

М171274

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

К. т. н., доцент ЖАВОРОНКОВ В. А.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ
КРУГЛЫХ ПРОФИЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ
НА ТРЕХВАЛКОВЫХ СТАНАХ

(Специальность 05.168 — Машины прокатного и волочильного
производства)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н. Э. Баумана и во Всесоюзном ордена Ленина научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте металлургического машиностроения.

Научный консультант—

академик АН СССР, Герой Социалистического труда, лауреат Ленинской и Государственных премий, проф., д. т. н. Целиков А. И.

Официальные оппоненты:

академик АН БССР, доктор технических наук, профессор Северденко В. П.,
доктор технических наук, профессор Томленов А. П.,
доктор технических наук, профессор Королев А. А.

Ведущее предприятие: Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт металлургии имени

Автореферат раз

Защита диссертации
на заседании Совет
зация производства
Трудового Красного
имени Н. Э. Баумана
ская, 5.

С диссертацией
лица.

Ваши отзывы в
просьба высылать по

Ученый секретарь
канд. техн. наук, д

М171274

М17/274
НТБ МВТУ им. Н. Э. Баумана



1171274

Жаворонков В. А. Теоретиче

ВВЕДЕНИЕ

Директивами XXIV съезда КПСС по девятому пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР поставлены ответственные задачи по улучшению качества металлургической продукции за счет внедрения прогрессивных способов производства металла и расширения сортамента проката, с тем чтобы существенно повысить эффективность его применения в машиностроении, строительстве и на транспорте.

В настоящее время на машиностроительных предприятиях при изготовлении различных тел вращения (оси, валы, втулки и др.) методами точения из сортового проката значительное количество металла уходит в стружку и большой парк металлорежущих станков загружается непроизводительными обдирочными операциями.

Даже послековки и штамповки заготовок, приближающихся по форме к готовым изделиям, имеют место большие отходы металла в заусенец и стружку. В среднем потери металла при изготовлении машин, составляют 15-20% от веса заготовки. Снижение расхода металла в машиностроении и металлообработке можно осуществить за счет получения профилей проката и заготовок приближающихся по форме и размерам к готовым деталям. Это позволяет использовать металл в состоянии поставки с минимальными изменениями его формы при последующей пластической деформации или обработке резанием.

Одним из эффективных направлений повышения коэффициента использования металла в заготовительных цехах, является широкое применение новых методов прокатки, разработанных во Всесоюзном научно-исследовательском институте металлургического машиностроения (ВНИИ-МЕТМАШ) и на кафедре "Машины-автоматы прокатного производства" МВТУ им. Баумана.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

МВТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Под руководством академика АН СССР А.И.Целикова разработаны и созданы прокатные станы с принципиально новыми технологическими процессами изготовления заготовок и деталей для машиностроения.

Новые процессы прокатки развивались в направлении использования возможностей деформации металла методами поперечной и винтовой прокатки, применяемых, в основном, для прошивки гильз и обработки бесшовных труб.

Среди различных процессов обработки металлов давлением процесс винтовой прокатки является одним из наиболее сложных. Теория этого процесса применительно к получению бесшовных труб разработана советскими учеными Целиковым А.И., Смирновым В.С., Гмельяненко П.Т., Чекмаревым А.П., Тетериним П.К. Большой вклад в развитие теории поперечной и винтовой прокатки внесли: Фомичев А.И., Плячковский О.А., Полухин П.И., Ваткин Я.Л., Матвеев Ю.М., Глейберг А.З., Борисов С.И., Потапов И.Н., Голубчик Р.М., Филькельштейн Я.С. и др.

В 1945 г. Целиковым А.И., на основании развития теории винтовой прокатки, было высказано положение, что при определенных условиях вскрытие внутренней полости в заготовке может быть локализовано. Для этого необходимо уменьшить тангенциальную раскатку металла и создать принудительное его течение вдоль оси заготовки. На основании этих требований была создана принципиально новая конструкция трехвалкового стана с валками, имеющими короткую бочку и с механизмом осевого натяжения заготовки. Кроме того, стан был снабжен следящим гидравлическим устройством для изменения положения валков в процессе прокатки в соответствии с профилем прокатываемой заготовки.

В результате выполненных исследований (Анисифоров В.П., Брежнев Л.А., Жаворонков В.А., Казанская И.И., Левин Е.И., Лившиц Г.А., Луговской В.М., Милютин С.П., Сичевой А.П., Чаликов В.В. и др.), установлены особенности течения металла при винтовой прокатке и определены энерго-силовые параметры процесса применительно к отдельным типам трехвалковых станов и видам продукции.

Впервые массовый выпуск круглых профильных заготовок был опробован и освоен в 1952-54 г.г. на Коломенском заводе "Текстильмаш" и Автомобильном заводе им. Ленинского Комсомола (Москва). Уже первый опыт использования трехвалковых станов для получения круглых профильных заготовок показал их высокую рентабельность и эффектив-

ность в части экономии металла и снижения трудозатрат в заготовительных цехах.

Трехвалковые станы "10", "20", "50", "70", и "100" длительное время успешно эксплуатируются на машиностроительных заводах, а стан "120" — на Днепровском металлургическом заводе им. Ф.Э.Дзержинского. В настоящее время в промышленности работают 12 трехвалковых станов конструкции ВНИИМЕТМАШ, на которых уже прокатано свыше 500 тыс. тонн круглых экономичных профилей. Это обеспечило народному хозяйству страны экономию около 100 тыс. тонн металла. В текущей пятилетке различными ведомствами и предприятиями будет построено и введено в эксплуатацию еще несколько аналогичных станов.

Одним из основных преимуществ процесса винтовой прокатки круглых профильных заготовок является его универсальность. Переход с прокатки одного типоразмера заготовки на другой не требует установки калиброванных валков, которые в отличие от других станов являются простыми по форме и небольшими по весу.

Прокатанные профили имеют достаточно высокую для горячей прокатки точность, что позволяет снижать припуски под дальнейшую их обработку.

Особенно большая экономия металла может быть получена при расширении выпуска на трехвалковых станах полых профильных заготовок с переменной толщиной стенки, при изменении наружного и внутреннего диаметра. Однако разработке основных теоретических и технологических положений прокатки полых профилей до последнего времени не уделялось достаточного внимания.

В условиях прокатки сплошных и полых заготовок на трехвалковых станах известные положения теории поперечно-винтовой прокатки не объясняют полностью физическую сторону этого специфического процесса. Для выявления характера деформации и основных ее закономерностей представляет интерес рассмотрение напряженного состояния металла при винтовой прокатке, с учетом цикличности нагружения и малых единичных обжатий, а также дополнительных пластических деформаций и упрочнения металла.

Не менее важным является тщательное изучение геометрического очага деформации и кинематических особенностей процесса для нормального осуществления винтовой прокатки и получения качественных заготовок.

В работе рассмотрены научные достижения и результаты исследо-

вательских работ в области поперечно-винтовой прокатки, которые получили дальнейшее развитие в приложении к трехвалковым станам специальной конструкции, а также явились определяющими при создании и совершенствовании нового технологического процесса получения круглых профильных заготовок.

Особое внимание обращено на анализ напряженно-деформированного состояния металла в условиях переменного нагружения заготовки при ее вращении в валках. Представлены методики определения величины контактной поверхности и нормальных контактных напряжений, что позволяет аналитическим путем определять силовые параметры процесса винтовой прокатки на трехвалковых станах. Решение этих теоретических вопросов имеет непосредственную связь с практической разработкой новых технологических процессов получения профильных заготовок и интенсификацией работы действующих станов.

В работе обобщен двадцатилетний опыт эксплуатации первых промышленных станов периодической прокатки и сделаны рекомендации по совершенствованию их конструкций и систем управления.

Все это позволяет наметить пути дальнейшего развития универсального и экономичного способа получения круглых профилей на трехвалковых станах.

ГЛАВА I. ОБЗОР СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ И ТРУБ С ПЕРЕМЕННЫМИ СЕЧЕНИЯМИ ПО ДЛИНЕ.

К настоящему времени разработаны высокопроизводительные методы продольной, поперечной и винтовой прокатки, которые внесли много нового в технологию производства деталей и профильных заготовок. Освоение на машиностроительных предприятиях таких процессов как горячая прокатка периодических профилей, накатка зубьев шестерен, раскатка колец и втулок, прокатка шаров, сверл, фрез, винтов и др. вносит существенное изменение в представление о роли прокатки как о чисто металлургическом производстве.

Целый ряд специфических процессов горячей и холодной прокатки уже являются составной частью технологии машиностроения. Практика эксплуатации ряда принципиально новых прокатных станов показала, что прокаткой можно получать широкий круг заготовок, приближающихся по форме и размерам к различным готовым изделиям.

Все многообразие, предложенных и осуществленных на практике схем получения деталей и заготовок с переменными по длине сечени-

ями и толщиной стенки можно разбить на продольную, поперечную и винтовую прокатку периодических профилей. В первой главе кратко рассмотрены вопросы прокатки профилей в валках с фиксированным положением осей и с изменением расстояния между осями валков. Показано, что в большинстве случаев валки этих станов оказываются сложными, требуется точная настройка и регулировка их положения в процессе прокатки. При этом, большие обжатия заготовки невозможны, т.к.

происходит переполнение калибра и на боковых поверхностях заготовки образуется заусенец.

Проведен анализ методов получения труб с наружными и внутренними утолщениями стенки: прессованием, волочением и продольной прокаткой. Показано, что эти методы малопроизводительны и не обеспечивают получение всего сортамента требуемых профильных труб.

Более подробно рассмотрены методы получения круглых профильных заготовок поперечной и винтовой прокаткой на станах конструкции ВНИИМЕТМАШ. В частности, прокатка в валках с винтовыми калибрами, получение изделий с винтовыми и кольцевыми поверхностями, изготовление зубчатых колес, прокатка ступенчатых заготовок в валках с клиновыми валками и др.

Особое внимание уделено способу прокатки круглых профильных заготовок на трехвалковых станах. Отмечается, что в результате теоретического анализа и большого числа экспериментов были найдены условия, исключающие образование полости и рыхлости в центральной зоне заготовки в процессе винтовой прокатки.

Основной особенностью нового процесса является возможность получения круглых профилей переменного сечения путем изменения в процессе величины обжатия в функции выходящего из валков переднего конца заготовки. Разработанные на этой основе конструкции трехвалковых станов позволяют:

1. Осуществлять непрерывную обработку длинных профильных заготовок, путем последовательного пропуска их через короткий очаг деформации.

2. Получать сплошные и полые круглые профили различной формы (с цилиндрической, сферической и конической поверхностями) и длиной до $6+12$ м размером по диаметру от 5 до 300 мм.

3. Обеспечить высокую точность прокатываемых профилей и хорошие механические свойства заготовок.

4. Обеспечить полную механизацию и автоматизацию процесса,

включая подготовительные и отделочные операции.

5. Станы имеют малые установочные мощности, занимают небольшие площади и не требуют значительного времени на настройку при переходе с одного профиля на другой, что дает возможность установки их как на металлургических, так и машиностроительных заводах с серийным и массовым выпуском различных круглых заготовок и деталей.

Новый способ винтовой прокатки обеспечивает большую экономию металла (20+35%), снижает трудоемкость и повышает культуру производства, высвобождает значительный парк металлорежущих станков и кузнечно-прессового оборудования, используемых в заготовительных цехах для предварительного формообразования деталей.

В заключение рассмотрены результаты некоторых исследований винтовой прокатки круглых профилей на других аналогичных установках (Северденко В.П., Близинов Е.А., Кудо Н. и др.).

Разработка и промышленное освоение универсального и экономичного способа производства круглых профилей на трехвалковых станах является приоритетом Советского Союза.

ГЛАВА II. СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА КРУГЛЫХ ПРОФИЛЕЙ И АНАЛИЗ РАБОТЫ ТРЕХВАЛКОВЫХ СТАНОВ.

При создании и освоении нового процесса прокатки успешно решены вопросы комплексной технологии производства круглых профилей. Сформулированы требования к исходным заготовкам, даются рекомендации по способам их нагрева, технические требования, относящиеся непосредственно к процессу прокатки, прокатанным профилям, а также отделке готового продукта.

Совершенствование процесса и конструкций станов происходило по мере накопления опыта эксплуатации первых промышленных станов и результатов научно-исследовательских работ. На основании анализа работы трехвалковых станов вносятся предложения повышения надежности и долговечности отдельных узлов и механизмов клетки. Дается краткое описание новых конструкций станов и их приводных систем.

Особо подчеркивается перспективность работы трехвалкового стана с программным управлением от автономного для каждого из валков следящего привода от шаговых двигателей. На основании выполненных исследований Электростальский завод тяжелого машиностроения приступил к изготовлению опытно-промышленного стана "300", в рабочей клетке которого применен дискретный следящий привод.

ГЛАВА Ш. КИНЕМАТИКА ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ.

Основная особенность деформации металла в валках при винтовой прокатке основывается на вращательном и поступательном движении заготовки вдоль очага деформации. Основными геометрическими параметрами трехвалковых станов являются: радиусы валков и заготовки, углы наклона, подачи и конусности валков и величина обжатия за 1/3 оборота заготовки. В работе приводятся зависимости, устанавливающие связь между этими параметрами.

Исходя из того, что производительность трехвалковых станов зависит от скорости прокатки и скольжения металла относительно валков в работе приводятся формулы для определения поступательной скорости валков для различных типов валков.

$$V_2 = \frac{2\pi a n \sin \beta}{1 + \frac{r_3}{R_{\delta k}} \cdot \cos \beta} \quad [\text{мм/сек}] \quad - \text{грибовидные валки (I)}$$

$$V_9 = 2\pi n a \quad [\text{мм/сек}] \quad - \text{дисковые валки} \quad (2)$$

где: a - смещение оси валка относительно оси заготовки,
 β - угол наклона оси валка к оси заготовки,
 r_3 - радиус исходной заготовки [мм],
 $R_{\delta k}$ - радиус валка в калибрующем участке [мм],
 n - число оборотов валков [об/мин].

Для нормального ведения процесса необходимо правильно рассчитывать калибровку валков. При выборе основных размеров рабочего валка следует исходить из условий внедрения и выхода металла из валков, прочности валка и производительности стана.

Наиболее рациональная схема расположения оси грибовидного валка по отношению к оси заготовки будет при угле $\beta = 45^\circ$. В этом случае:

катающий диаметр валка - $D_{\delta \min} \leq 5(\alpha_{\min} + \lambda)$;

высота рабочей части валка - $H_6 = L_0 \cos(\beta - \alpha) + L_k \cos \beta$;

где: λ - минимальный зазор между валками,

α - угол конусности валков,

L_0 - длина образующей конуса валка,

L_k - длина калибрующего участка на валке.

Из условия оптимального единичного обжатия, приходящегося на 1/3 оборота заготовки, предложена зависимость для определения длины калибрующего участка, что гарантирует получение качественной поверхности заготовки при прокатке на трехвалковых станах

$$L_K = \frac{V_n}{3n_3} \left(\frac{\ell_n \frac{\Delta z_n}{S \cdot \lg \alpha}}{\ell_n \varepsilon} + 1 \right);$$

... (3)

где: V_n — скорость прокатки [м/мин],
 ε — суммарная деформация,
 S — подача на 1/3 оборота заготовки [мм/об].

Оптимальный профиль вала можно определить из рассмотрения трех возможных случаев прокатки, характеризующихся совпадением тангенциальных скоростей вала и заготовки или скольжением заготовки относительно поверхности вала. Наиболее приемлемым, является случай, когда точка пересечения линий, соединяющих вершину обжимного конуса вала и конуса заготовки лежит ниже оси заготовки. На основании анализа построены графики, из которых определяется передаточное отношение между валком и заготовкой и следовательно, скорость вращения заготовки. Исходя из опыта работы промышленных станов рекомендовано в качестве оптимального соотношения между D_g и α_3 , отношение: $D_g = (3-5) \alpha_3$.

К инструменту трехвалковых станов относятся также копиры и захваты тележки натяжного устройства. В работе представлены аналитический и графический метод построения копиров профиля и даны рекомендации по выбору материала захватов.

В этой главе также предлагается уточненная методика определения величины площади соприкосновения металла с вальками.

Известно, что определяя величину контактной площади ряд авторов принимают образующую рабочего конуса за прямую. В действительности, вместо текущего радиуса вала более правильно подставлять в известные формулы фактическое значение радиуса кривизны сечения.

Величину подачи — S можно определять как высоту тела, ограниченного сечениями "X" и "X + ", с объемом равным объему металла, выходящего из валков за 1/3 оборота заготовки. Поперечное сечение заготовки принимаем ограниченным спиралью Архимеда. Тогда объем тела между двумя сечениями будет равен:

$$V = \pi S z_x^2.$$

Исходя из этого уравнения, определена действительная величина подачи для различных схем прокатки:

- а) прокатка сплошных профилей — $S = \frac{z^2}{z_x^2} \cdot \Delta_0$;
- б) прокатка полых профилей без оправки — $S = \frac{R^2 - z^2}{R_x^2 - z_x^2} \cdot \Delta_0$;
- в) прокатка полых профилей на оправке — $S = \frac{R^2 - z^2}{R_x^2 - z^2} \cdot \Delta_0$;

Радиус кривизны вала в произвольном коническом сечении, определен как радиус кривизны эллипса:

$$R_{\delta x} = \frac{R \cos \alpha}{\cos \beta x}.$$

Ширина контакта металла с валком в любом сечении равна:

$$\delta_{x+s} = \sqrt{\frac{R_{\delta x} (2R_x - S \tan \alpha)}{R_{\delta x} + R_x - S \tan \alpha}} \cdot S \tan \alpha. \quad \dots (4)$$

Для подсчета площади соприкосновения металла с валками необходимо: проинтегрировать найденное значение δ_{x+s} по длине

$$F = \int_0^L \delta_x \cdot dx. \quad \dots (5)$$

После преобразований получены уточненные формулы для определения площади контакта:

а) при прокатке сплошных профилей:

$$F = \frac{\sqrt{2\Delta_0} z^2 \tan \alpha}{\sin \alpha} \left[A \ln \frac{z_0}{z} + A' (z_0 - z) \right]; \quad \dots (6)$$

б) при прокатке полых профилей на оправке:

$$F = \frac{\sqrt{2\Delta_0} (R^2 - z^2) \tan \alpha}{\sin \alpha} \left[A \ln \frac{R_0 + \sqrt{R_0^2 + z^2}}{R + \sqrt{R^2 - z^2}} + A' (\sqrt{R_0^2 - z^2} - \sqrt{R^2 - z^2}) \right] \quad \dots (7)$$

в) при прокатке полых профилей без оправки:

$$F = \frac{\sqrt{2\Delta} (R^2 - z^2) \tan \alpha}{\sin \alpha} \left[A \ln \frac{R_0}{R} \frac{2 - \frac{z_0^2}{2R_0^2}}{2 - \frac{z^2}{2R^2}} + \frac{R_0}{z_0} A' \left(\arcsin \frac{z_0}{R_0} - \arcsin \frac{z}{R} \right) \right]$$

Для удобства пользования формулами построены графические зависимости для функций A и A' и показана связь между ними:

$$A = \sqrt{\frac{R_{\delta x} \cdot R}{R_{\delta x} + R}} - A' R. \quad \dots (8)$$

Для тонкостенных труб с отношением $S_0/d_0 = 0,1 \div 0,3$ установлена связь между изменением размеров заготовки и параметрами очага деформации

$$\frac{z_x}{R_x} = \frac{z_0}{R_0} \varphi, \quad \dots (9)$$

где: R_0, z_0, R_x и z_x — соответственно наружный и внутренний радиусы исходной заготовки (0) и радиусы в рассматриваемом сечении (X).

С учетом овализации сечения заготовки в формулу (4) необходимо подставлять значение коэффициентов — K_s , учитывающего влияние ширины δ_z , диаметра d_0 и толщины стенки труб S_0 . Точность полученных теоретических зависимостей для определения контактной поверхности проверялась экспериментально и оказалась довольно высокой.

В работе показано, что на изменение ширины зоны деформации существенно влияет величина натяжения. С увеличением натяжения и изменяется соотношение осевого и тангенциального течения металла. При этом условия осевого течения металла улучшаются, величина подачи возрастает, а оваллизация сечений уменьшается. Вместе с этим условия вращения заготовки затрудняются и коэффициент тангенциального скольжения уменьшается. При прокатке полых изделий с большими обжатиями ($\varepsilon = 50\%$ и более) происходит изгиб стенки трубы и ширина контактной поверхности в сечении выхода увеличивается.

ГЛАВА IV. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРОЦЕССА ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ НА ТРЕХ-ВАЛКОВЫХ СТАНАХ.

Изучению причин и механизма образования в заготовках осевой полости посвящено большое число работ в отечественной и зарубежной литературе (К.Грубер, Ф.Рело, Е.Зибель, Д.К.Чернов, И.Торка, Ф.Кокс, А.И.Фомичев, А.Ф.Лисочкин, В.С.Смирнов, П.К.Тетерин). Советскими учеными было доказано, что деформация по сечению заготовки при поперечной и винтовой прокатке носит неравномерный характер, и как следствие этого образуется разноименная схема объемного напряженного состояния металла в центре заготовки. Разрушение при прошивке в двухвалковом стане и наступает за счет дополнительных растягивающих напряжений в радиальном направлении, в результате неравномерности деформации по сечению заготовки.

Было отмечено, что трехвалковая схема деформации уменьшает поперечную раскатку, и в центре заготовки отсутствуют растягивающие напряжения. Поэтому трехвалковые станы являются перспективными по схеме напряженного состояния, энергосиловым параметрам процесса и качеству прокатываемых заготовок.

Применение дополнительного осевого напряжения натяжения (сжатия) еще больше способствует осевому истечению металла без разрушения сердцевины заготовки.

Применительно к трехвалковым станам для прокатки круглых профилей следует добавить, что здесь есть дополнительные особенности, которые характеризуются тем, что:

- 1) деформация заготовки осуществляется небольшими по ширине валками и носит сосредоточенный характер;
- 2) частные обжатия каждого элемента малы, и относительные диаметральные обжатия на $1/3$ оборота заготовки не превышают 3% ;
- 3) каждый элемент заготовки при вращении в валках получает

значительное число частных обжатий, в результате чего заготовка непрерывно испытывает переменные циклические напряжения.

а) Аналитическое определение напряжений в заготовке

При рассмотрении плоско-деформированного состояния заготовки при винтовой прокатке исходим из того, что частные обжатия невелики. Поэтому определение напряженного состояния можно произвести согласно теории малых упруго-пластических деформаций с использованием метода упругих решений:

$$\begin{aligned}\sigma_x - \bar{\sigma} &= 2G'(\varepsilon_x - \bar{\varepsilon}) \\ \sigma_y - \bar{\sigma} &= 2G'(\varepsilon_y - \bar{\varepsilon}) \\ \sigma_z &= \mu(\sigma_x + \sigma_y)\end{aligned} \quad \dots (10)$$

где: $\bar{\sigma} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$ — среднее гидростатическое напряжение,
 $\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{3}$ — средняя деформация ($\varepsilon_z = 0$)

При решении пластической задачи с упрочнением металла использован метод упругих решений. Переменный модуль сдвига можно представить в форме:

$$G' = G(1 - \omega); \quad (11)$$

где: G — постоянный модуль сдвига при упругих деформациях,
 $\omega(\varepsilon_i)$ — функция интенсивности деформаций, отличная от нуля при пластических деформациях. Функция (ω) определяется по заданной кривой упрочнения

$$\omega = 1 - \frac{\bar{\sigma}_i}{3G\varepsilon_i}. \quad (12)$$

Функция А.А.Ильюшина в пластической области по методу упругих решений напряжения с учетом уравнений (10) можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_x^y - 2G\omega(\varepsilon_x - \bar{\varepsilon}); \\ \sigma_y &= \sigma_y^y - 2G\omega(\varepsilon_y - \bar{\varepsilon});\end{aligned} \quad (13)$$

Компоненты упругой деформации выражаются через напряжения согласно закона Гука:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x^y &= \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \mu(\sigma_y - \sigma_z) \right]; \\ \varepsilon_y^y &= \frac{1}{E} \left[\sigma_y - \mu(\sigma_z - \sigma_x) \right];\end{aligned} \quad (14)$$

Компоненты пластической деформации выражаются через напряжения с использованием функции ω :

$$\begin{aligned}\varepsilon_x^n &= \frac{\omega}{E(1-\omega)} \left[\sigma_x - \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_z) \right]; \\ \varepsilon_y^n &= \frac{\omega}{E(1-\omega)} \left[\sigma_y - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_z) \right]\end{aligned} \quad (15)$$

Сначала решена упругая задача и найдены σ_x^y и σ_y^y (первое приближение). Затем рассчитаны интенсивность деформаций $\varepsilon_i^{(1)}$ и напряжений $\sigma_i^{(1)}$, которое сравнивается с расчетным значением $\sigma_i^{(1)}$ и полученными из кривой $\sigma_i - \varepsilon_i$ для первого приближения $\varepsilon_i^{(1)}$. Исходя из разности $\Delta \sigma_i^{(1)} = \sigma_i^{(1)} - \sigma_i$, определена функция $\omega_i^{(1)}$ в первом приближении по выражению (12) и из формулы $\omega = \frac{4}{3G} \frac{\sigma_i^{(1)}}{\varepsilon_i^{(1)}}$. Затем находим второе приближение $\sigma_x^{(2)}$, $\sigma_y^{(2)}$, $\varepsilon_x^{(2)}$, $\varepsilon_y^{(2)}$, $\omega^{(2)}$ и т.д.

Процесс последовательных приближений заканчивается при достаточной близости двух соседних приближений для интенсивности напряжений.

В работе дано решение упругой задачи для диска нагруженного тремя сосредоточенными силами. Полное решение задачи представлено в комплексной форме. Согласно метода предложенного Н.И. Мусхелишвили нет необходимости разрешать уравнения равновесия, а две функции комплексного переменного, определяются из следующих уравнений:

$$\varphi(z) = -\frac{1}{2\pi i} \sum_1^3 (\rho_{x_k} + i \rho_{y_k}) \ln \frac{z_k - z}{R} - \frac{z}{4\pi R} \sum_1^3 (\rho_{x_k} + i \rho_{y_k}) \bar{z}_k; \quad (16)$$

$$\psi(z) = \frac{1}{2\pi i} \sum_1^3 (\rho_{x_k} - i \rho_{y_k}) \ln \frac{z_k - z}{R} - \frac{1}{2\pi i} \sum_1^3 \left(\frac{\rho_{x_k} + i \rho_{y_k}}{z_k - \bar{z}} \right) \bar{z}_k;$$

где: ρ_{x_k}, ρ_{y_k} - проекции силы P на оси,
 z_k - точки приложения сил; $k = 1, 2, 3$,
 $z = x + iy$ - переменная точка внутри диска,
 R - радиус диска.

Напряжения и перемещения определяли из следующих формул:

$$\begin{aligned} \sigma_x + \sigma_y &= 4R\ell \cdot \varphi'(z); \\ \sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy} &= 2 \left[\bar{z} \cdot \varphi''(z) + \varphi'(z) \right]; \\ 2\mu(u + iv) &= x \cdot \varphi(z) - z \cdot \varphi'(z) - \psi(z). \end{aligned} \quad (17)$$

Для напряжений внутри диска под действием трех сосредоточенных сил получены следующие выражения:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{P}{2\pi i} \left(\frac{3 \cos \alpha_1 + \cos 3\alpha_1}{z_1} + \frac{3 \cos \alpha_2 + \cos 3\alpha_2 + \sqrt{3} \sin \alpha_2 + \sqrt{3} \sin 3\alpha_2}{2z_2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{3 \cos \alpha_3 + \cos 3\alpha_3 + \sqrt{3} \sin \alpha_3 + \sqrt{3} \sin 3\alpha_3}{2z_3} - \frac{3}{R} \right); \\ \sigma_y &= \frac{P}{2\pi i} \left(\frac{\cos 3\alpha_1 - \cos \alpha_1}{z_1} + \frac{\cos 3\alpha_2 - \cos \alpha_2 + \sqrt{3} \sin 3\alpha_2 - 3\sqrt{3} \sin \alpha_2}{2z_2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\cos 3\alpha_3 - \cos \alpha_3 + \sqrt{3} \sin 3\alpha_3 - 3\sqrt{3} \sin \alpha_3}{2z_3} + \frac{3}{R} \right); \\ \tau_{xy} &= \frac{P}{\pi} \left(\frac{\sin \alpha_1 + \sin 3\alpha_1}{z_1} + \frac{\sin \alpha_2 + \sin 3\alpha_2 + \sqrt{3} \cos \alpha_2 - \sqrt{3} \cos 3\alpha_2}{2z_2} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sin \alpha_3 + \sin 3\alpha_3 + \sqrt{3} \cos \alpha_3 - \sqrt{3} \cos 3\alpha_3}{2z_3} \right); \end{aligned} \quad (18)$$

где: z_1, z_2, z_3 - расстояние от точек Z_1, Z_2, Z_3 соответственно до точки,

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - углы между векторами z_1, z_2, z_3 и осью X.

В полярных координатах (r, θ) выражения σ_z и σ_θ можно вычислить по выражениям:

$$\sigma_z = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta; \quad (19)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \cos 2(\theta + \frac{\pi}{4}) + \tau_{xy} \sin 2(\theta + \frac{\pi}{4});$$

На основании этих формул были построены эпюры изменения σ_z и σ_θ по диаметру диска при углах $\theta = 0^\circ, 20^\circ$ и 40° , которые показали значительную неравномерность напряжений, изменяющих свой знак.

Установлено, что внутри диска действуют только сжимающие напряжения. Разрыхление внутри диска может произойти только при $z \geq \frac{R}{2}$, поскольку только в этом кольце действуют растягивающие радиальные и сжимающие тангенциальные напряжения.

Эпюры напряжений для упругого напряженно-деформированного состояния материала внутри заготовки сохраняют свой знак и при малых пластических деформациях. Зоны, в которых материал находится в пластическом состоянии, располагаются вблизи точек приложения сосредоточенных сил. Пластическое состояние в этих точках начинается как только интенсивность напряжений достигнет значения больше истинного предела текучести - σ_s

$$\sigma_1 > \sigma_s.$$

Приведенный анализ распределения напряжений характерен для трехвалковой схемы винтовой прокатки и ковке тремя бойками с малыми обжатиями. Различие между ковкой и прокаткой состоит в том, что при ковке после удара в заготовке остаются только остаточные напряжения, а при прокатке каждый элемент при вращении в валках испытывает переменные циклические напряжения.

Для расчета процессов циклического нагружения в случае вращения заготовки в валках приняты следующие основные гипотезы:

1) при циклическом нагружении предел текучести есть величина переменная, зависящая от предельного напряженного и деформированного состояния;

2) зависимость напряжение-деформация в упругой области при циклическом нагружении линейная;

3) при повторном нагружении пластическая деформация не изменяет величины упругих постоянных;

4) если при повторном нагружении появились пластические деформации; то последующее нагружение будет происходить вдоль исходной кривой упрочнения. При циклических нагружениях имеет место изменение кривой упрочнения от цикла к циклу.

В работе рассматривается циклическое деформирование заготовки с использованием указанных выше гипотез и деформационный критерий разрушения.

Число циклов до разрушения материала N определяется как отношение суммарной интенсивности деформаций при разрушении ε_p и дополнительной пластической деформации $\Delta \varepsilon_i^n$ за каждый цикл:

$$N = \frac{\varepsilon_p}{\Delta \varepsilon_i^n} \quad (20)$$

Так, например, если $\Delta \varepsilon_i^n = 0,05$ и $\varepsilon_p = 0,06$, то $N = 12$, а при $\Delta \varepsilon_i^n = 0,02$, $N = 30$. Таким образом, число циклов до разрушения зависит от накопленной пластической деформации за каждый цикл, т.е. от дробности деформаций. Число циклов зависит от размеров заготовок, наличия структурной неоднородности материала, микротрещин и других факторов.

В инженерных расчетах усилий при винтовой прокатке, сопровождающейся циклическими переменными нагружениями, следует пользоваться единой кривой упрочнения и деформационным критерием, определяя дополнительные пластические деформации в каждом цикле по методу упругих решений.

в) Распределение нормальных контактных напряжений

Значительный интерес в части развития теоретических положений расчета силовых параметров процесса винтовой прокатки представляет вопрос о том, насколько аналогичен этот процесс по характеру и величине напряжений на контакте с вальками с продольной прокаткой.

С этой целью выполнены экспериментальные исследования на двух-валковом стане "I60" в задачу которых входило:

1) определение величины нормальных контактных напряжений по длине дуги захвата и их распределение при продольной и поперечной прокатке с сохранением условия равенства начальной высоты и ширины очага деформации ($h_o = \alpha_o$ и $\beta_o = \ell_o$);

2) изучение распределения нормальных контактных напряжений по ширине плоских и по длине круглых образцов;

3) характер изменения величины ρ_{cp} в зависимости от δ_o соответственно при поперечной и продольной прокатке.

Как продольная, так и поперечная прокатка образцов из алюминия осуществлялась в одних и тех же валках в холодном состоянии с одинаковыми обжатиями и скоростями.

Анализ осциллограмм с записью нормальных контактных напряжений показал, что:

1) при продольной и поперечной прокатке образцов одинаковой начальной высоты с малыми обжатиями эпюры распределения нормальных контактных напряжений в очаге деформации по своему характеру не отличаются друг от друга, а по величине давления металла на валки процесс поперечной прокатки протекает при более высоких (на 20-25%) значениях средних нормальных напряжений;

2) изменение ширины очага деформации как при продольной, так и поперечной прокатке не влияет на величину ρ_{cp} , исключение составляет случай прокатки узких полос и дисков ($\frac{b_o}{h_o}$ или $\frac{L_o}{d_o} = 0,25 + 0,3$) когда наблюдается снижение удельного давления на 10-15%.

г) Влияние внешних зон на контактное давление

Известно, что недеформируемые участки металла, находящиеся за пределами геометрического очага деформации вызывают значительное повышение ρ_{cp} при осадке и продольной прокатке. Однако в литературе отсутствуют данные о воздействии внеконтактных зон, т.е. боковых частей круглой заготовки на сопротивление деформации при поперечной и винтовой прокатке.

В результате выполненных экспериментов, определяющих влияние недеформированных участков как прямоугольных, так и цилиндрических образцов установлено, что боковые внешние зоны цилиндрических заготовок при поперечной осадке (прокатке) вызывают дополнительное повышение контактных давлений почти в 1,5 раза. Причем влияние боковых зон не зависит от длины цилиндрического образца.

Данные по осадке полых заготовок без оправки также показывают, что влияние недеформированных боковых частей на ρ_{cp} в зависимости от отношения b_o/d_o - аналогично осадке цилиндрических образцов. При этом имеет место снижение величины контактного давления в зависимости от отношения S_o/d_o , которое изменялось в пределах $0 + 0,35$. При осадке толстостенных труб ($S_o/d_o > 0,35$) величина контактных давлений у сплошных и полых заготовок одного и того же диаметра практически одинакова.

Для определения коэффициента напряженного состояния с учетом влияния боковых внешних зон и недеформированных концов сплошных заготовок при поперечной и винтовой прокатке рекомендована эмпирическая зависимость, которая хорошо подтверждается результатами экспериментов:

$$\sigma_6 = \sigma_5 \cdot \sigma_k \cdot 1,8 \left(\frac{b_0}{d_0} \right)^{-0,3}, \quad (21)$$

где: σ_5 — коэффициент учитывающий влияние боковых зон круглой заготовки;

σ_k — коэффициент учитывающий влияние внешних недеформированных концов заготовки.

Исходя из анализа полученных данных для подсчета величины контактных напряжений при винтовой прокатке полых изделий, получена формула:

$$\rho_{ср пол} = 2,8 \sigma_{спл} \cdot \sigma_\phi \frac{S_0}{d_0}. \quad (22)$$

В работе приводятся графики изменения отношения $\frac{\rho}{2k}$ в зависимости от отношения b_0/d_0 , полученные в результате выполненных экспериментов.

ГЛАВА У. ПРОКАТКА ПОЛЫХ ПРОФИЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ.

Применение в машиностроении и строительстве круглых полых профилей с переменными диаметрами и толщиной стенки, обеспечивает повышение прочностных и технологических характеристик деталей, работающих при циклических нагрузках и на изгиб, и будет всегда определяющим там, где требуется снижение веса машин и механизмов. Использование процесса винтовой прокатки для получения профильных труб, является прогрессивным, т.к. является наиболее производительным из всех известных (прессование, волочение), и может быть осуществлен на сравнительно простом и несложном оборудовании — трехвалковых станах.

В первом разделе пятой главы диссертации рассмотрены вопросы напряженного-деформированного состояния полой заготовки при поперечной деформации в трех валках. Установлено, что при прокатке толстостенных труб без оправки условия деформации и схема напряженного состояния приближается к условиям и схеме прошивки сплошных заготовок. Наличие значительных растягивающих напряжений приводит к поперечной раскатке гильзы с уменьшением исходной толщины стенки заготовки.

При прокатке тонкостенных гильз без оправки схема напряженного состояния характеризуется пластическим изгибом. При этом толщина стенки трубы может увеличиваться или оставаться постоянной.

Прокатка труб на оправке имеет свои особенности. Так, если диаметр трубы велик по сравнению с толщиной исходной стенки, то процесс происходит в условиях плоской деформации, т.е. напряжения в заготовке в тангенциальном направлении близки к нулю. При прокатке толстостенных труб наблюдается значительная овализация. С увеличением разности наружного и внутреннего диаметров заготовки овализация при винтовой прокатке увеличивается.

Напряженное состояние заготовки при прокатке полых изделий более благоприятно, чем сплошных, т.к. пластическая зона, даже при малых деформациях охватывает все кольцевое сечение. В то же время напряженно-деформированное состояние полых толстостенных профилей имеет много общего с прокаткой сплошных заготовок и зависит от соотношения поперечной и продольной деформаций, температурно-скоростных условий, а также от исходной пластичности металла.

В работе впервые в полном объеме исследован процесс редуцирования полых заготовок при прокатке на трехвалковых станах с применением дополнительной осевой силы натяжения (сжатия). Показано, что при прокатке без оправки изменение толщины стенки и внутреннего диаметра трубы отличается от известных зависимостей, полученных для раскатных трех- и двухвалковых станов.

Обработка данных и анализ выполненных экспериментов позволяют рекомендовать для практических расчетов зависимость для определения размеров полых заготовок при безопрочной их прокатке на трехвалковых станах:

$$\frac{d_{\text{вн}1}}{d_1} = \frac{d_{\text{вн}0}}{d_0} - \left(\frac{S_0}{d_0} \right)^K \frac{d_0 - d_1}{d_0}, \quad (23)$$

где: $d_{\text{вн}0}$ и $d_{\text{вн}1}$ — соответственно внутренний диаметр заготовки до и после деформации,

d_0 и d_1 — соответственно наружный диаметр заготовки до и после деформации,

$K = 1,9 + 3,0$ — коэффициент, зависящий от исходных размеров заготовки.

В результате выполненных работ по прокатке полых тел с применением дополнительной осевой силы сделаны следующие выводы:

- 1) напряженное состояние металла характеризуется радиальными сжимающими напряжениями при любом отношении $\frac{S_0}{d_0}$;
- 2) процесс редуцирования осуществляется стабильно при отношении $S_0/d_0 = 0,1 + 0,3$;
- 3) получены обобщенные графики и эмпирическая зависимость для

определения толщины стенки различных полых заготовок в функции обжатия их по диаметру;

4) увеличение величины натяжения, а значит и величины подачи заготовки до $\Delta = (0,1 + 0,2) \alpha_z$ приводит при деформации стенки к увеличению ее толщины. Сравнение изменения отношения d_s/d_n у заготовок с одинаковыми исходными размерами позволило установить, что при прокатке с подпором (сжатием) толщина стенки изменяется больше.

С целью повышения устойчивости тонкостенных труб опробована прокатка с отношением $S_0/\alpha_0 = 0,15 + 0,07$ в калиброванных валках (конус деформации был разбит на несколько участков с промежуточными участками, параллельными оси заготовки). Особенно хорошие результаты по повышению устойчивости трубы и нормальному протеканию процесса получены на грибовидных валках. При этом уменьшается разность окружающих скоростей в различных точках поверхности вала, что в свою очередь уменьшает скручивание заготовки.

На основании выполненных исследований по изменению поперечной разностенности при винтовой прокатке в трехвалковых станах с натяжением установлено, что с увеличением обжатия как абсолютная так и относительная разностенность снижается. Причем наиболее эффективно снижение разностенности при вытяжках, не превышающих $\lambda = 2$. Прокатка без ^{прокатки}оправки показала более эффективное снижение разностенности, чем на ^{прокатки}оправке. На трехвалковых станах можно уменьшить исходную относительную разностенность вильз, полученных на прошивных станах, в 2-3 раза.

ГЛАВА VI. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА

а) Методика исследования, оборудование и приборы

Экспериментальная часть работы посвящена изучению контактных напряжений и определению энергосиловых параметров процесса в зависимости от температурно-скоростных режимов прокатки и геометрических размеров очага деформации.

Результаты этих исследований использованы в других разделах диссертации в качестве исходных данных для проверки теоретических зависимостей, а также как критерий для оценки качественных показателей прокатываемых заготовок.

Совместное изучение энергосиловых и технологических параметров процесса способствовало получению необходимых данных для проектирования новых станов и интенсификации процесса.

В 1952-72 г.г. при участии автора выполнены исследования на станах "10" (завод "Текстильмаш"), "70" (АЗЛК), "120" (завод им. Дзержинского), ППТ-7 и ППТ-400 (ЭЗТМ), а также на аналогичных опытных установках "10", "50" (МВТУ) и "120" (ВНИИМЕТМАШ). Особое внимание уделено конструкциям и точности изготовления месдоз для определения нормальных контактных напряжений и ширины поверхности соприкосновения металла с валками. Разработанные конструкции месдоз позволили разместить в одной вставке 3+10 штифтов и таким образом, исследовать изменения напряжений и ширины контактной поверхности вдоль всего конуса деформации, включая и калибрующий участок валька. Эти исследования применительно к трехвалковым станам выполнены впервые и обеспечили получение точных данных о характере изменения и величинах давления металла на валки и фактической контактной поверхности.

б) Математическое планирование эксперимента при исследовании влияния технологических факторов на качество поверхности профилей

Определение оптимальных условий для получения качественной поверхности (без заметных следов от валков) было сведено к решению экспериментальной задачи: нахождению минимальной характеристики, т.е. высоты образующихся на поверхности неровностей. Для этих целей использован статистический метод на основе математической теории ~~экспериментальных~~ экстремальных экспериментов. Этот метод позволил получить уравнение, связавшее величину искомой характеристики с независимыми переменными. В качестве характеристики (параметр оптимизации Y_i) взята высота винтовых следов на поверхности заготовки. При выполнении экспериментов все факторы, влияющие на качество поверхности, варьировались одновременно. Это позволило резко сократить число экспериментов и установить связь между двумя переменными.

Каждому образцу, полученному при эксперименте в зависимости от качества поверхности присваивался соответствующий ранг-целое или дробное число.

Связь между ранговой оценкой Y_i факторами технологического процесса X_n установлена с помощью уравнения регрессии. Величина коэффициентов регрессии характеризует степень влияния фактора X_n на параметр оптимизации - Y_i , а знак перед коэффициентом, указывает направление влияния.

Изучалось влияние 9 факторов (α_s , ξ , ℓ_k , α , V_r , ρ_s , T_0 , μ , а также способ подачи эмульсии). При прокатке сохранение неизменного качества, в первую очередь, зависит от скорости перемещения тележки — X_5 и числа оборотов валков X_6 .

Размеры валка и фактор температуры $X_1(\ell_k)$, $X_4(\alpha)$, $X_7(T^\circ)$ стабилизированы на верхних уровнях. Окончательно было получено уравнение:

$$y_i - 1018 = 0,3 \bar{X}_5^2 - 0,3 X_3^2.$$

На основании этого уравнения сделаны расчеты и построены графики в виде гиперболы. В экспериментальной области ветви гипербол дают зависимость между величиной обжатия — ξ и скоростью перемещения натяжного устройства, чтобы получить одинаковый ранг (качество поверхности), необходимо изменять значения X_3 и X_5 , оставаясь на одной и той же ветви гиперболы.

В работе дано сравнение ранговой оценки качества поверхности образца с высотой неровностей, замеренной с помощью микроскопа. Установлено, что определяющими факторами являются скорость выхода металла из валков (подача) и величина обжатия заготовки.

в) Определение давления металла на валки и расхода энергии.

В работе представлена методика определения давления металла и приводятся результаты экспериментальных замеров и подсчитанных значений P по теоретическим формулам. Получена хорошая сходимость результатов экспериментов с теоретическими расчетами.

Основными факторами, влияющими на изменение давления металла на валки, являются диаметр заготовки — α_s , скорость прокатки — V_n , величина обжатия — ξ и угол конусности валков — α . Увеличение этих величин приводит при прочих равных условиях, к увеличению давления металла на валки.

Расход энергии при прокатке на трехвалковых станах определялся как сумма мощности, затраченной на деформацию металла на преодоление сил трения металла с инструментом. Мощность деформации металла можно представить как сумму мощностей расходуемых на формоизменение — N_{ϕ} и преодоление сопротивления скручиванию — $N_{скр}$

$$N_{\text{деф}} = N_{\phi} + N_{скр}. \quad (24)$$

В свою очередь, мощность на преодоление трения на поверхности металла с валками

$$N_{\tau} = 3 T_{\tau} \eta_{\tau}, \quad (25)$$

где: $T_{\tau} = \mu P$ — сила трения,
 η_{τ} — коэффициент тангенциального скольжения.

При прокатке полных изделий мощность, затрачиваемая на преодоление трения между металлом и оправкой

$$N_{тр.оп} = T_{опр} \cdot U, \quad T_{опр} = \frac{\mu K_{соп} \cdot P_{сж}}{\sin \varphi}, \quad (26)$$

$K_{соп}$ - коэффициент осевого сопротивления оправки

При прокатке на оправке мощность, необходимая для преодоления сил трения, не превышает 10-15%.

По результатам замера и подсчета мощности прокатки приводятся обобщенные графики, отражающие зависимость удельного расхода энергии от обжатия и шага подачи. Эти данные относятся к прокатке на станах "120", "50" и "10" заготовок диаметром 10 + 130 мм из стали 45.

Установлено, что для этого сортамента заготовок удельный расход изменяется в пределах от 10 до 70 $\frac{\text{кВтч}}{\text{т}}$.

г) Прокатка заготовок с натяжением (сжатием).

С увеличением числа валков и сокращением длины их бочки уменьшается зона растягивающих напряжений по сечению заготовки, и металл при винтовой прокатке смещается в осевом и радиальном направлениях. При этом растягивающие напряжения в середине заготовки значительно уменьшаются. Однако, этих условий оказывается недостаточно, чтобы гарантировать полное отсутствие разрыхления металла в центре заготовки. При прокатке сплошных заготовок к их переднему концу необходимо прикладывать дополнительное растягивающее напряжение равное:

$$\sigma_{нат} = \frac{S_{нат}}{F} = \frac{4 \cdot \sigma_{нат}}{\pi d_p^2}. \quad (27)$$

Усилие осевого натяжения, при котором процесс винтовой прокатки протекает нормально зависит как от условий, гарантирующих получение изделий без внутренней полости - $\sigma_{нат} \geq (0,2+0,3) \sigma_{ст}^0$, так и от прочности наиболее обжатого сечения заготовки $S_{нат} < \pi r_{min}^2 \cdot \sigma_{ст}^0$.

От действия внешнего давления металла на валки усилие натяжения определяется как:

$$S_{нат} = 3P (\sin \alpha - \mu \cos \alpha). \quad (28)$$

При винтовой прокатке с подпором усилие сжатия - T можно найти из условий устойчивости и смятия конца заготовки:

$$T \leq \frac{\pi^2 E J}{4 l^2} \approx \frac{8 E r_0}{l^2}. \quad (29)$$

Сделаны рекомендации по выбору оптимальных параметров процесса прокатки заготовок с натяжением или ~~или~~ сжатием. В тоже время подчеркивается, что прокатка профилей может осуществляться без прило-

жения к заготовке дополнительного осевого усилия. В настоящее время на заводе им. Дзержинского освоена прокатка переднего конца заготовки для захима в патрон на заданный размер заготовки без применения осевого усилия сжатия. Это достигнуто путем уменьшения угла обжимного конуса валков $\alpha = 15+17^\circ$ с одновременным увеличением угла разворота валков по отношению к оси заготовки ($9+10^\circ$). Стабильность процесса и сохранение сплошности металла в этом случае будет обеспечено на сравнительно небольшой длине заготовки (150+200 мм). Процесс винтовой прокатки без применения осевого усилия может протекать только в момент захвата и прокатки начальных участков заготовок. После выхода из валков к обжимному концу заготовки необходимо приложить осевое усилие натяжения, что обеспечит не только сплошность металла по всей длине, но и центрирование прокатываемого профиля. Такой способ прокатки конца заготовки без применения дополнительного осевого усилия успешно осуществлен на трехвалковом стане "120" завода им. Дзержинского, что позволило значительно сократить потери металла за счет уменьшения технологических отходов. При проектировании новых технологических станов периодической прокатки необходимо предусматривать в начальный период прокатки при малых углах подачи, а в дальнейшем с увеличением обжатия, когда процесс начинает протекать устойчиво, увеличивать углы подачи, что благоприятно скажется на качестве наружной поверхности заготовок.

Очевидно, развитие технологии и конструкций трехвалковых станков следует проводить именно в этом направлении. Это позволит получить дополнительную экономию металла и сделать процесс еще более эффективным.

д) Определение крутящего момента

Крутящий момент на валках при прокатке сплошных заготовок можно определять по формуле:

$$M_{кр} = P(R_g \sin \varphi \cos \gamma + \frac{b}{2} \cos \varphi \cos \beta), \quad (30)$$

а при прокатке полых — к правой части этого уравнения следует добавлять величину, учитывающую влияние осевого усилия на оправку — $-P_{оп} R_g \sin \gamma$. Анализ экспериментальных и теоретических данных показывает, что они хорошо согласуются. Исходя из этого в основу расчета момента прокатки принят метод, предусматривающий определение давления металла на валок, ширину контактной поверхности. Рассматривая схему расположения сил, можно получить условие равновесия заготовки в осевом направлении очага деформации:

$$\rho \sin \alpha - Q_0 \cos \alpha - \frac{Q_{\text{ср}}}{3} = 0, \quad (31)$$

где: Q - равнодействующая сил трения на контактной поверхности. В работе приводится конкретный экспериментальный материал по определению $M_{\text{кр}}$ для процессов прокатки - сплошных и полых профильных заготовок.

ГЛАВА VII. РАЗВИТИЕ ПРОИЗВОДСТВА КРУГЛЫХ ПРОФИЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК НА ТРЕХВАЛКОВЫХ СТАНАХ.

Накопленный опыт эксплуатации трехвалковых станов и технологии получения круглых профильных заготовок позволяет значительно расширить применение нового экономического процесса для производства ряда ответственных деталей машиностроения и получения профильных труб винтовой прокаткой.

Коллективом ВНИИМЕТМАШ совместно с рядом институтов и заводов, при участии автора, разработан комплексный технологический процесс производства вагонных осей в осепрокатном цехе. Создаваемый осепрокатный цех производительностью 320-350 тыс. сплошных или полых вагонных осей в год является уникальным и не имеет себе подобных как у нас, так и за рубежом. В этом цехе несколько линий различного технологического назначения соединяются в одну непрерывную линию. Основным участком цеха является пресспрокатное отделение, оснащенное высокопроизводительными машинами для прошивки, раскатки и прокатки заготовок, а также закатки шеек полых осей. При разработке технологии особое внимание уделено качественным показателям вагонных осей.

С целью отработки оптимальных режимов технологического процесса на станах "120" и ППТ-7 были прокатаны опытные партии сплошных и полых вагонных осей узкой и широкой колеи. Стендовые исследования, выполненные во ВНИИ МПС и ВНИТИ (тепловозный), а также эксплуатационные испытания осей, полученных методом винтовой прокатки, показали, что они обладают высокими механическими свойствами (повышенной усталостной прочностью), осевой направленностью структуры, и другими положительными характеристиками.

Работы по совершенствованию технологического процесса прокатки сплошных и полых вагонных осей продолжают и в настоящее время. Поставлена задача прокатать и исследовать опытные партии натуральных образцов сплошных осей магистральных вагонов.

Большой интерес проявляет станкоинструментальная промышленность

к процессам получения круглых профильных заготовок для инструмента (гаечные ключи, напильники и др.).

Новым процессом, разработанным в последние годы, является прокатка на трехвалковом стане геологоразведочных и бурильных труб из легких сплавов. Это потребовало проведения большого объема работ, включая реконструкцию опытного стана "120" ВНИИМЕТМАШ, на котором в 1968-69 г.г. были прокатаны первые партии таких труб. Наряду с разработкой технологии винтовой прокатки профильных труб из легких сплавов выполнены металлографические и прочностные исследования свойств металла, которые по некоторым характеристикам (усталостная прочность) оказалась выше, чем у труб, полученных прессованием.

В работе приведены также результаты исследований по винтовой прокатке сплошных заготовок из легированных марок сталей и литых заготовок, полученных на установках непрерывного литья, и показана перспективность их развития.

Выполнены исследования по прокатке и других полых изделий: осей автотракторных прицепов, профильных втулок буровых (грязевых) насосов, полых распределителей, трамвайных осей. Результаты выполненных работ открывают большие перспективы для расширения внедрения технологического процесса винтовой прокатки профильных заготовок в различных отраслях машиностроения, транспорта и строительства.

В заключительной части работы приведены некоторые технико-экономические показатели использования круглых профилей в народном хозяйстве страны и показано, что при широком внедрении нового процесса получения круглых профилей в промышленность, общий экономический эффект составит до 7 млн. рублей в год.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.

1. Выполнено комплексное исследование нового технологического процесса винтовой прокатки круглых профилей переменного сечения, на промышленных трехвалковых станах "10", "70", "120", а также на аналогичном экспериментальном оборудовании во ВНИИМЕТМАШ, МВТУ им. Баумана и ЭЗТМ, что позволило разработать мероприятия по совершенствованию процесса и работы станков. Эти предложения реализованы на действующих промышленных установках и используются при проектировании новых трехвалковых станков ВНИИМЕТМАШ и Электростальским заводом тяжелого машиностроения.

2. Созданы новые способы винтовой прокатки сплошных и полых профилей и, в частности, разработан комплексный технологический

процесс получения сплошных и полых вагонных осей в осепрокатном цехе, осуществлена прокатка полых изделий с переменными внутренними диаметрами и толщиной стенки, закатка концов осей и валов. Впервые на трехвалковых станах прокатаны легированные марки сталей и легких сплавов на основе алюминия.

3. Освоена винтовая прокатка сплошных и полых профилей заготовок диаметром от 5+275 мм, что позволяет уверенно рекомендовать новый технологический процесс для производства таких крупных профилей как вагонные оси, втулки буровых насосов, геологоразведочные и бурильные трубы и др.

4. Установлены зависимости между основными геометрическими и скоростными параметрами процесса винтовой прокатки с применением осевого натяжения (ожатия) заготовки и определены оптимальные режимы деформации. Наиболее благоприятные условия деформации металла имеют место при прокатке на грибовидных вальках, когда отношение минимального радиуса валька к радиусу заготовки равно 5.

Рассмотрение кинематики очага деформации совместно с условиями течения металла в трехвалковых станах с применением дополнительной осевой силы показывает, что имеются реальные резервы для увеличения производительности станов при одновременном улучшении качества прокатанных заготовок.

5. Получены формулы для определения величины контактной площади металла с вальками при прокатке сплошных и полых профилей (с учетом овализации сечения). Установлено, что на коэффициент овализации в первую очередь влияют диаметр и толщина стенки исходной заготовки, а также величины обжатия и подачи.

6. Выполнен теоретический анализ напряженно-деформированного состояния заготовки при малых единичных обжатиях и циклическом нагружении. Исследовано деформированное состояние заготовки при вращении в трех вальках с учетом дополнительных пластических деформаций в каждом цикле. Исходя из накопленных пластических деформаций, определено предельное число циклов нагружения, характеризующее разрушение заготовки. Установлены границы кольцевой зоны разрушения при малоциклической усталости.

7. Проведено исследование распределения контактных напряжений при продольной прокатке высоких прямоугольных образцов и поперечной прокатке круглых заготовок с небольшими частными обжатиями (2+3%). Установлено, что характер эпюр распределения нормальных контактных

напряжений в очаге деформации при продольной и поперечной прокатке не отличаются друг от друга. Однако абсолютная величина давления металла на валки в процессах поперечной и винтовой прокатки на 20-25% выше средних нормальных напряжений по сравнению с процессами продольной прокатки. При определении напряженного состояния металла в процессе винтовой прокатки необходимо учитывать влияние внешних недеформируемых концов и боковых зон в виде соответствующих коэффициентов. Установлено, что круглая форма заготовки вызывает увеличение контактного давления в 1,5 раза по сравнению с деформацией плоских образцов.

8. Показано, что натяжение (сжатие) заготовки оказывает существенное влияние на снижение величины давления металла на валки. Рассмотрено влияние основных технологических параметров на величину осевого усилия.

Освоена прокатка небольших по длине участков металла (передних заготовок) концов без приложения к ним осевых усилий за счет увеличенного угла подачи и уменьшения угла обжимного конуса валков. Это делает процесс еще более эффективным, т.к. снижает расходный коэффициент металла, который в среднем для трехвалковых станов может составить $1,1+1,15$.

9. Исследован процесс редуцирования полых изделий (на оправке и без оправки) с большими обжатиями по толщине стенки и диаметру. Использование дополнительной осевой силы сжатия создает благоприятную схему напряженного состояния и позволяет получать большие деформации по стенке трубы ($\varepsilon = 75\%$). Вытяжка металла в осевом направлении при прокатке по схеме "сжатие" может быть равна $\lambda = 8 + 10$.

10. Установлено, что при одинаковом обжатии различных по размерам труб коэффициент отношения поперечной и продольной деформаций характеризуется геометрическим подобием. При безоправочной прокатке тонкостенных гильз ($S_0/d_0 = 0,1 + 0,25$) с небольшими обжатиями по диаметру вследствие преобладания сжимающих напряжений происходит увеличение исходной толщины стенки. При обжатии заготовки на 25% и выше увеличивается число циклов деформации, растет овализация и величина растягивающих напряжений, что приводит к уменьшению толщины стенки.

С увеличением исходной толщины стенки ($S_0/d_0 \geq 0,4$) неравномерность деформации увеличивается и у толстостенных труб, даже при малых обжатиях, наблюдается утонение стенки.

II. Предложена и разработана новая форма валков для получения тонкостенных полых профильных изделий, которая позволяет уменьшить поперечную деформацию и овализацию заготовки, сохранить постоянным отношение окружных скоростей вала и заготовки по длине очага деформации и уменьшить скручивание заготовки. За основу калибровки принят принцип дробности деформации и на валках осуществлено чередование конических и горизонтальных участков по отношению к оси заготовки. При прохождении промежуточных горизонтальных участков металл испытывает внеконтактную деформацию растяжения, что способствует снижению контактных напряжений и в целом уменьшения давления металла на валки.

12. Установлено, что при прокатке в трехвалковых станах полых изделий с большой исходной разностенностью (до 30%) ее относительная и абсолютная величина может быть значительно снижена. Наибольшее уменьшение разностенности наблюдается при вытяжках до 2+2,5. Дальнейшее увеличение коэффициента вытяжки не оказывает заметного влияния на уменьшение разностенности.

13. На основании методики планирования эксперимента установлены основные факторы, влияющие на качество поверхности прокатываемой заготовки. Показано, что с увеличением величины обжата и скорости прокатки, при прочих равных условиях, качество наружной поверхности заготовок улучшается.

14. Освоена прокатка на трехвалковых станах заготовок из углеродистых и легированных марок сталей, а также из легких сплавов на основе алюминия.

15. Металлографические и механические исследования прокатных заготовок показали, что в основном процесс винтовой прокатки не изменяет прочностные свойства исходного материала. В то же время после прокатки несколько улучшаются пластические характеристики и стабилизируются свойства металла по толщине и длине. Использование в качестве исходной заготовки под прокатку слитков с установок непрерывного литья показывает, что после прокатки наблюдается повышение прочностных характеристик заготовки и улучшение структуры за счет уплотнения и проработки ее.

16. Освоение в промышленности 12 трехвалковых станов, непрерывное расширение сортамента и повышение качества круглых профильных заготовок обеспечивает ежегодную экономию металла до 10000 т, что в денежном выражении составляет около 1 млн. руб

Показано, что еще больший экономический эффект будет достигнут при освоении новых технологических процессов, и особенно при прокатке полых профильных заготовок.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. В.А.Жаворонков. Исследование первых промышленных станов поперечно-винтовой прокатки. Сб.трудов МВТУ им. Баумана, "Прокатные станы и технология прокатки", № 63, 1955.

2. В.А.Жаворонков. Исследование силовых воздействий на станах поперечно-винтовой прокатки. Сб.трудов МВТУ им. Баумана "Прокатные станы и технология прокатки", № 80, 1957.

3. А.И.Целиков, В.А.Жаворонков. Новые методы производства проката, журнал "Механизация трудоемких и тяжелых работ", № 6, 1957.

4. В.А.Жаворонков. Получение профилей переменного сечения на станах поперечно-винтовой прокатки". "Научные доклады высшей школы (Машиностроение и приборостроение)", № 2, 1958.

5. В.А.Жаворонков, Е.А.Жукавич-Стоша. Основные параметры инструмента станов для поперечно-винтовой прокатки периодических профилей. Сб.трудов МВТУ им. Баумана "Прокатные станы и технология прокатки", № 84, 1958.

6. В.А.Жаворонков. Получение тел вращения методом поперечно-винтовой прокатки. Труды Межвузовской научно-технической конференции "Современные достижения прокатного производства" Ленинград, ЛПИ, 1958.

7. В.А.Жаворонков. Поперечно-винтовая прокатка тел вращения в холодном состоянии. "Известия ВУЗов. Машиностроение", № II, 1959.

8. V.A.Javoronkov "Some problems of the modern Theory of cross-spiral Rolling". Preceedings of the 7-th congress on Theoretical and Applied Mechanics - Bombay. December, 1961.

9. V.A.Javoronkov "New methods of cross-spiral rolling in manufacturing machine parts". Machine Building Industry, India, No.2, 1961.

10. V.A.Javoronkov "New rolling process in manufacturing machine parts", The Institution of Engineers, India, No.10, 1963.

11. V.A.Javoronkov "Latest developments in theory of rolling", Machine Building Industry, India, No.4, 1964.

12. V.A.Javoronkov "Modern Trends in the developments of rolling mills", Blast Furnace and Steel Plant, USA, No.6, 1964.

13. V.A.Javoronkov "Survey of developments of rolling", Transactions of the Indian Institute of metals Seventeen Annual Technical Meeting, Bombay, 1964.

14. A.I.Tselikov, V.A.Javoronkov "New methods of Rolling in production of Machine Parts", Proceedings of the Düsseldorf section Intern. conference in Iron and Steelmaking. 1965.

15. В.А.Жаворонков, А.Н.Сорокин. Определение величины контактной поверхности при поперечно-винтовой прокатке круглых профилей. "Известия ВУЗов", Машиностроение, № 12, 1967.

16. В.А.Жаворонков, А.Н.Сорокин. Исследование процесса поперечно-винтовой прокатки сплошных и полых вагонных осей. Материалы Всесоюзной технологической конференции. Секция "Процессы заготовительных цехов", Москва, IX, 1967.

17. В.А.Жаворонков, В.В.Чаликов. Изучение особенностей эффективности при поперечно-винтовой прокатке легких сплавов. Материалы Всесоюзной технологической конференции. Секция "Процессы заготовительных цехов", Москва, IX, 1967.

18. Новый технологический процесс массового производства сплошных и полых вагонных осей, получаемых методом винтовой прокатки. Межвузовская научная конференция "Теория производительности как основа проектирования машин-автоматов", МВТУ им. Баумана, 1968.

19. В.А.Жаворонков, А.И.Ратнер, В.В.Чаликов, Н.П.Закорко и В.Я.Шапиро. О влиянии некоторых технологических параметров на качество поверхности изделий, получаемых на трехвалковом стане. Известия ВУЗов. Машиностроение № 10, 1969

20. В.А.Жаворонков, А.К.Афанасьева, В.С.Курбатов, В.В.Чаликов, Л.В.Теплицкий и Е.И.Левин. Техничко-экономическая оценка нового метода производства бурильных труб из

из легких сплавов. "Технология легких сплавов (ВИЛС)" № 3, 1969.

21. А.И.Целиков, В.А.Жаворонков, Е.И.Левин, И.К.Шафран, А.В.Сичевой, А.А.Брежнев, Трехвалковые станы винтовой прокатки для производства круглых периодических профилей. "Сталь", № 5, 1970.

22. В.А.Жаворонков, В.В.Чаликов, Н.П. Закорко. Влияние геометрических и скоростных параметров процесса винтовой прокатки на качество поверхности. "Известия ВУЗов, Машиностроение" № 5, 1970.

23. А.И.Целиков, В.А.Жаворонков, М.В.Васильчиков. Производство точных заготовок для машиностроения методами прокатки. Материалы 3-й Всесоюзной научно-технической конференции "Научные основы технологии и прогрессивные процессы", МВТУ, Москва, 1970.

24. В.А.Жаворонков. Исследования процесса винтовой прокатки сплошных и полых периодических профилей. Материалы 3-й Всесоюзной научно-технической конференции. "Научные основы технологии и прогрессивные процессы". МВТУ, Москва, 1970.

25. В.А.Жаворонков. Получение вагонных осей новым методом винтовой прокатки на трехвалковом стане. Сб. "Новое в технологии заготовительных цехов", издание "Машиностроение", 1970.

26. В.А.Жаворонков, Ю.А.Марков, В.Ф.Свиреданко. О распределении нормальных контактных напряжений при продольной и поперечной прокатке сечений. "Известия ВУЗов, Машиностроение", № 4, 1971.

27. Т.В.Маргаритина, В.А.Жаворонков. Экономическая целесообразность применения круглых периодических профилей в машиностроении. "Известия ВУЗов, Машиностроение", № 3, 1971.

28. А.И.Целиков, В.А.Жаворонков, С.Е.Рокотян, А.Н.Сорокин. Аналитическое определение напряжений при малых упруго-пластических деформациях диска, нагруженного тремя сосредоточенными силами. "Известия ВУЗов, Машиностроение", № 10, 1971.

29. А.И.Целиков, В.А.Жаворонков, С.Е.Рокотян, А.Н.Сорокин. Циклические упруго-пластические деформации круглых тел при поперечной и винтовой прокатке. "Известия ВУЗов, Машиностроение", № 11, 1971.

30. В.А.Жаворонков, Ю.А.Марков, И.А.Столяров. Исследование влияния внешних зон на контактное давление при поперечно-винтовой прокатке. "Известия ВУЗов, Машиностроение", № 6, 1972.

31. А.И.Цаликов, Ю.Е.Коваленко, А.А.Шевченко, В.А.Жаворонков, Сичевой А.П. и др. Способ производства заготовок полых осей. Авторское свидетельство № 194725. Бюллетень изобретений № 9, 1967.

32. И.К.Тартаковский, П.М.Финагин, Полухин П.И., Матвеев Ю.М., Потапов И.Н., Жаворонков В.А. и др. Рабочая клетка трехвалкового стана. Авторское свидетельство № 214478. Бюллетень изобретений № 12, 1968.

33. В.А.Жаворонков, В.М.Ямпольский, В.В.Чаликов и др. Способ производства сплошных и полых периодических профилей. Авторское свидетельство № 250089. Бюллетень изобретений № 26, 1969.