

М239967

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

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

Инж. ЛУТКОВСКИЙ Сергей Иванович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОЛОЧЕНИЯ
ПРОВОЛОКИ ИЗ МАЛОПЛАСТИЧНЫХ СТАЛЕЙ
И СПЛАВОВ

(05.03.05 — Технология и машины обработки давлением)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана и электро-металлургическом заводе «Электросталь» им. И. Ф. Тевосяна.

Научные руководители:

д. т. н., проф. Зарошинский М. Л.,

к. т. н., доц. Синельников Ю. И.

Официальные оппоненты:

д. т. н. Шефтель М. И.,

к. т. н. Коростелин А. А.

Ведущее предприятие — Московский металлургический завод «Серп и Молот».

Автореферат разослан « »

1974 г.

Защита диссертации состоится « » 1974 г.
на заседании Совета факультета «Автоматизация и механизация производства» МВТУ им. Н. Э. Баумана по адресу:
Москва, 1070

Ваши от
просьба выс

печатю,

С диссер
им. Н. Э. Ба

МВТУ

Секретар
д. т. н

тепанов

ВВЕДЕНИЕ

Государственный план развития народного хозяйства на 1971-1975г.г. предусматривает увеличение выпуска стальной проволоки в 2,1 раза, улучшение качества металлопродукции, повышение эффективности применения металла в народном хозяйстве, повышение производительности труда в 1,3 раза. Особое внимание уделяется повышению качества проволоки из малопластичных сталей и сплавов.

Малопластичные стали по химическому составу, в основном, относятся к легированным и высоколегированным сталям, имеющим высокое содержание таких элементов, как хром, молибден, вольфрам, никель, ванадий, алюминий и др. Технология обработки давлением таких сплавов имеет длительный цикл, как по времени, так и количеству операций. Волочение малопластичных сталей и сплавов характеризуется малыми величинами степени деформации за проход, обусловленных низкими значениями таких характеристик пластичности, как относительное удлинение $\delta\epsilon$, относительное сужение поперечного сечения ψ и отношения предела прочности σ_B к пределу текучести σ_T .

Малые единичные степени деформации вынуждают производить большое количество переходов (до 8-10) для достижения необходимого размера проволоки. Уже после 1-2 последовательных деформаций приходится производить термообработку с целью улучшить пластические свойства проволоки. Время термообработки для некоторых сплавов может достигать 12-20 часов, кроме того, после термообработки требуется выполнить большое количество операций: травление, промывка, нанесение подмазочного слоя, сушка и др. Большое количество термообработок может привести к появлению брака, так при частых термообработках стали P-18 образуются стабильные карбиды, которые с трудом растворяются в твердом растворе при закалке.

Основными путями усовершенствования технологии волочения малопластичных сталей и сплавов являются:

- 1) улучшение пластических свойств сталей и сплавов за счет нагрева металла перед волочением;
- 2) снижение усилия волочения за счет уменьшения энергетических затрат на внешнее трение путем подбора технологических

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1239967

Путковский С.И. Совершенс

смазок и подачи их в очаг деформации под давлением, правильного выбора геометрии волочильного инструмента, единичных и суммарных деформаций, скорости волочения.

Целью данной работы явилось усовершенствование технологии волочения некоторых малопластичных сталей и сплавов таких как Р-18, Р9К5, ЭП-201, ЭП-342, 9Х18, Х20Н80, ЭИ-702, ЭИ-693 и некоторых других.

При выполнении экспериментальных исследований, ставились следующие задачи:

1) разработать технологию волочения с подогревом проволоки средних размеров таких марок, как Р-18, 9Х18 и др.;

2) усовершенствовать технологию холодного волочения сплавов типа Х20Н80, ЭИ-702, ЭИ-693 путем использования инструмента, позволяющего подавать смазку в очаг деформации под давлением и использования эффективных технологических смазок.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЯ ВОЛОЧЕНИЯ

Прогресс в технологии проволочного производства тесно связан с фундаментальными теоретическими исследованиями С.И.Губкина, И.Л.Перлина, А.Л.Тарновского, В.Л.Колмогорова, Г.Закса, Э.Зибеля и др. В работах отечественных и зарубежных ученых усилие волочения обычно определяется методом совместного решения приближенных дифференциальных уравнений равновесия и уравнения состояния (условие пластического течения). Более строгое физическое представление о напряженном состоянии можно получить, если учесть влияние касательных напряжений в очаге деформации на распределение радиальных и продольных нормальных напряжений и следовательно на усилие волочения.

При расчете напряжений применен метод интегрирования дифференциальных уравнений равновесия для осесимметричной задачи ($G_R = G_\varphi$):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial G_R}{\partial R} + \frac{\partial \tau_{Rz}}{\partial z} &= 0 & (a) \\ \frac{\partial G_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{Rz}}{\partial R} + \frac{\tau_{Rz}}{R} &= 0 & (b) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

М В Т У
И. З. Баулина
БИБЛИОТЕКА

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

Уравнение пластичности для этого случая будет:

$$(\sigma_R - \sigma_z)^2 + 3 \cdot \tau_{Rz}^2 = \sigma_{\phi}^2. \quad (2)$$

Равновесие элементарного объема (рис. I), выделенного на границе металл-инструмент позволяет найти 2 уравнения, связывающие внешние (σ_K , τ_K) и внутренние (σ_z , σ_R , τ_{Rz}) напряжения

$$\left. \begin{aligned} \tau_m + \sigma_z \cdot \operatorname{tg} \alpha - \tau_K - \sigma_K \cdot \operatorname{tg} \alpha &= 0 \\ \tau_m \cdot \operatorname{tg} \alpha + \sigma_R + \tau_K \cdot \operatorname{tg} \alpha - \sigma_K &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где $\tau_m = \tau_{Rz}$ при $R = R_i$

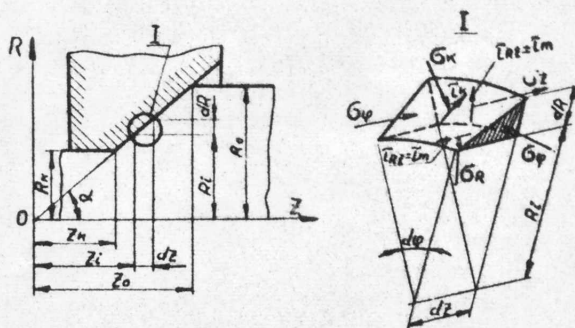


Рис. I.

Положим, что изменение τ_{Rz} в поперечном сечении можно описать уравнением:

$$\tau_{Rz} = \tau_m \cdot \left(\frac{R}{R_i} \right)^n, \quad (4)$$

где n — постоянная для каждого поперечного сечения, зависящая от условий голения.

Совместное решение (I), (2), (3) и (4) позволяет определить

τ_m , используя граничные условия на контакте ($\tau_K = f \cdot \sigma_K$) и на входе в очаг деформации ($\sigma_z = 0$ при $z = z_0$ и отсутствии противонапряжения)

$$\tau_m = \tau_{m0} \cdot \frac{z}{z_0}^{\frac{n+1}{n}}, \quad (5)$$

где $\tau_{m0} = \tau_m$ при $z = z_0$.

Анализ уравнения (5) показал, что условия (1), (2) и (3) удовлетворяются при значениях коэффициента $n_0 = 1$ и немного превышающих единицу. Поэтому можно принять, что

$$n_0 = n = 1.$$

Тогда уравнение (4) примет вид:

$$\tau_{RZ} = \tau_{m0} \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)^{\frac{2}{A}} \cdot \frac{P}{R_i}, \quad (6)$$

где

$$\tau_{m0} = \frac{G_0 \cdot (f + t_{ga})}{A \cdot f \cdot (ct_{ga} + t_{ga})} - \frac{G_0 \cdot t_{ga}}{A}; \quad (7)$$

G_0 - напряжение противонапряжения;

$$A = \frac{ct_{ga} - t_{ga} + \sqrt{3}/2 \cdot (f + t_{ga})}{f \cdot (ct_{ga} + t_{ga})} - 1; \quad (8)$$

f - коэффициент внешнего трения.

Решив совместно (10) и (6) относительно G_z , получим

$$\frac{dG_z}{dz} + \frac{2 \cdot \tau_{m0}}{R_i} \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)^{\frac{2}{A}} = 0. \quad (9)$$

После интегрирования (9) и определения постоянной интегрирования из условия, что при $z = z_0$, $G_z = G_0$, получим

$$G_z = A \cdot \tau_{m0} \cdot ct_{ga} \cdot \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_0}\right)^{\frac{2}{A}}\right] + G_0. \quad (10)$$

Сравнение результатов полученных по уравнению (10) и уравнению Закса:

$$G_z = \frac{(1 + f \cdot ct_{ga})}{f \cdot ct_{ga}} \cdot \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_0}\right)^{f \cdot ct_{ga}}\right]. \quad (11)$$

для случая, когда $G_0 = 0$, показало, что значения G_z , вычисленные по (10) ниже аналогичных результатов, полученных по уравнению (11), разница полученных результатов возрастает с увеличением угла конуса деформации α и коэффициента внешнего трения. При учете влияния калибрующей части инструмента на усилие волочения было выполнено аналитическое решение основанное на допущении, что зона очага деформации на длине калибрующего пояска l_k есть упругая. Совместное решение уравнений (1) и обобщенного закона Гука позволило получить уравнение для

вычисления $\sigma_{ср}$ на выходе из очага деформаций:

$$\sigma_{ср} = \sigma_z \cdot \exp \left[\frac{2 \cdot f \cdot M}{(1-M)} \cdot \frac{l_k}{R_k} \right], \quad (12)$$

где σ_z - определяется уравнением (10);

M - коэффициент Пуассона;

l_k, R_k - длина и радиус калибрующей части инструмента.

При использовании жесткопластической схемы для вычисления усилия волочения необходимо учитывать дополнительную работу обусловленную влиянием жестких внешних зон. Анализ работ по аналитическому учету дополнительной работы при волочении показал целесообразность применения экспериментального метода учета влияния внешних зон на усилие волочения.

В экспериментах использовались цилиндрические образцы из инструментальной стали У-8 и алюминиевого сплава Д-1 (рис. 2). Размеры образцов применялись следующие: общая

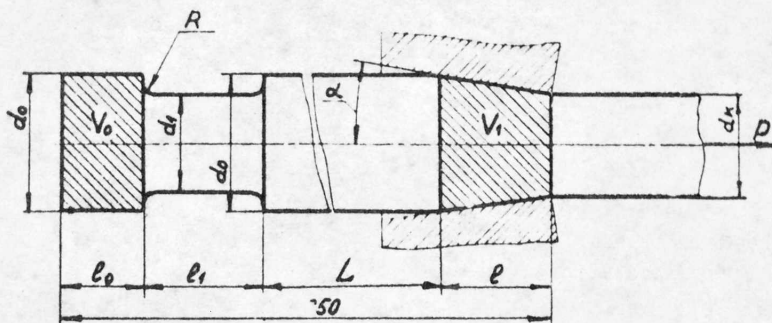


рис. 2

длина образцов составляла 350 мм; диаметр образцов d_0 равнялся 8 мм для стали У8 и 7,7 мм для сплава Д-1; длина l_0 выбиралась таким образом, чтобы объем заднего конца V_0 был равен объему геометрического очага деформации V_1 . Остальные размеры образцов выбирались равными: $l_1 = l + 5$ мм, где l - длина конуса деформации; $d_1 = d_k - 0,2$ мм; $R = 0,1$ мм. Напряжение волочения на длине образца L ($\sigma_{ср}$) сравнивалось с напряжением волочения на длине l_0 , для которого отсутствовала задняя жесткая зона (σ'). Полученные зависимости $\sigma'_{l_0} = \sigma(\epsilon/d_0)$, где $\sigma'_{l_0} = \sigma_{ср} / \sigma_1$, качественно не отличаются от аналогичных зависимостей полученных при

осадке и прокатке. Анализ полученных данных позволил сделать выводы, что влияние внешних зон на усилие волочения возрастает с увеличением α и уменьшением степени деформации. При волочении с углами конуса деформации $\alpha = 3-6^\circ$ влияние материала на зависимости $\eta_{\phi 0} = \phi(\varepsilon/d_{\phi})$ незначительна. На рис. 3 представлены зависимости $\eta_{\phi 0} = \phi(\alpha)$ для стали У3, позволяющие учитывать влияние внешних зон на усилие волочения.

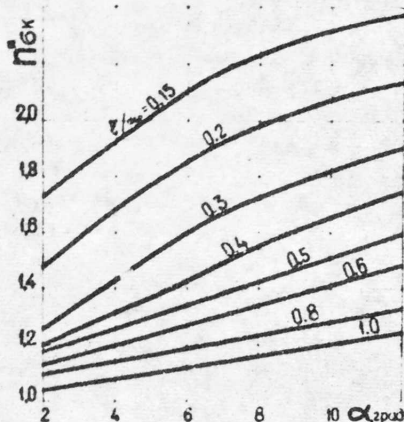


Рис. 3

Используя методику определения усилия деформирования, предложенную академиком Целиковым А.И., усилие волочения можно выразить следующим образом:

$$D = \eta_{\phi} \cdot G_{\phi}, \quad (13)$$

где η_{ϕ} — коэффициент напряженного состояния;
 G_{ϕ} — фактическое сопротивление деформации при волочении.
 Коэффициент η_{ϕ} определится следующим образом:

$$\eta_{\phi} = \eta'_{\phi} \cdot \eta''_{\phi} \cdot \eta'''_{\phi}, \quad (14)$$

где η'_{ϕ} — коэффициент влияния внешнего трения;
 η''_{ϕ} — коэффициент влияния внешних зон;
 η'''_{ϕ} — коэффициент влияния противонапряжения.

Для волочения коэффициент влияния внешнего трения на усилие волочения есть произведение коэффициентов, учитывающих влияние внешнего трения в конической и цилиндрической частях очага деформаций, т.е.

$$n'_6 = n'_{6\kappa} \cdot n'_{6\alpha} \quad (15)$$

Коэффициенты влияния внешнего трения в конической и цилиндрической частях очага деформаций определится из соотношений:

$$n'_{6\kappa} = \frac{(f + t_{0\alpha}) \cdot ct_{0\alpha}}{f(ct_{0\alpha} + t_{0\alpha})} \cdot \left[1 - \left(\frac{R_{\kappa}}{R_0} \right)^{2/3} \right]; \quad (16)$$

$$n'_{6\alpha} = \exp \left[\frac{2f \cdot M}{(1-M)} \cdot \frac{R_{\kappa}}{R_{\kappa}} \right]. \quad (17)$$

Анализ аналитических выражений для учета дополнительной работы деформации, обусловленной влиянием внешних зон, позволяет предположить равноценность влияния жесткой зоны на входе и выходе из очага деформаций. Поэтому n''_6 можно определить из выражения:

$$n''_6 = 2 \cdot n''_{60} - 1, \quad (18)$$

где n''_{60} — определено на основании экспериментов.

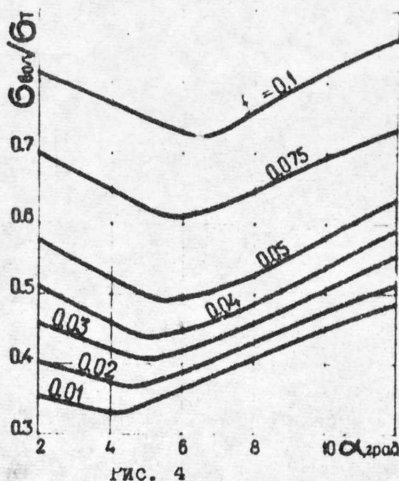


рис. 4

Коэффициент влияния противонапряжения (G_0) определится отношением усилий воложения при наличии и отсутствии противонапряжения, т.е.

$$n''_6 = \frac{G_z}{G_z / G_0 = 0}, \quad (19)$$

где G_2 - определяется уравнением (10).

Сопротивление деформации $G\phi$ определится из выражения:

$$G\phi = n_r \cdot n_v \cdot n_n \cdot G_T, \quad (20)$$

где n_r, n_v, n_n - коэффициенты, учитывающие влияние на температуры, скорости деформации и наклепа соответственно;

G_T - предел текучести, определенный в статических условиях при растяжении.

Для холодного волочения можно принять, что

$$n_r = n_v = 1$$

При использовании жесткопластической схемы очага деформаций величину $G\phi$ можно определять, используя кривые наклепа, из уравнения:

$$G\phi = \frac{1}{(\epsilon_2 - \epsilon_1)} \cdot \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} G \cdot d\epsilon, \quad (21)$$

где ϵ_1, ϵ_2 - суммарные степени деформации перед волочением и после него.

Интеграл $\int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} G \cdot d\epsilon$ есть площадь ограничения кривой наклепа между значениями суммарной деформации образца перед волочением (ϵ_1) и после него (ϵ_2).

На рис.4 приведены зависимости $\eta_6 = \phi(\alpha)$ для различных значений коэффициента внешнего трения f и $R_k/R_0 = 0,87$, из которого видно, что для каждого значения f , коэффициент η_6 принимает минимальное значение, которое при увеличении f смещается в сторону больших значений α .

2. ВОЛОЧЕНИЕ МАЛОПЛАСТИЧНЫХ СТАЛЕЙ С ПОДОГРЕВОМ

Одним из эффективных способов, приводящих к интенсификации процесса волочения малопластичных сталей и сплавов, является улучшение пластических свойств сталей за счет подогрева перед волочением. Для исследования был выбран температурный интервал частичного разупрочнения $(0,3+0,7) \cdot T_{пл}$, где

$T_{пл}$ - температура плавления стали. Для создания новой технологии волочения сталей Р-18, ЭИ-474, 9Х18, ЭИ-515, Р9К5, ЭП-201, ЭП-342 и некоторых других исследовались следующие вопросы:

1) изменение механических свойств сталей в статических

и динамических условиях в диапазоне температур 100–600°C;

2) влияние условий волочения (температура нагрева перед волочением, единичная и суммарная степень деформации, технологическая смазка, скорость, геометрия инструмента) на усилие волочения;

3) стабильность процесса волочения (запас прочности, минимальные и максимальные значения усилия волочения) в зависимости от изменения параметров волочения.

Экспериментальное исследование осуществлялось на машине однократного волочения с диаметром барабана 600 мм, позволявшей вести волочения со скоростями 0,5–1,5 м/сек. Нагрев проволоки перед волочением осуществлялся в проходной печи со свинцовой ванной. Температура свинца, в экспериментах, изменялась в диапазоне 350–600°C. Контроль температуры поверхности проволоки перед и после волочения осуществлялся как с помощью хромель–алюминиевых термопар, так и с помощью фотоэлектрического параметра конструкции Челябинского научно–исследовательского металлургического института. Усилие волочения замерялось месдозой, в конструкции которой использовались провололочные тензодатчики. Стабильная работа месдозы обеспечивалась наличием водяного охлаждения, как волокодержателя, так и датчиков месдозы. Изучение механических характеристик сталей осуществлялось на гладких цилиндрических образцах, для чего были сконструированы специальные захваты, исключавшие скольжение образцов в губках захватов.

Для вырванных сталей были проведены статические испытания в диапазоне температур 100–600°C, по результатам которых были построены графики изменения относительного удлинения, относительного сужения поперечного сечения, предела текучести

σ_T и предела прочности σ_B в зависимости от температуры нагрева образца. Статические испытания позволили установить, что для большинства испытанных марок сталей такие характеристики пластичности, как относительное сужение поперечного сечения, начинают увеличиваться с температур 350–400°C. Для указанных марок сталей были проведены динамические испытания по определению предела прочности после волочения и относительного сужения поперечного сечения проволоки при скорости волочения 1 м/сек. непосредственно на волочильном стане. Динамические испытания позволили установить, что значения предела

прочности, полученные при волочении ($V = 1$ м/сек) значительно выше аналогичных значений, полученных при статических испытаниях. При динамических испытаниях было отмечено, что с увеличением угла конуса деформации α предел прочности уменьшается и увеличиваются значения относительного сужения поперечного сечения.

В экспериментах по определению влияния единичной степени деформации на усилие волочения было установлено возможность резкого увеличения единичных деформации при волочении с подогревом по сравнению с холодным волочением. Так для Р-18 единичная относительная степень деформации достигла 0,25-0,3 (0,1-0,17 при холодном волочении) и 0,45-0,48 для стали ЭИ-342 при стабильном протекании процесса. Для всех исследуемых сплавов напряжение волочения уменьшалось с увеличением температуры проволоки перед волочением. Применение температур подогрева более $550+600^{\circ}$ приводило к сильному разогреву поверхности проволоки, причем разность между значениями температур поверхности проволоки перед волокой и на расстоянии 50 мм после выхода из волоки увеличивалась при увеличении температуры подогрева, степени деформации и скорости волочения. Так при относительной степени деформации 0,23, скорости волочения 1 м/сек, температуре проволоки перед волокой 600° , разность температур поверхности проволоки до и после волочения превышала $100-150^{\circ}\text{C}$.

При изучении влияния предварительной степени деформации на напряжение волочения было установлено, что величина напряжения волочения растет с увеличением предварительной степени деформации почти для всех исследованных сплавов.

Экспериментами установлено, что применение небольших (0,1-0,15) единичных деформаций не приводит к увеличению суммарной степени деформации достигаемой без промежуточных термообработок.

При исследовании влияния угла конуса деформации α на напряжение волочения было установлено, что оптимальные углы для Р-18 (единичная степень деформации 0,2+0,25) находятся в пределах $\alpha = 10-12^{\circ}$, а для стали ЭИ-474 $\alpha = 9-10^{\circ}$.

В экспериментах по подбору технологической смазки использовались: графит, дисульфид молибдена (MoS_2), солевые

смеси, содержавшие Li_2SO_4 , $NaCl$, KCl , $MgCl_2$, графит и MoS_2 с добавками натриевого мыла, графито-солевые смеси. Наилучшей смазкой из опробованных признана графит + мыло (с объемным содержанием 7:1).

Изучение износостойкости инструмента, показало, что применение непосредственно охлаждения волоочильного инструмента водой увеличивает стойкость в 3-5 раз при волочении со скоростью 0,5 м/сек и в 7-10 раз при скорости 1,5 м/сек по сравнению с неохлаждаемым инструментом.

В опытах установлено, что для большинства исследованных сталей запас прочности (отношение предела прочности к напряжению волочения) возрастает при повышении температуры подогрева металла в диапазоне 400-500°C. Для всех исследованных сталей, при степени деформации 0,3 и $T = 550^\circ C$, запас прочности превышал 1,5.

Сравнительный анализ технологии волочения с подогревом и холодного волочения показал значительный экономический эффект применения теплого волочения, так только для сплава Р-18 в термическом цехе завода "Электросталь" экономия составила 114 рублей на тонну готовой продукции.

3. ВОЛОЧЕНИЕ СПЛАВОВ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ ПРИ ПОДАЧЕ СМАЗКИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Повышение эффективности процесса волочения существенным образом связано с уменьшением коэффициента внешнего трения. Наименьшие потери мощности, обусловленные наличием внешнего трения будут иметь место при полном разделении трущихся поверхностей (инструмент-металл). Нормальное давление на границе металл-инструмент (G_k), а следовательно, и давление смазки будет возрастать с уменьшением коэффициента контактного трения:

$$G_k = \frac{\tau_m}{(f + \tau_{gd})}, \quad (22)$$

где $\tau_m = \tau_{m0} \cdot (R_1/R_0)^{2/A}$,

τ_{m0} — определяется уравнением (7).

При полном разделении трущихся поверхностей давление смазки на входе в очаг деформаций равно:

$$G_k = \frac{G \phi \cdot ctg \alpha}{\sqrt{(ctg \alpha - tg \alpha)^2 + 3}} \quad (23)$$

Простейшим устройством, позволяющим подавать смазку в очаг деформаций под некоторым давлением является смазочный конус, используемый в геометрии волочильного инструмента (см. ГОСТ 9453-67). Однако давление, создаваемое смазочным конусом, даже при применении смазок обладающих высокой адгезией с деформируемым металлом, недостаточно для разделения трущихся поверхностей и получения гидродинамического трения. Целью исследования в данной части работы было:

1) определение возможности использования конструкции сборного инструмента, предложенной В.Л. Колмогоровым и С.И. Орловым, для создания условий волочения в режиме жидкостного трения сплавов со специальными свойствами;

2) уточнение основных параметров сборного инструмента;

3) исследование смазок на основе мыльного порошка.

Исследования волочения сплавов с использованием сборных волок проводилось на промышленных станах 1/550 и 2-6/250. Волочильные станы были оборудованы мисдозами для замера усилия волочения. Для волочения были выбраны сплавы 48НХ, 36НХТЮ и Х20Н8ОН, химический состав которых регламентирован ГОСТ 10994-64 и ГОСТ 12766-67. В качестве заготовок использовались бунты проволоки ϕ 5,5 мм весом 15+100 кг.

При изучении возможности увеличения единичных деформаций при применении сборного инструмента было установлена возможность увеличения единичных деформаций на 20+25% при снижении усилия волочения, причем эффективность волочения при использовании сборного инструмента возрастает с увеличением единичной степени деформации. В экспериментах установлено, что отношение P_{max}/P_{min} уменьшается с 1,1+1,3, при волочении через одинарные (обычные) волоки, до 1,05+1,03 при волочении через сборный инструмент. За счет увеличения единичных деформаций удалось сократить количество протяжек с 7-6 до 4 для сплавов 36НХТЮ и Х20Н8ОН. Для сплава 48НХ удалось значительно увеличить суммарную степень деформации без применения промежуточных термообработок (ϕ 5,5 $\rightarrow$ 2,5 при обычном волочении

и с ϕ 8,0 $\rightarrow$ 2,5 при волочении через сборный инструмент), при этом улучшалось качество поверхности проволоки.

При исследовании смазок использовались мыльный порошок натриевого мыла, мыльный порошок синтетический (типа "Новость"), смесь порошков мыла и серы с соотношением по объему 2:1, смесь порошков мыла и дисульфида молибдена с объемным соотношением 10:1 и 5:1; смесь порошков мыла и графита (10:1 и 5:1 по объему). Наиболее эффективной оказалась смазка мыло + дисульфид молибдена (5:1). Эта смазка после первого прохода создавала на поверхности проволоки прочную пленку, которая не разрушалась даже после 7,8 проходов.

Исследование влияния скорости на усилие волочения, при изменении скорости с 0,5 до 9,5 м/сек., показало, что для каждой единичной степени деформации и применяемой смазки существует оптимальная скорость волочения и что при использовании сборного инструмента можно существенно увеличить скорость волочения.

Параметрами, которые исследовались в конструкции сборного инструмента, были:

1) зазор между диаметром калибрующего пояска инструмента и диаметром заготовки;

2) угол конуса деформации рабочей волоки.

В опытах использовались как зазоры между диаметром калибрующего пояска напорной волоки, так и одновременные обжатия в напорной и рабочей волоках. Усилие волочения уменьшалось с уменьшением зазора между заготовкой и диаметром калибрующего пояска напорной волоки и начинало быстро расти при относительной степени деформации в напорной волоке 0,02–0,04, оптимальными зазорами для заготовки ϕ 5,5–2,9 признаны 0,02+0,05 мм по радиусу. Оптимальным углом конуса деформации рабочей волоки для примененных смазок оказался $2\alpha = 8^\circ$. Длительная эксплуатация сборного инструмента показала необходимость применения конструкции, позволяющей непосредственное охлаждение водой волок.

Для практической оценки эффективности измененной технологии волочения предложено использовать коэффициент полезного действия деформации (к.п.д. деформации), который вычисляется, как отношение напряжения волочения при отсутствии трения к напряжению волочения, замеренного экспериментально, т.е.

$$\eta = \frac{G_{\beta=0}}{\sigma_{\text{вн}}} \quad (24)$$

Напряжение волочения при $f = 0$ можно определить из уравнения:

$$G_{\beta=0} = 2.6 \rho \cdot \ln(R_0/R_K). \quad (25)$$

Из уравнения (25) видно, что $G_{\beta=0} = 0$ численно равно площади, ограниченной кривой наклепа между значениями начальной и конечной степени деформации см. уравнение (21). Поэтому в уравнении (24) и числитель и знаменатель определяются из экспериментальных данных. Для выбранных сплавов были построены кривые наклепа для различных условий волочения. Опыты показали, что при волочении с углами конуса деформации $\alpha = 3-6^\circ$ и применяемыми смазками кривые наклепа совпадали. Сравнение к.п.д. деформации при волочении через сборный инструмент (сдвоенные волокна) и одинарные волокна показало, что к.п.д. деформации при волочении через сдвоенные волокна значительно выше, чем при волочении через одинарные (0,6-0,8 против 0,4-0,55) и увеличивается при увеличении единичных степеней деформации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Предложен метод расчета коэффициента влияния внешнего трения в конической части очага деформации с учетом действия внутренних касательных напряжений.
2. На основе обобщенного закона Гука определено влияние сил трения в калибрующей части инструмента.
3. Экспериментально установлено влияние внешних жестких зон на усилие деформирования при волочении прутков и проволок.
4. Предложена методика расчета усилия волочения для круглых сплошных профилей.
5. Изучены механические характеристики 7 марок малопластичных марок сталей и сплавов при статических и динамических испытаниях на растяжение в диапазоне температур $100-600^\circ\text{C}$.
6. Проведены промышленные исследования влияния температуры, скорости волочения, единичных и суммарных деформаций, геометрии инструмента и различных технологических смазок на усилие при волочении малопластичных сталей с подогревом. Составлены и

приняты в производство новые технологические маршруты волочения.

7. На волочильных машинах I/550 и 2-6/250 проведено экспериментальное сравнение способов волочения через одинарные и сдвоенные волокна для различных скоростей, единичных и суммарных деформаций, параметров геометрии сборного инструмента при волочении на сухих смазках.

Для оценки эффективности технологических параметров процесса волочения использован к.п.д. пластической деформации. Предложенная технология и геометрия сборного инструмента используется на заводе "Электросталь".

8. Экономическая эффективность, предложенной технологии при волочении с подогревом малопластичных сталей и сплавов типа П18 определена в размере 114 руб. на тонну готовой продукции.

Использование усовершенствованной конструкции сборного инструмента и технологии при волочении сплавов с особыми физическими свойствами позволило получить годовой экономический эффект в размере 45000 рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Теплое волочение труднодеформируемых сплавов. Известия вузов, Машиностроение, № 9, 1966г.

2. Экспериментальное определение влияния внешних зон на усилие волочения круглых сплошных профилей. Известия вузов, Машиностроение, № 11, 1971г.

3. Волочение проволоки из сплавов с особыми физическими свойствами на смазке под давлением. "Сталь", № 11, 1972г.

4. Влияние калибрующей части инструмента на усилие волочения сплошных цилиндрических тел. Известия вузов, Машиностроение, № 3, 1974г.

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на:

1. Научно-техническом Совете электрометаллургического завода "Электросталь", 1965г. и 1974г.

2. Республиканской научно-технической конференции "Трение и технологические смазки при обработке металлов давлением", Днепрпетровск, 1971г.