

В.И.Большаков, И.Б.Листопадов, К.В.Коноваленко

АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОДАЧИ ГИЛЬЗЫ В ВАЛКИ ПИЛИГРИМОВОГО СТАНА

Приведены результаты сравнительного анализа основных направлений стабилизации подачи гильзы гидромеханическими механизмами в валки пильгерстанов. Показано, что причиной нестабильности подачи являются изменяющиеся в процессе прокатки возмущения, вызывающие изменение скорости каретки. Отмечены перспективные направления снижения амплитуды колебаний каретки.

Состояние вопроса. Трубопрокатные установки с пилигримовыми станами являются наиболее экономичными агрегатами для производства горячекатаных труб нефтяного сортамента. До недавнего времени на заводах мирового сообщества эксплуатировалось более 70 трубопрокатных установок, из них 6 в Украине, производящих трубы диаметром 20–630мм. Начато строительство трубопрокатной установки с пилигримовыми станами в Китае. Основным недостатком пилигримовой прокатки является относительно низкое по сравнению, например, с непрерывными станами качество выпускаемых труб. Специфическим для пилигримовых станов дефектом труб являются так называемые бугры, представляющие собой местное увеличение диаметра от утолщения стенки. Появление такого вида брака является следствием чрезмерной подачи [1]. Кроме того, на пилигримовом стане при прокатке образуются закаты как следствие переполнения калибра при чрезмерных подачах. Применение максимальных подач при прокатке труб обусловлено энергетикой стана, так как быстро прокатанная труба меньше теряет тепла [1]. Следует отметить, что по тем же причинам прокатку труб стараются вести на максимально возможных оборотах валков стана.

Комплекс основных механизмов пилигримового стана (пильгерстана), схема которого приведена на рис. 1, состоит из прокатной клетки с приводом рабочих валков, подающего аппарата, сообщающего прокатываемой гильзе возвратно–поступательное и вращательное движение. Подающий аппарат 1 представляет собой поршневой пневмоцилиндр (воздушный цилиндр), корпус которого установлен на каретке 2 механизма подачи. На шток пневмоцилиндра 3 устанавливается оправка (дорн) с прокатываемой гильзой 4. Движение к валкам 5 поршень 6 подающего аппарата совершает под действием сжатого воздуха $P_в$, подающегося от централизованной системы высокого (до 1Мпа) давления через обратный клапан 7 в воздушную камеру подающего аппарата. Сжатый воздух подающийся в воздушную камеру имеет давление ($P_{во}$), необходимое для перемещения поршня, связанного с его штоком дорна с гильзой и соединительного устройства (замка). Суммарная масса поршня, замка, дорна и гильзы составляет подвижную массу воздушного цилиндра. Возвратное движение пере-

12–28% от средней подачи. Широкий диапазон подач и наличие подач, значительно отклоняющихся в большую сторону от заданной величины, приводят к перегрузке главной линии стана и появлению брака при прокатке труб, что вынуждает уменьшать величину подачи. Потери производительности при этом составляют около 10%.

Изложение основных материалов.

Нестабильность скорости перемещения каретки для подачи прокатываемой гильзы в валки пилигримового стана отмечалась многими исследователями, в том числе ведущих фирм, например Маннесман Меер (Маннесман Демаг), по разработке, изготовлению и эксплуатации пилигримовых станов. Было установлено [2], что нестабильность скорости перемещения каретки (подачи) вызывается колебательным процессом с переменной частотой колебаний как реакцией на торможение подвижных масс воздушного цилиндра.

С.Н.Кожевниковым и А.В.Праздниковым экспериментально [3] и с помощью моделирования [4] показано, что колебания каретки имеют не только переменную частоту, но и переменную амплитуду, зависящие от переменной жесткости жидкости в гидроцилиндрах привода каретки. Впервые было показано, что подача гильзы в валки представляет собой сложное движение, состоящее из возвратно–поступательного движения, передаваемого гильзе плунжером воздушного цилиндра, равномерного движения каретки и периодического колебательного движения каретки. В работе [4] показано, что дроссельное управление скоростью не обеспечивает постоянства скорости каретки и предложено искать путь стабилизации подачи в замене дроссельного управления объемным управлением гидропривода. Вторым основополагающим выводом работы [4] было утверждение, что неравномерность подачи по длине трубы является постоянной величиной.

Основываясь на выводах С.Н.Кожевникова и А.В.Праздникова [4], разработки механизмов подачи с объемным регулированием скорости в 60–70 годах 20 века стали основным направлением в стабилизации подачи для пилигримовых станов с гидравлическим механизмом перемещения каретки. Анализ конструкций разработанных в этот период механизмов подачи с различного вида дозаторами, установленными на напорной или сливной магистрали гидропривода, приведен в работах [4–6]. В работе [4] приведена конструкция механизма подачи, разработанная сотрудниками ИЧМ для пилигримового стана ТПЦ №1 ОАО Интерпайп–НТЗ. Особенностью конструкции является использование вращающегося пробкового гидрораспределителя, связанного с приводом валков. В работе [5] приведены конструкции механизмов подачи с дозаторами, разработанными ВНИТИ и УралНИТИ для пилигримовых станов Челябинского трубного и Таганрогского металлургического заводов. Все типы механизмов подачи с дозаторами не нашли практического применения. В работе [7] приведена конструкция механизма подачи, в которой дозирующий расход жидкости

механизм снабжен амортизаторами, которые, по мнению авторов разработки, должны способствовать демпфированию колебаний каретки. Сведений о его промышленном опробовании в научно-технической литературе не содержится.

Дальнейшие попытки стабилизации подачи за счет объемного управления расходами жидкости, подаваемыми или отбираемыми дозаторами от гидроцилиндров механизма подачи, привели к созданию механизмов подачи с дозирующими насосами. Механизм подачи с трехплунжерным дозирующим насосом [8] был установлен и испытан на пилигримовом стане ТГМЗ. Во время испытаний сотрудниками ИЧМ, включая авторов работы, проводились экспериментальные исследования. На рис.2 приведены кривые перемещения каретки механизма подачи при работе с дозирующим насосом ($x_{доз.}$) и при работе с дросселем ($x_{дрос.}$). Видно, что характер перемещения каретки практически одинаков как при работе с насосом, так и с дросселем. Результаты исследований не выявили преимущества механизма подачи с дозирующим насосом по сравнению с механизмом подачи с дроссельным регулированием скорости перемещения каретки. Работа модернизированного дозирующего насоса, установленного и испытанного при

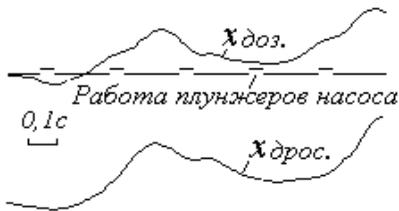


Рис.2. Перемещение каретки при работе с дозирующим насосом – $x_{доз.}$; при работе с дросселем – $x_{дрос.}$

пуске и освоении оборудования пилигримовых станов в ТПЦ №4 ОАО Интерпайп–НТЗ, также не показала преимуществ объемного регулирования скорости перед дроссельным регулированием.

В машиностроительной гидравлике для обеспечения стабильности перемещения рабочего органа используют регуляторы скорости (расхода), принцип действия которых основан на поддержании постоянства перепада давления на дросселе. Анализ конструкций, принципов и особенностей работы гидросистем с регуляторами скорости, приведенными в работах [9–14], показывает, что их эффективность в значительной степени зависит от качества изготовления золотниковых пар и свойств рабочей жидкости.

В работе [12] показано, что коэффициент стабильности подачи от внешней нагрузки зависит от величины радиального зазора в золотниковых устройствах регулирования расхода. В работах [13, 14] приведены результаты исследований зависимости стабильности подачи от величины утечек и перетечек жидкости между полостями силовых гидроцилиндров, реологических свойств рабочей жидкости. Следует заметить, что стабильно работающие регуляторы скорости применяются только в гидроприводе, использующем в качестве рабочей жидкости масло, поэтому их использо-

вание в гидроприводе механизмов подачи пилигримовых станов проблематично.

Таким образом, установлено, что использование объемного дозирования жидкости и регуляторов скорости в механизмах подачи пилигримовых станов не имеет ощутимых преимуществ перед дроссельным управлением.

Вторым направлением стабилизации прокатываемой гильзы в валки пильгерстана является устранение колебательного движения каретки механизма подачи или, по крайней мере, уменьшения амплитуды ее колебаний. Колебания каретки при ее перемещении к валкам возникают при торможении подвижных масс подающего аппарата перед захватом гильзы валками стана [2–4].

Одним из способов уменьшения амплитуды колебаний является способ динамического демпфирования колебаний каретки, предложенный К.Бруксом (Маннесман Демаг) [16]. В патенте заявлен плавающий поршень воздушного цилиндра подающего аппарата, который в конце хода подвижных масс к валкам тормозится амортизаторами. Особенностью работы подающего аппарата заключается в том, что торможение плавающего поршня происходит раньше, чем торможение подвижных масс гидротормозом на время, равное половине периода колебаний каретки. Сведений об опробовании такого способа торможения в научно-технической литературе не содержится. Проведенный нами анализ возможной эффективности работы подающего аппарата показывает, что реализация динамического демпфирования в известных конструкциях подающих аппаратов не эффективна, в связи с малым соотношением тормозных воздействий. (Соотношение импульсов сил не превышает $0,1-0,5\%$). Положительным является возможность применения плавающего поршня для управления степенью сжатия воздуха в пневмокамере воздушного цилиндра, что важно для уменьшения величины осевого подпора для обеспечения прокатки без срыва процесса пильгерования.

Динамическое демпфирование колебаний каретки за счет введения гидравлической обратной связи между гидравлическим тормозным устройством и гидроцилиндрами обратного хода механизма подачи предложено в [17]. Расчетным путем показано, что введение обратной связи более чем в 2 раза снижает амплитуду колебаний каретки. Некоторое уменьшение амплитуды колебаний каретки за счет введения подпора на напорной магистрали механизма подачи предложено и исследовано в работе [15]. Введение подпора уменьшает размах колебаний каретки на 10%, и, что более важно, уменьшает крутизну нисходящей ветви первого колебания каретки. Ожидаемое повышение стабильности подачи составляет 1–2%.

Экспериментальные исследования работы гидромеханических систем подачи, проведенные на пилигримовых станах Таганрогского металлургического (ТГМЗ) и Нижнеднепровского трубопрокатного заводов (ОАО

Интерпайп–НТЗ), позволили установить [15], что при некоторых скоростных режимах работы подающего аппарата частота колебаний каретки близка к частоте возмущающих сил, т.е. гидромеханическая система работает в резонансном режиме. Например, при пуске пилигримового стана на ТГМЗ амплитуда колебаний каретки достигала 200мм, что вызывало поломки деталей главной линии и подающих аппаратов и затрудняло ведение прокатки труб. Изменением частотной характеристики гидромеханической системы (жесткости гидроцилиндров) резонансные явления были устранены.

Одним из способов уменьшения амплитуды колебаний является синтез закона торможения, при котором его динамическое воздействие будет минимальным. В статье [18] приведены результаты исследований на имитационной модели влияния величины модуля, времени действия и формы импульсного нагружения на динамические параметры гидросистемы механизма подачи. Определены рациональные значения параметров закона нагружения, при которых амплитуда колебаний каретки снижается в 1,8 раза.

Анализ методов расчета и исследования комбинированных пневмогидравлических систем показывает, что основная часть информации, необходимой для совершенствования работы различных систем пилигримовых станов, была получена с помощью экспериментальных и теоретических исследований проведенных сотрудниками ИЧМ и других специализированных организаций. Экспериментальные данные использовались для разработки различных механизмов пилигримового стана и для адаптации имитационных моделей.

Анализ причин возникновения неравномерности подачи при прокатке одной трубы, проведенный в работах [4, 20–21] показал, что основными из них являются неодинаковая в смежных циклах скорость вращения валков, изменение частоты колебаний каретки по длине прокатываемой гильзы, переменная амплитуда колебаний каретки. Механизм трансформации возмущений в нестабильность подачи можно рассмотреть на следующем примере.

На рис.3 приведен фрагмент осциллограммы, показывающий изменение скорости подвижных масс подающего аппарата – кривая v и перемещение каретки механизма подачи – кривая x в двух смежных циклах прокатки гильзы.

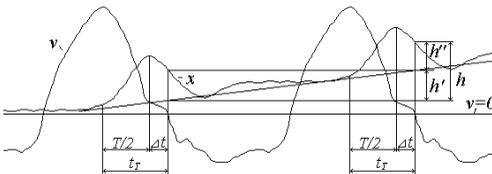


Рис. 3. Осциллограмма смежных циклов прокатки гильзы на пильгерстане

Перемещение каретки представляет собой сложное движение, состоящее из равномерного и колебательного движений [4]. Перемещаемая кареткой гильза захватывается валками в моменты, когда скорость подвижных масс

равна нулевому значению. Величина перемещения каретки за время между двумя смежными точками с $v=0$ является подачей гильзы за один оборот валков (h). Величина подачи состоит из суммы подачи при равномерном движении каретки (h') и доли подачи вследствие колебательного движения каретки (h''), $h=h'+h''$. Подачи h' и h'' определяются:

$$h' = \frac{60\mu f}{nF} \sqrt{2\Delta p / \rho}, \text{ где } \mu - \text{коэффициент расхода жидкости через}$$

дроссель; f – площадь сечения дросселя; n – число оборотов валков; Δp – перепад давлений на дросселе; F – площадь гидроцилиндров хода назад; ρ – плотность жидкости. $h'' = A \sin 2\pi\beta t_T$, где A – амплитуда колебаний каретки; β – частота колебаний; t_T – время колебания.

Если обозначить индексами 1 и 2 переменные в выражениях для смежных подач, то отклонение подачи будет равно:

$$\Delta h = 60 \frac{\mu f}{F} \sqrt{2/\rho} \left(\frac{\sqrt{\Delta p_1}}{n_1} - \frac{\sqrt{\Delta p_2}}{n_2} \right) + A_1 \sin 2\pi\beta_1 t_{T_1} - A_2 \sin 2\pi\beta_2 t_{T_2}. \quad (1)$$

Оценка изменения подач по уравнению (1) для полученных экспериментально параметров работы пильгерстана при прокатке труб 10"х8 показывает, что при изменении числа оборотов на 0,8% полная подача изменяется на 14,3%. Основная часть изменения подачи приходится за счет колебательного движения каретки (динамическая подача) $\Delta h''=13,5\%$. Статическая составляющая подачи изменяется на 0,8%. С увеличением амплитуды колебаний увеличивается разброс величин подач. Минимальное изменение подачи при прокатке одной гильзы возможно при равенстве времени торможения (времени от начала торможения до захвата гильзы валками) и времени полупериода колебаний каретки, т.е. отсутствия Δt на рис.3. Таким образом, можно считать, что причиной нестабильности подачи является наличие изменяющихся в процессе прокатки одной гильзы возмущений, вызывающих изменение скорости каретки, при этом амплитуда колебаний является фактором, увеличивающим неравномерность подачи колебаний каретки.

Одним из факторов, косвенно влияющих на нестабильность подачи, является влияние скоростного режима прокатки и калибровки прокатных валков пильгерстана на скорость перемещения каретки механизма подачи. Это влияние определяется перекачкой энергии от электромеханической системы к гидромеханической системе через пневмогидромеханическую систему (рис.1). Исследование явления перекачки энергии приведено в работе [19].

При пусковых исследованиях работы комплекса механизмов пилигримовых станов ТГМЗ и ОАО Интерпайп–НТЗ было установлено локальное изменение скорости перемещения каретки при срабатывании других гидравлических механизмов стана, питающихся от одной с механизмом

подачи напорной магистрали [22]. Причиной такого явления послужили ошибки в определении расходных характеристик сложной гидравлической системы с изменяющейся структурой. Взаимное воздействие работы различных гидромеханизмов было устранено путем введения гидравлических развязок в гидросхемы питания механизмов подачи.

Наиболее перспективным направлением в стабилизации подачи гильзы в валки пильгерстана является создание гидромеханических механизмов подачи. Основной идеей, заложенной во все известные конструкции таких механизмов подачи, является введение электромеханических дозаторов скорости перемещения каретки в гидравлический механизм. Анализ особенностей конструкций гидромеханических устройств подачи приведен в работах [5–6]. В них показаны преимущества винтовых электромеханических дозаторов перед рычажными и цепными механизмами, отмечена сложность обеспечения быстрых перемещений каретки во время вспомогательных операций. Следует заметить, что анализ, выполненный в работах [4–5], не учитывает взаимодействия подающего аппарата и механизма подачи, поэтому в статье [5] утверждается, что совместно с работой электромеханического дозатора для компенсации динамических нагрузок со стороны подающего аппарата должен работать и гидравлический механизм, гидроцилиндры обратного хода которого компенсируют часть нагрузки. В работе [23] на основании моделирования показано, что для условий пильгерстанов ОАО Интерпайп–НТЗ использование винтового дозатора уменьшает неравномерность подачи с 13,5% до 0,8% и амплитуду колебаний с 20мм до 1,2мм. Для предотвращения раскрытия зазоров в винтовой паре необходимо обеспечивать подпор со стороны гидроцилиндра хода вперед величиной около 1МН, что исключает совместную работу дозатора и гидроцилиндров обратного хода.

Сложность обеспечения надежной работы привода дозатора и отсутствие технических решений, способных обеспечить в полном объеме существующий технологический процесс производства труб без потери производительности стана затрудняет использование электромеханических дозаторов в механизмах подачи пилигримовых станов.

Заключение.

Установлено, что при пилигримовой прокатке труб с гидравлическими механизмами подачи прокатываемая гильза подается в валки стана на разную величину в каждом цикле прокатки. Среднеквадратичное отклонение величин подач достигает 12–28% от средней. Широкий диапазон подач и наличие подач, значительно отклоняющихся в большую сторону от заданной величины, приводят к перегрузке главной линии стана и появлению брака при прокатке труб, что вынуждает уменьшать величину подачи. Потери производительности при этом составляют около 10%.

Установлено, что причиной нестабильности подачи является изменение в процессе прокатки одной гильзы возмущений, вызывающих изменение скорости каретки, при этом амплитуда колебаний является факто-

ром, увеличивающим неравномерность подачи за счет колебаний каретки. Основными возмущениями являются неодинаковая скорость вращения валков, изменение частоты и амплитуды колебаний каретки механизма подачи по длине прокатываемой гильзы.

Установлено, что ввиду превалирующего влияния динамической составляющей неравномерности подачи, устройства объемного регулирования скорости каретки (дозаторы, дозирующие насосы), работа которых заключается в уменьшении статической неравномерности подачи, не имеют ощутимых преимуществ перед дроссельным регулированием скорости. При изменении числа оборотов на 0,8% полная подача изменяется на 14,3%. Основная часть изменения подачи происходит вследствие колебательного движения каретки (динамическая подача) $\Delta h'' = 13,5\%$. Статическая подача изменяется на 0,8%.

Уменьшение неравномерности подачи возможно за счет уменьшения амплитуды колебаний каретки путем демпфирования колебаний; установки обратного клапана на входе в гидроцилиндр хода вперед механизма подачи; выбора динамических параметров гидросистемы механизма подачи, исключающих возникновение резонансных явлений; синтез закона торможения подвижных масс подающего аппарата, при котором его динамическое воздействие на механизм подачи будет минимальным; построения гидросхемы привода механизма подачи, исключающей влияние других гидромеханизмов стана на работу механизма подачи; введения в гидравлический механизм подачи электромеханического дозатора. Наиболее значимыми из перечисленных способов являются синтез рационального по динамическому воздействию на механизм подачи торможения подвижных масс и использование электромеханического дозатора.

1. *Виноградов А.Г.* Трубное производство. – М.: Металлургия, 1981. – С.108–109.
2. *Емельяненко П.Т.* Пильгерстаны. – Гостехиздат Украины, Харьков, 1937. – 639с.
3. *Кожевников С.Н., Праздников А.В.* Экспериментальное исследование подающего аппарата с гидравлическим торможением // Изв. вузов. Чер. металлургия. – № 12. – 1959. – С.179–188.
4. *Кожевников С.Н., Праздников А.В.* Динамика гидропривода механизма перемещения каретки подающего аппарата пильгерстана // Изв. вузов. Чер. металлургия. – № 8. – 1960. – С.170–194.
5. *Новые механизмы подачи пилигримовых станок / А.В.Праздников, А.М.Июффе, В.Ф.Пешат и др.* – Вып.4. – Серия 7. – М.: Черметинформация, 1968. – 10с.
6. *Оборудование цехов с пилигримовыми трубопрокатными установками. / С.Н.Кожевников, А.В.Праздников, А.М.Июффе и др.* – М.: Металлургия, 1974. – 256с.
7. *Патент* Великобритании № 743417, кл. В3Т, /83/4/М.
8. *А.с.* ВНР (Венгерская народная республика) № 153063, кл. В21в, 17/04.
9. *Кожевников С.Н.* Аппаратура механизмы гидро-, пневмо- и электроавтоматики металлургических машин: (Учеб. пособие для металлург. орг. и ин-тов УССР). – Киев: Изд-во АН УССР, 1961– 160с.

10. *Осецкий А.И.* Некоторые вопросы регулирования скоростей в гидроприводах металлорежущих станков // «Исследования в области металлорежущих станков». Сб. трудов. – Вып.4. – М.: Машгиз, 1961.
11. *Ермаков В.В.* Основы расчета гидропривода. – М.: Машгиз, 1951.– 248с.
12. *Брон Л.С., Тартаковский Ж.Э.* Гидравлический привод агрегатных станков и автоматических линий. – М.: Машиностроение, 1974. – 356с.
13. *Брон Л.С., Жилин Д.Д.* Анализ систем дроссельного регулирования и стабилизации рабочей подачи. // Станки и инструмент. – №7. – 1970.
14. *Зайченко И.З.* Дроссельное регулирование малых расходов жидкости. // Станки и инструмент. – №5. – 1964.
15. *Праздников А.В., Иоффе А.М., Листопадов И.Б.* Исследование механизмов перемещения каретки пилигримовых станков // Металлургическое машиноведение и ремонт оборудования. Сборник трудов. – Вып.1. – Днепропетровск. – 1972 – С.155–158.
16. *Патент Великобритании № 938903, кл.86(4), (В21в).*
17. *Листопадов И.Б.* Исследование способа динамического демпфирования для стабилизации подачи металла в валки пилигримового стана // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб.трудов. – Вып.2. – К.: Наукова думка, 1998, С.–318–324.
18. *Большаков В.И., Листопадов И.Б.* Влияние параметров внешнего импульсного возмущения на реакцию гидромеханических систем // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сборник трудов. – Вып.5. – К.: Наукова думка. 2001, С.–330–336.
19. *Большаков В.И., Листопадов И.Б.* Особенности переходных процессов в электрогидромеханической системе периодического действия // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. трудов. – Вып.10. – 2005. – С.307–312.
20. *Оборудование цехов с пилигримовыми трубопрокатными установками.* / С.Н.Кожевников, А.В.Праздников, А.М.Иоффе и др. – М.: Металлургия, 1974. – 256с.
21. *Листопадов И.Б.* Анализ причин нестабильной подачи металла в валки пилигримового стана // VIII Всесоюзная молодежная научно–техническая конференция «Научно–технический прогресс в металлургии и металлловедении черных металлов». Тезисы докладов. – Тула. – 1974.– С.32–33.
22. *Большаков В.И., Листопадов И.Б.* Анализ особенностей составления расчетных схем систем с изменяющейся структурой // Подъемно–транспортная техника. – №2. – 2005. – С.38–47.
23. *Листопадов И.Б., Иоффе А.М.* Исследование работы гидравлического механизма подачи пильгерстана с электромеханическим дозатором.// Тезисы докладов конференции «Молодые ученые и специалисты–металлурги – научно–техническому прогрессу в 10 пятилетке». – Днепропетровск. – 1978. –С.– 140–141.

*Статья рекомендована к печати
канд.техн.наук В.В.Веревым*