

УДК 621.778.1: 539.374.2: 62- 426.2

Анищенко А.С.*

ВЛИЯНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ВОЛОЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПРОВОЛОКИ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПТ-7св

Изучено влияние температурно-скоростных, деформационных параметров волочения и режимов травления на механические свойства, структуру, газонасыщенность и предельные отклонения диаметра проволоки из сплава ПТ-7св.

Ключевые слова: *изотермическое волочение, проволока, механические свойства, газонасыщенность, травление, вакуумный отжиг.*

Аніщенко О.С. Вплив ізотермічного волочіння на структуру та властивості дроту з титанового сплаву ПТ-7св. Вивчено вплив температурно-швидкісних, деформаційних параметрів волочіння і режимів травлення на механічні властивості, структуру, газонасиченість та граничні відхилення діаметру дроту зі сплаву ПТ-7св.

Ключові слова: *ізотермічне волочіння, дріт, механічні властивості, газонасиченість, травлення, вакуумне відпалювання.*

O.S. Onicshenko. Influence of isothermal drawing on the structure and properties of wire, made of titanium alloy of ПТ-7св type. Influence of temperature and speed, deformation parameters and pickling regimes upon mechanical properties, structure, gas saturation and ultimate fluctuations of diameter of wire made ПТ-7св were investigated.

Keywords: *isothermal wire drawing, wire, mechanical properties, gas saturation, pickling, vacuum annealing.*

Постановка проблемы. Титановая сварочная проволока, изготовленная холодным волочением, характеризуется наличием осевой пористости на отдельных участках. Этот дефект является следствием несовершенной технологии, предусматривающей достижение большой суммарной вытяжки за счет малых обжатий за один проход, допускаемых титаном и его сплавами при холодном волочении [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Осевая пористость устраняется при изотермическом волочении (ИВ) проволоки [2]. Недостатком этого процесса является наводороживание поверхности проволоки при ИВ через фильтры и ее бесфильтрное волочение (БФВ) на участке между нагретой фильтрой и барабаном стана. Искажение диаметра проволоки при БФВ было учтено расчетным путем при совершенствовании технологии ИВ [3]. Однако соответствие проволоки требованиям ГОСТ 27265 по точности размеров, механическим свойствам и газонасыщению достигается не только технологией ИВ, но и зависящими от нее финишными операциями устранения газонасыщенного слоя, осветления и вакуумного отжига.

Цель статьи – разработка оптимальных режимов ИВ титановой проволоки на основе изучения ее структуры, механических свойств и степени насыщения газами.

Изложение основного материала. В качестве исходного материала для исследований использовали сварочную проволоку из сплава ПТ-7св диаметром 7,0 мм, соответствующую требованиям ГОСТ 27265. Изотермическое волочение проволоки проводили на волочильном стане ВС 1/550 однократного действия, дополнительно оснащенном печами для нагрева деформируемого материала и фильтр и вспомогательными емкостями для смазки проволоки. Подсмазочный слой (смазка ВАР-9), наносимый на проволоку перед нагревом, состоял из смеси графита, тринатрийфосфата и воды. Перед волочением нагретую проволоку с подсмазочным слоем пропускали через емкость, заполненную мелкодисперсным графитом.

Волочение осуществляли за несколько проходов без промежуточных отжигов и травлений с вытяжкой за один проход $\mu_i = 1,36 \div 1,44$ ($\mu_i = d_i^2 / d_{i+1}^2$, где d_i и d_{i+1} – диаметры проволоки до и после волочения на i -ом проходе). Изотермический режим деформации обеспечивали на-

* канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

гревом проволоки и фильер до температур $T = 800 \div 900^\circ\text{C}$, близких к температуре полиморфного превращения сплава ПТ-7св (870°C).

Металлографическое исследование проволоки проводили на микроскопе ММР-4, шлифы травили в водном растворе плавиковой кислоты. Диаметр зерен замеряли с помощью окуляр-микрометра ($\times 100$) по ГОСТ 5639. Механические свойства проволоки определяли в соответствии с ГОСТ 10446 растяжением образцов с базовой длиной 100 мм на машине Р-0,5.

Массовую долю водорода измеряли методом вакуум-нагрева по ГОСТ 24956 и импульсно-спектральным методом согласно РД 5.9184 в диаметральном сечении проволоки, для чего торцы образцов зачищали на глубину до $l = 0,3$ мм. Испытания производили на фотоэлектрическом стилометре ФЭС-1 с использованием вольфрамовых электродов. Оплавляемое электродом пятно на образце имело диаметр 2 мм, что позволяло приблизить точку замера к краю сечения не ближе, чем на 1 мм от него.

Газонасыщенный слой на поверхности проволоки выявляли путем замера микротвердости в нескольких диаметральных сечениях на приборе ПМТ-3 при нагрузке 50 граммов. Замеры производили от кромки поверхности образцов на глубину $2 \div 3$ мм, а также в центре сечения образцов. За газонасыщенный слой принимали слой α -фазы под микроскопом с микротвердостью на $780 \div 980$ МПа выше микротвердости центра образца.

Исследуемая технология изотермического волочения предусматривала нагрев проволоки до заданной температуры с оплавлением тринатрийфосфата на ее поверхности за время τ , в течение которого проволока перемещалась в рабочей зоне печи. При лимитированной длине рабочей зоны, равной $L=1850$ мм, требуемое время нагрева обеспечивали экспериментальным подбором соотношения скорости волочения V и вытяжки на i -том проходе μ_i в соответствии с пропорцией:

$$\tau / L = \mu_i / V \quad (1)$$

Для проволоки диаметром $4 \div 7$ мм время нагрева составляло $20 \div 30$ с. С учетом этого при увеличении вытяжки за один проход необходимо было исходя из пропорции (1) повышать скорости волочения в пределах $V = 8,6 \div 24,5$ см/с.

На рис.1 (кривые 1 - 4) представлены механические свойства проволоки, подверженной изотермическому волочению при 800 и 900°C с различной суммарной вытяжкой μ . Зависимости δ ; $\psi = f(\mu)$ для проволоки, деформированной при 900°C , в интервале вытяжек $1 < \mu < 2$, идентичны графикам 3, 4, а с увеличением вытяжек показывают незначительный рост пластических свойств: $\psi = 52\%$ и $\delta = 7,5\%$ при $\mu = 3,21$.

Ниже приведены формулы, полученные аппроксимацией экспериментальных значений δ , ψ и σ_s , с погрешностью $6 \div 10\%$ и $8 \div 12\%$ соответственно для определения δ , ψ и σ_s :

$$\sigma_s = -392,39 \times \mu \times \exp[4,77 (T/1000)^2 - 4,19] + 914,39;$$

$$\delta = (0,11\mu^2 + 4,85\mu + 1,49)^{-1} \times 10^2;$$

$$\psi = 2,97 \times \mu^2 - 9,79 \times \mu + 48,82 .$$

На наш взгляд, упрочнение проволоки и снижение ее пластичности, не характерные для изотермической деформации, обусловлены различными температурно-скоростными условиями БФВ. Нагрев проволоки до 800°C требует меньшего времени, чем нагрев до 900°C . Следовательно, при одинаковой вытяжке за проход скорость волочения при 800°C в соответствии с пропорцией (1) должна быть выше скорости волочения при 900°C , что вызывает дополнительный рост скоростного упрочнения деформируемого материала, не исчезающий в испытуемых образцах вследствие быстрого охлаждения проволоки на участке между фильерой и барабаном стана. Тем не менее, уровень значений σ_s , δ и ψ позволяет волочить проволоку без промежуточных отжигов при условии возобновления смазки и подсмазочного слоя на каждом проходе.

Просмотр нетравленных микрошлифов на микроскопе при увеличении $\times 100$ и $\times 500$ показал, что загрязненность металла неметаллическими включениями незначительна и не превышает 0,5 балла по ГОСТ 1778. Отдельные несплошности и другие дефекты типа осевой пористости в исследуемых сечениях отсутствуют.

На шлифе из исходной проволоки диаметром 7,0 мм после травления была выявлена полиэдрическая равноосная структура с признаками пластинчатости ($\sim 25\%$ площади шлифа),

средний диаметр зерна был равен 49 мкм, значения микротвердости на расстоянии 25÷50 мкм от края шлифа находились в пределах 2245÷2630 МПа. В центральных зонах шлифа металл был мягче, микротвердость зерен с пластинчатым строением колебалась в пределах 2050÷2235 МПа, а зерен без признаков пластинчатости – в пределах 1735÷1990 МПа.

Волочение при 900°С формировало в проволоке перегретую структуру с грубопластинчатым внутризерненным строением, средний диаметр зерна увеличивался до 65÷85 мкм, с ростом вытяжки микротвердость возрастала преимущественно в поверхностных слоях и при $\mu = 3,27$ была равна 2050÷2450 МПа в центре и 2370÷3310 МПа на периферии сечения проволоки. Глубина газонасыщенного слоя в среднем была равна 56 мкм. Интенсивный рост α -слоя наблюдался в основном при волочении на первых двух проходах: при вытяжке $\mu_1 = 1,39$ α -слой имел глубину в среднем 48 мкм, которая затем незначительно увеличивалась с ростом вытяжки.

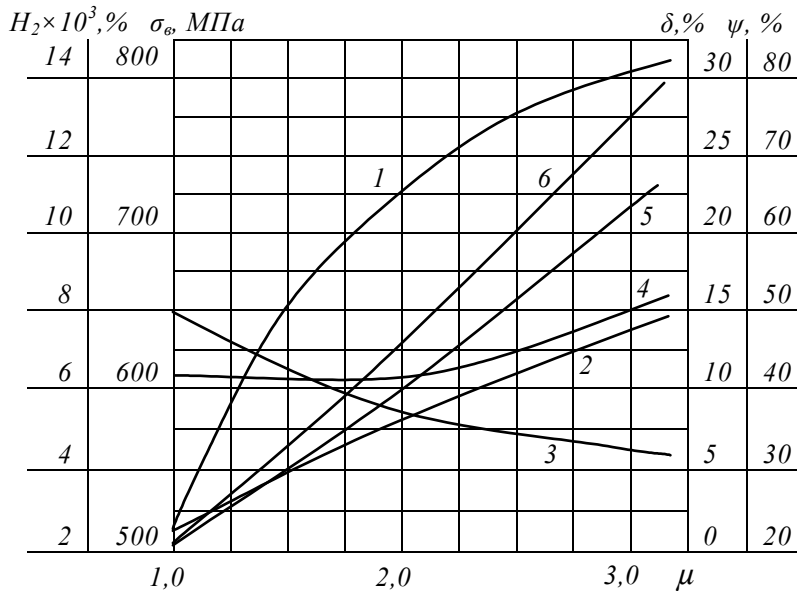


Рис.1- Влияние вытяжки и температуры волочения на механические свойства и наводороживание проволоки

из сплава ПТ-7св:

- 1- $\sigma_{\sigma}=f(\mu)$, $T=800^{\circ}\text{C}$; 2- $\sigma_{\sigma}=f(\mu)$, $T=900^{\circ}\text{C}$; 3- $\delta=f(\mu)$, $T=800^{\circ}\text{C}$;
 4- $\psi=f(\mu)$, $T=800^{\circ}\text{C}$; 5- $H_2=f(\mu)$, $T=800^{\circ}\text{C}$; 6- $H_2=f(\mu)$, $T=900^{\circ}\text{C}$

структуры с полиэдрическим равноосным зерном диаметром 20÷25 мкм и микротвердостью, равной в центре и на периферии шлифа соответственно 2540÷2715 и 2900÷3725 МПа. Газонасыщенный слой формировался, как и в предыдущем случае, на первых двух проходах, имел глубину 50 мкм. Кроме того, на периферии образцов чаще встречались участки, полностью свободные от α -фазы.

Выявленная кинетика роста α -фазы, по нашему мнению, обусловлена степенью защиты поверхности проволоки от газонасыщения при высоких температурах. На первых проходах подмазочный слой невелик, поэтому интенсивность взаимодействия титана с газами сравнительно высока. На последующих проходах поверхность проволоки перед нагревом покрыта несколькими сухими слоями, состоящими из смазки ВАР-9 и мелкодисперсного графита, поверх которых наносится очередной водный раствор ВАР-9, а на него – очередной слой графита. В совокупности это в большей степени ограничивает доступ газов к поверхности проволоки.

Следует отметить, что как в исходной, так и в деформированной проволоке, несмотря на наличие α -фазы, массовая доля кислорода равна $O_2 = 0,085 \div 0,090\%$ и лишь для проволоки, деформированной при 900°С с вытяжкой $\mu = 3,27$, она превышает на 0,01% верхний предел ГОСТ 27265 ($O_2 \leq 0,12\%$). Еще меньше насыщенность металла азотом: $N_2 = 0,01\%$ при норме $N_2 \leq 0,03\%$.

Вместе с тем наличие подмазочных слоев и графита на поверхности проволоки не предохраняют металл от наводороживания при волочении. Оно тем интенсивнее, чем больше время τ пребывания проволоки в печи, определяемое из пропорции (1), и выше температура нагрева. Как видно из рис.1 (кривые 5 - 6), одна минута пребывания проволоки в печи при $T = 800 \div 900^{\circ}\text{C}$ ($\mu = 1,96$) в три раза увеличивает содержание водорода на глубине 1 мм от боковой поверхности металла. При продолжительности нагрева проволоки $\tau = 110$ с (волочение за 4 прохода с $\mu = 3,17$) наводороживание тех же слоев металла превышает исходный показатель в

средний диаметр зерна увеличивался до 65÷85 мкм, с ростом вытяжки микротвердость возрастала преимущественно в поверхностных слоях и при $\mu = 3,27$ была равна 2050÷2450 МПа в центре и 2370÷3310 МПа на периферии сечения проволоки. Глубина газонасыщенного слоя в среднем была равна 56 мкм. Интенсивный рост α -слоя наблюдался в основном при волочении на первых двух проходах: при вытяжке $\mu_1 = 1,39$ α -слой имел глубину в среднем 48 мкм, которая затем незначительно увеличивалась с ростом вытяжки.

Снижение температуры нагрева проволоки до 800°С уже при вытяжке $\mu = 2,00$ приводило к образованию мелкозернистой

5,5 ÷ 7 раз при норме $H_2 \leq 0,002\%$. Вакуум-нагрев в отличие от спектрального анализа показывает, что массовая доля водорода во всем объеме испытуемого металла заметно ниже и для проволоки, деформированной при 800 и 900° С ($\mu = 3,17$), составляет $(3 \div 6) \times 10^{-3}$ и $(4 \div 7) \times 10^{-3} \%$ соответственно.

Интенсивное насыщение титановых сплавов водородом происходит при их травлении. Степень наводороживания металла зависит от состава травильного раствора, температуры и продолжительности травления. Для ИВ с подмазочным слоем ВАР-9 были уточнены режимы химической обработки сплава ПТ-7св. Остатки смазки, а затем α -слой наиболее эффективно удалялись с поверхности проволоки в 20 ÷ 40%-ом растворе серной кислоты после выдержки 20 ÷ 30 минут при 70 ÷ 80° С. Наводороживание образцов с исходным содержанием водорода $H_2 = (1,8 \div 2,2) \times 10^{-3} \%$ возрастало до $H_2 = (12,6 \div 18,0) \times 10^{-3} \%$ непосредственно на торцевой поверхности и до $H_2 = (2,8 \div 4,7) \times 10^{-3} \%$ после обточки торца образца на глубину $l = 0,3$ мм.

Процесс травления проволоки сопровождался уменьшением ее диаметра на 0,05 ÷ 0,15 мм, который становился тем меньше, чем выше концентрация серной кислоты и ниже прочность сцепления подмазочного слоя с поверхностью металла. В свою очередь, подмазочный слой наиболее прочно удерживался при температурах волочения, близких к температурам оплавления ($T = 450 \div 500^\circ \text{C}$) входящего в состав смазки ВАР-9 тринатрийфосфата. В связи с этим для повышения точности размеров проволоки с учетом оптимизации процесса травления была снижена температура нагрева проволоки с 900 до 800°С и учтены 0,05 ÷ 0,07 мм съема металла при травлении в расчетах технологических маршрутов волочения.

Для осветления проволоки перед отжигом оптимальным оказался 7 ÷ 12%-ый раствор азотной кислоты с добавкой 0,8 ÷ 1,5% плавиковой кислоты (время обработки – 2 ÷ 5 минут). Массовая доля водорода на торцевой поверхности образцов после осветления уменьшилась на $(0,9 \div 1,8) \times 10^{-3} \%$, а объемное содержание водорода в образцах оказалось в пределах $(1,0 \div 1,2) \times 10^{-3} \%$, что несколько ниже, чем для травленных и осветленных титановых листов [1].

С целью удаления водорода и обеспечения требуемых ГОСТ 27265 механических свойств проволоку подвергали вакуумному отжигу при температурах, близких к температуре полиморфного превращения. Оптимальный режим отжига: вакуумирование пространства печи до достижения давления 1×10^{-5} мм ртутного столба, нагрев металла до 820 ÷ 840°С, выдержка в течение 8 часов, охлаждение с печью, - обеспечивал для проволоки следующий уровень свойств: $\sigma_s = 558 \div 596$ МПа, $\delta = 28 \div 32\%$, $H_2 = (1,6 \div 1,8) \times 10^{-3} \%$.

Выводы

Изготовление проволоки из титанового сплава ПТ-7св, соответствующей по уровню механических свойств, газонасыщению и точности размеров требованиям ГОСТ 27265, может быть осуществлено изотермическим волочением при 800°С с вытяжкой за проход $\mu_i = 1,36 \div 1,44$ и скоростью волочения $V = 8,6 \div 24,5$ см/с, травлением и осветлением в растворах серной, азотной и плавиковой кислот и вакуумным отжигом при 820 ÷ 840°С в течение 8 часов.

Список использованных источников:

1. Хаяк Г.С. Волочение проволоки из цветных металлов и сплавов. / Г.С. Хаяк. - М. : Металлургия, 1967. - 151 с. : ил.
2. Анищенко А.С. Волочение титановой проволоки в изотермических условиях / А.С. Анищенко // Вопросы материаловедения. - 1995. - вып.2. - С.45-53.
3. Лепехов В.И. Совершенствование технологии изотермического волочения титановой проволоки. / В.И. Лепехов, А.С. Анищенко, Г.С. Лупандин. – Вісник ПДТУ: Зб. наук. праць.- Маріуполь: ПДТУ.- 1996.- Вип. 2. - С.74-76.

Рецензент: В.И.Капланов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 03.12.2010