

СКОРОСТНАЯ ТЕРМООБРАБОТКА ТОКОМ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

В. И. Сташенко

Работа посвящена разработке технологического цикла производства высокопрочной проволоки из среднеуглеродистой стали, в котором волочение совмещено со скоростной термообработкой током высокой плотности низкого напряжения. Предложены две технологические схемы, исключающие процесс патентирования.

Ключевые слова: скоростная термообработка, ток высокой плотности, высокопрочная проволока, патентирование.

Введение

Технология проволочного производства состоит из двух основных операций: термической обработки и волочения. Термическая обработка является наиболее трудоемким и низко производительным процессом. Здесь скорость движения нити проволоки в десятки раз ниже скорости волочения, что разрывает единый процесс производства на части, несоизмеримые по производительности.

Актуальной задачей технологии проволочного производства является создание линии, совмещающей технологические операции термической обработки и волочения в едином непрерывном процессе, что позволило бы получать проволоку с требуемыми физико-механическими свойствами.

Целью исследований являлось определение скоростного режима электроконтактного нагрева, позволяющего проводить волочение и получать высокопрочную проволоку с хоро-

шими пластическими свойствами в едином технологическом цикле.

Практический интерес представляет умеренно быстрый нагрев (от десятка до сотен градусов в секунду) стали, поскольку в металле происходит диффузионно-бездиффузионный процесс $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение. Такой нагрев позволяет интенсифицировать термообработку и улучшить комплекс механических свойств стали.

Увеличение скорости нагрева значительно ускоряет диффузионное перемещение атомов углерода, существенно улучшает очистку феррита от углерода и одновременно задерживает процесс коагуляции, сохраняя пластинчатую форму цементита [1]. Эти процессы при скоростном нагреве и малой выдержке разделяются. Чем быстрее нагрев, тем меньше его влияние, а каждой скорости нагрева соответствует вполне определенная область температур, при достижении которых наблюдается максимум пласти-

ческих свойств и сохраняется высокий уровень прочности. Структурные изменения, обуславливающие такое сочетание, сильно влияют на последующую деформируемость стали при волочении в холодном состоянии. Поэтому очистка феррита от избыточного количества атомов углерода является обязательным условием для больших суммарных обжатий, максимально возможного деформационного упрочнения и высокой пластичности холоднодеформированной стали [2]. Другая немаловажная особенность скоростного нагрева стали состоит в том, что процесс формирования благоприятной структуры для последующего волочения протекает достаточно быстро, и этот вид термообработки можно применять для непрерывно движущейся проволоки. При этом скорость ее движения не влияет на скорость процесса.

Материалы и методика эксперимента

Проволока диаметром менее 10 мм из трудно деформируемых металлов и сплавов, например из средне-углеродистой стали марки 70, является наиболее удобным объектом для применения скоростной термической обработки током высокой плотности (ТВП) низкого напряжения. Ток течет непосредственно через материал движущейся заготовки посредством электрических контактов. В процессе движения заготовка может подвергаться механической обработке, например деформированию волочением.

Такая комбинация обработок стальной проволоки является высокоэффективной, и электроконтактное тепловое воздействие позволяет осуществлять волочение заготовки при более высоком уровне пластичности металла, поскольку ток оказывает на процесс пластической деформации не только тепловое, но и пондеромоторное действие, скин-эффект и способствует взаимодействию носителей зарядов с дислокациями. Это приводит к уменьшению на десятки процентов сопротивления металла деформированию; снижает количество дефектов структуры, в том числе и микротрещин; делает структуру металла более равновесной; улучшает текстуру проволоки; увеличивает степень суммарных обжатий и позволяет сокращать количество промежуточных отжигов [3, 4].

В работе получение заготовки из средне-углеродистой стали марки 70 высокой прочности и пластичности без длительной промежуточной термообработки в печи и последующее

ее холодное волочение осуществлялись с применением тока высокой плотности (ТВП).

Температура нагрева проволоки при прямом пропускании тока устанавливается и регулируется одним из трех параметров: электрическим напряжением U , расстоянием между контактами l (база нагрева) и скоростью волочения проволоки v_v . Наилучшим способом регулирования температуры нагрева T является изменение напряжения тока U [5]. Плавно изменять U можно либо регулированием автотрансформатора, либо с помощью тиристорной схемы управления напряжением питающего первичную обмотку силового трансформатора. При этом выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ пропорционально $T^{1/2}$.

Катанка, прошедшая волочение с суммарным обжатием порядка 78%, подвергалась кратковременному электротепловому воздействию до температур 500–600 °C со скоростью 400–500 °C/с.

Первоначально определялись режимы ТВП, которые могли быть использованы для скоростного нагрева холоднотянутой заготовки и обеспечения предела прочности стали σ_v при печной термообработке. Исследования проводились в лабораторных условиях на проволочных образцах из среднеуглеродистой стали марки 70 длиной порядка 400 мм диаметром 2,6–3,5 мм. Влияние интенсивности электрического воздействия $I \cdot t_n$ (где I – сила тока; t_n – длительность его действия) на пластичность и прочность материала определялось по критериям в виде отношений: $\delta/\delta_{\text{бр}}$ – удлинение при разрыве (с током и без тока); $\sigma_v/\sigma_{v \text{ бр}}$ – предел прочности (с током и без тока). Длительность воздействия тока менялась от 0,5 до 4 с, а плотность тока (отношение силы тока к площади сечения образца) – от 35 до 80 А/мм². Был установлен оптимальный диапазон пластичности при незначительном снижении прочности. Также эксперимент показал, что изменение плотности тока при той же длительности воздействия влияет на прочность и пластичность образцов больше, чем увеличение длительности воздействия при постоянной плотности тока.

Результаты эксперимента

Результаты многократных исследований механических испытаний образцов стали 70, проведенных на разрывной машине Р-50 на базе 200 мм при скорости деформирования 40 мм/мин и разных режимах действующего тока, представлены в табл. 1. Так, например образец 1 подвергался действию тока силой $I = 510$ А

Таблица 1

*Результаты исследований пластических и прочностных свойств
образцов стали 70 после обработки током*

№ пп	$\delta/\delta_{\text{бт}}$	$\sigma_{\text{в}}/\sigma_{\text{в бт}}$	$\sigma_{0,2}/\sigma_{0,2 \text{ бт}}$	Режим тока		
				$I, \text{ A}$	$t_{\text{н}}, \text{ c}$	$T, ^\circ\text{C}$
1	1,32	0,99	0,98	510	2	350
2	1,9	0,92	0,87	510	2,2	370
3	2	0,85	0,8	510	2,5	400
4	1,79	0,94	0,76	510	1,8	300

Примечание: отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_{0,2 \text{ бт}}$ – условный предел текучести (с током и без тока).

в течение $t_{\text{н}} = 2$ с со скоростью нагрева $250^\circ\text{C}/\text{с}$ до температуры $+350^\circ\text{C}$; охлаждение проводилось на воздухе.

В исследованиях был установлен принципиально новый способ повышения пластичности проволоки из стали 70 за счет паузы в подаче тока.

При разработке способа электроконтактного теплового воздействия с импульсной подачей тока использовались теоретические представления о действии импульсов тока на систему [6].

Несколько импульсов тока одинаковой амплитуды и длительности $t_{\text{н}}$, следующие друг за другом через одинаковые интервалы времени $t_{\text{п}}$ (паузы), образуют серию. Энергетическое воздействие серии на систему (деформируемый образец) существенно зависит от времени паузы $t_{\text{п}}$ и числа импульсов в серии [6] (рис. 1, S_f – спектральная энергетическая величина, зависящая от частоты импульсов; S_0 – максимальное значение модуля спектральной функции при $f=0$). Если в промежуток времени пропускают два импульса, а пауза уменьшается и $t_{\text{п}} < t_{\text{н}}$, то действие пары импульсов приближается к действию одиночного импульса удвоенной длительности с более эффективным дей-

ствием (см. рис. 1, а). При увеличении $t_{\text{п}}$ (см. рис. 1, б) характер действия импульсов меняется. В спектре энергетического воздействия появляются «лепестки» распределения энергии разной интенсивности. Их число возрастает с увеличением $t_{\text{п}}$, а «силовое» действие на систему уменьшается. Об этом свидетельствуют результаты работы [7]. Таким образом, эффективность энергетического воздействия серии импульсов тока на пластическую деформацию металла зависит от интервала времени их следования, т.е. паузы.

Через проволочные образцы длиной 250 мм из стали 70 диаметром 3,2–3,3 мм, полученные холодным волочением из катанки диаметром 6,5 мм, пропускали электрический ток высокой плотности величиной 65 и 35 А/мм² промышленной частоты низкого напряжения с паузой $t_{\text{п}}$, длительность которой менялась в интервале 0,25–4 с после первого импульса. Длительность $t_{\text{н}}$ первого и второго импульсов тока менялась от 1 до 3 с.

Нагрев проводили двухступенчато – первым и вторым импульсами тока одинаковой длительности $t_{\text{н1}} = t_{\text{н2}}$ (рис. 2). Охлаждение проводилось на воздухе.

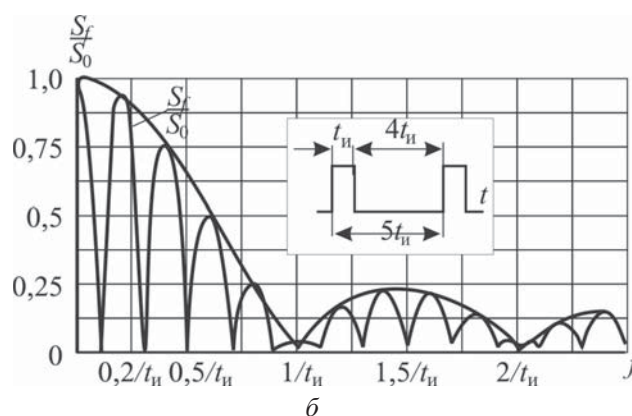
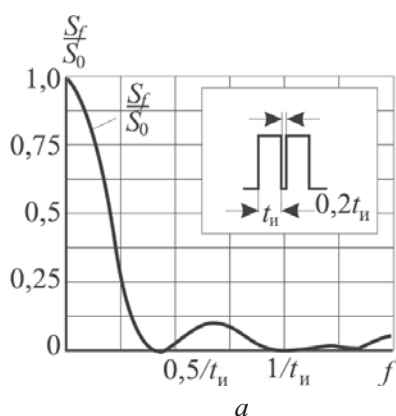


Рис. 1. Спектр энергетического воздействия S_f/S_0 двухимпульсного сигнала:
а) при $t_{\text{н}} < t_{\text{п}}$; б) при $t_{\text{н}} > t_{\text{п}}$

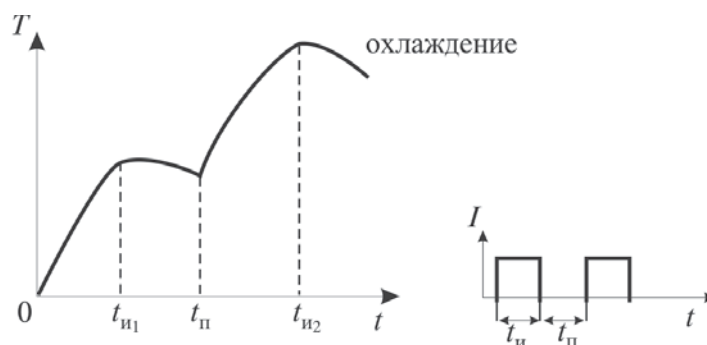


Рис. 2. Двухступенчатый нагрев проволоки импульсным током высокой плотности

Оптимальные параметры многократных исследований пластических и прочностных свойств проволоки после ее термообработки серий из двух импульсов тока представлены в табл. 2.

Проведенные испытания позволили установить временной интервал пауз между импульсами тока, который существенно повышает пластичность среднеуглеродистой стали после холодного волочения.

В результате анализа энергетического воздействия импульсов тока на металлическую систему (см. табл. 2) было установлено, что при плотности тока порядка 65 А/мм² и длительности его воздействия $t_{и} \sim 1$ с изменение времени паузы $t_{п}$ от 0,5 до 1,5 с существенно влияет на пластические и прочностные свойства стали марки 70 в зависимости от относительной величины $t_{п}/t_{и}$. Также исследования показали, что относительная пластичность возрастает в 1,5 раза, достигая максимума при увеличении $t_{п}/t_{и}$ от 0,25 до 1,25. Однако дальнейшее увеличение $t_{п}/t_{и}$ приводит к снижению относительной пластичности, достигая меньших значений, чем при воздействии одиночных импульсов.

Следует отметить, что ввиду малых промежутков времени термообработки и высоких скоростей нагрева заготовки током порядка 400–500 °С в секунду, термообработку током высокой плот-

ности можно проводить в динамическом режиме движения заготовки при кратковременном нагреве до температур 500–600 °С. Более высокие температуры приводят к горячим обрывам.

Опытно-промышленные испытания

На основе полученных данных были разработаны технологические процессы скоростной термообработки холоднотянутой заготовки током высокой плотности и автономный участок волочения стальной проволоки с нагревом током, встраиваемый в волочильный стан, позволяющий за один технологический цикл многократного волочения получать значительные суммарные обжатия.

В испытаниях электроконтактный нагрев осуществлялся на двух участках (базах длиной l). По условиям термообработки и способу подведения тока такая схема воздействия дает возможность получить лучшее сочетание пластических и прочностных свойств. Она позволяет выбирать нужный температурный режим обработки, а также термоциклирование в процессе волочения. Кроме того, создаются условия, при которых проволока и оборудование до и после участков действия тока не находятся под электрическим напряжением.

Для первого технологического процесса (данные табл. 1) волочение и обработка током

Таблица 2

Оптимальные параметры пластических и прочностных свойств образцов стали 70 после обработки парой импульсов тока с паузой подачи

Параметры	$\delta/\delta_{бт}$	$\sigma/\sigma_{в бт}$	$\delta/\delta_{бт}$	$\sigma/\sigma_{в бт}$	$\delta/\delta_{бт}$	$\sigma/\sigma_{в бт}$
Длительность паузы, с						
Длительность импульса, с	0,5		1,0		1,5	
1	2,3	0,9	2,68	0,87	2,75	0,85
2	2,58	0,89	3,18	0,8	3,6	0,72
3	2,9	0,82	3,62	0,75	4,29	0,64

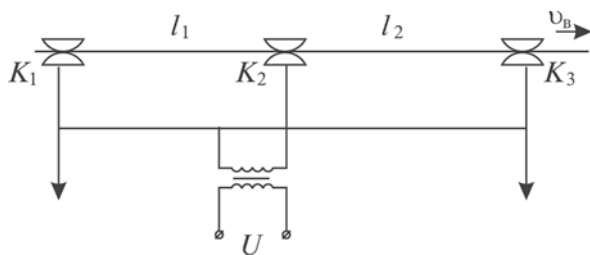


Рис. 3. Двухплечевая схема воздействия тока высокой плотности: l_1 , l_2 – базы действия тока; K_1 , K_2 , K_3 – электрические контакты; U – электрическое напряжение, подаваемое на понижающий трансформатор; $v_{\text{в}}$ – скорость волочения проволоки

проводились по схеме, представленной на рис. 3.

Технологическая схема позволила на первом плече (база l_1) оказывать основное воздействие с большей скоростью, на втором (база l_2) – подогрев с меньшей скоростью, что способствует также выравниванию температуры нагрева по длине проволоки. Выбранный источник тока и схема его включения в технологический процесс обеспечивали электробезопасность для обслуживающего персонала и оборудования.

Были рассчитаны основные параметров тока при непрерывном нагреве по двухплечевой схеме для теплофизических параметров сталей 70. На первом плече осуществлялся нагрев до температуры 300–350 °С, на втором – до 450–500 °С.

В технологических схемах волочения процесс разбивался либо на три этапа (I и III этапы – холодное волочение, II – теплое волочение с током высокой плотности), либо на пять этапов (I, III, V – холодное волочение; II и IV – теплое волочение с током высокой плотности).

В целях упрощения контактного устройства и обеспечения надежного контакта с проволокой, для больших и средних диаметров проволоки, в качестве контактирующих устройств использовались волокнистые; для меньших диаметров (~2 мм) – роликовые контакты.

На опытно-промышленном стане проводилось волочение стальной катанки из стали 70 с диаметра 6,5 мм на диаметр 1,25 мм. Волочение с током проходило без промежуточных отжигов и патентирования при суммарном обжатии за технологический цикл 96,3%. Применялась трехэтапная схема волочения:

I-й этап – холодное волочение с диаметра 6,5 до 4,27 мм с суммарным обжатием 56,8%;

II-й этап – три последовательные протяжки с электрическим нагревом проволоки.

В первом технологическом цикле (см. рис. 3) при первой протяжке волочение осуществлялось с диаметра 4,27 до 3,32 мм с суммарным обжатием до 40%. В качестве контактов использовались три волокнистые (K_1 , K_2 , K_3). Технологическая скорость волочения составляла 136 м/мин (2,3 м/с); длина плеч нагрева – $l_1=1,3$ м и $l_2=1,5$ м; напряжение нагрева – около 36 В; плотность тока – около 80 А/мм².

При второй протяжке волочение осуществлялось с диаметра 3,32 на 2,55 мм, суммарное обжатие составляло до 41%. Технологическая скорость волочения на этом участке составляла 162 м/мин (2,7 м/с), а длины плеч были равны $l_1=1$ м и $l_2=1,5$ м. Подавался ток напряжением около 40 В плотностью около 120 А/мм². С увеличением скорости волочения плотность тока возрастала пропорционально $v = l/t$.

При третьей протяжке волочение осуществлялось с диаметра 2,55 на 1,96 мм с суммарным обжатием до 41%. Технологическая скорость волочения составляла 196 м/мин (3,26 м/с); длина плеч нагрева – $l_1=1$ м и $l_2=1,3$ м; плотность тока – около 160 А/мм². Суммарное обжатие на втором этапе было равно 79%. При трех протяжках с током единичные обжатия на контактах K_1 , K_2 и K_3 составили соответственно: 6–9%; 10–11% и 22–28%.

Сразу после третьей протяжки в едином потоке проводилось холодное волочение проволоки с диаметра 1,96 до 1,25 мм с суммарным обжатием 59%. Для обеспечения устойчивого и равномерного нагрева проволоки на участке электроконтактного теплового волочения на первом контакте при первом обжатии использовалась обычная смазка – мыльный порошок, а на втором и третьем контактах (при втором и третьем обжатии) – графитовый порошок. Эти смазки не препятствовали электропроводности системы; контакты работали без искрения.

Все контакты (см. рис. 3) представляли собой мыльницы. Средняя мыльница (K_2) по сравнению с обычной мыльницей имела дополнительное водоохлаждение стенок и располагалась на электроизоляционной опоре – в виде плиты текстолита, изолированной от общей станины – металлического стола длиной ~ 4 м. Заостренный конец проволоки заправлялся в первую волоку, затем захватывался клещами и транспортировался ко второму и потом к третьему контакту. Включался механизм движения, и затем напряжение на нагреваемых участках увеличивалось

до заданной величины.

Для реализации технологии электроконтактной термической обработки с паузой при подаче тока во втором технологическом цикле была предложена электрическая схема, представленная на рис. 4. Здесь l_1, l_2 – базы электротеплового воздействия; K_1, K_2, K_3, K_4 – электроконтакты. Длина базы l паузы действия тока определяется из условия $l = v_{\text{в}} \cdot t_{\text{п}}$.

В этом технологическом цикле были также проведены три протяжки с плотностью тока 65 А/мм^2 , технологической скоростью 80 м/мин и длинами баз $l_1 = l_2 = 1,35 \text{ м}$, при длине базы паузы $l = 1,7 \text{ м}$ и единичных обжатиях 8%, 12%, 16%, 30–32% соответственно. При первой протяжке волочение осуществлялось с диаметра 4,27 до 3,0 мм с суммарным обжатием 49%. При второй протяжке – с 3,0 до 2,1 мм с суммарным обжатием 47%. При третьей протяжке с током волочение осуществлялось с диаметра 2,1 мм до 1,5 мм с суммарным обжатием 49%. Сразу после третьей протяжки в едином потоке проводилось холодное волочение проволоки с диаметра 1,5 мм до 1,25 мм с обжатием 30%. Такой технологический цикл исключил трудоемкий процесс патентирования и обеспечил стабильное холодное волочение проволоки с необходимыми свойствами.

Подробные рентгеноструктурные исследования в работе не проводились, а детальное изучение влияния тока на структуру стали описано в работах [8, 9].

Заключение

В работе было проведено моделирование процессов волочения стали 70 с током и разработаны технологические процессы многократного волочения проволоки из стали 70 с применением ТВП, а также предложена новая схема применения ТВП с импульсной подачей тока и определены оптимальные режимы электроконтактной тепловой обработки, позволяющие проводить волочение без патентирования.

Полученные результаты были опробованы на промышленном стане многократного волочения, в который был встроен автономный участок электроконтактной тепловой обработки. Совмещение технологических операций позволило исключить из технологического цикла патентирование. Механические испытания полученной проволоки диаметром 1,25 мм показали существенное увеличение предела прочности

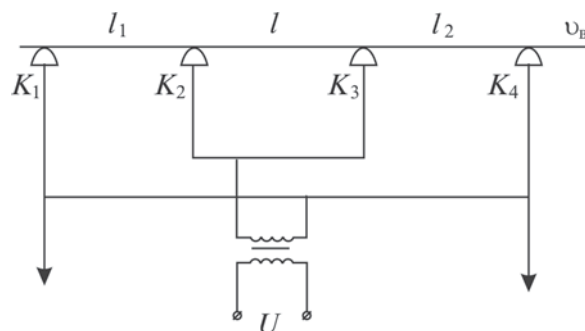


Рис. 4. Электрическая схема электроконтактного нагрева с импульсной подачей тока

стали.

Применение скоростной термообработки током высокой плотности позволяет интенсифицировать процесс пластической деформации и разрабатывать эффективные технологии волочения трудно деформируемых сплавов, что способствует повышению производительности труда и сокращению технологического цикла производства высокопрочной проволоки.

Список литературы

1. Кидин И.Н. Фазовые превращения при ускоренном нагреве стали. – М.: Металлургия, 1957. – 280 с.
2. Гриднев В.Н., Гаврилюк В.Г., Мешков Ю.Я. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали. – Киев: Наукова думка, 1974. – 232 с.
3. Гольфанд И.М., Сычев А.В. Электроконтактный нагрев при производстве проволоки // Метизное производство. 1972. № 4. – 28 с.
4. Гриднев В.Н., Гаврилюк В.Г., Мешков Ю.Я. О связи прочности холодноформированной стали с ее структурой. В кн.: Прочность и пластичность металлов и сплавов. – Киев: Наукова думка, 1968. С. 43–46.
5. Коврев Г.С. Электроконтактный нагрев при обработке цветных металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 312 с.
6. Ицхоки Я.С. Импульсные устройства. – М.: Советское радио, 1959. – 728 с.
7. Сташенко В.И., Троицкий О.А. Влияние формы и режимов прохождения импульсов тока на пластическую деформацию кристаллов цинка // Докл. АН СССР. 1982. Т. 267. № 3. С. 638–641.
8. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / Ю.В. Баранов, О.А. Троицкий, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. – М.: Изд-во МГИУ, 2001. – 844 с.

9. Рентгеноструктурные исследования меди и стали, подвергнутых электропластическому волочению / О.А. Троицкий, В.И. Спицын, А.А. Гавриш и др.// ФММ. 1982. Т. 50. № 1. С. 157–163.

Материал поступил в редакцию 14.10.2009

**СТАШЕНКО
Владимир
Иванович**

E-mail: **ssv568@mail.ru**
Тел. +7 (499) 135-55-18

Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов – физическое материаловедение, влияние внешних энергетических воздействий на физико-механические свойства материалов. Автор более 130 научных работ.