работе приняты содержание кремния в различных марках прокатываемой стали и расход закаленного слоя бочки в процессе эксплуатации.

Разработка и промышленное опробование режимов дифференцированного назначения рабочих валков

Одним из ключевых требований при производстве проката из низкоуглеродистой стали является обеспечение высокого качества поверхности и плоскостности полос.

Рабочие валки на ранних этапах эксплуатации (с большими диаметрами) имеют наиболее высокую твердость и износостойкость, что определяет их применение в последних клетях стана, формирующих окончательные геометрические характеристики и требуемое качество поверхности полос [2].

Применение рабочих валков с большими диаметрами, (следовательно – с наиболее высокой твердостью бочки) для прокатки низкоуглеродистой стали (с содержанием легирующего элемента – кремния менее 0,2%) обеспечивает получение полос первого класса отделки поверхности, с повышенными требованиями к геометрическим размерам и плоскостности.

Прокатка низкоуглеродистой стали происходит при малой обрывности полос, незначительной повреждаемости рабочей поверхности бочки и низкой вероятности аварийных отказов валков по неисправимым дефектам.

В ходе выполнения работы предложено новые рабочие валки применять для производства проката из низкоуглеродистой стали марок 08Ю и 08пс до расходования закаленного слоя в процессе перешлифовок до величины, составляющей не более 25% от максимальной глубины закалки.

Таким образом, закаленный слой валка на первом этапе его назначения в клетки используется наиболее эффективно, обеспечивая одновременно высокую износостойкость валка и повышенные требования к качеству поверхности, плоскостности и точности геометрических размеров полос из низкоуглеродистой стали.

На следующем этапе целесообразно использование рабочего валка для прокатки полос электротехнических изотропных сталей с содержанием кремния до 2,0%, по-

скольку уровень обрывности полос, и, следовательно, повреждаемость валка достаточно малы.

Требования к качеству поверхности полос электротехнических изотропных сталей при этом ниже, чем к качеству полос конструкционных углеродистых сталей. Таким образом, эффективность использования рабочего слоя на втором этапе эксплуатации, при прокатке низколегированных электротехнических изотропных сталей высока.

Применение рабочих валков с большими диаметрами для прокатки электротехнических сталей с высоким содержанием кремния нецелесообразно по следующим причинам.

Прокатка сталей с высоким содержанием кремния характеризуется большим количеством обрывов полос и высоким уровнем повреждаемости бочки рабочих валков (в т.ч. приобретение грубых либо неисправимых дефектов бочки «навар», «отслоение рабочего слоя»), что приводит к необходимости выполнения увеличенных съемов рабочего слоя при перешлифовках, либо к преждевременному выводу валков из работы на начальном этапе эксплуатации и снижению ресурса валков.

Следует принять во внимание и тот факт, что при снижении твердости валка по мере расходования рабочего слоя глубина проникновения повреждений вглубь валка уменьшается. Таким образом, рабочие валки для прокатки электротехнических сталей с высоким содержанием кремния следует применять на более поздних этапах эксплуатации, по мере снижения твердости бочки в результате расходования закаленного слоя.

Назначение рабочего валка для прокатки сталей с высоким содержанием (3% и более) кремния наиболее эффективно после использования более половины всего закаленного слоя, исходя из следующих соображений:

- требования к качеству поверхности полос электротехнической изотропной и электротехнической анизотропной стали ниже, чем к прокату конструкционных уг-

леродистых сталей; таким образом, возможно применение рабочих валков с более низкой твердостью рабочей поверхности;

- прокатка хрупких сталей с содержанием кремния более 2% связана с большим количеством обрывов и повреждений бочки валков, при этом следует принять во внимание тот факт, что при снижении твердости валка по мере расходования закаленного слоя, глубина проникновения повреждений вглубь валка уменьшается, что позволяет производить непродуктивные съемы меньшей величины при шлифовках валков, получивших повреждения при эксплуатации.

В результате анализа всех вышеуказанных особенностей технологии разработана и опробована в промышленных условиях следующая схема назначения рабочих валков в клети непрерывного стана 1400 ПАО «НЛМК»:

- с момента ввода в эксплуатацию до использования в ходе выполнения перешлифовок закаленного слоя до величины, составляющей менее 25% максимальной величины закаленного слоя, валок применяют для прокатки полос из низкоуглеродистой стали, содержащей в химическом составе менее 0,2% кремния;

- по мере использования закаленного слоя бочки величиной, составляющей от 25% до 50% включительно от максимального значения глубины закалки рабочего слоя, рабочий валок применяют для прокатки электротехнической изотропной стали с содержанием кремния от 0,2% до 2%.

- после использования 50% глубины рабочего слоя валка валок применяют в стане для прокатки электротехнической изотропной стали с содержанием кремния 2% и более и для прокатки электротехнической анизотропной стали до полного использования перешлифовками глубины закаленного слоя или до минимального конструктивного диаметра.

Разработка режимов восстановления работоспособности и эксплуатации рабочих валков, получивших повреждения в клети

Восстановление работоспособности рабочего валка с дефектом бочки «навар»

без наличия на металле бочки «цветов побежалости», а также с дефектами «сетка», «поруб» производили путем выполнения при шлифовке увеличенных съемов до полного удаления перешлифовкой поврежденного закаленного слоя.

Величина удаляемого закаленного слоя составляла при выполнении шлифовки от 7% до 10% максимальной глубины закаленного слоя, при этом после удаления дефектов не требовалось выполнение операции повторной закалки валка.

В то же время, образование каждого из вышеуказанных дефектов связано с повышенными нагрузками в зоне контакта полосы и валка и достижением критического уровня интенсивности внутренних напряжений в рабочем слое бочки.

В ходе опытно - промышленной проверки установлено: если степень развития дефекта такова, что для его удаления потребовалось выполнить при перешлифовке съем (на диаметр валка) величиной от 7% до 10% максимальной глубины рабочего слоя (на диаметр валка), то при дальнейшей эксплуатации валок разрушался по дефектам контактно-усталостного характера (отслоению и выкрошиванию рабочего слоя) вследствие критического уровня внутренних напряжений в рабочем слое, полученных при повышенных контактных нагрузках в момент повреждения в клети.

Для уменьшения вероятности отказа по дефектам контактно-усталостного характера рабочий валок после перешлифовки со съемом закаленного слоя величиной, составляющей от 7% до 10% максимальной глубины рабочего слоя на диаметр валка, дополнительно подвергали низкотемпературному отпуску.

Выполнение операции низкотемпературного отпуска после удаления грубых дефектов бочки шлифовкой со съемом величиной, составляющей от 7% до 10% максимальной глубины рабочего слоя на диаметр валка, позволило обеспечить благоприятное распределение внутренних напряжений в рабочем слое, уменьшить уровень их интенсивности и снизить вероятность преждевременных отказов валков по дефектам контактно-усталостного характера.

Таким образом, выполнение низкотемпературного отпуска обеспечило дополнительное увеличение стойкости валков.

Выполнение операции повторной закалки необходимо для валка, получившего при эксплуатации дефект бочки «навар» или «оков» с визуально различимыми на металле бочки «цветами побежалости». Образование данных дефектов связано с обрывом и свариванием поверхности бочки валка и полосы в результате резкого увеличения контактного давления.

Происходящий при этом локальный разогрев бочки валка (термический удар) приводит к необратимым изменениям структуры закаленного слоя валка, образованию трещин и падению твердости рабочей поверхности валка ниже допустимого уровня.

Восстановление работоспособности валка с грубыми дефектами бочки «навар», «оков» производили путем полного удаления перешлифовкой поврежденного закаленного слоя и повторной закалкой для получения необходимой твердости поверхности бочки.

Величина удаляемого закаленного слоя составляла при выполнении перешлифовки 10% и более от максимальной величины закаленного слоя, таким образом, валки после повторной закалки имели малый диаметр.

По результатам эксплуатации перезакаленных валков установлено, что выполнение повторной закалки не позволяет полностью восстановить качественные характеристики валка до уровня нового.

Очевидно, что это связано с технологией отливки иковки стальных валков, при которой изготовленный валок имеет различные свойства по сечению. Наиболее чистым по содержанию неметаллических включений, имеющим более плотную структуру является металл наружного слоя отливки (поковки) валка, в то время как, ближе к сердцевине отливки (поковки) структура металла более рыхлая и загрязненная по уровню неметаллических включений.

Применение перезакаленных валков с малыми диаметрами в клетях №3 и №4 стана 1400 приводило к уменьшению срока

службы и повышенному расходу валков в результате интенсивного износа их рабочей поверхности и необходимости выполнения внеплановых перевалок по причинам «выработка», «по профилю», обусловленных неудовлетворительным качеством поверхности и плоскостности полосы и непродуктивного использования закаленного слоя при перешлифовках.

Применение перезакаленных валков ограничило клетями №1 и №2 непрерывного стана 1400, оказывающих при прокатке меньшее влияние на формирование качества поверхности и плоскостности полосы, что обеспечило повышение их срока службы при выполнении требований к качеству полос и производительности стана.

Таким образом, в результате опытно-промышленных испытаний определена следующая технологическая схема восстановления и эксплуатации рабочих валков стана 1400, получивших грубые повреждения бочки:

- рабочий валок, восстановление работоспособности которого после повреждения в клети было произведено съемом рабочего слоя за одну перешлифовку величиной, составляющей от 7% до 10% максимальной глубины рабочего слоя, перед установкой в клеть дополнительно подвергать низкотемпературному отпуску;

- рабочий валок, восстановление работоспособности которого после повреждения в клети было произведено съемом рабочего слоя за одну перешлифовку величиной, составляющей более 10% максимальной глубины рабочего слоя, подвергать операции повторной закалки, после чего применять только в клетях №1 и №2 стана 1400.

Результаты внедрения разработанных режимов

Разработанная технология эксплуатации рабочих валков реализована на непрерывном четырехклетевом стане 1400 холодной прокатки для производства всего объема металлопродукции.

Оценка эффективности новой технологии выполнена по результатам анализа эксплуатационных показателей списанных

за год рабочих валков типоразмера 440×1400 мм.

В качестве сравнения взяты аналогичные показатели рабочих валков за год, предшествовавший реализации разработок.

Результаты сравнительного анализа эксплуатационных показателей рабочих валков представлены в таблице 4 и на рисунках 1-4.

Таблица 4

Показатели эффективности использования рабочих валков четырехклетевого стана 1400
ПАО «НЛМК»

Наименование показателя	Период сравнения	
	до внедрения разработки	после внедрения разработки
Доля валков, списанных по «износу» (%)	10,8	34,1
Доля аварийных отказов рабочих валков по причинам «отслоение», «поломка» (%)	7,4	2,0
Эффективность использования закаленного слоя валков (т/мм)	1 027	1 308
Среднее количество установок валка в клеть до списания (штук/валок)	20,8	31,6
Средняя наработка рабочих валков до списания (т/валок)	10 787	20 467
Удельный расход рабочих валков (кг/т)	1,07	0,69

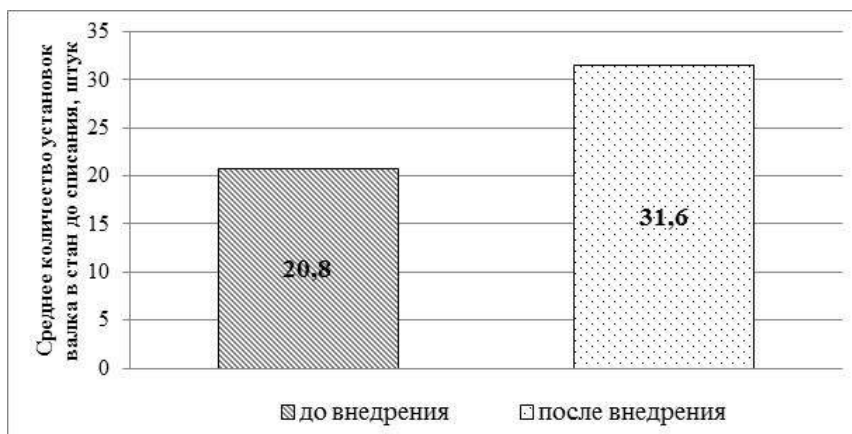


Рисунок 1. Среднее количество установок рабочего валка в клетке стана 1400 до списания

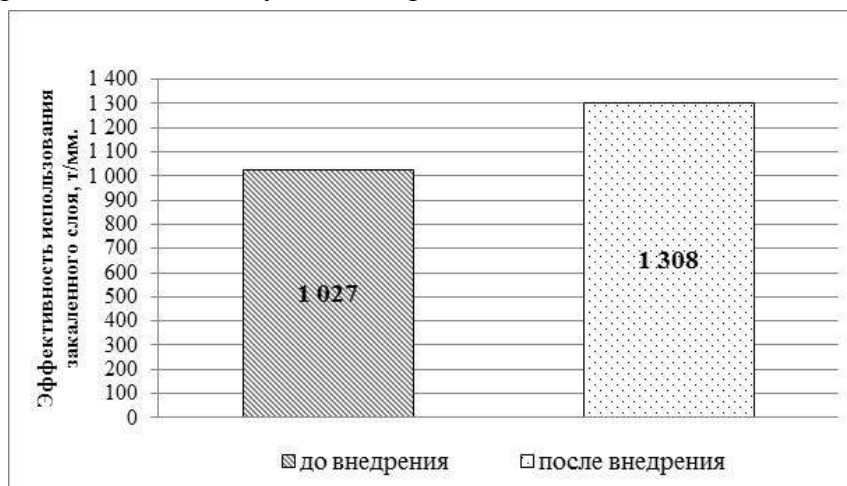


Рисунок 2. Средняя эффективность использования 1 мм закаленного слоя рабочих валков стана 1400

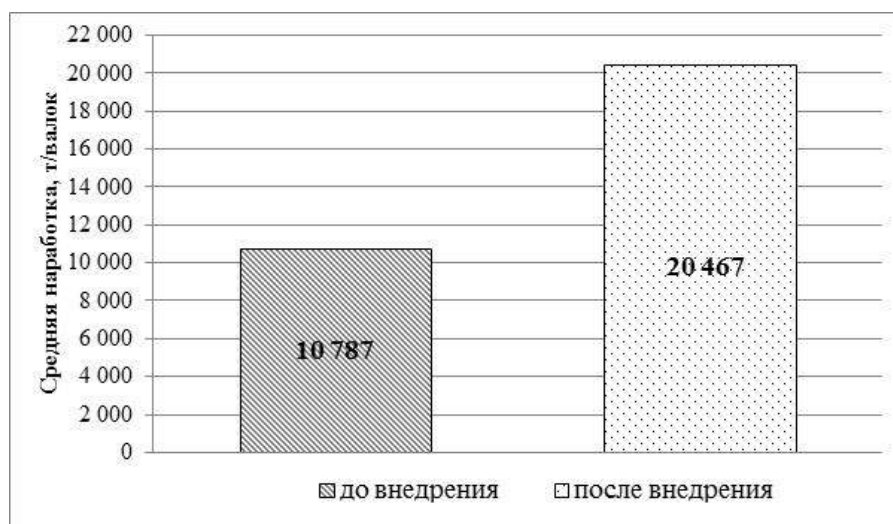


Рисунок 3. Средняя наработка рабочих валков стана 1400 до списания

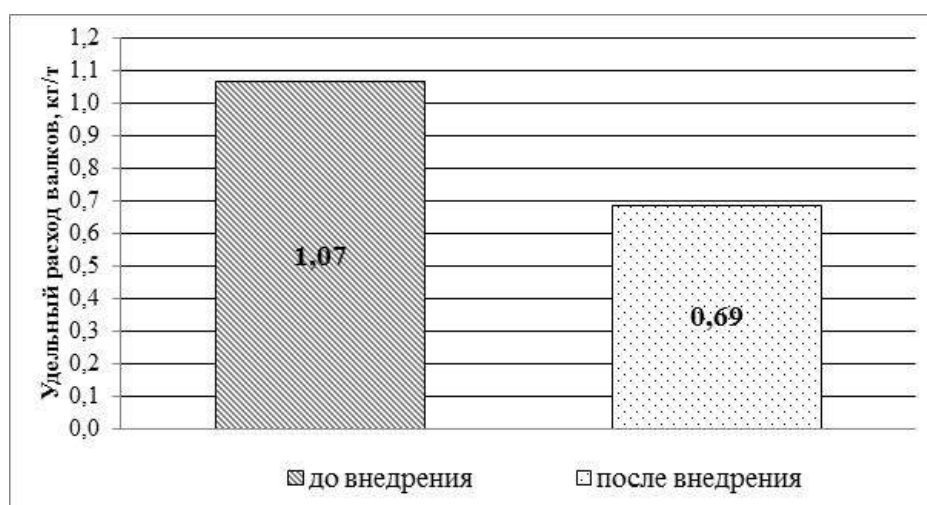


Рисунок 4. Удельный расход рабочих валков стана 1400 на 1 тонну проката

Заключение

Разработаны режимы подготовки и эксплуатации прокатных валков непрерывного стана холодной прокатки, позволяющие повысить их эксплуатационную надежность и долговечность.

Определена технологическая схема восстановления работоспособности и эксплуатации валков стана 1400, получивших грубые повреждения бочки.

Внедрение разработанных режимов на стане 1400 ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» позволило уменьшить количество аварийных отказов рабочих валков, повысить на 27% эффективность использования закаленного слоя и увеличить в 1,9 раза средний ресурс валков до списания.

Библиографический список

1. Повышение качества и эксплуатационной стойкости валков листовых станов/Е.И. Трейгер, В.П. Приходько. Москва, Металлургия, 1988, 192 с.
2. Надежность и долговечность валков холодной прокатки/ Полухин В.П., Николаев В.А., Тылкин М.А. Москва, Металлургия, 1976, 488 с.
3. Офицеров Ю.А., Черешнев В.В., Черкасов В.Н., Терехов Р.В. Разработка технологии эксплуатации рабочих валков непрерывного стана холодной прокатки для производства сортамента различной сложности / Труды X конгресса прокатчиков, Липецк, 12-14 апреля 2015 г., т.1, с. 271-275



УДК 621.73

К.Н. Соломонов, Н.И. Федоринин, Л.И. Тищук
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
университет путей сообщения
(Воронежский филиал)»
г. Воронеж, Россия
E-mail: konssol@list.ru
Дата поступления 09.05.2016

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ЛИНИИ РАЗДЕЛА ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ДЛЯ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОГО КОНТУРА

Аннотация

Приведены принципы, положенные в основу описания картины течения металла по плоским поверхностям. Представлена постановка задачи об определении типа линии раздела течения металла в общем виде и частные решения. Дан алгоритм построения эквидистанты замкнутого кусочно-линейного контура. Показано экспериментальное подтверждение разработанных методик.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, картина течения металла, линия раздела течения металла, линия тока, пространственная эпюра контактных давлений, эквидистанта.

Введение

В процессахковки и объемной штамповки плоских заготовок существенное влияние на качество получаемых изделий оказывает распределение потоков металла по плоскости контакта заготовки и зеркала гравюры штампа. Обычно такие процессы проходят при температуре деформируемого металла, близкой к температуре рекристаллизации. Поэтому упрочнением металла можно пренебречь. В таком случае пластическое течение металла по плоскости контакта подчиняется основным законам теории обработки металлов давлением. Тогда картина течения металла по плоскости контакта определяется положением линии раздела течения металла и направлением линий тока. При значительном трении линии тока направлены ортогонально контуру заготовки, вдоль которого граничные контактные давления меняются скачкообразно. Границей может служить либо край заготовки (при свободной осадке), либо полость штампа под какое-либо конструктивное углубление (ребро жесткости, бобышка, рассекатель), что характерно для открытой штамповки, либо стенка пуансона (при закрытой штамповке). В соответ-

ствии с этим видоизменяются линии раздела течения металла. Следовательно, формирование плоской заготовки при пластическом деформировании в значительной степени зависит от расположения линий раздела течения металла. Тогда при моделировании процессов изготовления поковок ключевую роль играет определение формы и положения линии раздела течения металла.

1. Основы описания картины течения металла

Одним из способов описания картины течения металла служит так называемая «эквидистантная теория», основанная на трех известных [1] принципах:

1. *Принцип наименьшего сопротивления*, выдвинутый применительно к пластической деформации Г. Треска (1895 г.), сформулирован С. И. Губкиным [2] следующим образом. «В случае возможности перемещения точек деформируемого тела в различных направлениях, каждая его точка перемещается в направлении наименьшего сопротивления». Прямым следствием закона наименьшего сопротивления является, например, образование заусенца при штамповке в открытых штампах. Металл в

начальный период штамповки начинает вытекать в стороны за пределы фигуры штампа в зазор между верхним и нижним штампами. Заполнение же элементов полости штампа возможно, если сопротивление течению металла в заусенец становится больше сопротивления течению в те или иные участки полости. Сопротивление течению металла в заусенец увеличивается по мере уменьшения его толщины в процессе движения верхнего штампа, что и обеспечивает в конечном итоге заполнение всех элементов полости. Для практического применения закона наименьшего сопротивления необходимо знать направление траектории, по которой для точек, на ней расположенных, сопротивление течению будет наименьшим.

Принцип наименьшего сопротивления следует учитывать при теоретических исследованиях и при решении практических задач. Так, например, штамповка осадкой круглой в плане поковки во многих случаях может быть осуществлена из заготовки с квадратным поперечным сечением.

2. Для случая осадки (сжатия) призматических и цилиндрических тел между параллельными плитами (бойками) при наличии трения по плоскостям контакта эти траектории определяются по *принципу кратчайшей нормали*, сформулированному А. Ф. Головиным [3], заключающемуся в том, что перемещение любой точки тела в плоскости, перпендикулярной к действию внешней силы, происходит по кратчайшей нормали к периметру сечения. Аналогичный принцип выдвинул Э. Зибелем [4]. Следует добавить, что максимальную конечную деформацию тело получит в тех направлениях, по которым будет передвигаться наибольшее количество точек. Пусть, например, осаживается призма с прямоугольным основанием. Согласно принципу перемещения точек по кратчайшей нормали к периметру сечения прямоугольник можно разделить на два треугольника и две трапеции линиями, представляющими собой граничные линии или линии раздела течения, поскольку длина нормалей к периметру сечения по обе стороны из каждой точки, лежащей на этих линиях, бу-

дет одинаковой. Учитывая количество точек тела, расположенных на направлениях течения в данном сечении, можно предположить, что после некоторой осадки сечение примет вид многоугольника. Нетрудно представить, что при увеличении степени осадки тела, рассматриваемого в нашем примере, периметры его поперечных сечений стремятся к эллипсам, а эллипсы в дальнейшем преобразуются в круги, после чего движение точек происходит по радиусам.

3. Такая закономерность изменения формы поперечных сечений тела при осадке была замечена еще К. Зоббе (1908 г.) [5], который предложил *принцип наименьшего периметра*. Этот принцип можно сформулировать так: любая форма поперечного сечения призматического или цилиндрического тела при осадке его в пластическом состоянии с наличием контактного трения стремится принять форму, имеющую при данной площади наименьший периметр, т. е. в пределе стремится к кругу.

Принцип наименьшего периметра справедлив при перемещении точек деформируемого тела по кратчайшим нормальям к периметрам сечений, перпендикулярных к направлению действующей силы. В дальнейшем было установлено, что кратчайшая нормаль не всегда является направлением наименьшего сопротивления, а лишь при условиях: если трение на поверхностях контакта металла с инструментом изотропно, т. е. одинаково по всем направлениям; если величина контактного трения значительна.

При осадке, например, прямоугольного параллелепипеда между плоскими бойками без контактного трения схема перемещения точек отличается от описанной выше, когда прямоугольник превращается в многоугольник, а затем эллипс и круг. Движение частиц в плоскостях, нормальных к направлению внешней силы, носит радиальный характер, и поперечные сечения в процессе деформации будут оставаться подобными исходным. В. Г. Березкин [6] это показал весьма тонкими экспериментами по осадке прямоугольных свинцовых и алюминиевых образцов, при которых трение было практически исключено.

В соответствии с этими принципами можно считать, что:

- существует некая линия, вдоль которой скорости перемещения частиц металла равны нулю – так называемая, линия раздела течения металла;
- линия раздела течения металла является геометрическим местом точек, равноудаленных от контура заготовки или границы контура вдоль ребер жесткости;
- линии тока направлены ортогонально контуру заготовки при коэффициенте трения, близком к единице, и – радиально при минимальном трении.

Зная положение линии раздела течения металла, можно прогнозировать распределение потоков металла по плоскости контакта в условиях пластической деформации.

Следует отметить, что рассмотренные выше принципы действительны для деталей, имеющих ярко выраженное полотно (т.е. плоскостные участки). Несмотря на кажущуюся ограниченность области применения данной теории из-за вышеприведенной оговорки, детали с признаком «плоскостности» составляют довольно обширный класс, охватывающий различные отрасли машиностроения.

2. Постановка задачи

Решение полной системы дифференциальных уравнений, описывающей поведение нагретого металла при пластическом деформировании, аналитическими методами весьма затруднительно. Примером численного решения служит метод конечных элементов, реализованный практически во всех современных вычислительных системах, предназначенных для моделирования пластического формоизменения металла.

Другой принципиально отличный подход заключается в упрощении математической модели еще на стадии ее разработки, а, следовательно, и облегчении решения системы дифференциальных уравнений и сведении ее в ряде вариантов к аналитическим зависимостям. В таких случаях приходится отказываться от всеобщности

математической модели и ограничиваться описанием всего нескольких процессов ОМД, пренебрегая зачастую температурными и реологическими параметрами. Некоторые процессы ОМД (например, те из них, которые проходят при температуре рекристаллизации, благодаря чему упрочнением металла можно пренебречь) позволяют это делать без больших погрешностей.

В процессах ОМД значительную долю составляют плоские поковки, при формообразовании которых пространственная эпюра контактных давлений (ПЭКД) представляет собой поверхность одинакового ската [7]. В механике сплошных сред такое описание процесса формоизменения материала известно, как «песчаная аналогия» [8]. В этом случае ПЭКД представляет собой поверхность одинакового ската, все образующие которой наклонены к плоскости контакта под одинаковым углом [9].

Проецируя ПЭКД на плоскость контакта инструмента и заготовки, получаем картину течения металла (КТМ), которая состоит из линий раздела течения металла (ЛРТМ) и линий тока (ЛТ). При этом ЛРТМ – проекция гребней ПЭКД, а ЛТ – проекции образующих поверхности ПЭКД. Эти понятия, характеризующие пластическое течение металла по плоскости, имеют физический смысл:

Рассмотрим постановку задачи в скалярной форме. Пусть контур состоит из двух участков, заданных произвольными гладкими функциями $y_1(x_1)$ и $y_2(x_2)$. Требуется найти геометрическое место точек, равноудаленных от этих кривых (рис. 1). Эти точки лежат на кривой $y(x)$.

Положение линии раздела течения металла определяется двумя условиями:

1) равноудаленности: $L_{T1} = L_{T2}$;

2) нормальности: $L_{T1} \perp y_1(x_1)$,
 $L_{T2} \perp y_2(x_2)$.

Из совместного рассмотрения этих условий, получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно x , y , x_2 :

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2, \\ \frac{dy_1}{dx_1} = -\frac{x-x_1}{y-y_1}, \\ \frac{dy_2}{dx_2} = -\frac{x-x_2}{y-y_2}, \end{cases} \quad (1)$$

где (x_1, y_1) — координаты точки, выбранной на кривой $y_1(x_1)$.

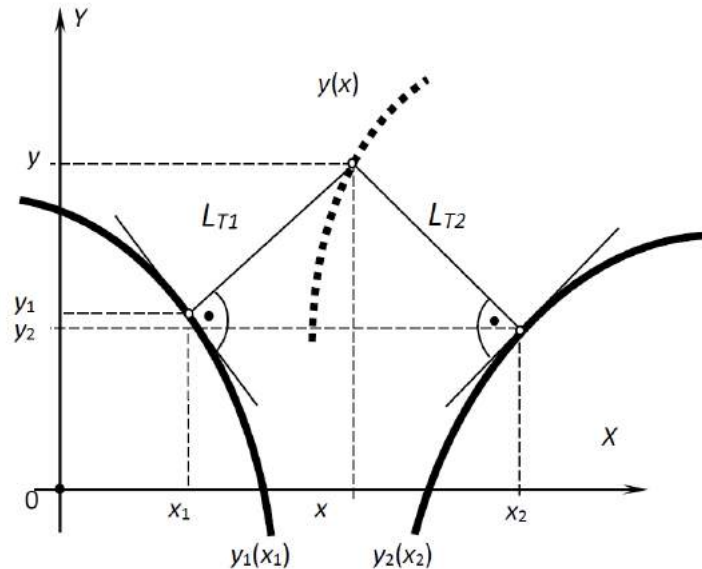


Рисунок 1. Эквидистанта двух гладких кривых

В общем виде аналитическое решение этой системы представляет большие трудности, не оправданные их практической полезностью, т.к. любую гладкую кривую можно аппроксимировать дугами кривых второго порядка (окружности, гиперболы, параболы, в вырожденном виде – и прямой), что упрощает решение и сводит его к частным случаям.

3. Аналитическое решение

Рассмотрим практическую задачу о сжатии прямоугольной пластины с двумя круглыми вырезами (рисунок 2).

Иследуем последовательно форму ЛРТМ на трех характерных участках:

1 – прямая-прямая; 2 – окружность-окружность; 3 – прямая-окружность.

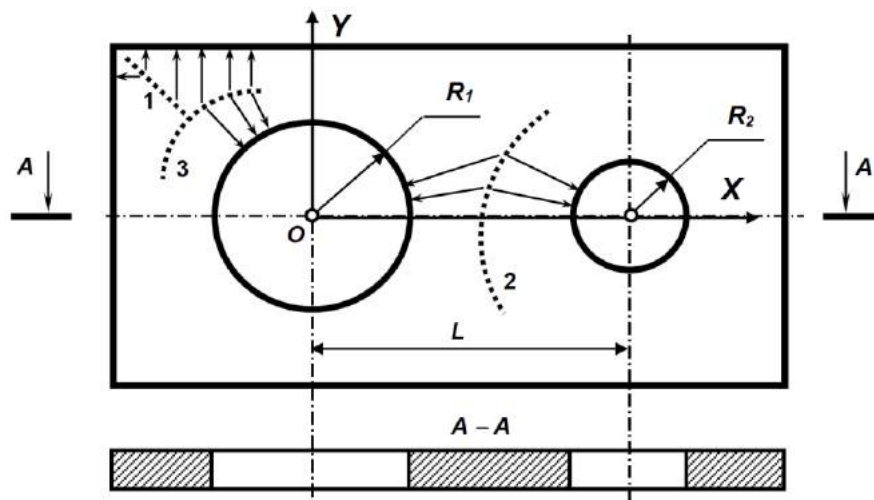


Рисунок 2. Линия раздела течения металла на прямоугольной пластине с двумя круглыми вырезами

На участке 1, очевидно ЛРТМ представляет собой биссектрису прямого угла.

На участке 2, как показано в [7], ЛРТМ может быть описана уравнением кривой второго порядка в каноническом виде:

$$\frac{(x - L/2)^2}{\left(\frac{R_1 - R_2}{2}\right)^2} - \frac{y^2}{L^2 - (R_1 - R_2)^2} = 1. \quad (2)$$

Тип кривой зависит от знака разности: $D = L^2 - (R_1 - R_2)^2$.

А. Если $D > 0$, соотношение (2) представляет собой уравнение гиперболы. В этом случае $L > \pm (R_1 - R_2)$.

Б. Если $D < 0$, соотношение (2) описывает уравнение эллипса. Тогда получаем неравенство $L < \pm (R_1 - R_2)$.

Этому соответствует практическая задача (не показанная на рисунке) построения ЛРТМ при осадке круглой пластины с круглым вырезом. Очевидно, в том случае, когда центр окружности, ограничивающей вырез, совпадает с центром пластины, расстояние между ними $L = 0$, и тогда эллипс превращается в окружность, что следует также из преобразований уравнения (2).

Таким образом, уравнение (2) охватывает все основные варианты взаимного расположения круглых многосвязных контуров поковки, каждый из которых представляет собой либо внешний контур, либо технологический вырез.

Исследования типа кривой на участке 3 показывают, что ЛРТМ представляет собой параболу [7].

Можно сказать, что все частные случаи решения системы (1) этим и исчерпываются, поскольку контур поковки можно аппроксимировать дугами окружности и отрезками прямой. При указанных допущениях ЛРТМ представляет собой кривую второго порядка.

4. Численное решение

Большинство деталей, применяемых в машиностроении, ввиду требований к технологичности конструкции, состоят из поверхностей вращения и многогранников. Поэтому в практике кузнечно-штамповочного производства немало деталей, получаемых из плоских заготовок, имеют элементы плоскостного характера. В рамках данной статьи ограничимся наиболее простым случаем: рассмотрим задачу построения эквидистанты для контура, представляющего собой кусочно-линейную замкнутую линию, т.е. многоугольник (рисунок 3).

Эквидистантой двух прямых является биссектриса этого угла. Поэтому самой первой эквидистантной линией контура является биссектриса самого малого угла в вершине D. Далее проводим биссектрисы двух соседних углов (C и E) до пересечения с биссектрисой самого малого угла (это точки G и H). Заканчиваются первые эквидистантные линии в ближайшей точке G пересечения с биссектрисами соседних углов.

Далее убираем из рассмотрения сторону контура DE, биссектрисы прилежащих углов к которой образовали эквидистантные линии. Продолжаем до пересечения стороны контура FE и CD, соседние с отброшенной линией.

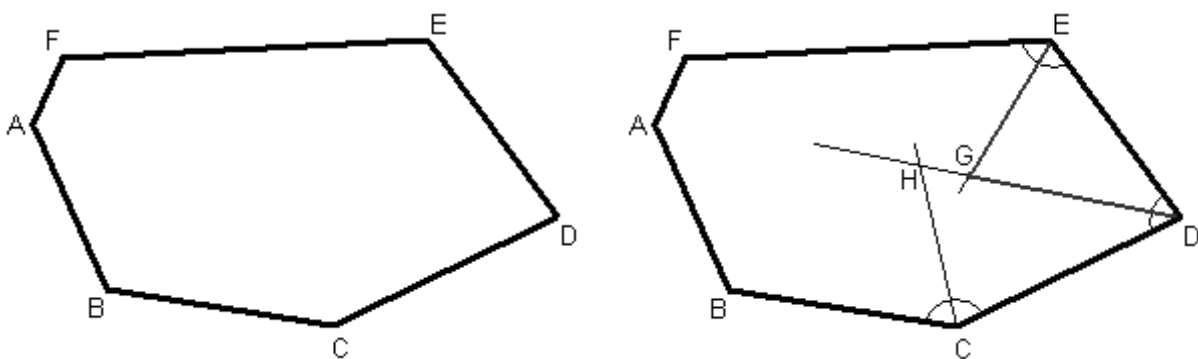


Рисунок 3. Алгоритм построения эквидистанты

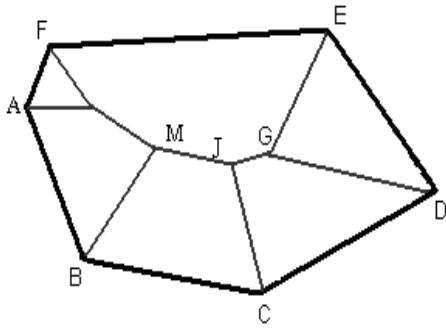


Рисунок 4. Эквидистанта многоугольника

Размерность контура уменьшилась на единицу: вместо шестиугольника теперь будет рассматриваться пятиугольник. Очевидно, что теперь наименьшим углом в многоугольнике контура будет вновь полученный угол. Процедура повторяется, только новая эквидистантная линия строится не от угла контура, а из точки окончания последней эквидистантной линии – точки G. Далее вновь ищем наименьший угол контура среди оставшихся (это угол при вершине F) и повторяем вышеописанный алгоритм действий, пока многоугольник не будет сведен фактически к треугольнику. Как известно из геометрии, в треугольнике биссектрисы всегда пересекаются в одной точке, поэтому для заверше-

ния построения эквидистантных линий достаточно соединить точки, в которых происходила остановка последовательных действий. Построение завершено (результат показан на рисунок 4).

Аналогичным образом можно построить эквидистанту любого многоугольника. В настоящее время алгоритм реализован в среде визуального программирования DELPHI.

5. Экспериментальное подтверждение

Исследования закономерностей течения металла при осадке плоских заготовок из стали и алюминиевых сплавов дают схожее (рис. 5) изображение картины течения металла, полученное в ходе натурального [10] и виртуального экспериментов [11].

Виртуальный эксперимент по осадке прямоугольных пластин разной толщины и размеров в плане при изменяющихся значениях коэффициента трения проводился с помощью известного и хорошо себя зарекомендовавшего вычислительного комплекса DEFORM. Преимущество компьютерного эксперимента (кроме экономии средств) заключалось еще и в том, что можно было отследить весь процесс постадийной осадки.

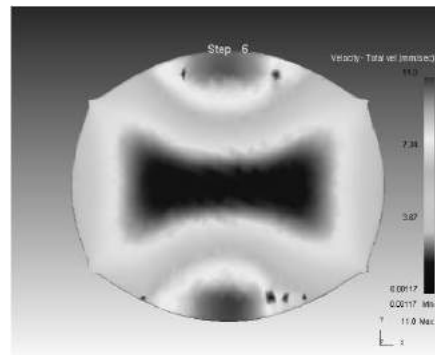
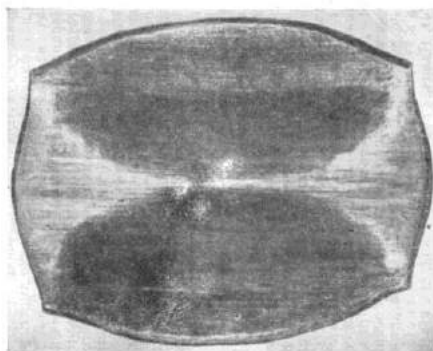


Рисунок 5. Результаты осадки плоских заготовок в ходе экспериментов: слева – натурального, справа – виртуального

Заключение

1. Аппроксимация контура поковки отрезками прямой и дугами окружности позволяет ограничить все многообразие эквидистантных линий кривыми второго порядка.

2. Предложенный алгоритм построения эквидистантных линий дает возможность автоматизировать методику решения поставленной задачи.

3. Экспериментальные данные косвенно подтверждают правильный выбор расчетных схем для отображения картины течения металла.

Библиографический список

1. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1971. 423 с.
2. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением. – М.: Metallurgizdat, 1947. 532 с.
3. Головин А.Ф. Прокатка. – М.: Metallurgizdat, 1933. 236 с.
4. Зибель Э. Обработка металлов в пластическом состоянии. – М.: ОНТИ, 1934.
5. Sobbe C. Beiträge zur Technologie des Schmiedepressens // Werkstattstechnik, 1908, No 9, s. 457-471.
6. Березкин В.Г. Кузнечная вытяжка под плоскими бойками // Сборник «Машины и технологии обработки металлов давлением». – М.: Машгиз, 1955.
7. Соломонов К.Н., Костарев И.В., Абашкин В.П. Моделирование процессов объемной штамповки иковки плоских заготовок. – М.: Издательский дом МИСиС, 2008.
8. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. – М.: Иностранная литература, 1954. 647 с.
9. Ильюшин А.А. Пластичность. – М.: Гостехиздат, 1948. 376 с.
10. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганаго О.А. Деформации и усилия при обработке металлов давлением. – М.: Машгиз, 1959.
11. Соломонов К.Н., Свирин В.В. Анализ кинематических схем течения металла с помощью виртуального эксперимента // Технология легких сплавов, 2010, № 3, С. 58-64.



УДК 658.52.011.56

А.К. Иванюк, Ю.П. Сердобинцев
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет»
г. Волгоград, Россия
E-mail: ivanyuk_aleksei@mail.ru

Дата поступления 14.05.2016

В авторской редакции

РАСЧЕТ И КОРРЕКТИРОВКА КОЭФФИЦИЕНТА ПРОДОЛЬНОГО ИЗГИБА ТРУБ, ИСПЫТЫВАЮЩИХ ВНЕШНЕЕ СЖАТИЕ

Аннотация

Произведен расчет и оценка полученных значений минимальной толщины стен труб, испытывающих внешнее сжатие. В ходе исследования выявлены расхождения значений из-за неполной исследованности влияния геометрии трубы на коэффициент продольного изгиба. Рассчитаны и проанализированы погрешности, с помощью современных САД систем получены критические значения для дальнейшей корректировки данного коэффициента. Разработаны две программы для автоматизированного расчета и произведена корректировка исследуемого коэффициента. В результате получены уменьшенные значения погрешности расчетов, что в дальнейшем способствует более точному расчету труб, испытывающих внешнее сжатие.

Ключевые слова: коэффициент продольного изгиба труб, автоматизированный расчет деформаций, Autodesk Inventor, критическое давление.

Введение

В данной статье рассматривается вопрос о повышении точности расчета минимальной толщины стенок, испытывающих заданное внешнее давление. Решение достигается анализом и корректировкой коэффициента продольного изгиба труб. Так

как определение толщины стенок трубы является важным вопросом в разных отраслях, то авторам видится целесообразным повышением точности в расчетах труб.

Исследования проводились для труб, используемых для создания подводных технических средств, т.е. небольшого размера,

до 1 метра, и испытывающих объемное гидростатическое сжатие.

При анализе известной таблицы значений коэффициента продольного изгиба было выявлено, что значения для труб малых размеров (до 1 метра в длину и до 200 мм в диаметре) значения отсутствуют и при использовании ближайшего коэффициента дают большую погрешность.

После проведения ряда экспериментов определены зависимости геометрии и результирующих расчетных значений. Полученные результаты показали уменьшение погрешности, что позволило существенно доработать созданную авторами автоматизированную расчетную программу.

Основная часть

В первую очередь проанализируем существующий метод расчета на прочность труб испытывающих объемное сжатие [1]. Для анализа использовалась следующая основная формула:

$$\delta_{min} = \frac{(p_H - p_B)d_H}{2[\sigma_y]} ; \quad (1)$$

где p_H – внешнее давление,

p_B – внутреннее давление,

d_H – наружный диаметр стенки,

$[\sigma_y]$ – допустимое напряжение, учитывающее устойчивость стенок трубы к продольному изгибу $[\sigma_y] = \varphi[\sigma]$,

$[\sigma]$ – допустимое напряжение на сжатие материала оболочки,

φ – коэффициент продольного изгиба, зависящий от гибкости трубы

$$\lambda = \mu l / i,$$

μ – коэффициент Пуассона,

l – длина трубы, i – момент инерции поперечного сечения трубы [2]

Провести данный расчет возможно не для всех материалов. Проанализировав существующую литературу, выяснилось, что зависимость $\varphi = f(\lambda)$ является известной только для небольшой группы материалов, в частности для металлов и сплавов. На рисунке приведена известная таблица таких зависимостей (Рисунок 1) [3].

ДАННЫЕ К РАСЧЕТАМ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

Коэффициенты продольного изгиба φ (увеличенные в 1000 раз)

Материал	Г и б к о с т ь л														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
АМг	973	945	917	870	770	685	603	530	465	415	365	327	296	265	235
АМг6	973	946	890	770	640	542	458	387	322	280	243	213	183	162	148
АВТ1	996	992	900	780	660	557	463	387	312	252	210	175	150	129	113
Д16Т	999	998	835	700	568	455	353	269	212	172	142	119	101	87	76
Ст2, Ст3 Ст4	990	970	950	920	890	860	810	750	690	600	520	450	400	360	320
Ст5	980	950	930	900	840	800	740	660	590	500	430	380	320	280	270
НЛ-2 15ХСНД	980	950	930	900	830	780	710	630	540	450	390	330	290	260	230
СЧ12, 15 СЧ18, 21	970	910	810	690	570	440	340	260	200	160	-	-	-	-	-
СЧ24 СЧ28	950	870	750	600	430	320	230	180	140	120	-	-	-	-	-
Босна	990	970	930	870	800	710	610	490	380	310	250	220	180	160	140

Рисунок 1. Данные к расчетам на устойчивость

Так исходными данными для наших расчетов являлись:

Длина трубы - 40см, материал - алюминий 6061, μ - 0.33, σ - 275 МПа, начальный коэффициент продольного изгиба φ - 0.973, внутренний диаметр d_B - 120 мм.

С помощью САД программы Autodesk Inventor были найдены критические значения давлений для труб с определенной толщиной стенки [4]. По напряжениям фон Мизеса и коэффициенту запаса прочности данное значение было подобрано максимально точно [5]. Результаты представлены на рисунках 2 и 3. Данные значения были занесены в разработанную авторами автоматизированную программу для расчета толщины стен, для проверки адекватности рассчитанных значений, установлении причины расхождений, дальнейшей корректировки для уменьшения расчетной погрешности. Интерфейс программы представлен на рисунке 4.

Зная критическое давление при которой труба с заданной толщиной стенки начинает разрушаться, можно точно отследить погрешность расчетов по выше описанной формуле и по разработанной на ее базе программе [6]. Так было проведено 7 виртуальных экспериментов, данные которых занесены в таблицу 1. Очень точно прослеживается логическая связь – при увеличении давления, необходима большая толщина стенки [7].

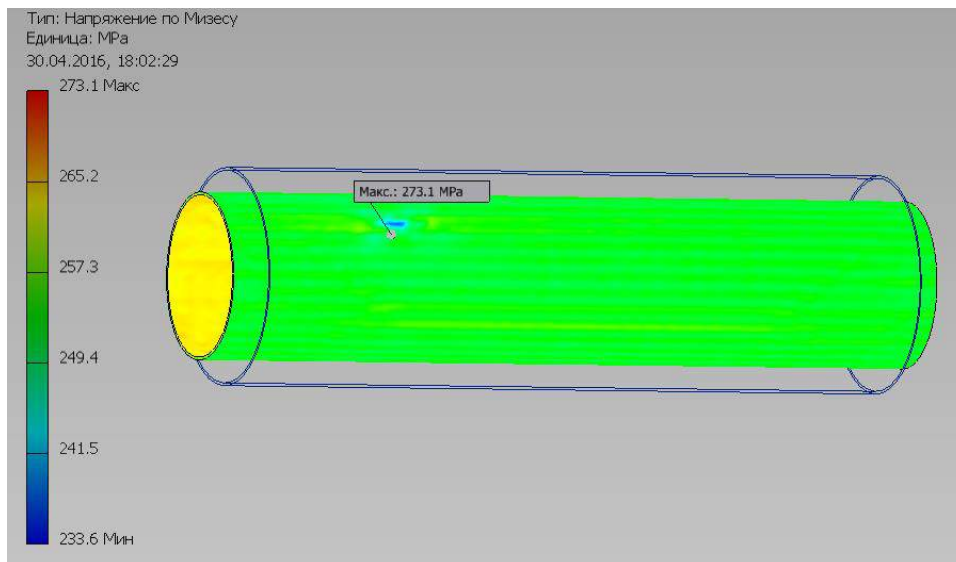


Рисунок 2. Виртуальное исследование, напряжение по Мизесу

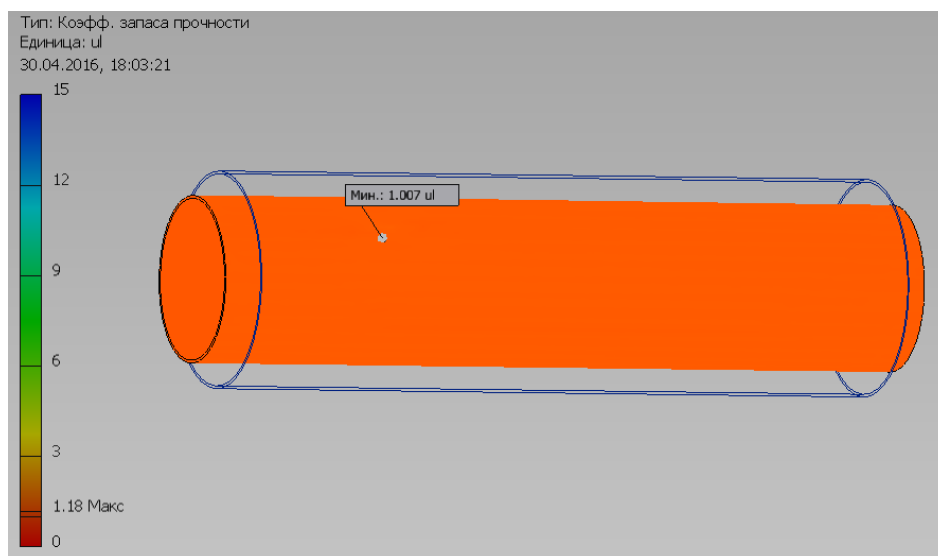


Рисунок 3. Виртуальное исследование, коэффициент запаса прочности

Автоматизированный расчет толщины стенки оболочек испытывающих гидростатическое сжатие

Расчет толщины стенки трубы:		Расчет толщины стенки сферы:	
Материал: <input type="text" value="Алюминий 6061"/>			
Давление наружное, МПа	<input type="text" value="6.4"/>	Давление наружное, МПа	<input type="text" value="6.4"/>
Давление внутреннее, МПа	<input type="text" value="0.1"/>	Давление внутреннее, МПа	<input type="text" value="0.1"/>
Сигма, предел прочности, МПа	<input type="text" value="275"/>	Сигма, предел прочности, МПа	<input type="text" value="275"/>
Длина трубы, м	<input type="text" value="0.4"/>	Диаметр наружный, м	<input type="text" value="0.123"/>
Диаметр начальный внутр, м	<input type="text" value="0.12"/>	Мин. толщина стенки, мм	<input type="text" value="0.7045"/>
μ , коэф. Пуассона	<input type="text" value="0.33"/>	<input type="button" value="Расчет стенки сферы"/>	
Диаметр наружный, м	<input type="text" value="0.123"/>		
Расчитать гибкость трубы	<input type="text" value="3.073"/>	<input type="button" value="Выход"/>	
Открыть таблицу с коэф. продольного изгиба			
Коэффициент продольного изгиба	<input type="text" value="0.973"/>		
<input type="button" value="Расчет стенки трубы"/>	Мин. толщина стенки, мм		
	<input type="text" value="1.448"/>		

Рисунок 4. Автоматизированная программа для расчета толщины стенок оболочек, испытывающих гидростатическое сжатие

Таблица экспериментальных значений

	Расчетная программа			CAD система		
	Критическое давление, МПа	Расчётная толщина стенки, мм	Идеализированный коэффициент продольного изгиба	Критическое давление, МПа	Диаметр наружный, мм	Толщина стенки, мм
Эксперимент 1	6.4	1.448	0.939	6.4	123	1.5
Эксперимент 2	20	4.834	0.94	20	130	5
Эксперимент 3	35	9.13	0.888	35	140	10
Эксперимент 4	44.8	12.53	0.812	44.8	150	15
Эксперимент 5	59	17.61	0.856	59	160	20
Эксперимент 6	67.5	21.41	0.833	67.5	170	25
Эксперимент 7	75	25.19	0.817	75	180	30

По разработанной программе расчетные значения с увеличением критического давления становятся более отличными от полученных посредством CAD системы. То есть видно, что для 7 эксперимента толщина стенки должна выходить в 30 мм, но по рассчитанной программе она составляет 25,19 мм. В чем же здесь ошибка? Ошибки в формуле нет, просто не учтено изменение самого коэффициента продольного изгиба для данных малых величин гибкости трубы. Следовательно, появляется необходимость его корректировки, что можно сделать по созданной авторами программе [8].

В ходе исследований выявлена и рассчитана погрешность, а также обоснована необходимость корректировки коэффициента продольного изгиба для повышения точности расчетов. Расчет погрешности представлен в таблице 2.

Таблица 2

Соотношение полученной погрешности от изменения толщины стенки трубы

Изменение толщины стенки, мм	Погрешность расчета, %	Гибкость трубы
0.3	3.47	3.073
1	3.32	2.984
2	8.7	2.863
3	16.47	2.749
4	11.95	2.64
5	14.36	2.537
6	16.03	2.441

На рисунке 5 приведены два графика – расчетное значение и заданное, будем считать его за идеальное, к которому мы должны стремиться при расчетах [9].

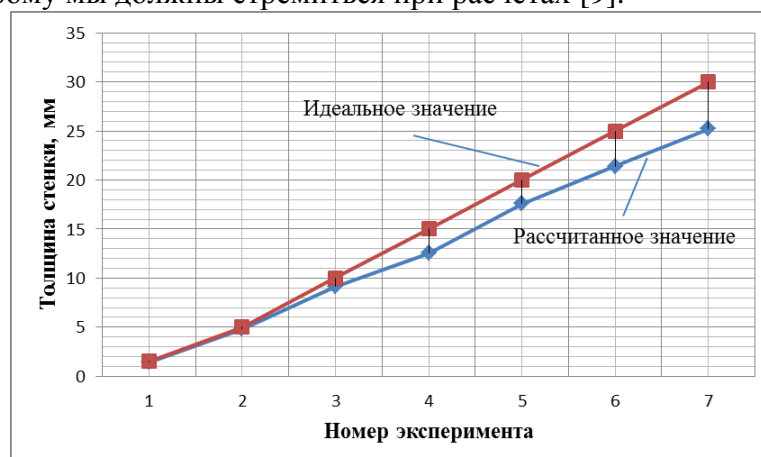


Рисунок 5. Графики расхождений значений толщины стенок

После анализа и расчета для конкретных значений была получена таблица 3 зависимости гибкости трубы и скорректированного коэффициента изгиба, обеспечивающего приближение расчетных значений к идеальным.

Таблица 3
Соотношение скорректированного коэффициента продольного изгиба и гибкости трубы

Гибкость трубы	Скорректированный коэффициент продольного изгиба
3.073	0.939
2.984	0.94
2.863	0.888
2.749	0.812
2.64	0.856
2.537	0.833
2.441	0.817

По данной таблице был построен график и произведена аппроксимация. Полученные данные представлены на рисунке 6.

Из рисунка 6 видно, что при уменьшении гибкости трубы коэффициент продольного изгиба уменьшается. Коэффициент достоверности выведенной формулы достаточно велик – 0.9988. Это означает, что мы можем в дальнейшем использовать данную расчетную формулу для корректировки и нахождения значений толщин труб с разной геометрией и находящейся под разным давлением.

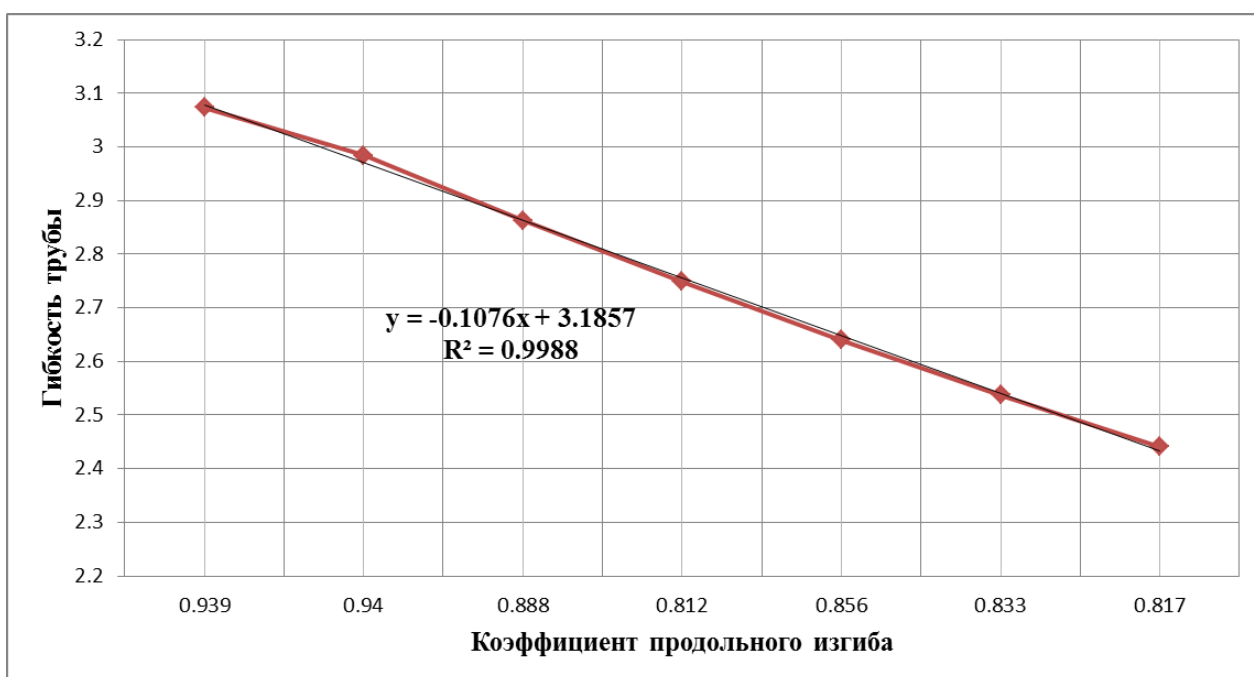


Рисунок 6. Аппроксимация функции зависимости гибкости трубы и коэффициента продольного изгиба

Заключение

Проанализирована существующая методика определения толщины стенки герметичных оболочек (приборов связи), испытывающих гидростатическое давление.

Разработаны объемные модели посредством компьютерного моделирования.

Используя различные модификации геометрических размеров, были проведены виртуальные испытания, для определения максимального значения давления, которое может выдержать заданная труба из конкретного материала [10].

Разработана автоматизированная программа для расчета толщины стен оболочек

находящихся под гидростатическим давлением. Программа была написана по исследованной методике и учитывает все физико-химические параметры исследуемого объекта. Такие как предел прочности, геометрия трубы, коэффициент μ , и др.

Решена задача проверки точности расчетов по разработанной программе. При проведении вычислений была обнаружена нехватка известных значений зависимости коэффициента продольного изгиба и гибкости трубы.

Была предложена идея корректировки найденных экспериментальным путем коэффициентов, для уменьшения погрешностей расчета.

По результатам анализа и вычислений использование данной аппроксимированной функции позволяет уменьшить расчетную погрешность, при этом обеспечивая достаточный запас прочности трубе испытывающей гидростатическое напряжение.

Библиографический список

1. Иванюк, А.К. Проектирование автоматизированной системы технологической подготовки производства корпусных деталей прибора связи [Электронный ресурс] / Иванюк А.К., Барабанов В.Г. // 65-я международная студенческая научно-техническая конференция, посвящённая 85-летию со дня основания вуза / Астраханский гос. техн. ун-т. - Астрахань, 2015. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
2. Капустин, Н.М. Автоматизация машиностроения / Н.М. Капустин, Н.П. Дьяконова, П.М. Кузнецов. Под ред. Н.М. Капустина. – М.: Высшая школа, 2007. – 224 с.
3. Иванюк А.К., Барабанов В.Г. Разработка новых подходов в методологии проектирования АСТПП // Сборник тезисов докладов по внутривузовскому смотрю-конкурсу научных конструкторских и технологических работ студентов / ВолгГТУ, Совет СНТО. - Волгоград, 2015. - С. 23.
4. Сердобинцев, Ю.П. Повышение качества функционирования технологического оборудования: монография / Ю.П. Сердобинцев, О.В. Бурлаченко, А.Г. Схиртладзе; ВолгГТУ. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 410 с.
5. Иванюк, А.К. Синтез структурной схемы проектирования АСТПП на примере корпусных деталей/Иванюк А.К., Сердобинцев Ю.П. // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС - 2015). Материалы конференции. Санкт-Петербург. 28-30 октября 2015г. Спб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2015. - С. 433-437.
6. Капустин, Н.М., Кузнецов П.М. Формирование виртуальной производственной системы для выпуска изделий в распределенных системах /Н. М. Капустин, П.М. Кузнецов //Машиностроитель. 2002. № 6. С. 42-46.
7. Колесов, И.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для машиностроительных специальностей вузов/ И. М. Колесов. - М.: Высшая школа, 1999. -591 с.
8. Иванюк, А.К. К вопросу об интеграции САМ систем в АСТПП корпусных деталей прибора связи / Иванюк А.К., Барабанов В.Г. // Евразийский союз учёных. - 2014. - № 8 (часть 8). - С. 53-56.
9. Зильбербург Л.И., Молочник В.И., Яблочников Е.И. Реинжиниринг и автоматизация технологической подготовки производства в машиностроении. СПб: "Политехника", 2004. – 152 с.
10. Яблочников Е.И. Методологические основы построения АСТПП. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 84 с.



УДК 531.43/46

Р.Н. Савельева, Е.С. Иванова
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: sav-r46 @yandex.ru
Дата поступления 12.05.2016

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ГЛАВНОГО ПРИВОДА РАБОЧИХ КЛЕТЕЙ И СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ИХ РЕСУРСА

Аннотация

Техническое диагностирование оборудования линии привода валков черновой клетки «ДУО» стана 2500 горячей прокатки ОАО «ММК» выявило неудовлетворительную работоспособность ряда ее элементов, в частности рабочих валков. Одним из направлений повышения работоспособности рабочих валков является применение материала с более высокими прочностными характеристиками. На основе аналитического исследования ресурса рабочих валков клетки «ДУО» стана 2500 горячей прокатки ОАО «ММК» по критерию кинетической прочности предложены материалы с более высокими прочностными характеристиками, позволяющие повысить долговечность валков.

Ключевые слова: надежность, долговечность, работоспособность, ресурс, рабочие валки, черновая клеть.

Введение

Актуальной проблемой теории надежности является решение вопроса о прогнозировании безотказности и долговечности нагруженных деталей и узлов машин на стадии проектирования и эксплуатации по различным критериям (параметрам состояния). Именно этой проблеме и посвящена данная работа.

Объектом исследования являются элементы главного привода черновой реверсивной клетки «ДУО» ЛПЦ-4 ОАО «ММК», состоящего из электродвигателя, главного шпинделя и муфт, шестеренной клетки, универсальных шпинделей и рабочих валков.

Предметом исследования служат показатели безотказности и долговечности оборудования привода валков.

Основная часть

Проведено техническое диагностирование главного привода клетки «ДУО», в ходе которого определен проектный ресурс (срок службы) его элементов, в частности рабочих валков.

Рабочие валки на стане 2500 горячей прокатки ОАО «ММК» выполнены из стали 40 ХН. Для оценки ресурса безотказ-

ной работы валков был использован современный кинетический подход к расчету долговечности элементов механических систем, представленный в работах [1-8]. С позиции кинетического подхода ресурс нагруженных деталей машин рассчитывается на основе математического моделирования процесса повреждаемости структуры их материала для заданных условий нагружения (заданных напряжений σ_{max} и температуры изделия T). В этом случае параметром состояния исследуемых деталей является не максимальное напряжение σ_{max} , а текущая плотность скрытой энергии дефектов - $u_e(\sigma_{max}, T, t)$, которая накапливается с течением времени эксплуатации t в наиболее нагруженных локальных объемах материала, расположенных в зоне действия σ_{max} . Момент отказа шестеренной клетки (ее ресурс) определяется моментом достижения плотностью $u_e(\sigma_{max}, T, t)$ критического значения, которая является функцией энтальпии плавления материала детали в жидком состоянии ΔH_s [9].

На рисунке 1 показана графическая интерпретация этого расчета в виде номограммы. Ресурс рабочего валка, подверженного изгибу, можно оценить по номограмме

(рисунок 1) следующем образом. По расчетному значению напряжения $\sigma = 66,6$ МПа, отложенному по оси абсцисс, и кривой, соответствующей заданному значению его рабочей температуры $T = 60^\circ\text{C}$, необходимо по оси ординат найти (рассчитать) значение искомого ресурса (см. ординату выделенной точки на рисунок 1). В данном случае средний ресурс исходного рабочего валка, рассчитанный по предложенной методике, составляет для заданных условий нагружения $t_{\text{пр}} \approx 2,28 \cdot 10^8 \text{ с} = 7,4$ года. На номограмме ордината выделенной точки.

Одним из направлений повышения работоспособности рабочих валков является применение материала с более высокими прочностными характеристиками.

С этой целью были предложены материалы с более высокими прочностными характеристиками по рекомендациям, приведенным в современной научно-технической литературе - 50ХН, 60ХН, 9ХФ [10].

Для этих марок стали был рассчитан средний ресурс по методике прогнозирования долговечности. Результаты расчета представлены на рисунках 2 – 4.

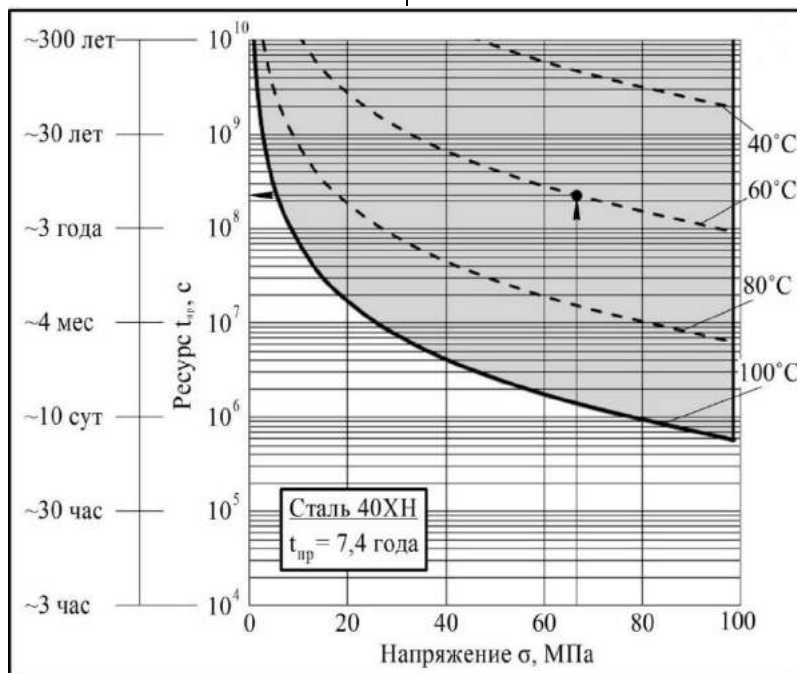


Рисунок 1. Номограмма для оценки ресурса валка из стали 40ХН

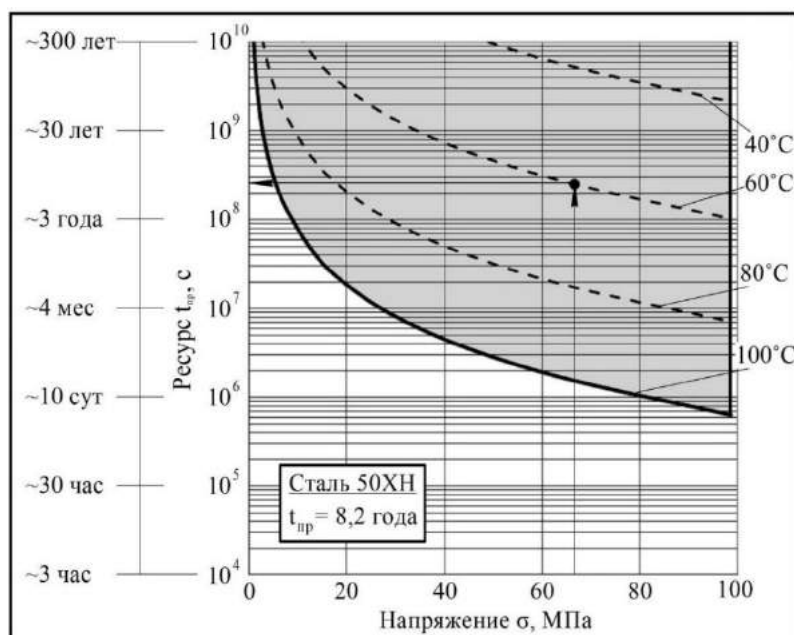


Рисунок 2. Номограмма для оценки ресурса валка из стали 50ХН

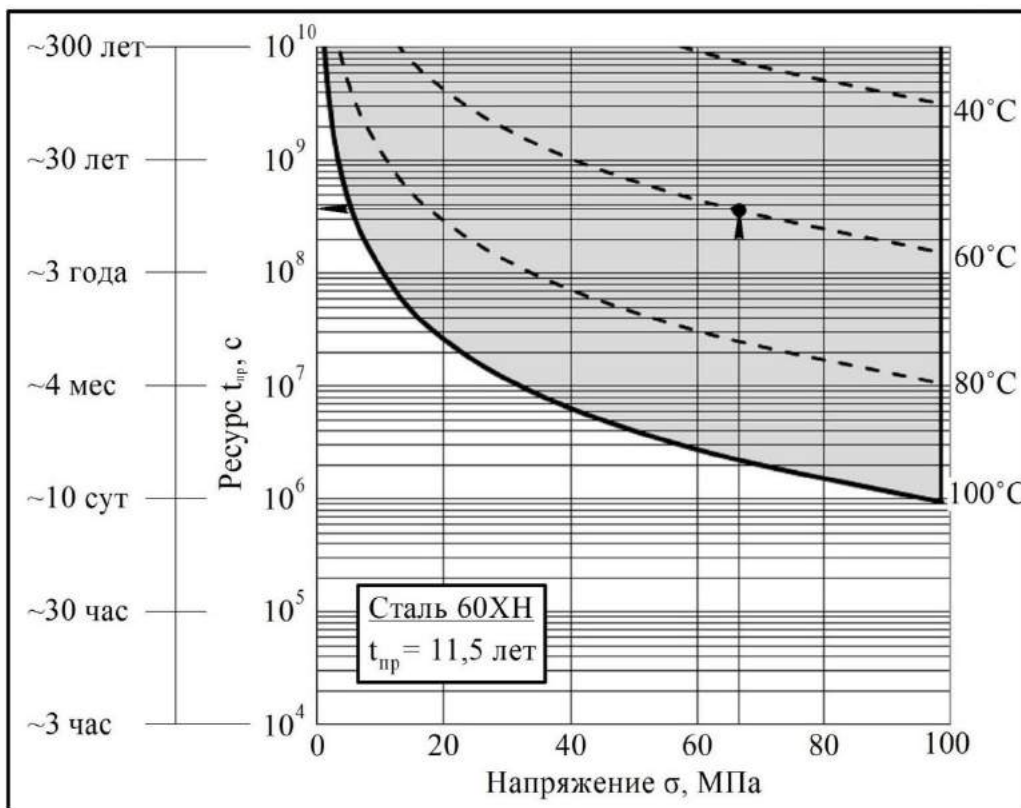


Рисунок 3. Номограмма для оценки ресурса валка из стали 60XH

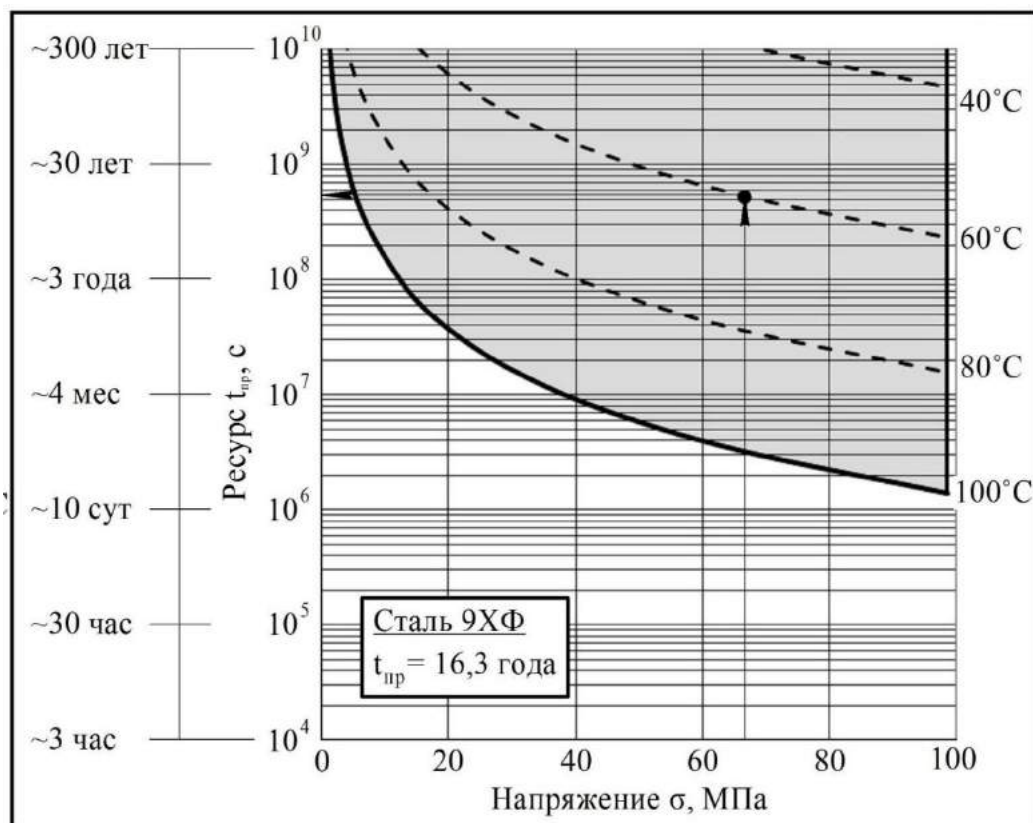


Рисунок 4. Номограмма для оценки ресурса валка из стали 9XF

Прогнозируемый ресурс рабочего валка (предельная длительность непрерывного пребывания валка под нагрузкой от момента ее приложения до момента отказа

(разрушения)) составляет для стали 50XH $t_{пр} \approx 8,2$ года, для стали 60XH – $t_{пр} \approx 11,5$ лет, для стали 9XF – $t_{пр} \approx 16,3$ лет.

Заключение

По результатам расчета средний ресурс рабочих валков из стали 9ХФ составляет 16,3 года, что практически более чем в 2 раза превышает ресурс валков из стали 40ХН.

Таким образом, этот материал является более эффективным и при промышленном внедрении его более высокая стоимость может окупиться за счет увеличения срока службы рабочих валков и главного привода в целом.

Библиографический список

1. Основы физической теории надежности деталей машин по критериям кинетической прочности материалов / В.П. Анцупов, Л.Т. Дворников, Д.Г. Громаковский, А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, 2014. №1. С. 141-146.
2. Оценка долговечности нагруженных деталей по кинетическому критерию прочности / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, Р.Н. Савельева // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 70-й научно-технической конференции. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2012. Т.1. С. 137-141.
3. Методология вероятностной оценки надежности элементов машин по различным критериям / А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), М.Г. Слободянский, А.М. Овсов // Механическое оборудование металлургических заводов: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. Корчунова А.Г. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2012. С. 28-34.
4. Оценка долговечности и повышение срока службы золотниковых распределителей / А.В. Анцупов, В.А. Русанов, В.П. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), Р.Н. Савельева // Механическое оборудование металлургических заводов: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. Корчунова А.Г. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2012. С. 44-52.
5. Анцупов А.В. (мл.). Развитие теории прогнозирования надежности деталей машин / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал, 2014. №2. С.26-32.
6. Прогнозирование долговечности клапанов насоса сжиженных газов по критерию износостойкости рабочих элементов / Р.Н. Савельева, К.В. Чернов // Механическое оборудование металлургических заводов: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. Корчунова А.Г. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2015. С. 23-28.
7. Обеспечение надежности привода экранированных систем экранирования горячекатаных полос / В.А. Русанов В.А., А.С. Губин., Р.Н. Савельева, И.А. Анцупова // Инновации в науке: сб. ст. по материалам XLII международной научно-практической конференции. №2 (39). – Новосибирск: Изд-во «СибАК», 2015. С.35-44.
8. Анцупов А.В. (мл.). Теория и практика обеспечения надежности деталей машин по критериям кинетической прочности и износостойкости материалов: монография / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 308 с.
9. Конструкции и расчет надежности деталей и узлов прокатных станов: учеб. пособие / В.П. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.А. Русанов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 156 с.
10. Стали и сплавы. Марочник: справ.изд. / Сорокин В.Г., Гераськин М.А., Палеев В.С. и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.

ТРЕБОВАНИЯ

к оформлению материалов представляемых для публикации

1. Материалы предоставляются в электронном виде, оформленные в программе MS Word 97-2003.
2. Объем представленных материалов должен быть не менее 6-ти страниц (в режиме оформления одной колонкой на листах формата А4), включая рисунки и таблицы.
3. Формат листа: А4 (210x297 мм).
4. Межстрочный интервал: одинарный.
5. Размер полей слева, справа и сверху страницы 18 мм, снизу 20 мм.
6. Нумерация страниц осуществляется внизу по центру страницы.
7. Шрифт текста: Times New Roman, размер 12 пт.
8. Отступ перед каждым абзацем (красная строка) – 10 мм.
9. Формулы должны быть набраны в тексте, вписывание формул от руки не допускается, размер базового шрифта в формулах – 12 пунктов.
10. Рисунки должны быть вставлены в текст и обязательно представлены в виде отдельного файла в формате jpeg, tiff, bmp с разрешением не менее 300 dpi. Наличие подрисовочной надписи обязательно.
11. Не допускается разрыв таблиц, рисунков, заголовков при переходе со страницы на страницу.
12. Структура текста.
 - 12.1. Индекс УДК.
 - 12.2. Имя, отчество и фамилия авторов, жирный шрифт – Times New Roman, размер – 12 пт.
 - 12.3. Наименование организации.
 - 12.4. Город, страна.
 - 12.5. Контактный адрес электронной почты (E-mail).
 - 12.6. Название (должно быть набрано прописными буквами не в режиме CAPS LOCK (SHIFT)).
 - 12.7. Аннотация.
 - 12.8. Ключевые слова.
 - 12.9. Введение.
 - 12.10. Основная часть.
 - 12.11. Заключение (Выводы).
 - 12.12. Библиографический список.
13. Библиографический список составляется в последовательности ссылок в тексте. В тексте статьи ссылки на литературный источник заключаются в квадратные скобки. Библиографическое описание регламентировано ГОСТ 7.05-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Материалы для публикации направлять по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова, кафедра «Проектирование и эксплуатация металлургических машин и оборудования».
Контактные телефоны: (3519) 29-85-07, 29-84-51.
E-mail: momz-magtu@yandex.ru, momz-magtu@mail.ru с указанием темы электронного письма «Журнал МОМЗ».
Контактное лицо, отв. редактор к.т.н. Слободянский Михаил Геннадьевич.