

УДК 621.9.047.7:621.778.04

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ
В ПРОЦЕССЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ВОЛОЧЕНИЕМ
НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛИ 12Х18Н9**

*канд. техн. наук Ю.Г. АЛЕКСЕЕВ, д-р техн. наук, проф. Л.А. ИСАЕВИЧ,
А.Ю. КОРОЛЁВ, канд. техн. наук, доц. В.С. НИСС
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Исследовано влияние промежуточной электролитно-плазменной обработки в процессе деформационного упрочнения волочением стали 12Х18Н9, широко применяемой для изготовления медицинских инструментов и имплантатов. Использовался базовый маршрут волочения, включающий семь проходов и обеспечивающий суммарное обжатие 80 %. Продолжительность промежуточной электролитно-плазменной обработки между проходами волочения составляла от 1 до 10 мин. Установлено, что применение электролитно-плазменной обработки между проходами волочения приводит к снижению величины растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое. Определена оптимальная продолжительность промежуточной электролитно-плазменной обработки, обеспечивающая сочетание высокого предела прочности и низких остаточных напряжений. Применение промежуточной электролитно-плазменной обработки в процессе деформационного упрочнения волочением обеспечивает повышение усталостной прочности материала благодаря снижению остаточных напряжений, плотности дислокаций, количества дефектов и инородных включений.

Введение. Ряд медицинских инструментов и имплантатов при эксплуатации подвергаются значительным знакопеременным нагрузкам. К таким изделиям относятся, прежде всего, имплантаты для травматологии (костные винты и пластины, стержни, спицы), эндопротезы тазобедренного сустава, инструменты-волноводы для ультразвукового разрушения тромбов внутри сосудов. Воздействие циклических напряжений при работе в организме приводит к их усталостному разрушению. Разрушение инструментов и имплантатов внутри организма вызывает тяжелые последствия, необходимость проведения срочных внеплановых операций, а в некоторых случаях внезапное разрушение может привести к летальному исходу. Поэтому к материалам для изготовления таких изделий предъявляются высокие требования по прочностным характеристикам (предел прочности, предел выносливости). Для изготовления медицинских инструментов и имплантатов наиболее часто применяют нержавеющие стали аустенитного класса в виде прутков различного диаметра, получаемых волочением. В деформационно-упрочненном состоянии такие стали имеют предел прочности до 1600...1700 МПа.

Основным недостатком заготовок, получаемых волочением, является наличие неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений в поверхностных слоях материала, приводящих к значительному снижению усталостной прочности изделий, работающих в условиях циклических нагрузжений. Волочение также сопровождается появлением микро- и макродефектов, снижающих прочностные характеристики материала. Дефекты поверхности проявляются в виде поперечных складок, возникающих после каждого прохода волочения, которые в последующем становятся центрами развития микротрещин и царапин, продуктов износа инструмента, скоплений дислокаций, являющихся концентраторами напряжений и снижающих усталостную прочность материала.

Для удаления поверхностных дефектов и снижения величины остаточных напряжений предложен метод получения заготовок, основанный на волочении с применением промежуточной электролитно-плазменной обработки между каждым проходом. Электролитно-плазменная обработка (ЭПО) – способ обработки в электролитах при напряжениях 250...320 В, широко применяемый для очистки поверхности, снижения шероховатости и снятия заусенцев на изделиях, изготовленных из различных металлических материалов. Метод основан на удалении металла за счет плазменных разрядов, возникающих в парогазовой оболочке, образующейся вокруг обрабатываемой поверхности.

В работах [1; 2] проведены исследования влияния ЭПО на структуру и свойства поверхностного слоя деформированных аустенитных нержавеющих сталей. В результате проведенных исследований установлено, что кроме снижения шероховатости, ЭПО приводит также к модификации поверхности, которая выражается в изменении фазового состава с уменьшением содержания мартенситной фазы и увеличением содержания аустенитной фазы, снижением микротвердости поверхностного слоя толщиной до 30 мкм, снижением плотности дислокаций. На основании полученных результатов сделано предположение о том, что применение ЭПО между проходами волочения при деформационном упрочнении заготовок может обеспечить повышение усталостной прочности благодаря снижению остаточных напряжений в поверхностном слое и удалению дефектных поверхностных слоев, формирующихся при волочении.

Методы проведения исследований. Для подготовки образцов для исследований на основании рекомендаций [3] разработан базовый маршрут волочения, включающий семь проходов и обеспечивающий суммарное обжатие $\delta_{\text{сум.}} = 80\%$. В качестве исходных заготовок использовались прутки из стали 12Х18Н9 диаметром 4 мм и длиной 200 мм, разупрочненные закалкой при температуре 1100 °С с охлаждением в воде. Разработанный маршрут волочения приведен в таблице 1.

Таблица 1

Маршрут волочения для подготовки образцов

№ перехода	Исходный диаметр $d_{\text{исх.}}$, мм	Конечный диаметр, $d_{\text{кон.}}$, мм	Единичное обжатие, $\delta_{\text{ед.}}$	Суммарное обжатие, $\delta_{\text{сум.}}$	Коэффициент вытяжки, K
1	3,98	3,55	0,20	0,20	1,26
2	3,55	3,15	0,21	0,37	1,27
3	3,15	2,82	0,20	0,50	1,25
4	2,82	2,50	0,21	0,61	1,27
5	2,50	2,24	0,20	0,68	1,25
6	2,24	2,00	0,20	0,75	1,25
7	2,00	1,80	0,19	0,80	1,23

Образцы готовились методом обычного волочения, а также методом волочения с промежуточной ЭПО продолжительностью 1, 3, 5 и 10 мин. При ЭПО величина размерного съема на диаметр составляла 0,005, 0,015, 0,025 и 0,05 мм соответственно.

Для волочения согласно разработанному базовому маршруту использовался цепной волочильный стан. Скорость волочения составляла 20 м/мин. Угол рабочего конуса используемых волок составлял 8 градусов, материал волок – сплав ВК6 [4]. В качестве смазки использовалось натриевое мыло. Промежуточная ЭПО выполнялась в 4-процентном растворе сульфата аммония, при рабочем напряжении 300 В и температуре электролита 80 °С.

Исследование влияния ЭПО между проходами волочения на распределение остаточных напряжений в прутках проводилось методом замера прогибов [5]. При этом использовалась теория стержней, основанная на гипотезе плоских сечений. Остаточное напряженное состояние предполагалось одноосным. Для определения остаточных напряжений постепенно удалялся слой материала $ABCD$ (рис. 1), находящийся в зоне постоянных по длине стержня напряжений. В цельном стержне они действуют по граням AB и CD .

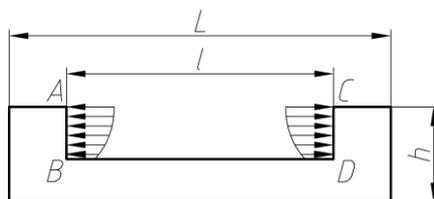


Рис. 1. Схема выявления остаточных напряжений путём последовательного удаления слоёв металла

Для определения остаточных напряжений в образцах методом замера прогибов круглый профиль приводился к прямоугольному путем сошлифовывания лысок (рис. 2). Шлифование лысок на круглом профиле, а также последовательное удаление плоских слоёв с полученного приведенного профиля осуществлялось на плоскошлифовальном станке с применением специальной технологической оснастки.

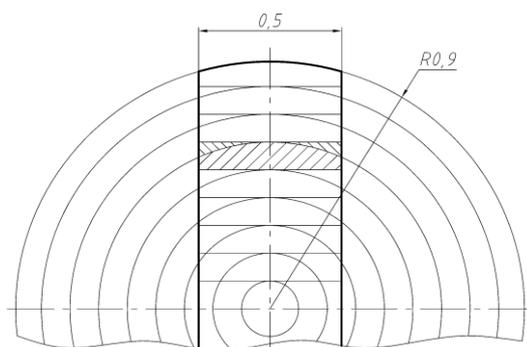


Рис. 2. Приведение круглого профиля к прямоугольному

После формирования прямоугольного профиля с целью дальнейшего определения величины прогиба на одну из сторон каждого образца при помощи микротвердомера наносились метки. Для измерения величины прогиба использовался инструментальный микроскоп. Схема нанесения меток и схема измерения прогиба приведены на рисунке 3. Величина прогиба равна полусумме отклонений точек *A* и *C* от точки *B*:

$$f = \frac{1}{2}(f_A + f_C). \quad (1)$$

После нанесения меток для каждой группы образцов выполнялось последовательное удаление слоёв. Толщина удаленных слоёв для каждого из образцов приведена в таблице 2.

Таблица 2

Толщина удаленных слоёв

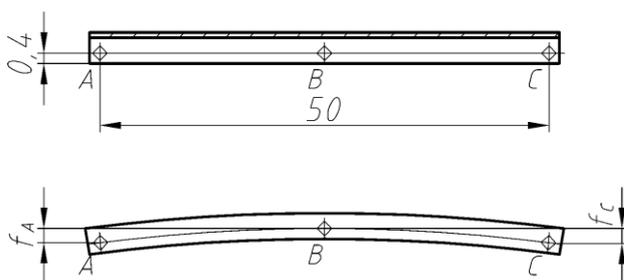


Рис. 3. Схема нанесения меток для измерения прогибов

№ образца в группе	Толщина уделённого слоя, мм
0	0
1	0,04
2	0,13
3	0,20
4	0,31
5	0,43
6	0,59
7	0,69
8	0,80
9	0,90

Далее по величине прогиба рассчитывались значения остаточных напряжений по сечению заготовки. Измерение предела прочности образцов проводили растяжением прутков на универсальной испытательной машине.

Для создания циклической нагрузки при испытаниях на усталостную прочность использовался ультразвуковой генератор мощностью 80 Вт, позволяющий генерировать колебания частотой от 22 до 28 кГц с амплитудой до 180 мкм. Для подключения к ультразвуковому преобразователю образцы длиной 250 мм припаивались припоем ПСр60 к переходному винту, изготовленному из стали 12Х18Н9. Оценка влияния ЭПО на усталостную прочность материала проводилась путём сравнения усталостной прочности образцов, полученных волочением и волочением с промежуточной ЭПО.

Испытания на усталостную прочность заключались в определении числа циклов, приводящих к разрушению образцов при заданных величинах напряжений и в определении предельного напряжения, при котором не происходит разрушения при максимальном числе циклов нагружения (база испытаний). Для стали это число принимается равным $N = 1 \cdot 10^7$. Испытания проводились до базы, предел выносливости определялся как наибольшее значение максимального напряжения цикла, при котором образец выдерживал базовое число циклов без разрушения [6]. Зависимость максимальных напряжений, приводящих к разрушению образца при усталостных испытаниях, от числа циклов нагружения до момента разрушения представляет собой кривую, называемую кривой усталости, или кривой Велера [7].

Величина напряжений, возникающих в образцах, при передаче ультразвуковых колебаний определялась по формуле:

$$\sigma = A \frac{2\pi f E}{c}, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где A – амплитуда ультразвуковых колебаний, мм; f – частота ультразвуковых колебаний, кГц; E – модуль упругости материала, МПа (для стали 12Х18Н9 принимается равным $1,96 \cdot 10^5$ МПа); c – скорость звука в материале, мм/с (для стали 12Х18Н9 принимается равной $5,17 \cdot 10^6$ мм/с).

Испытания проводились на частоте $f = 25000$ Гц. Для каждого из уровней нагружения испытывались по три образца. Испытания начинались при амплитуде колебаний 180 мкм. Далее амплитуда колебаний постепенно уменьшалась с шагом 20 мкм до тех пор, пока не был достигнут уровень, при котором образец не разрушался после числа циклов, равного базе испытаний.

Результаты и их обсуждение. На основании измеренных значений величин прогибов выполнены расчеты, позволившие определить значения остаточных напряжений, действующих в кольцевых сечениях образцов, полученных волочением, а также волочением с промежуточной ЭПО продолжительностью

1, 3, 5 и 10 мин. На основании аппроксимации полученных данных построены зависимости, характеризующие распределение остаточных напряжений по сечению образцов (рис. 4).

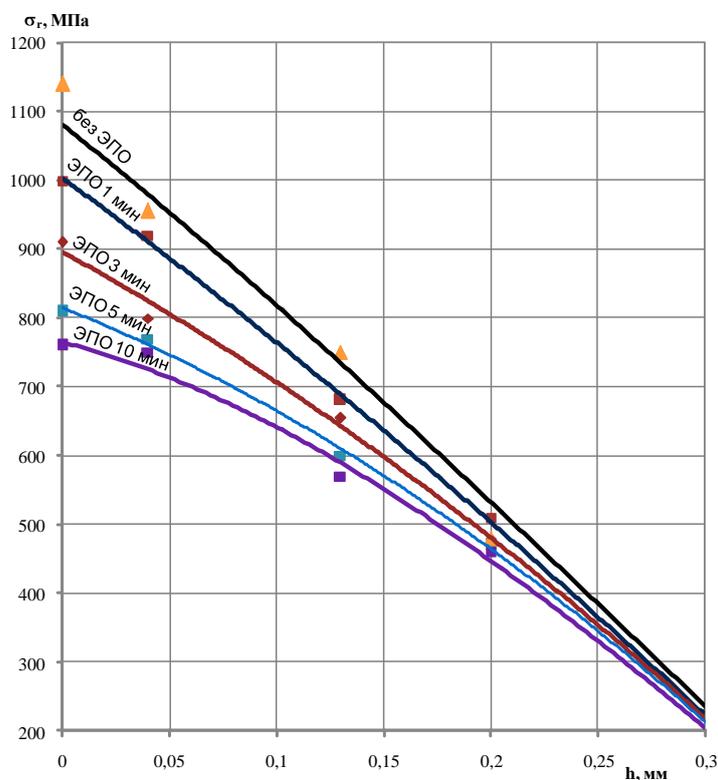


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений (σ_r) в поверхностном слое образцов, полученных волочением с различной продолжительностью промежуточной ЭПО

Анализ полученных данных показывает, что в результате применения промежуточной ЭПО между проходами волочения в поверхностных слоях глубиной до 0,3 мм происходит снижение величины остаточных напряжений относительно значений остаточных напряжений в образцах, полученных волочением без ЭПО. Из рисунка 4 следует, что чем больше продолжительность ЭПО, тем больше снижаются остаточные напряжения. Наиболее интенсивное снижение остаточных напряжений происходит при промежуточной ЭПО продолжительностью до 3 мин.

Снижение остаточных напряжений в результате применения промежуточной ЭПО между проходами волочения может быть обусловлено следующими явлениями:

- удалением между проходами волочения слоя с повышенной плотностью дислокаций, инородными включениями, продуктами износа инструмента;
- сглаживанием или удалением продольных складок на заготовке, которые впоследствии являются центрами усталостного разрушения;
- снижением коэффициента трения, обеспечивающего снижение напряжений в зоне контактного трения;
- разупрочнением поверхностного слоя.

В результате испытаний полученных образцов на разрыв установлено, что, несмотря на снижение суммарной степени обжатия из-за удаления поверхностных слоёв, промежуточная ЭПО не приводит к снижению предела прочности материала. Кроме того, при ЭПО продолжительностью до 3 мин наблюдается рост предела прочности (рис. 5, кривая 1) с максимальным значением 1480 МПа. Повышение предела прочности образцов на разрыв при промежуточной ЭПО продолжительностью до 3 мин объясняется уменьшением величины неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений в периферийных слоях. Также причиной повышения предела прочности является уменьшение плотности дефектов в структуре материала в результате применения ЭПО между проходами волочения.

С дальнейшим увеличением продолжительности промежуточной ЭПО предел прочности постепенно снижается и при 10 мин достигает значения 1250 МПа. Это связано с разупрочнением поверхности при ЭПО и недостаточной степенью деформационного упрочнения из-за существенного снижения суммарной степени обжатия в результате удаления материала в процессе промежуточной ЭПО.

На рисунке 5 также представлена зависимость величины остаточных напряжений в поверхностном слое от продолжительности промежуточной ЭПО (кривая 2).

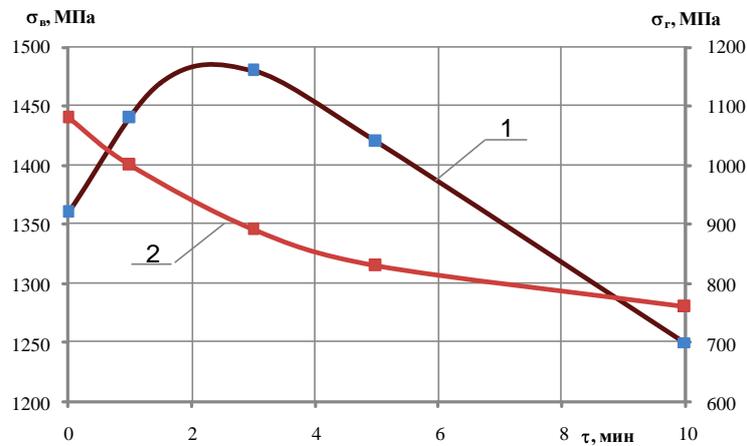


Рис. 5. Зависимость предела прочности (σ_b) и остаточных напряжений в поверхностном слое (σ_r) от продолжительности промежуточной ЭПО (τ)

Из представленной зависимости следует, что наиболее интенсивное снижение остаточных напряжений в материале происходит при промежуточной ЭПО продолжительностью до 5 мин. Электролитно-плазменная обработка продолжительностью более 5 мин характеризуется низкой интенсивностью снижения остаточных напряжений. Для обеспечения высокой прочности и низких остаточных напряжений наиболее оптимальным является режим волочения, включающий промежуточную ЭПО между проходами волочения продолжительностью 3...5 мин. При этом обеспечивается предел прочности материала 1420...1480 МПа, а величина растягивающих остаточных в поверхностном слое снижается до 820...880 МПа.

Испытаниям на усталостную прочность подвергались образцы, полученные волочением без ЭПО и волочением с промежуточной ЭПО продолжительностью 5 мин. На основании данных, полученных по результатам испытаний, построены кривые усталости в логарифмической системе координат (рис. 6).

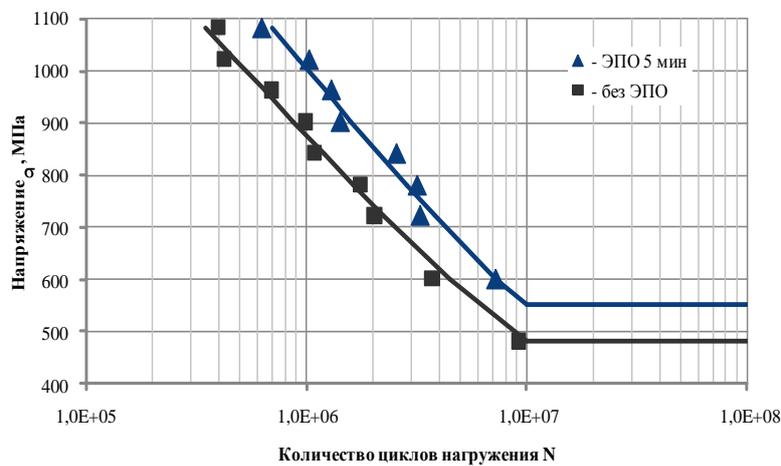


Рис. 6. Кривые усталости образцов после волочения без ЭПО и после волочения с ЭПО

Результаты испытаний усталостной прочности образцов после волочения и после волочения с промежуточной ЭПО продолжительностью 5 мин показывают, что предел выносливости после волочения с ЭПО 12,5 % выше, чем после обычного волочения (предел выносливости после волочения составлял около 480 МПа, а после волочения с ЭПО – 540 МПа).

Повышение предела выносливости при волочении с применением промежуточной ЭПО связано прежде всего со снижением величины растягивающих остаточных напряжений в периферийных слоях. Кроме того, повышение предела выносливости связано с уменьшением количества дефектов, являющихся концентраторами напряжений, и повышением качества поверхностного слоя в результате применения промежуточной ЭПО.

Заключение. Применение ЭПО между проходами волочения является эффективным методом снижения величины неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое толщиной до 0,3 мм при конечном диаметре получаемого прутка 1,8 мм. Чем больше продолжительность промежуточной ЭПО, тем ниже остаточные напряжения в поверхностном слое. Промежуточная ЭПО продолжительностью 10 мин приводит к снижению величины растягивающих остаточных напряжений на поверхности прутка с 1080 до 770 МПа. Однако наиболее существенный эффект снижения остаточных напряжений наблюдается при продолжительности промежуточной ЭПО до 3 мин.

Установлено, что для обеспечения сочетания высокой прочности и низких остаточных напряжений продолжительность ЭПО между проходами волочения должна составлять 3...5 мин. При этом достигается предел прочности 1420...1480 МПа, а величина растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое снижается до 820...880 МПа.

Проведенные исследования эксплуатационных характеристик образцов, полученных методом волочения с промежуточной ЭПО, показали, что применение ЭПО продолжительностью 5 мин обеспечивает повышение усталостной прочности материала с 480 до 540 МПа за счет снижения остаточных напряжений, плотности дислокаций, количества дефектов и инородных включений.

Результаты исследований использованы при изготовлении заготовок длинномерных ультразвуковых инструментов-волноводов малого диаметра, применяемых для разрушения тромбов внутри сосудов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние электролитно-плазменной обработки на изменение характеристик поверхностного слоя коррозионно-стойких аустенитных сталей / А.Ю. Королёв [и др.] // Инженерия поверхности: сб. науч. ст. междунар. науч.-техн. конф., Брест, 27 – 27 окт. 2007 г.; Брест. гос. техн. ун-т; редкол.: В.М. Хвиевич [и др.]. – Брест, 2007. – С. 77 – 81.
2. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя стали 12X18H10T / И.В. Фомихина [и др.] // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2008. – № 3. – С. 24 – 29.
3. Горловский, М.Б. Справочник волочильщика проволоки / М.Б. Горловский, В.Н. Меркачёв. – М.: Металлургия, 1993. – 256 с.
4. Колмогоров, Г.Л. Инструмент для волочения / Г.Л. Колмогоров, С.И. Орлов, В.Ю. Шевляков. – М.: Металлургия, 1992. – 144 с.
5. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: ГИТТЛ, 1963. – 178 с.
6. Циммерман, Р. Металлургия и материаловедение: справ. / Р. Циммерман, К. Гюнтер. – М.: Металлургия, 1982. – 480 с.
7. Волков, С.С. Расчет и конструирование ультразвуковых сварочных машин / С.С. Волков; под ред. Н.М. Жигулёва. – М.: ВЦИИИ, 1974. – 104 с.

Поступила 15.05.2012

THE EFFECT OF ELECTROLYTE-PLASMA TREATMENT IN THE PROCESS OF DEFORMATIVE HARDENING BY DRAWING ON STRENGTH PROPERTIES OF STEEL 12X18H9

Y. ALEKSEEV, L. ISAEVICH, A. KOROLYOV, V. NISS

The effect of electrolyte-plasma treatment in the process of deformative hardening by drawing of steel 12X18H9 widely used for medical tools and implants manufacturing was investigated. The basic drawing sequence which consists of seven passes and provides the total reduction ratio of 80 % was used. The duration of the intermediate electrolyte-plasma treatment between passes of drawing was from 1 to 10 min. The studies found that the use of electrolytic-plasma treatment between passes of drawing leads to a decrease in the tensile residual stresses in the surface layer. The optimal duration of the intermediate electrolyte-plasma treatment, providing a combination of high tensile strength and low residual stresses, was determined. It is established that the use of an intermediate electrolyte-plasma treatment in the process of deformative hardening by drawing enhances the fatigue strength of the material by reducing the residual stress, dislocation density, the number of defects and foreign inclusions.