



The methods of optimization of the die channel geometry at wire drawing by the temperature criterion enabling to project geometry of deforming and calibrating zones of die are created.

А. В. ВЕДЕНЕЕВ, ОАО «БМЗ»,

Ю. Л. БОБАРИКИН, М. Н. ВЕРЕЩАГИН, М. Ю. ЦЕЛУЕВ, ГГТУ им. П. О. Сухого

УДК 669.24

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИИ ДЕФОРМИРУЮЩЕЙ И КАЛИБРУЮЩЕЙ ЗОН КАНАЛА ВОЛОКИ

Оптимизацию геометрии деформирующей и калибрующей зон канала волокна связывают с поиском геометрических характеристик этих зон, которые обеспечивают минимальное усилие волочения проволоки. Под каналом волокна понимаются форма и размеры деформирующей и калибрующей зон волокна. Однако критерий оптимизации по минимальному усилию волочения не обеспечивает минимальные температуры в очаге деформации при волочении проволоки ввиду сложности распределения температурных полей в деформируемой проволоке [1]. Оптимальной геометрией волокна по температурному критерию принимается такой вариант геометрии канала волокна, при котором проволока при протяжке через эту волоку нагревается до минимальной температуры сравнительно с другими геометриями канала волокна. Это обеспечивает снижение динамического деформационного старения стальной проволоки и, как следствие, уменьшение падения ее пластичности, а также снижение износа волок и температурного окисления технологических смазок.

Для решения поставленной задачи использовали численный метод расчета деформации проволоки при волочении с помощью метода конечных элементов и методов математической статистики.

В основе математической формулировки рассматриваемого процесса волочения проволоки лежит система зависимостей механики деформируемого твердого тела: уравнения движения, неразрывности, связи деформаций и перемещений, связи скоростей деформаций и скоростей перемещений, связи ускорений и скоростей, уравнение теплопроводности [1–5]. Замыкают систему данных уравнений начальные условия, описывающие конфигурацию проволоки и волокна, их температур-

ное и деформированное поле в начальный момент времени; граничные условия, описывающие приложенные к ограничивающим поверхностям проволоки и волокна кинематические и энергосиловые параметры, а также физические уравнения связи из теории пластичности и упругости.

Решение рассматриваемой задачи осуществим в цилиндрической системе координат при следующих основных упрощениях:

1. Напряженно-деформированное и температурное состояние материала проволоки считаем ассиметричным, для чего будем пренебрегать внешними массовыми силами.

2. Считаем, что в процессе пластического деформирования в объеме проволоки действует распределенный источник тепловой энергии, равный 90% работы пластического деформирования.

3. На поверхности контакта проволоки и волокна действуют силы трения Амонтона-Кулона и распределенный источник тепловой энергии, равный 50% от работы сил трения. Через поверхность контакта между волоком и проволокой осуществляется теплопередача по закону Ньютона с коэффициентом теплопередачи $\alpha = 15 \cdot 10^4$ Вт/(м²·°С).

4. Материал проволоки считаем деформационно и кинематически упрочняемой упругопластической средой с плотностью $\rho = 7745$ кг/м³, модулем Юнга $E = 207$ ГПа, коэффициентом Пуассона $\mu = 0,3$ и зависимостью сопротивления пластическому деформированию:

$$\sigma_s = (1,374 + 0,114 \lg(\xi_i))(999 + 544,31 \ln(\varepsilon_i)), \text{ МПа,}$$

где ξ_i – интенсивность скоростей деформаций; ε_i – интенсивность деформаций.

Зависимость сопротивления пластическому деформированию от деформации материала прово-

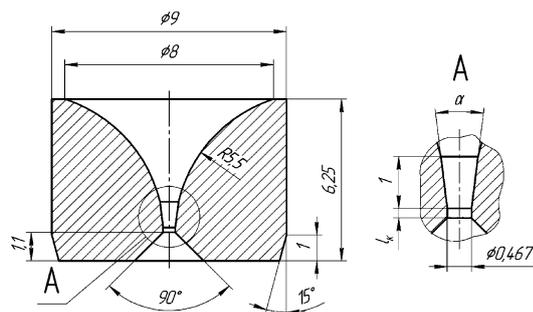


Рис. 1. Схема проволоки с конической деформирующей зоной: l_k – длина калибрующей зоны; α – угол конической деформирующей зоны

локи получили аппроксимацией методом наименьших квадратов экспериментальных данных, полученных при стандартных испытаниях проволоки из стали марки 90 К на растяжение с последующей корректировкой по скорости деформации на основе литературных данных [5]. Теплофизические характеристики материала проволоки: коэффициент теплопроводности $\lambda = 49 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, теплоемкость $c = 477 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$.

5. Материал проволоки считаем упругой средой с плотностью $\rho = 15150 \text{ кг/м}^3$, модулем Юнга $E = 647 \text{ ГПа}$, коэффициентом Пуассона $\mu = 0,2$. Теплофизические характеристики материала проволоки: коэффициент теплопроводности $\lambda = 50,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, теплоемкость $c = 382 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$.

Численные исследования волок с конической деформирующей зоной выполняли для волок тонкого волочения, которые применяются на ОАО «БМЗ» (рис. 1).

Для проволоки с определенной длиной калибрующей зоны l_k оптимальной геометрии проволоки будет

соответствовать оптимальный угол конической деформирующей зоны проволоки $\alpha_{\text{оп}}$. Для поиска $\alpha_{\text{оп}}$ необходимо получить распределения температур в проволоке при волочении при разных углах проволоки и неизменном значении l_k . После этого можно выбрать вариант проволоки с минимальным значением пиковых или максимальных температур в температурном поле проволоки. Таким образом, необходимо исследовать весь диапазон углов деформирующих и длин калибрующих зон проволоки и найти соответствие между углом деформирующей проволоки и длиной калибрующей зоны, которое определяет минимальный нагрев проволоки. Чтобы каждому значению l_k привести в соответствие определенное значение $\alpha_{\text{оп}}$, необходимо также учесть уровень усилий волочения P и коэффициентов запаса волочения γ . Это увеличивает степень объективности представленных исследований.

Из полученных температурных полей в проволоке при ее волочении из численных моделей определено, что имеет место два температурных пика в проволоке: на выходе из калибрующей зоны проволоки $T1_{\text{max}}$; в месте входа в калибрующую часть проволоки $T2_{\text{max}}$ (рис. 2).

Для упрощения длину l_k можно представить в виде относительной длины калибрующей зоны:

$$k = l_k/d_k,$$

где d_k – диаметр проволоки в калибрующей зоне.

Расчеты выполняли для наиболее нагруженной проволоки с номинальным диаметром 0,467 мм в действующем на маршруте волочения для изготовления сверхвысокопрочной проволоки диаметром

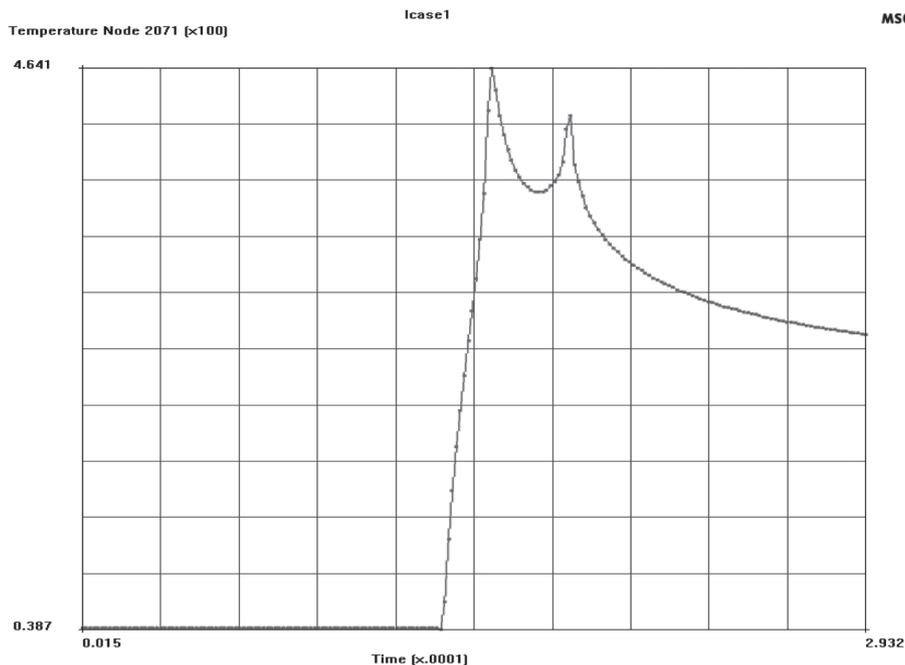


Рис. 2. Температурный цикл поверхности проволоки для $a = 12^\circ$, $k = 0,4$, $f = 0,05$

0,41 мм. При изготовлении тонкой проволоки использовали латунированную заготовку диаметром 2,45 мм (сталь марки 90 К), скорость волочения составила 8 м/с. Методика расчета может использоваться для других волок маршрута волочения по аналогии.

Результаты численного расчета величин $T1_{max}$, $T2_{max}$, P , γ в зависимости от значений углов конической деформирующей зоны волокна α и значений k приведены в таблице, которая представляет собой план численного эксперимента из 18 опытов с факторами α и k , совмещенный со значениями откликов эксперимента $T1_{max}$, $T2_{max}$, P , γ .

Анализ значений параметров (см. таблицу) свидетельствует об удовлетворительных условиях волочения исходя из величин P и γ . Но значения $T1_{max}$, $T2_{max}$ не позволяют получить требуемое качество стали из-за повышенных величин. Диапазон полученных температур достаточно широк и показывает влияние геометрии волокна на температуру проволоки.

Значения параметров волочения при коэффициенте контактного трения $f=0,05$

Номер опыта	α , град	k	$T1_{max}$, °C	$T2_{max}$, °C	P , Н	γ
1	6	0,3	513	474,3	172	2,8
2	10	0,3	450,8	464,1	157,3	3,1
3	12	0,3	414,5	454,2	158,2	3,0
4	14	0,3	403,2	460,5	160,5	3,0
5	16	0,3	390,6	480,5	163,5	2,9
6	20	0,3	383,6	497,3	173,4	2,8
7	6	0,4	534,3	473,7	180,3	2,7
8	10	0,4	452,4	462,7	163,6	2,9
9	12	0,4	427,8	451,7	161,7	3,0
10	14	0,4	404,8	457,3	163,6	2,9
11	16	0,4	390,4	479,5	166,4	2,9
12	20	0,4	381,9	506,4	175,4	2,7
13	6	0,5	543	473,3	188,6	2,5
14	10	0,5	454,8	461,9	170,7	2,8
15	12	0,5	430,1	449,1	168,6	2,8
16	14	0,5	404,8	454	166,7	2,9
17	16	0,5	400,9	476,1	169,4	2,8
18	20	0,5	393,6	499,6	177,1	2,7

Для опыта № 9 (см. таблицу) получен график термического цикла произвольной точки поверхности проволоки (рис. 2). Горизонтальный отрезок линии слева внизу соответствует величине температуры поверхности проволоки на входе в волоку. Затем наблюдается интенсивный рост температуры при движении проволоки через деформирующую зону. Первый температурный пик $T2_{max}$ приходится на зону стыковки деформирующей и калибрующей зон. Второй температурный пик $T1_{max}$ относится к зоне окончания калибрующего пояса. Величина температуры поверхности после

выхода проволоки из волоки уменьшается. Интересен факт спада температуры между двумя пиками. Температурный пик $T1_{max}$ меньше, чем $T2_{max}$. Объяснения поведения температурной кривой связаны с тем, что до первого пика источниками тепловыделения служат энергия внутреннего трения (или пластической деформации), а также энергия контактного трения. После второго пика основной вклад в нагрев поверхности проволоки вносит контактное трение.

Результаты, представленные в таблице, описываются следующими математическими зависимостями, полученными обработкой данных по плану регрессионного анализа:

1) максимальная температура проволоки на выходе из волоки, °C:

$$T1_{max} = 439,9 - 13,8\alpha + 0,8\alpha^2 + 992,3k - 826k^2 - 59,8\alpha k - 0,8\alpha^2 k + 24,6\alpha k^2 + 2,7\alpha^2 k^2; \quad (1)$$

2) максимальная температура проволоки на входе в калибрующую зону волокна, °C:

$$T2_{max} = 396,5 + 17,7\alpha - 0,9\alpha^2 + 639,2k - 712,3k^2 - 146,1\alpha k - 7,2\alpha^2 k + 163,5\alpha k^2 - 8,3\alpha^2 k^2; \quad (2)$$

3) усилие волочения проволоки, Н:

$$P = 140,2 + \alpha + 258,5k - 155,9k^2 - 38,5\alpha k + 1,4\alpha^2 k + 37\alpha k^2 - 1,5\alpha^2 k^2. \quad (3)$$

Используя уравнения (1)–(3), можно вычислять величины данных параметров для других значений α и k , не вошедших в таблицу.

Уравнения (1) и (2) графически представляют собой криволинейные поверхности (рис. 3, 4).

Совмещение поверхностей рис. 3, 4 позволяет получить поверхность, изображенную на рис. 5. Из рисунка видно, что есть возможность провести линию на этой поверхности, для которой харак-

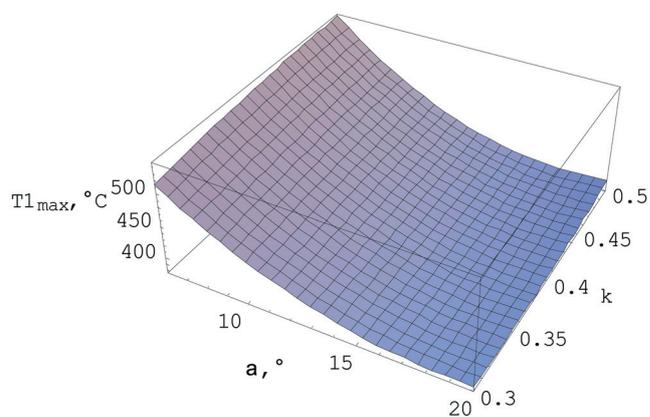


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры $T1_{max}$ проволоки на выходе из волоки от угла деформирующей зоны α и относительной длины калибрующей зоны k при коэффициенте контактного трения $f=0,05$

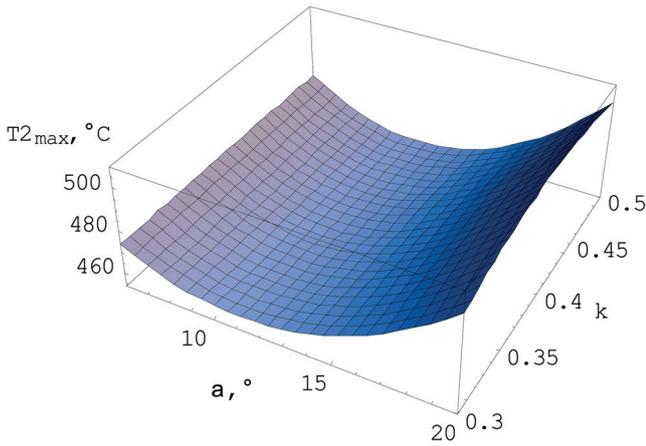


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры $T2_{max}$ проволоки на входе в калибрующую зону волокна от угла деформирующей зоны α и относительной длины калибрующей зоны k при коэффициенте контактного трения $f=0,05$

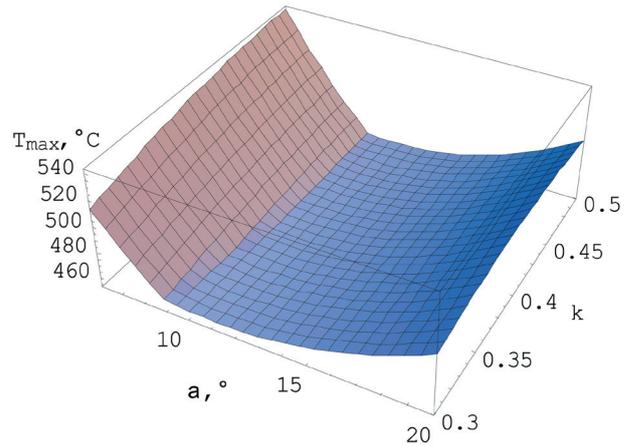


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры проволоки T_{max} от угла деформирующей зоны α и относительной длины калибрующей зоны k при коэффициенте контактного трения $f=0,05$

терна минимальная температура, выбранная из максимальных значений для определенного значения α при постоянном значении величины k . Эту линию можно представить в виде графика (рис. 6), который приводит в соответствие длину калибрующей зоны, выраженную через k , с оптимальным углом деформирующей зоны волокна α_{opt} . Значения α_{opt} не постоянны и для определенной длины калибрующей зоны принимают свое значение. На линии отмечены численные значения максимальных температур в проволоке, соответствующих точкам графика, где размещены эти цифры. Анализ этих цифр указывает на практическое постоянство минимальных значений температур при различных значениях длин калибрующей зоны волокна.

Для сравнения волочения с обычным контактным трением и уменьшенным его значением были проведены аналогичные приведенным выше исследования, отличающиеся коэффициентом контактного трения, сниженным до $f=0,02$. Результа-

ты этих вычислений приведены на рис. 7. Анализ полученных данных показывает на значительное уменьшение температуры проволоки.

Анализ абсолютных величин оптимальных углов волокон из рис. 6, 7 показывает на относительно узкий диапазон их значений, что определяет возможность рационального практического использования полученных данных. Из рисунков можно определить, что оптимальной геометрией волокна по температурному критерию для коэффициента контактного трения $f=0,02$ является геометрия с минимально возможной длиной калибрующей зоны. При $f=0,05$, характерным для обычного «мокрого» волочения стальной латунированной проволоки со скольжением, длина калибрующей зоны при оптимальном угле конической зоны волокна мало влияет на температуру в проволоке. Характерно значительное снижение температуры проволоки при уменьшении контактного трения.

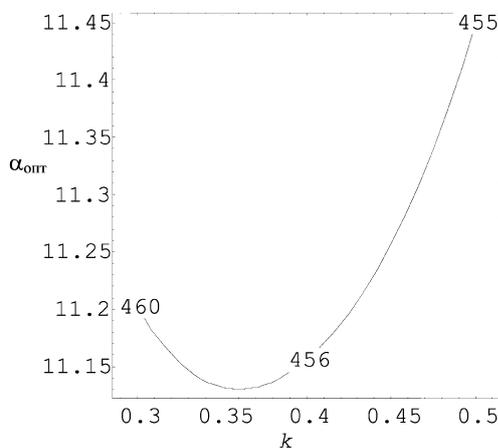


Рис. 6. Зависимость величины оптимального угла α_{opt} конической деформирующей зоны волокна от относительной длины калибрующей зоны k при $f=0,05$

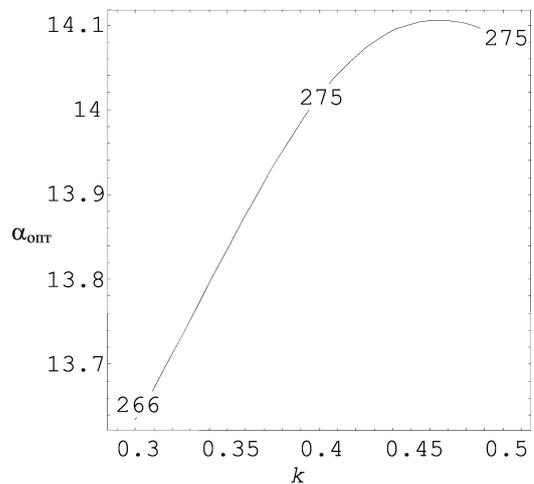


Рис. 7. Зависимость величины оптимального угла α_{opt} конической деформирующей зоны волокна от относительной длины калибрующей зоны при коэффициенте контактного трения $f=0,02$

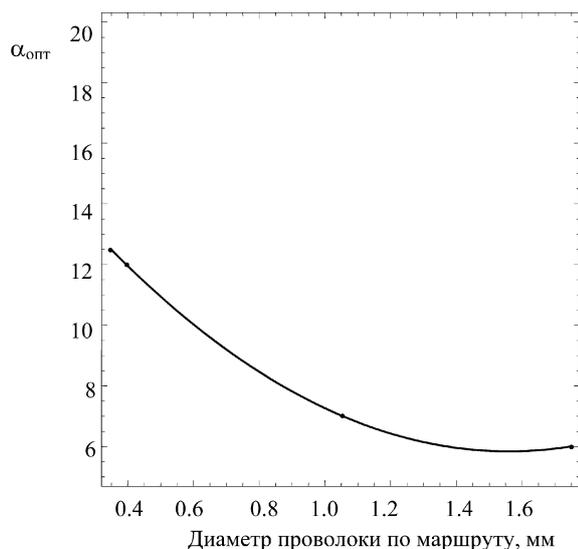


Рис. 8. Зависимость оптимального угла от диаметра проволоки при волочении с конечной скоростью 12 м/с и коэффициенте трения $f=0,05$

Также можно определить, что для исследуемой проволоки при коэффициенте контактного трения $f=0,05$ оптимальным средним углом является угол 11° , а для $f=0,02$ – угол 14° .

Данная методика была использована для расчета маршрута тонкого волочения сверхвысокопрочной проволоки диаметром 0,35 мм из заготовки диаметром 1,94 мм (сталь марки 90 К). Было получено распределение оптимальных углов конических деформирующих зон волок, показанное на рис. 8. Из рисунка видно, что по ходу маршрута

волочения углы конусов волок должны постепенно увеличиваться от 6 до 12° . В отличие от действующего маршрута волочения для первых пяти волок угол конуса деформирующих зон постоянный и составляет 10° , для последующих 19 волок угол также постоянный и составляет 12° . В связи с этим можно рекомендовать провести практический эксперимент с измененной геометрией волок.

Выводы

1. Создана методика оптимизации геометрии канала волокна при волочении проволоки по температурному критерию, позволяющая проектировать геометрию деформирующей и калибрующей зон волокна, обеспечивающих минимальные температуры в обрабатываемой проволоке.

2. Для коэффициента контактного трения $f=0,02$ необходимо использовать минимально возможную длину калибрующей зоны.

3. Для коэффициента контактного трения $f=0,05$ протяженность калибрующей зоны существенно не влияет на температуру проволоки.

4. Для исследованной проволоки при коэффициенте контактного трения $f=0,05$ оптимальным углом является угол 11° , а для $f=0,02$ – угол 14° .

5. Предложены оптимизированные углы конусов деформирующих зон волок для действующего маршрута волочения на ОАО «БМЗ», значения которых выбираются из рис. 8.

Литература

1. В е р е щ а г и н М. Н., Б о б а р и к и н Ю. Л., С а в е н о к А. Н. и др. Влияние скорости волочения на температуру и напряженно-деформированное состояние в проволоке из высокоуглеродистой стали // *Литье и металлургия*. 2008. № 1(45). С. 40–48.
2. А р к у л и с Г. Э., Д о р о г о б и д В. Г. Теория пластичности. М.: Металлургия, 1987.
3. К о л м о г о р о в В. Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1987.
4. Теория пластических деформаций металлов / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др.; Под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1983.
5. И в а н о в К. М., Ш е в ч е н к о В. С., Ю р г е н с о н Э. Е. Метод конечных элементов в технологических задачах ОМД. СПб.: Изд-во ПИМаш, 2000.