

Новиков Михаил Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ДЛЯ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕЖИМОВ ДЕФОРМАЦИИ И
РАСШИРЕНИЯ СОРТАМЕНТНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СТАНОВ
ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ БЕЗ НАПРАВЛЯЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва 2007

Работа выполнена на кафедре «Технология металлов» Московского энергетического института (технического университета)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Голубчик Р.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Коликов А.П.
кандидат технических наук, доцент
Леняшин В.Б.

Ведущее предприятие: ОАО АХК ВНИИМЕТМАШ
им. академика А. И. Целикова

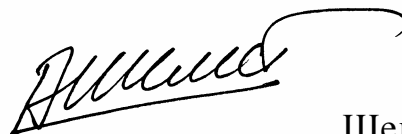
Защита состоится « 31 » октября 2007 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.060.02 в Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН.

Автореферат разослан « 20 » сентября 2007 года.

Справки по телефону 135-96-29.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Шелест А.Е.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В технологических процессах производства горячекатаных труб важное место занимают станы винтовой прокатки, которые используются для получения исходных заготовок, их прошивки и раскатки гильз. Работа этих станов в значительной мере определяет сортамент, качество поверхности и точность геометрических размеров труб, стабильность работы и производительность агрегатов в целом. Роль винтовой прокатки существенно возрастает при изготовлении труб с повышенной тонкостенностью, когда настройка и калибровка инструмента, режим деформации определяют принципиальную возможность получения требуемой продукции.

В связи с этим при создании прогрессивных технологий производства труб одна из первоочередных задач заключается в разработке методов оценки предельных параметров редуцирования и раскатки, различных калибровок и пространственного положения валков.

Создание и освоение новых технологий и конструкций станов, совершенствование процессов требуют дальнейшего развития отдельных вопросов теории винтовой прокатки и создания на этой основе новых методов расчета рациональных режимов деформации.

Данная работа выполнена по плану фундаментальных исследований Минобрнауки РФ в области инженерных наук (грант Минобрнауки № 01200304631).

Цели и задачи работы. Целью настоящей работы являлось совершенствование режимов деформации и калибровки инструмента при прокатке сплошных заготовок и раскатке гильз в косовалковых станах без направляющего инструмента с привлечением математического моделирования, экспериментальных данных и всестороннего анализа параметров конечного и циклического формоизменения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- установить границы устойчивости процесса прокатки по условиям вращения и прилегания стенки гильзы-трубы к оправке;
- определить геометрические, кинематические и силовые параметры процесса винтовой прокатки и провести анализ деформации металла заготовки при раскатке по длине очага деформации;
- предложить рекомендации по совершенствованию настроек и калибровок валков существующих станов;
- разработать и обосновать технологическую схему для получения труб повышенной тонкостенности.

Научная новизна. Разработана и реализована математическая модель процесса раскатки в трех- и четырехвалковом стане винтовой прокатки, позволяющая оценить устойчивость протекания установившегося процесса и определить геометрические, кинематические и силовые параметры при движении гильзы-трубы.

К новизне научных результатов следует отнести:

- выявление и систематизацию факторов, влияющих на протекание процесса раскатки;
- оценку технологических возможностей процесса раскатки гильз в станах винтовой прокатки без направляющего инструмента.
- связь условий вращения гильзы-трубы и прилегания стенки к оправке в зависимости от параметров процесса, размеров прокатываемых труб и их свойств;
- особенности опережения и отставания при винтовой прокатке;
- распределение коэффициентов скорости по контактной поверхности;
- калибровку валков трехвалкового раскатного стана.

Практическая значимость. Научные разработки диссертации и технические решения направлены на расширение сортамента заготовок для прошивки и повышение тонкостенности готовых труб при раскатке. Они включают усовершенствованные технологические режимы редуцирования заготовок и раскатки гильз.

Реализация результатов в промышленности. Показана возможность использования предложенных рекомендаций при проектировании электросталеплавильных комплексов, оснащенных установками непрерывной разливки стали. Для повышения тонкостенности готовых труб выявлена возможность использования четырехвалкового планетарного стана, что возможно при реконструкции трубопрокатных агрегатов, имеющих в своем составе два раскатных стана.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждаются соответствием отдельных зависимостей общим положениям теории обработки металлов давлением и механики сплошных сред, достаточно точным совпадением ряда рекомендаций с собственными экспериментальными и расчетными данными и данными ранее проведенных исследований.

Апробация работы. Отдельные разделы работы доложены, обсуждены и одобрены на международной научно-технической конференции “Теория и технология процессов пластической деформации - 2004” (г. Москва, 2004 г.); десятой и одиннадцатой международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов МЭИ (г. Москва, 2004 и 2005 гг.); шестом и седьмом международном конгрессе прокатчиков (г. Липецк, 2005 г., г. Москва, 2007 г.); международной научно-технической конференции “Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов” (г. Санкт-Петербург, 2005 г.); восьмой международной научно-технической конференции “Теоретические проблемы процессов прокатки” (г. Днепропетровск, 2005 г.); четырнадцатой международной научно-практической конференции “Трубы - 2006” (г. Челябинск, 2006 г.).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 10 статьях.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, сводки основных выводов, изложена на 158 страницах машинописного текста,

включающего 68 рисунков, 6 таблиц и библиографический список из 108 наименований отечественных и зарубежных авторов.

На защиту выносятся следующие основные положения:

- предельные параметры устойчивости прокатки в станах винтовой прокатки без направляющего инструмента;
- математическая модель процесса винтовой прокатки в косовалковых станах без направляющего инструмента, позволяющая определить геометрические, кинематические и силовые параметры;
- анализ деформации металла заготовки при раскатке в станах винтовой прокатки;
- рекомендации по совершенствованию процессов редуцирования сплошных заготовок и раскатки гильз, направленные на расширение сортамента трубных заготовок и повышение тонкостенности готовых труб.

Основное содержание работы

Развитие процессов раскатки и редуцирования с использованием станов винтовой прокатки связано с именами таких известных российских и украинских ученых как П.Т. Емельяненко, А.И. Целиков, И.М. Павлов, В.С. Смирнов, А.П. Чекмарев, П.И. Полухин, П.К. Тетерин, Ю.М. Матвеев, А.О. Пляцковский, И.А. Фомичев, Ю.Ф. Шевакин, В.Я. Осадчий, И.Н. Потапов, А.А. Богатов, В.И. Друян, М.И. Ханин, А.П. Коликов, Р.М. Голубчик, Б.А. Романцев, С.П. Галкин, Б.Н. Матвеев, В.И. Котенок, Д.В. Меркулов, В.Б. Лентяшин, а также ученых производителей А.З. Глейберга, Н.С. Кирвалидзе, Е.Д. Клемперта, В.Н. Умеринкова, А.А. Спирина.

Ими решены многие важные вопросы теории и технологии процессов раскатки и редуцирования: геометрия очага деформации, ряд кинематических задач, напряженно-деформированное состояние, условия захвата, силовые условия и др.

Вместе с тем отсутствовали методики сравнения калибровок и настроек валков в сопоставимых условиях, определения предельных углов подачи и условий прилегания гильзы-трубы к оправке, расчета течения деформируемого металла в поперечном направлении.

В предлагаемой работе сделаны попытки в какой-то мере восполнить эти пробелы.

Устойчивость протекания процесса прокатки

Технологические параметры, определяющие производительность процесса прокатки и качество получаемого проката, во многом ограничиваются условиями устойчивости.

Так в процессе освобождения очага деформации при раскатке гильз нарастает поперечное течение материала, что может привести к образованию треугольного раструба, вследствие чего произойдет торможение гильзы-трубы в стане. При редуцировании сплошной заготовки применение больших углов

подачи, обеспечивающих высокую производительность может также лимитироваться условиями вращения.

Анализ условий вращения в поперечном сечении заготовки

Контактная поверхность при раскатке гильз состоит из зон обжатия стенки и редуцирования, определяемых углами $\gamma_{об}$ и $\gamma_{ред}$ соответственно. Полагаем, что равнодействующие нормальных усилий $N_{об}$ и $N_{ред}$ в этих зонах приложены в центре дуги контакта, а соответствующие им силы трения описываются законом Ш. Кулона с коэффициентом трения f .

Условия равновесия для сечения заготовки

$$\gamma_{об} = \frac{2fi}{1+i} + 2 \frac{N_{ред}}{N_{об}} \left[\frac{fi}{1+i} - \left(\gamma_{об} + \frac{\gamma_{ред}}{2} \right) \right], \quad (1)$$

где $i = R / R_B$ - передаточное отношение; R и R_B - радиусы гильзы-трубы и валка соответственно.

Анализ соотношения сил показывает, что по сравнению с усилием в зоне обжатия стенки усилием в зоне редуцирования можно пренебречь. Тогда, получим известное выражение П. К. Тетерина

$$\gamma = \frac{2fi}{1+i}, \quad (2)$$

где $\gamma = \gamma_{об} + \gamma_{ред}$ - угол контакта по валку.

Считая контактную поверхность дугой окружности, из формулы К. Грубера-А. И. Целикова для ширины контактной поверхности с учетом (2) получим относительное обжатие на шаге подачи по диаметру заготовки

$$\varepsilon_D^{ед} = \frac{z}{D} = \frac{f^2}{1+i}, \quad (3)$$

где z - обжатие на шаге подачи; $D = 2R$ - диаметр гильзы-трубы.

Объем подачи гильзы за 1 / n оборота валков на выходе

$$\Omega = \frac{\pi^2}{n} D_T S_T (D_T - S_T) \operatorname{tg} \alpha \frac{\eta_0^{вых}}{\eta_T^{вых}}, \quad (4)$$

где D_T и S_T - диаметр и толщина стенки трубы; n - число валков, образующих калибр; α - угол подачи валков; $\eta_0^{вых}$ и $\eta_T^{вых}$ - коэффициенты осевой и тангенциальной скорости на выходе соответственно.

Полагая поперечное сечение круглым и пренебрегая искажениями очага деформации, отстоящий от начала калибрующего участка против хода прокатки объем подачи

$$\Omega = \pi \frac{z}{\operatorname{tg} \varphi} \left[z \left(\frac{D_T}{2} + \frac{z}{3} \right) + S_T (D_T - S_T) \right], \quad (5)$$

где φ - угол конусности очага деформации на участке гребня валка.

С учетом выражений (4) и (5) максимальный угол подачи валков

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{n}{\pi \operatorname{tg} \varphi} \frac{\varepsilon_D^{\text{ед}} \left[\varepsilon_D^{\text{ед}} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \varepsilon_D^{\text{ед}} \right) + \frac{S_T}{D_T} \left(1 - \frac{S_T}{D_T} \right) \right]}{\frac{S_T}{D_T} \left(1 - \frac{S_T}{D_T} \right)} \frac{\eta_T^{\text{ВЫХ}}}{\eta_O^{\text{ВЫХ}}}. \quad (6)$$

Условие вращения в виде (3), позволяет вычислить предельный угол подачи валков по выражению (6). Предельный угол подачи для случая редуцирования сплошной заготовки получим, положив толщину стенки равной половине диаметра заготовки.

Ширина контактной поверхности при прокатке сплошной заготовки

Используя методику Б. Е. Хайкина и В. В. Козлова, определяем долю металла, ушедшего в длину k_μ . Рассматривая перечное сечение заготовки, при ряде допущений, установили связь коэффициента k_μ и введенного П. К. Тетереным показателя q_m , характеризующего часть металла, смещаемого в тангенциальном направлении в виде

$$q_m = (1 - k_\mu)^{2/3}. \quad (7)$$

Используя q_m , можно определить истинное значение обжатия на i -ом шаге подачи

$$z_i = z_1^T q_m^{i-1} + z_2^T q_m^{i-2} + \dots + z_i^T, \quad (8)$$

где z_i^T - теоретическое обжатие на i -ом шаге подачи, определенное в предположении, что поперечное течение отсутствует.

Определив долю металла, ушедшего в длину, и, используя связь (7), находим скорректированное значение обжатия (8).

Анализ условий прилегания стенки заготовки к оправке

Раскатка тонкостенных труб в трехвалковом стане сопровождается значительным увеличением периметра. Под действием усилий со стороны валка профиль раскатываемой трубы, находящейся в межвалковом зазоре, сплющивается, что может привести к потере устойчивости гильзы-трубы и торможению процесса.

Прилегание стенки трубы к оправке определяется давлением металла на валки и сопротивлением изгибу стенки трубы в межвалковом зазоре. По А. И. Целикову в случае равенства удельных давлений со стороны валков и оправки разница контактных поверхностей определяется уравнением

$$b - b_{\text{оп}} = \frac{N_{\text{ред}}}{P_{\text{ср}}}, \quad (9)$$

где b , $b_{\text{оп}}$ - ширина контактной поверхности по валку и по оправке соответственно; $p_{\text{ср}}$ - среднее удельное давление.

Из условия образования пластического шарнира во внеконтактной зоне определяем усилие в зоне редуцирования

$$P_{\text{ред}} = \frac{2\sigma_S S}{\left(\frac{D}{S} - 1\right) \sin \frac{\pi}{n}}, \quad (10)$$

где σ_S - сопротивление деформации.

Из геометрии контактной поверхности в случае минимального нарушения условия прилегания

$$b_{\text{оп}} = \frac{\frac{1}{2} \frac{D}{S} - 1}{\frac{1}{2} \frac{D}{S} + \varepsilon_S^{\text{ед}}} b, \quad (11)$$

где $\varepsilon_S^{\text{ед}} = z / S$ - частное относительное обжатие по толщине стенки.

Подставляя выражения (10) и (11) в уравнение (9), используя формулу К. Грубера-А. И. Целикова и преобразуя, получим

$$\varepsilon_S^{\text{ед}} = \left(\frac{\sigma_S}{p_{\text{ср}}}\right)^2 \frac{4(1+i)}{\frac{D}{S} \left(\frac{D}{S} - 1\right)^2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} \frac{\left(\frac{1}{2} \frac{D}{S} + \varepsilon_S^{\text{ед}}\right)^2}{\left(\varepsilon_S^{\text{ед}} + 1\right)^2}. \quad (12)$$

Выражение (12) позволяет определить относительное обжатие по толщине стенки, при котором произойдет частичный отрыв внутренней поверхности гильзы-трубы от оправки и начнется внеконтактная деформация стенки. Используя уравнение связи для нахождения относительного обжатия по диаметру $\varepsilon_D^{\text{ед}} = \varepsilon_S^{\text{ед}} S / D$, по выражению (6) можно определить предельный угол подачи валков α .

Предельные технологические параметры прокатки

Для условий раскатки различных гильз рассчитаны предельные углы подачи валков. В расчетах принято: $D_B = 432$ мм, $\varphi = 42^\circ$, $f = 0.37$, $\eta_{\text{O}}^{\text{ВЫХ}} = 0.8$, $\eta_{\text{T}}^{\text{ВЫХ}} = 0.98$, $\sigma_S / p_{\text{ср}} = 0.8$.

Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что с уменьшением передаточного отношения i и повышением отношения $D_{\text{T}} / S_{\text{T}}$ предельный угол подачи по условиям вращения α_{max} возрастает. Расчет для разных значений коэффициентов скорости $\eta_{\text{O}}^{\text{ВЫХ}}$ и $\eta_{\text{T}}^{\text{ВЫХ}}$, коэффициента трения f показывает качественно верное влияние их на пределы устойчивости процесса раскатки. Отличия в значениях предельного α_{max} и рекомендуемого заводской инструкцией α_{max} углов свидетельствуют о наличии резерва процесса раскатки в установившемся процессе.

Результаты расчета максимальных обжатий по толщине стенки и угла подачи по условиям прилегания стенки гильзы-трубы (см. табл. 1) соответствуют экспериментальным закономерностям. Однако полученные значения предельных углов подачи занижены, так как не учитывает влияние недеформированных объемов металла.

Пределные углы подачи в зависимости от параметров процесса

Размеры, мм		$\frac{D_B}{D_T}$	$\frac{D_T}{S_T}$	$\epsilon_S^{\text{ед}}, \%$	α_{max}	$\alpha_{\text{рек}}$
гильзы	раскатан. трубы					
130.0×20.0	101.0×10.0	4.28	10.1	38	13°31' / 2°47'	6°
131.0×25.0	102.0×15.0	4.24	6.8	73	11°58' / 7°56'	10°
131.0×30.0	102.0×20.0	4.24	5.1	148	11°13' / 20°40'	11°
159.0×23.0	132.4×13.2	3.32	10.0	41	12°28' / 3°3'	6°
179.0×25.0	152.4×15.2	2.89	10.0	42	11°53' / 3°7'	6°

Расчеты по условиям вращения для случая прокатки сплошной заготовки показывают, что для реальных углов подачи процесс протекает устойчиво, а ограничения наступают при очень больших углах подачи α и углах конусности очага деформации ϕ .

Из анализа поперечного течения металла следует, что с увеличением относительного обжатия и ростом угла подачи α доля металла, смещаемого в тангенциальном направлении q_m , возрастает. При увеличении угла конусности очага деформации ϕ параметр q_m снижается, что объясняется локализацией обжатия вследствие уменьшения длины очага деформации, рост поперечного течения в котором сдерживают прилегающие недеформированные “жесткие концы”. Например, при относительном обжатии 40%, углах подачи и конусности очага деформации 15° $q_m = 0.48$.

Кинематические параметры процесса прокатки

В процессе прокатки можно выделить две стадии:

1) установившуюся – стадия, для которой характерны малые колебания силовых и скоростных параметров, а также наличие переднего и заднего “жесткого концов”;

2) неустановившуюся – стадия заполнения и освобождения очага деформации, а так же образования и устранения “жестких концов”.

В установившейся стадии прокатки со стороны валков на заготовку действуют силы нормального давления \vec{n} и трения $\vec{\tau}$, а силы инерции и собственного веса пренебрежимо малы. Тогда, выполняются уравнения равновесия статики.

Математическая модель процесса прокатки

Введем системы координат, связанную с заготовкой $OXYZ$ и связанную с валком $O'xuz$. Причем ось OX является осью заготовки, а ось $O'x$ является осью валка. Система координат валка получена поворотами вокруг оси OZ на угол раскатки β , затем вокруг оси OY на угол подачи α и смещением на X_0 и Y_0 вдоль осей OX и OY и соответственно.

Валок, являющийся поверхностью вращения с образующей $R_B(u)$, описывается параметрами положения на оси валка u , поворота от фиксированного сечения v . Тогда, в системе координат заготовки уравнение поверхности валка

$$\begin{cases} X = u \cos \beta \cos \alpha + R_B \cos \nu \sin \beta \cos \alpha - R_B \sin \nu \sin \alpha + X_0, \\ Y = u \sin \beta - R_B \cos \nu \cos \beta + Y_0, \\ Z = -u \cos \beta \sin \alpha - R_B \cos \nu \sin \beta \sin \alpha - R_B \sin \nu \cos \alpha. \end{cases} \quad (13)$$

Скорость валка $\vec{U} = \vec{e}_U \omega_B R_B$ и нормальное усилие $\vec{N} = \vec{e}_N p_n$ характеризуются единичными направляющими векторами, где ω_B - угловая скорость валка; p_n - удельное нормальное давление. Дифференцируя уравнения (13), определяем направления скорости \vec{e}_U и касательной к образующей валка, используя которые находим направление нормального давления \vec{e}_N .

Под коэффициентом скорости в направлении \vec{e} будем понимать коэффициент пропорциональности между проекциями скорости заготовки \vec{V} и скорости валка \vec{U} на это направление $\vec{V} \cdot \vec{e} = \eta_e \vec{U} \cdot \vec{e}$. Описание движения будем вести, используя коэффициенты скорости в направлении осей координат, два из которых являются независимыми.

Введем коэффициент скольжения $\nu_e = 1 - \eta_e$. Аналогично продольной прокатке зоны опережения и отставания на контактной поверхности определяются значением коэффициента скольжения в направлении скорости валка

$$\nu_U = 1 - \eta_U = e_{UX}^2 \nu_X + e_{UY}^2 \nu_Y + e_{UZ}^2 \nu_Z.$$

Используя коэффициенты скорости, определяем вектор скорости заготовки $\vec{V} = \vec{e}_V \omega_B R_B \sqrt{\eta_X^2 e_{UX}^2 + \eta_Y^2 e_{UY}^2 + \eta_Z^2 e_{UZ}^2}$ с направляющим вектором \vec{e}_V , по которому, используя закон Ш. Кулона, находим вектор силы трения $\vec{\tau} = f p_n \vec{e}_\tau$ с направляющим вектором \vec{e}_τ .

Точки заготовки совершают сложное движение по поверхности валка, а сама контактная поверхность имеет сложную конфигурацию. Однако малое время деформации заготовки валком позволяет считать точки входа и выхода из контакта с валком находящимися в одном поперечном сечении. При этом точка начала контакта определяется из пересечения поверхностей, а точка выхода из контакта соответствует кратчайшему расстоянию до поверхности валка.

В установившейся стадии выполняется условие постоянства секундных объемов. Вводя допущения о ходе процесса, определяем коэффициент скорости в направлении оси OX в произвольной точке контактной поверхности

$$\eta_X = \frac{R_B^{\text{ВЫХ}}}{R_B} \frac{e_{UX}^{\text{ВЫХ}}}{e_{UX}} \frac{\mu}{\mu_\Sigma} \eta_X^{\text{ВЫХ}}, \quad (14)$$

где $\eta_X^{\text{ВЫХ}}$ - коэффициент скорости η_X на выходе; $R_B^{\text{ВЫХ}}$ - диаметр валка в сечении выхода; $e_{UX}^{\text{ВЫХ}}$ - направляющий вектор скорости валка на выходе; μ - вытяжка в рассматриваемом сечении; μ_Σ - полная вытяжка за проход.

Коэффициент скорости η_Z определяется из уравнения

$$\eta_Z^2 e_{UZ}^2 \left(1 + \frac{e_{NZ}^2}{e_{NY}^2} \right) + 2\eta_Z e_{UX} e_{UZ} \eta_X \frac{e_{NX} e_{NZ}}{e_{NY}^2} + e_{UX}^2 \eta_X^2 \frac{e_{NX}^2}{e_{NY}^2} - \frac{i^2}{i_{\text{ВЫХ}}^2} (e_{UY}^2 \eta_Y^2 + e_{UZ}^2 \eta_Z^2) = 0, \quad (15)$$

где $\eta_Y^{\text{ВЫХ}}$ и $\eta_Z^{\text{ВЫХ}}$ - коэффициенты скорости η_Y и η_Z на выходе соответственно; $i_{\text{ВЫХ}}$ - передаточное отношение в точке выхода.

Из условия движения заготовки вдоль поверхности валка по известному выражению определяем коэффициент скорости

$$\eta_Y = - \frac{e_{UX} \eta_X e_{NX} + e_{UZ} \eta_Z e_{NZ}}{e_{UY} e_{NY}}. \quad (16)$$

Точка выходящая из контакта с валками в произвольном поперечном сечении очага деформации $X = X_0$ смещается на длину шага подачи l в осевом направлении. Между соседними сечениями выходов точки из контакта с валками заключен объем подачи

$$\Omega = \int_{X_0}^{X_0+l} F_{\text{поп}} dX = \frac{\pi^2}{n} D_T S_T (D_T - S_T) \frac{e_{UX}^{\text{ВЫХ}} \eta_X^{\text{ВЫХ}}}{\sqrt{e_{UY}^2 \eta_Y^2 + e_{UZ}^2 \eta_Z^2}}, \quad (17)$$

где $F_{\text{поп}}$ - поперечное сечение очага деформации.

В случае прокатки сплошной заготовки в формуле (18) полагаем $S_T = D_T / 2$.

При известных значениях коэффициентов скорости на выходе, вычисляя шаги подачи по выражению (17), находим конфигурацию контактной поверхности.

Уравнения равновесия для установившегося процесса при постоянном распределении удельных давлений p_n по контактной поверхности $F_{\text{вал}}$ можно записать в виде

$$\begin{cases} \int_{F_{\text{вал}}} (e_{NX} + f e_{\tau X}) dF = 0, \\ \int_{F_{\text{вал}}} [(e_{NY} + f e_{\tau Y})Z - (e_{NZ} + f e_{\tau Z})Y] dF = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Система нелинейных уравнений (18) относительно $\eta_X^{\text{ВЫХ}}$ и $\eta_Z^{\text{ВЫХ}}$ разрешается известными численными методами. Заданными коэффициентами скорости на выходе определяется конфигурация контактной поверхности, используя выражения (14) – (16) – распределение значений коэффициентов скорости на ней, что позволяет вычислить все значения, входящие в (18) и определить невязки уравнений равновесия.

Математическая модель позволяет рассчитать распределение коэффициентов осевой и тангенциальной скорости по контактной поверхности, положение нейтральной линии и другие требуемые параметры.

Так при раскатке в трехвалковом стане в безгребневых валках диаметром 500 мм с конусностью валка $\varphi = 10^\circ$ гильзы 120×19 мм в трубу 100×10 мм на углах подачи $\alpha = 10^\circ$ и раскатки $\beta = -10^\circ$ при коэффициенте трения $f = 0.3$ получаем коэффициенты осевой $\eta_0^{\text{ВЫХ}} = 1.04$ и тангенциальной $\eta_0^{\text{ВЫХ}} = 0.92$ скорости на выходе. Используя найденные коэффициенты скорости на выходе, определяется распределение коэффициентов по контактной поверхности (рис. 1).

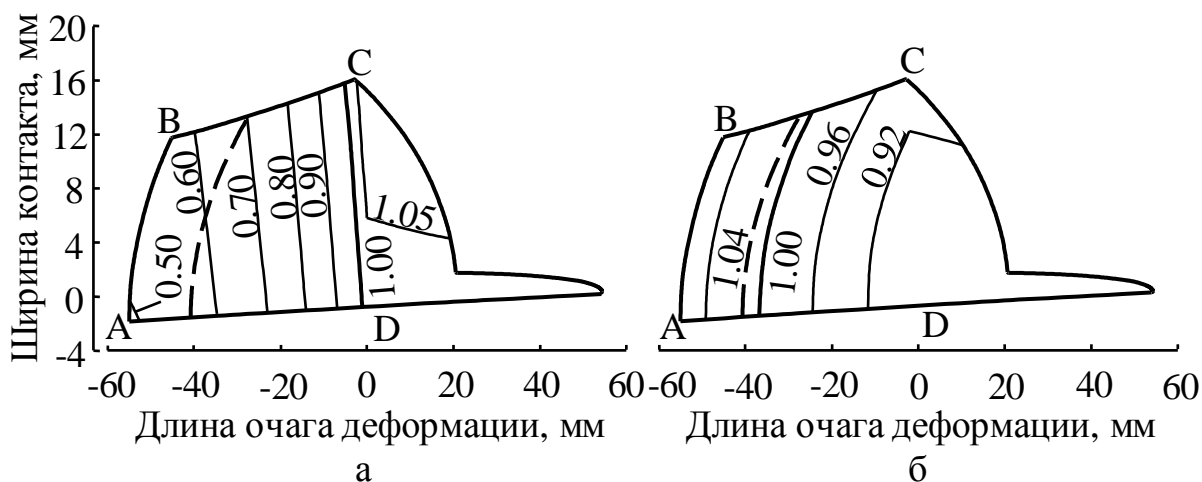


Рис. 1. Распределение изолиний $\eta_0 = \text{const}$ (а) и $\eta_T = \text{const}$ (б) по контактной поверхности

По длине очага деформации значения при $\eta_0 > 1$ получены в конце обжимного участка и при переходе на калибрующий участок. Для коэффициента тангенциальной скорости значения $\eta_T > 1$ находятся во входной части очага деформации. Значения коэффициента скорости в направлении скорости валка, где $\eta_U = 1$, показаны пунктирной линией, которая показывает положение нейтрального сечения. По длине очага деформации имеются зоны опережения (слева от нейтрального сечения) и отставания (справа от нейтрального сечения).

Наиболее интересным выводом, который следует из рис. 1 является наличие зоны отставания при величине коэффициентов осевой или тангенциальной скорости больше единицы. Опережение и отставание определяются не только величиной одного из коэффициентов скорости, но в большей степени их соотношением.

Влияние калибровки валков на кинематические параметры

Рассмотрим вклады от бесконечно малой части контактной поверхности на отдельных участках валка в баланс сил и моментов уравнений равновесия (18). С повышением скольжения металла заготовки по валку доли вкладов увеличиваются. Причем на контактной поверхности может наблюдаться резкое изменение величины долей вкладов при отсутствии скольжения.

Уменьшение передаточного отношения (рост диаметра валка) приводит к некоторому возрастанию доли вкладов, способствующих осевому движению, при этом доля вкладов в баланс моментов изменяется мало. Увеличение угла подачи вызывает повышение долей вкладов,

способствующих осевому движению, при этом доля вкладов, способствующих вращению, несколько снижается.

Рост конусности очага деформации приводит к увеличению долей вкладов выталкивающих усилий. Увеличение угла раскатки несколько повышает доли вкладов, способствующих осевому продвижению, т.е. грибовидную схему расположения валков ($\beta > 0$) следует признать более предпочтительной. При этом изменение конусности и угла раскатки незначительно изменяют доли вкладов в баланс моментов.

Для сравнительной оценки кинематических и энергетических параметров использовали коэффициенты осевой $\eta_O^{\text{ВЫХ}}$ и тангенциальной $\eta_T^{\text{ВЫХ}}$ скорости на выходе, а также коэффициенты производительности $G_V = (R_B^{\text{ВЫХ}} / R_B^X) e_{UX}^{\text{ВЫХ}} \eta_X^{\text{ВЫХ}}$ и мощности $G_N = \int_{F_{\text{вал}}} R_B v_U dF / R_B^X$, где

R_B^X - характерный радиус валка, в расчетах принимаемый равным радиусу в начале калибрующего участка.

С увеличением конусности очага деформации на участке обжатия коэффициенты скорости уменьшаются. Аналогично снижается и коэффициент производительности, изменения которого определяются различием в коэффициентах скорости. Коэффициент мощности может возрастать, и иметь максимум. Это объясняется уменьшением длины контактной поверхности и одновременным ростом ее ширины, при этом скольжение на контакте валка и заготовки увеличивается.

При прокатке с постоянным обжатием по стенке снижение высоты гребня приводит к росту коэффициентов скорости, производительности и мощности. Увеличение угла конусности очага деформации на гребне влияет аналогично, но коэффициент тангенциальной скорости уменьшается.

Данные расчетов свидетельствуют о целесообразности уменьшения конусности обжимного участка при прокатке в валках без гребня, и уменьшении высоты гребня и угла конусности на участке гребня при прокатке в валках с гребнем.

Влияние технологических факторов на кинематические параметры

Все характеристики процесса винтовой прокатки непосредственно или опосредованно зависят от углов подачи и раскатки.

Возрастание угла подачи как при прокатке в валках без гребня, так и с гребнем приводит к увеличению коэффициента осевой скорости. Однако при значительных углах подачи коэффициент осевой скорости достигает максимума и возможно даже некоторое его снижение. При этом коэффициент тангенциальной скорости однозначно уменьшается. Коэффициенты производительности и мощности с ростом угла подачи увеличиваются.

Изменение угла раскатки в области чашевидных схем приводит к изменениям коэффициента осевой скорости при раскатке и редуцировании различного характера (рис. 2,а). С увеличением угла β при раскатке коэффициент скорости имеет максимум, а при редуцировании также

наблюдается максимум, но менее выраженный, однако в области грибовидных схем прокатки происходит устойчивый рост коэффициента осевой скорости, причем значения его с определенного угла раскатки превышают наблюдаемый максимум. Коэффициент тангенциальной скорости для всех случаев с ростом угла раскатки уменьшается.

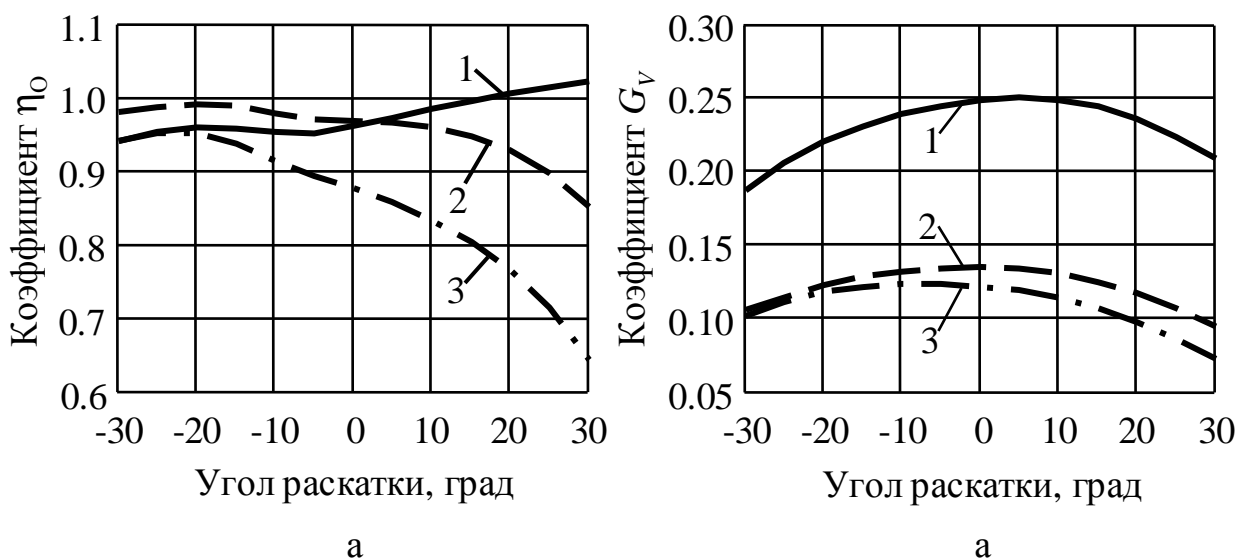


Рис. 2. Зависимость коэффициентов осевой скорости (а) и производительности (б) от угла раскатки при прокатке: 1 - раската 100 мм; 2 - трубы 100×11 мм; 3 - трубы 150×16 мм

При изменении угла раскатки для коэффициента производительности наблюдается максимум в районе угла раскатки $\beta = 0^\circ$, т.е. при бочковидной схеме (рис. 2,б). Максимум коэффициента мощности наблюдается в области грибовидных схем.

Подробное изучение влияния схемы расположения валков для случая редуцирования сплошной заготовки проводилось с использованием расчетных распределений коэффициентов осевой и тангенциальной скорости, а также передаточного отношения по контактной поверхности.

Изменения в распределении передаточного отношения невелики для прокатки в стане с чашевидным расположением валков, так как изменения диаметра валка в целом соответствуют характеру изменения диаметра обжимаемой заготовки. Изменения же передаточного отношения при прокатке в стане с грибовидными валками более значительны. Непостоянство передаточного отношения по длине очага деформации способствует значительному скручивающему действию валков в ходе прокатки и возникновению и/или развитию поверхностных дефектов.

Распределение коэффициентов тангенциальной скорости соответствует распределению i , что объясняется преимущественным движением поверхности заготовки в тангенциальном направлении. Рост скольжения в тангенциальном направлении на отдельных участках контактной поверхности приводит к сужению границ возможных режимов прокатки и уменьшению осуществимых предельных обжатий.

Коэффициент осевой скорости в точке выхода заготовки из валков несколько больше при прокатке по грибовидной схеме расположения валков.

Учитывая большие размеры валка на выходе, производительность процесса в стане с таким расположением валков будет выше. Распределение η_0 в целом свидетельствует о большем резерве тянущих сил при прокатке по чашевидной схеме, так как максимальный коэффициент скорости на контактной поверхности достигает больших значений. Это свидетельствует о более благоприятных условиях при ведении процесса по чашевидной схеме.

В качестве наиболее рациональной следует считать чашевидную схему с углами раскатки $\beta = -15^\circ \div -10^\circ$.

Влияние числа валков раскатного стана на кинематические параметры

Раскатка гильз в промышленных условиях осуществляется в станах винтовой прокатки с тремя валками. Представляет интерес провести сравнение в сопоставимых условиях трех- и четырехвалковых станов. Расчеты проводили при диаметре валка $D_B = 440$ мм и коэффициенте трения $f = 0.3$.

Для калибра, образованного четырьмя валками, допустимый угол подачи по условиям вращения и прилегания больше, чем для калибра, образованного тремя валками. Поэтому расчеты проводили для четырехвалкового стана с углами подачи на 3° и 6° больше, чем рекомендуемые. Для валков, образующих четырехвалковый калибр, диаметр принимался равным половине диаметра валков, образующих трехвалковый калибр.

Сравнение коэффициентов осевой скорости показывает значительное преимущество трехвалкового стана с гребневой калибровкой валков (табл. 2). Коэффициенты осевой скорости при прокатке в калибрах с безгребневыми валками имеют близкие значения, но для четырехвалкового калибра несколько меньшие. Коэффициенты тангенциальной скорости во всех случаях имеют сходные значения, свидетельствующие об устойчивом протекании процесса прокатки.

Сравнение станов по коэффициенту производительности показывает преимущество трехвалкового стана с гребневыми валками. При оценке трех- и четырехвалкового калибра большая производительность в силу большего диаметра валка на стороне трехвалковых калибров.

Меньшая контактная поверхность при прокатке в безгребневых валках и сравнимое скольжение дают им значительное преимущество – на прокатку расходуется меньше энергии и требуется менее мощный привод. Для случая прокатки в четырехвалковом калибре по сравнению с трехвалковой схемой также наблюдается хотя и небольшое, но преимущество.

Увеличение углов подачи при прокатке в четырехвалковом калибре позволяет получить производительность сходную с прокаткой в трехвалковом калибре, образованном валками без гребня.

Сделанный анализ свидетельствует о рациональности использования трехвалкового раскатного стана с гребневыми валками, который имеет высокую производительность, хотя и требует большей мощности.

В станах с вращающейся клетью не применяются валки с гребнем. В силу особенностей их конструкции преимущество имеют четырехвалковые

калибры. Использование четырехвалковых калибров позволяет, устанавливая большие углы подачи валков, получать производительность сопоставимую с трехвалковыми калибрами. Но четырехвалковые калибры имеют меньшие вращающиеся массы, что дает выигрыш в скорости прокатки.

Таблица 2

Параметры раскатки в различных калибрах

Гильза, мм	Труба, мм	Угол подачи	Число валков	$\eta_{\text{O}}^{\text{ВЫХ}}$	$\eta_{\text{T}}^{\text{ВЫХ}}$	G_V	G_N
135×37	108×28	11°	3	1.230*	0.821	0.168	113.5
				0.919	0.874	0.170	114.7
		14°	4	0.844	0.878	0.156	79.2
				0.811	0.857	0.189	160.4
				0.754	0.826	0.212	247.8
		161×23	132×13	6°	3	1.380	0.844
0.900	0.908					0.091	53.0
9°	4			0.820	0.910	0.083	36.2
				0.892	0.902	0.134	88.1
				0.898	0.894	0.179	138.9
195×27	166×17			6°30'	3	1.316	0.876
		0.922	0.932			0.101	62.3
		9°30'	4	0.846	0.934	0.092	43.1
				0.881	0.930	0.140	99.2
				0.880	0.923	0.182	155.6

* Первая строка – валки с гребнем, остальные – валки без гребня

Деформация металла заготовки при раскатке

Формоизменение гильз в стане винтовой прокатки представляет собой сложную последовательность обжатий и определяет силовые и кинематические параметры процесса, возможности оборудования.

Прокатка тонкостенных труб сопровождается образованием внеконтактного профиля, при небольшой величине которого устойчивость процесса сохраняется. Однако при прокатке заднего конца наблюдается значительное течение металла в поперечном направлении, что является основной причиной переполнения калибра и остановки процесса.

Течение металла заготовки в поперечном направлении

Условие постоянства объема можно записать в виде

$$\varepsilon_L + \varepsilon_S + \varepsilon_{\Theta} = 0, \quad (19)$$

где $\varepsilon_L = \ln \mu$ - продольная деформация; $\varepsilon_S = \ln(S / S_{\Gamma})$ - деформация обжатия стенки; $\varepsilon_{\Theta} = \ln(\Pi^{\text{cp}} / \Pi_{\Gamma}^{\text{cp}})$ - тангенциальная деформация; μ - текущий коэффициент вытяжки; Π_{Γ}^{cp} , Π^{cp} - средний периметр гильзы и текущий соответственно.

Оценку поперечного течения и его изменения по длине очага деформации проводили по результатам обмеров заторможенных гильз-труб в трехвалковом раскатном стане ТПА 160 ПНТЗ. В ходе экспериментов гильза

154×24.5 мм раскатывалась в трубу 126×12 мм. Процесс осуществлялся в валках диаметром 432 мм с высотой гребня $h = 12.5$ мм.

По распределению поперечных сечений по длине очага деформации рассчитывали распределение коэффициентов вытяжки, по которым, в свою очередь, определяли коэффициенты продольной ε_L деформации. Коэффициенты радиальной деформации ε_S рассчитывали непосредственно по значениям толщины стенки. Используя условие постоянства объема (19), определяли распределение коэффициентов поперечной деформации (рис. 3).

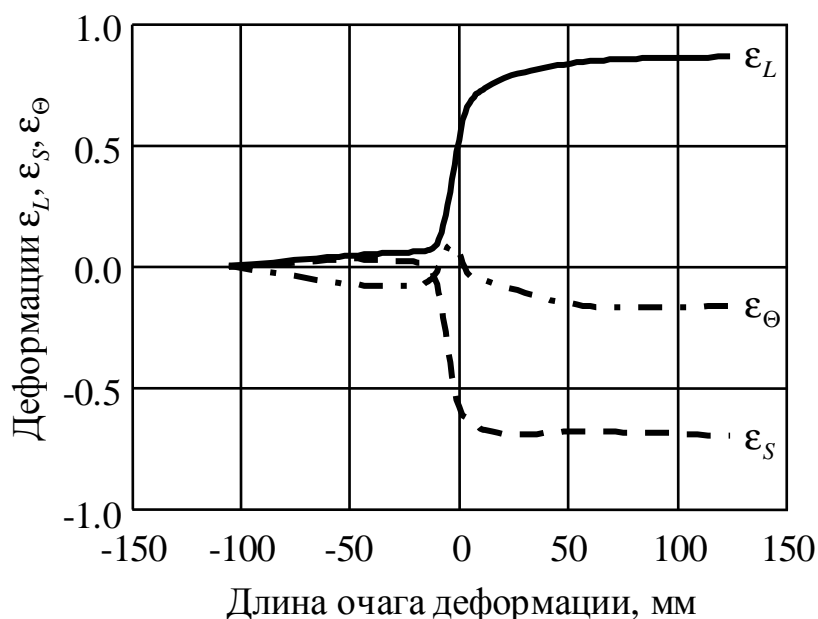


Рис. 3. Распределение продольной ε_L , радиальной ε_S и поперечной ε_Θ деформаций по длине очага деформации

Во входной части обжимного участка очага деформации происходит некоторое снижение среднего периметра гильзы–трубы, при этом толщина стенки практически неизменна. В районе гребня валков происходит резкое изменение толщины стенки. При этом возрастает вытяжка, но часть металла уходит в тангенциальном направлении и средний периметр гильзы–трубы несколько возрастает. На калибрующем участке очага деформации значения среднего периметра уменьшается, а вытяжка увеличивается.

Обработка экспериментальных данных других исследователей показывает аналогичное распределение коэффициентов поперечной деформации по длине очага.

Максимальная поперечная деформация увеличивается с ростом тонкостенности раскатываемой трубы, причем интенсивность снижения поперечной деформации на калибрующем участке уменьшается. Увеличение угла подачи также приводит к росту максимума поперечной деформации.

Анализ экспериментальных данных по неустановившейся стадии процесса раскатки показывает, что распределение поперечной деформации при прокатке заднего конца близко к зависимости в установившемся процессе. Однако величина максимального значения поперечной деформации при прокатке заднего конца существенно больше и может достигать величин,

при которых длина калибрующего участка недостаточна для формирования профиля трубы.

Для установившегося процесса, существует предложенный А.А. Спириным коэффициент поперечной деформации, превышение которого приводит к образованию раструба на заднем конце.

Предельные параметры поперечной деформации

Предельный коэффициент поперечной деформации из условия устойчивого протекания процесса прокатки по А.А. Спирина составляет

$$\varepsilon_{\Theta \text{уст}} = \ln \frac{1.2 - \frac{S_T}{D_K}}{1 + 2 \frac{\Delta_\Gamma}{D_K} + \frac{S_T}{D_K} \left(\frac{\Delta S}{S_T} - 1 \right)}, \quad (20)$$

где Δ_Γ - величина зазора между внутренней поверхностью гильзы и оправкой; D_K - диаметр калибра.

Предельное значение коэффициента поперечной деформации (20) определяется относительным обжатием по толщине стенки $\Delta S / S_T$, показателем D_K / S_T и отношением Δ_Γ / D_K .

Коэффициент поперечной деформации не учитывает размеры калибра и соответственно объемы металла, находящиеся в межвалковом зазоре. Предлагаемые в литературе коэффициенты не позволяют проводить сравнение деформаций в калибрах, образованных разным числом валков. В качестве меры, характеризующей объемы металла, находящиеся в межвалковом зазоре, можно принять коэффициент овализации – отношение максимального и минимального радиусов поперечного сечения гильзы–трубы $\xi = R_{\max} / R_{\min}$.

Допущения о конфигурации поперечного сечения позволяют рассчитать предельный коэффициент овализации на калибрующем участке очага деформации по условию устойчивого протекания процесса раскатки

$$\xi_{\text{уст}} = 1 + \frac{1 - \cos \frac{\pi}{n}}{\frac{n}{\pi} \sin \frac{\pi}{n} - \cos \frac{\pi}{n}} \left\{ e^{\varepsilon_{\Theta \text{уст}}} \left[1 + 2 \frac{\Delta_\Gamma}{D_K} + \frac{S_T}{D_K} \left(\frac{\Delta S}{S_T} - 1 \right) \right] + \frac{S_T}{D_K} - 1 \right\}. \quad (21)$$

Максимальный коэффициент овализации, рассчитываемый по выражениям (20) и (21), определяется деформационными и геометрическими параметрами, а также числом валков, образующих калибр n . Отличия при увеличении числа валков, образующих калибр при равных деформациях невелико. Однако при увеличении числа валков, образующих калибр, изменяется и величина предельной поперечной деформации ε_Θ .

Анализ факторов, влияющих на поперечное течение металла и его величину, показывает перспективность использования стана с четырьмя валками. При прокатке в таком стане уровень величин поперечной деформации будет ниже, что позволит прокатывать более тонкостенные трубы на больших углах подачи валков.

Совершенствование процесса прокатки

Подход к разработке мероприятий, направленных на совершенствование процесса прокатки, может быть различен. Так выбор рациональных режимов деформации и улучшение известных конструкций стана во многом исчерпан в связи с большим опытом применения существующих установок. Применение калибровок валков, направленных на улучшение условий прокатки, более перспективно. Применение станов новых конструкций и создание на их основе новых схем раскатки является наиболее предпочтительным решением, которое может позволить значительно расширить сортамент, хотя требует наибольших затрат

Совершенствование калибровки валков

Используемые для редуцирования и раскатки валки, состоят из трех участков: обжимного, калибрующего и раскатного. Профиль обжимного участка может быть гладким с постоянной конусностью или комбинированным с деформирующим гребнем. Применение гребневых валков накладывает ограничение – фиксированное абсолютное обжатие, однако улучшает условия прокатки вследствие снижения поперечного течения, что имеет решающее значение для процесса раскатки. При редуцировании сплошных заготовок, не имеющих значительных ограничений по устойчивости, вследствие широкого изменения абсолютных обжатий использование безгребневых валков более предпочтительно.

Величина максимального обжатия и как следствие максимальная поперечная деформация наблюдается в начале калибрующего участка валков. Предлагается на половине калибрующего участка валков, прилегающей к участку гребня, выполнять канавки величиной не более половины высоты гребня, а длину калибрующего участка увеличить до максимально возможных значений. Получающиеся на поверхности заготовки выступы раскатываются на гладкой части калибрующего участка, при этом снижается величина обжатия и предотвращается чрезмерное течение металла в межвалковый зазор, а образовавшийся внеконтактный профиль раскатывается в кольцо на длинном калибрующем участке.

Модернизация технологической схемы производства труб

Новым перспективным раскатным станом является четырехвалковый планетарный стан. Четыре валка образуют закрытый калибр, вследствие чего возможна прокатка даже особо тонкостенных труб. Применение планетарной клетки позволяет вести непрерывную прокатку одновременно в раскатном и редуционном станах. Работа такой компактной линии позволяет прокатывать трубы большой длины и веса, что снижает концевую обрезь.

Особенностью работы стана является раскатка гильз постоянного диаметра в трубы постоянного диаметра. Такое ведение процесса упрощает работу агрегата вследствие уменьшения числа перенастроек калибра прошивного стана и смен направляющего инструмента. Однако это требует в технологической цепи наличие редуционного или редуционно-растяжного

стана с достаточным числом клетей, позволяющих уменьшить диаметр трубы на значительную величину.

Наиболее рациональным является использование такого стана и стоящего за ним редуционно-растяжного блока для модернизации существующих агрегатов с двумя линиями раскатки и редуцирования. Такая модернизация позволит значительно расширить размерный сортамент. При этом не требуется значительного изменения существующего оборудования.

Прокатка в модернизированной линии состоит в следующем. Заготовку постоянного диаметра $D_3 = 220$ мм нагревают, зацентрируют и прошивают в гильзу постоянного диаметра $D_T = 230$ мм. Гильза раскатывается в трубу диаметром $D_T = 195$ мм и с близкой к готовой толщиной стенки, после чего ее редуцируют, если требуется с натяжением, и получают готовую трубу. Пример режимов деформации по модернизированной схеме для нескольких размеров труб показан в табл. 3.

Таблица 3

Пример режимов деформации на модернизированной установке (размеры, мм)

готовая труба	заготовка	гильза	раскатанная труба	горячая готовая труба
27.0×3.2	220.0	230.0×20.0	195.0×4.4	27.4×3.2
70.0×16.0		230.0×31.0	195.0×16.2	71.0×16.2
121.0×5.0		230.0×20.0	195.0×5.0	122.7×5.1
146.0×38.0		230.0×54.0	195.0×38.5	148.0×38.5
168.0×6.0		230.0×21.0	195.0×6.1	170.4×6.1

Таким образом, предлагаемая технологическая схема с четырехвалковым раскатным станом позволяет расширить сортамент получаемых труб в сторону повышения отношения D_T / S_T до значений $30 \div 40$.

Основные выводы

1. Для установившегося процесса винтовой прокатки в косовалковом стане без направляющего инструмента предложены аналитические выражения, позволяющие при известных коэффициенте трения, коэффициентах скорости и калибровке валка определить предельные углы подачи по условиям вращения заготовки. Выявлено наличие резерва устойчивости процесса раскатки для используемых на практике режимов деформации. Например, при раскатке гильзы 130.0×20.0 мм в трубу 101.0×10.0 мм предельный угол подачи составляет $13^\circ 31'$, а рекомендуемый 6° .

2. Из условий прилегания стенки гильзы-трубы к оправке при раскатке в трехвалковом стане определены предельные относительные обжатия и максимальные углы подачи. Установлено, что для используемых режимов прокатки тонкостенных труб невозможно предотвратить отход стенки от оправки, так как, например, для раскатываемой гильзы 130.0×20.0 мм в трубу 101.0×10.0 мм отход происходит уже при относительном обжатии 38% и угле подачи $2^\circ 47'$.

3. Разработанная математическая модель процесса прокатки в косовалковом стане без направляющего инструмента позволяет расчетным путем определить геометрические, кинематические и силовые параметры.

4. Получены распределения коэффициентов осевой и тангенциальной скорости по контактной поверхности и положение нейтральной линии. Это позволило научно обоснованно сравнивать типы калибровок валков, настройки станов разного конструктивного исполнения. Показано, например, преимущество ведения прокатки по чашевидной схеме.

5. Установлена перспективность увеличения в планетарном стане числа валков.

6. Проведено сравнение величины затекания металла в межвалковый зазор при различном количестве валков, образующих калибр. Установлено, что в четырехвалковой клети затекание металла в межвалковый зазор меньше. Это позволяет получать более тонкостенные трубы на больших углах подачи.

7. Для раскатки тонкостенных труб предложено использовать четырехвалковый планетарный стан с грибо-дисковой схемой настройки, разработанный фирмой “Кокс” (Германия). Стан характеризуется простотой конструкции и меньшей массой вращающихся частей. Получение требуемой толщины стенки достигается использованием оправок разных диаметров, а наружный диаметр получают на редуционно-растяжном стане, который работает в режиме непрерывной прокатки с планетарным станом.

8. Рассчитана калибровка валка для получения нескольких типоразмеров трубных заготовок из непрерывнолитых заготовок одного диаметра. Предложена калибровка валков с гребнем для раскатки тонкостенной части сортамента, отличающаяся наличием удлиненного калибрующего участка (до трех шагов подачи) с размещенными на первой половине винтовыми канавками.

9. Предложенная технологическая схема может быть реализована на трубопрокатных агрегатах, имеющих в своем составе два раскатных стана. Разработаны режимы деформации по схеме прошивной стан, четырехвалковый планетарный стан, редуционно-растяжной стан. Предложены режимы, позволяющие получать из заготовок диаметром 220 мм готовые трубы диаметром $27 \div 168$ мм с минимальной толщиной стенки 3.2 мм.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Чикалов С.Г., Меркулов Д.В., Новиков М.В., Чепурин М.В. Оценка перспективности прошивных станов разных конструкций. *Сталь*, 2004, № 3, с. 44 - 46.

2. Клемперт Е.Д., Меркулов Д.В., Голубчик Р.М., Новиков М.В. Оценка возможностей трехвалковых раскатных станов винтовой прокатки по допустимому углу подачи. *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 8. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: “Системні технології”, 2005 г., с. 401 - 404.*

3. Меркулов Д.В., Новиков М.В., Голубчик Р.М. Пути уменьшения склонности к скручиванию при винтовой прокатке. *Современные достижения*

в теории и технологии пластической обработки металлов: Труды междунар. науч.-тех. конф. Спб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005, с. 374 - 381.

4. Меркулов Д.В., Клемперт Е.Д., Новиков М.В., Голубчик Р.М. Деформация гильз в трехвалковых станах винтовой прокатки. Труды VI международного конгресса прокатчиков, Липецк, 18-21 октября 2005 г., т. 1. М.: АО "Черметинформация", 2005 г., с. 437 - 441.

5. Чикалов С.Г., Клемперт Е.Д., Голубчик Р.М., Меркулов Д.В., Новиков М.В. Пути расширения сортамента непрерывнолитых заготовок. Труды XIV Международной научно-практической конференции "Трубы - 2006". Сборник докладов в двух частях. Том 2. Челябинск: ОАО "РосНИТИ", 2006 г., с. 254 - 258.

6. Меркулов Д.В., Клемперт Е.Д., Голубчик Р.М., Новиков М.В. Неустановившиеся стадии процесса раскатки в трехвалковом стане винтовой прокатки. Труды XIV Международной научно-практической конференции "Трубы - 2006". Сборник докладов в двух частях. Том 2. Челябинск: ОАО "РосНИТИ", 2006 г., с. 147 - 152.

7. Чикалов С.Г., Клемперт Е.Д., Голубчик Р.М., Меркулов Д.В., Новиков М.В. Получение требуемого сортамента непрерывнолитых заготовок для прошивки. Сталь, 2007, № 3. с. 72 - 74.

8. Меркулов Д.В., Новиков М.В., Голубчик Р.М. Опережение и отставание при винтовой прокатке. Труды VII международного конгресса прокатчиков, Липецк, 15-18 октября 2007 г., т. 1. М.: МОО "Объединение прокатчиков, корпорация производителей черных металлов", 2007 г., с. 509 - 514.

9. Меркулов Д.В., Новиков М.В., Голубчик Р.М. Математическая модель процесса винтовой прокатки в станах без направляющего инструмента. Труды VII международного конгресса прокатчиков, Липецк, 15-18 октября 2007 г., т. 1. М.: МОО "Объединение прокатчиков, корпорация производителей черных металлов", 2007 г., с. 505 - 508.

10. Галкин С.П., Голубчик Р.М., Меркулов Д.В., Новиков М.В. Кинематика на контактных поверхностях при винтовой и радиально-сдвиговой прокатке на станах различных типов. Труды VII международного конгресса прокатчиков, Липецк, 15-18 октября 2007 г., т. 1. М.: МОО "Объединение прокатчиков, корпорация производителей черных металлов", 2007 г., с. 514 - 518.