

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Харитонов В. А., Усанов М. Ю., Сметнёва Н. Ю.

ФГБОУ ВО "Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова"

Spring wire, hardened by quenching with following tempering, must have a high cyclic resistance and relaxation resistance, a high elastic limit, structural homogeneity and isotropic properties. Achieving of required complex physico-mechanical properties of spring wire doesn't depend only on the quality of the final heat treatment. Great importance has a mode of preliminary cold plastic deformation by drawing.

In practice, the preparation of wire drawing is performed on the basis of the ductility of the metal, the technical characteristics of wire drawing machines, geometry of the drawing die and also for economic reasons. However, estimation the depth of deformation in the metal at drawing doesn't make.

This work proposes the method of a choice the rational wire drawing route using the stiffness ratio and determination the depth of deformation in the drawing process. There was chosen the wire drawing route and the geometry of drawing die used for the creation of homogenous stress conditions in the deformation zone and receiving high-quality wire for subsequent quenching and tempering.

Key words: *spring wire, drawing, deformation zone, stress conditions, stiffness ratio.*

Пружинная проволока, упрочняемая закалкой с последующим отпуском, должна обладать повышенной усталостной прочностью и релаксационной стойкостью, иметь высокий предел упругости, структурную однородность и изотропность свойств. Достижение необходимого комплекса физико-механических параметров пружинной проволоки зависит не только от качества проведения окончательной термообработки. Большое значение имеет режим предварительной холодной пластической деформации - волочения.

На практике составление маршрутов волочения производится, исходя из пластичности металла, технических характеристик волочильных машин, геометрии волок, а также из экономических соображений. Однако при этом не производится оценка глубины проникновения деформации в металле при волочении.

В данной работе предложена методика выбора рационального маршрута волочения проволоки с использованием коэффициента жесткости и определения глубины проникновения деформации в процессе волочения. На основе предложенного способа выбран маршрут волочения проволоки и геометрия канала волочильного инструмента, обеспечивающие создание равномерного напряженного состояния в очаге деформации и получение качественной проволоки, предназначенной для последующей закалки и отпуска.

Ключевые слова: *пружинная проволока, волочение, очаг деформации, напряженное состояние, коэффициент жесткости.*

На сегодняшний день одним из широко распространенных в машиностроении изделий являются пружины клапана двигателя внутреннего сгорания, изготавливаемые из стальной термически обработанной проволоки. Клапанные пружины, работающие в условиях резко меняющихся динамических нагрузок, характеризуются высокой упругостью, сопротивлением релаксации и ползучести, усталостной прочностью и циклической стойкостью. Для изготовления данного вида пружин применяется проволока с высоким пределом упругости и прочности на разрыв, повышенной усталостной прочностью и релаксационной стойкостью. Изотропность физико-механических свойств и структурная однородность пружинной проволоки, упрочняемой закалкой с последующим отпуском, зависит не только от качества проведения заключительной термической обработки. Большое значение имеет режим предварительной холодной пластической деформации (ПХПД) – волочения. Получение равномерной микроструктуры и механических свойств закаленно-отпущенной пружинной проволоки определяется величиной суммарной ПХПД [1], а также степенью проработки сечения металла при каждой протяжке, то есть зависит от единичных обжатий выбранного маршрута волочения.

Составление маршрутов волочения проволоки на практике осуществляется, исходя из пластичности металла, технических характеристик волочильных машин, геометрии и расположения волок по размерам, а также экономических соображений. Маршрут волочения должен обеспечить получение качественной проволоки с достаточным запасом прочности и пластичности с максимально возможной производительностью и минимальными затратами. При составлении маршрутов необходимо учитывать значение параметра неравномерности деформации Δ – отношения средних характерных размеров клиновидной зоны деформации [2, 3], коэффициента запаса прочности n , а также энергозатрат для каждого блока волочильного стана в процессе волочения. Параметр Δ характеризует геометрию очага деформации, однако не позволяет определить напряженное состояние металла в зоне деформации. В настоящей работе предлагается использование коэффициента жесткости для оценки напряженного состояния металла в очаге деформации при составлении маршрутов волочения стальной проволоки.

С целью определения рациональных условий ПХПД проволоки диаметром 4,80 мм, предназначенной для последующей термической обработки,

было проведено моделирование процесса волочения методом конечных элементов в программном комплексе Deform-3d.

В качестве исходной заготовки при моделировании принята проволока диаметром 7,80 мм из стали марки 51ХФА с временным сопротивлением разрыву $\sigma_B = 1100$ Н/мм². В данной работе произведено сравнение процесса волочения проволоки по маршруту I:

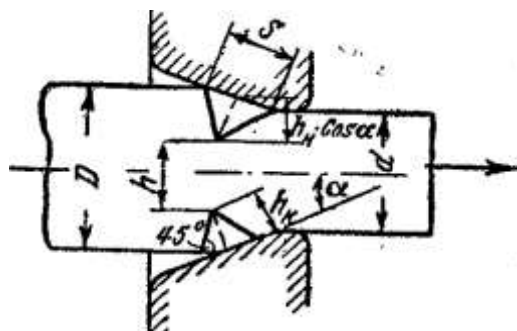
17,8 19,3 18,0 16,6 16,4 %
7,80 - 7,07 - 6,35 - 5,75 - 5,25 - 4,80 мм

и маршруту II:

21,7 21,8 21,6 20,9 %
7,80 - 6,90 - 6,10 - 5,40 - 4,80 мм.

Модели волок соответствуют форме 12 по ГОСТ 9453. Угол рабочего конуса волокна 2α принимался равным 12 градусам (в соответствии с ГОСТ 9453), а также 8 и 6 градусов, остальные геометрические параметры канала волокна не изменялись. В работе рассмотрено 6 комбинаций маршрутов волочения и углов рабочей зоны волокна. При расчетах в программном комплексе Deform-3d проволока является пластическим объектом, волокно – абсолютно жестким. Коэффициент трения (по Кулону) между проволокой и волокном – 0,08, скорость волочения – 2,5 м/с.

В работе [4] С. И. Губкиным для изучения глубины проникновения деформации при волочении использован параметр h – расстояние между концами основных линий течения металла (рис. 1) – зона растяжения.



242 Рис. 1. Схема расположения зоны растяжения h в очаге деформации при волочении

Для определения значения h в настоящей работе произведена оценка напряженного состояния металла в очаге деформации для каждой протяжки с помощью коэффициента жесткости Смирнова-Аляева η [5], рассчитываемого по формуле:

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (1)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные нормальные напряжения; σ_i – интенсивность главных напряжений.

При отрицательных значениях коэффициента η схема напряженного состояния называется "мягкой", в ней преобладают сжимающие напряжения. При $\eta > 0$ схема напряженного состояния является "жесткой", преобладают растягивающие напряжения. Значение $\eta = 0$ соответствует состоянию чистого сдвига [5].

Также была произведена оценка вида напряженного состояния с применением коэффициента Лоде-Надаи μ_σ [6], определяемого по формуле:

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (2)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные нормальные напряжения.

В случае $\mu_\sigma = -1$ действует схема растягивающих напряжений, $\mu_\sigma = +1$ – сжимающих напряжений, $\mu_\sigma = 0$ отвечает состоянию чистого сдвига [6].

Величина h в очаге деформации (рис. 1) определялась в месте максимального значения коэффициента жесткости η_{\max} по длине очага деформации. Установлено, что при волочении по маршруту I с уменьшением угла рабочей зоны волокна 2α значение η уменьшается и в очаге деформации создается более равномерное напряженное состояние с преобладанием сжимающих напряжений (рис. 2).

В случае, когда волочение ведется в 4 протяжки, более равномерное напряженное состояние создается при $2\alpha = 8^\circ$ (рис. 3).

По результатам моделирования построены графики (рис. 4), отражающие влияние степени единичных обжатий $q_{\text{ед}}$ на изменение коэффициента жесткости η при различных углах рабочего конуса волокна 2α . Наиболее благоприятное, напряженное состояние обеспечит применение волок с углом рабочего конуса $2\alpha = 8^\circ$, создающим более «мягкую» схему с преобладанием сжимающих напряжений.

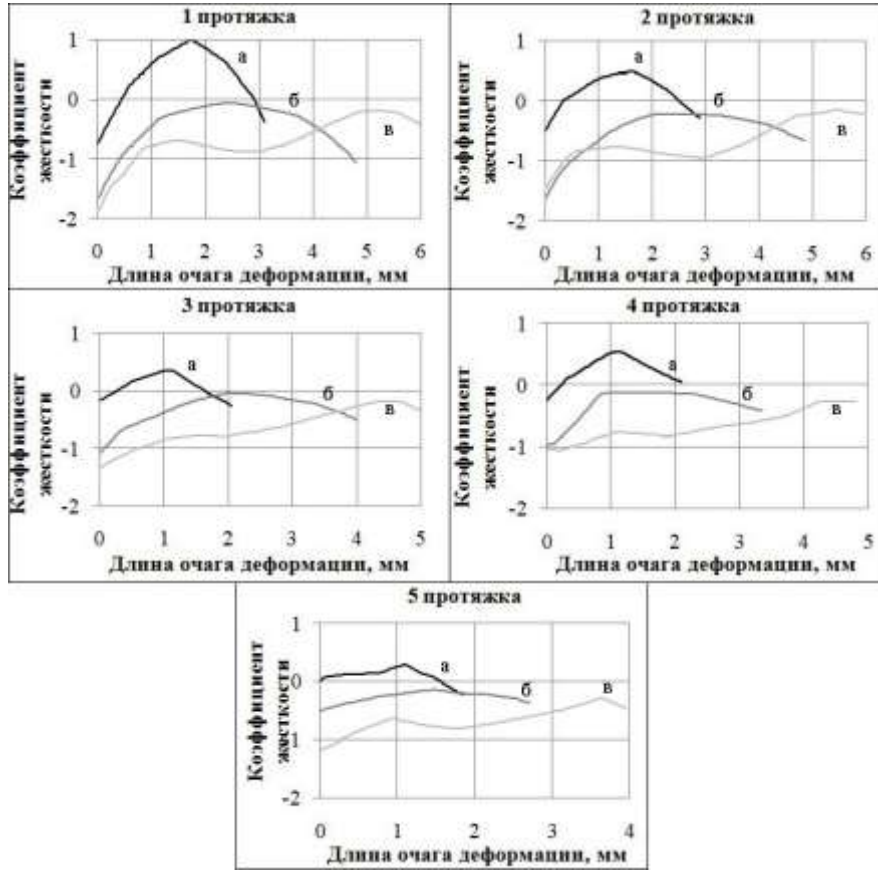


Рис. 2. Изменение коэффициента η по длине ОД при различных значениях угла 2α при волочении по маршруту I: а – $2\alpha = 12^\circ$; б – $2\alpha = 8^\circ$; в – $2\alpha = 6^\circ$ 243

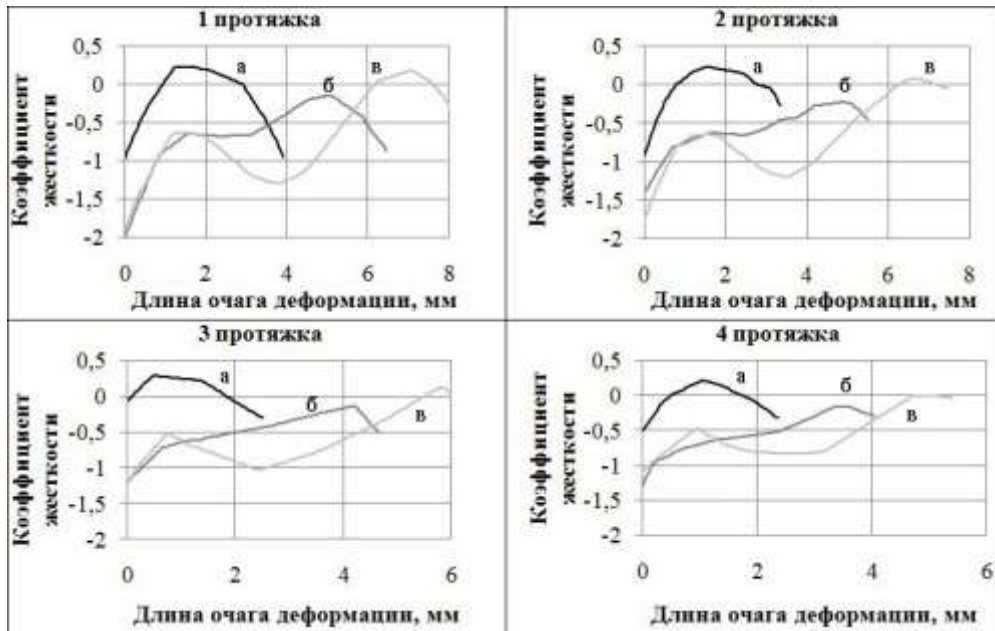


Рис. 3. Изменение коэффициента η по длине ОД при различных значениях угла 2α при волочении по маршруту II: а – $2\alpha = 12^\circ$; б – $2\alpha = 8^\circ$; в – $2\alpha = 6^\circ$

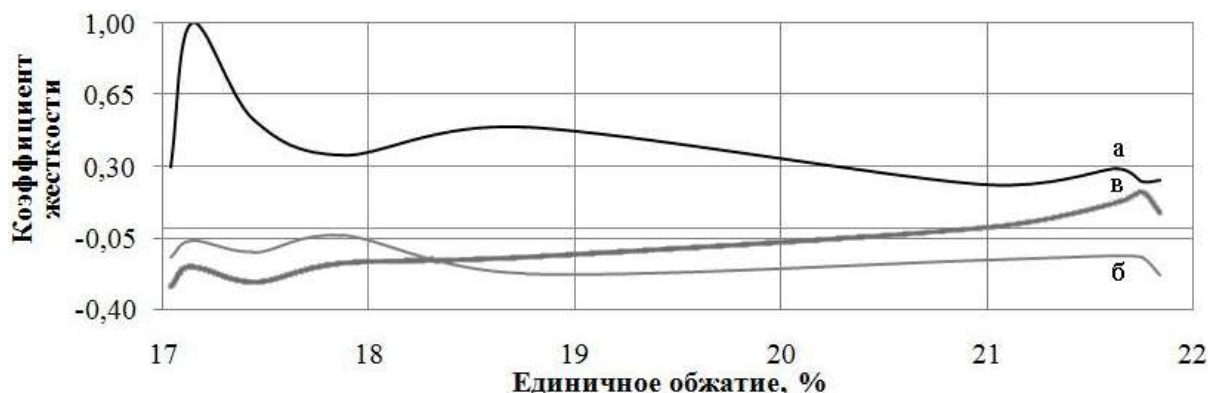


Рис. 4. Величина коэффициента η при различных значениях $q_{ед}$ и угла 2α : а – $2\alpha = 12^\circ$; б – $2\alpha = 8^\circ$; в – $2\alpha = 6^\circ$

С ростом единичных обжатий величина зоны растяжения в целом снижается при протяжке через волоки с углом $2\alpha = 12^\circ$, отсутствует при использовании волок с $2\alpha = 8^\circ$ и несколько повышается при $2\alpha = 6^\circ$. Появление зоны растяжения при $2\alpha = 6^\circ$, вероятно, связано с тем, что конусы основных линий течения металла (рис. 1) заходят один за другой, и в месте их пересечения вновь образуется зона преимущественно растягивающих напряжений. Однако данное предположение требует дополнительных исследований. Согласно полученным при моделировании данным, угол $2\alpha = 8^\circ$ способствует минимизации зоны с преобладающими растягивающими напряжениями в очаге деформации, то есть созданию напряженного состояния с преимущественно сжимающими напряжениями (рис. 4). Применение волок с углом рабочего конуса $2\alpha = 12^\circ$ приводит к образованию в очаге деформации зоны растяжения, максимальное значение которой достигает 2,6 мм при единичном обжатии 17,8%. Дальнейшее повышение $q_{ед}$, в целом, способствует уменьшению величины h .

Результаты расчета напряженного состояния в центральных слоях очага деформации (вдоль оси волочения) с помощью коэффициента Лодэ-Надаи μ_σ показывают, что при рассматриваемых значениях единичных обжатий величина μ_σ для $2\alpha = 12^\circ$ лежит в диапазоне [-1,00; -0,82], для $2\alpha = 8^\circ$ – в диапазоне [-1,00; -0,73], а для $2\alpha = 6^\circ$ – в диапазоне [-1,00; -0,80]. Следовательно, действует схема преимущественно растягивающих напряжений.

Учитывая значения коэффициента жесткости η и величину зоны растяжения h , наиболее рациональным станет волочение проволоки по маршруту I с применением волок с углом $2\alpha = 8^\circ$.

Расчетные значения коэффициента запаса прочности n для всех рассмотренных вариантов волоче-

ния приведены на рис. 5. На всех вариантах они находятся в допустимых пределах и не являются ограничением для выбора.

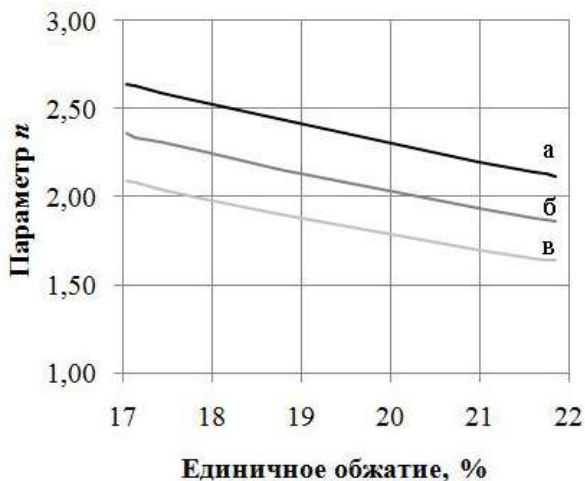


Рис. 5. Расчетные значения коэффициента запаса прочности n : а – $2\alpha = 12^\circ$; б – $2\alpha = 8^\circ$; в – $2\alpha = 6^\circ$

Для выбора единичных обжатий, обеспечивающих наиболее равномерное напряженное состояние металла в ОД при волочении проволоки из стали марки 51ХФА, нами предлагается использовать следующую зависимость, полученную на основе результатов моделирования (для $2\alpha = 8^\circ$):

$$\eta = 0,2712 \cdot \ln\left(\frac{0,07}{q_{ед}} \cdot (1 + \sqrt{1 - q_{ед}})^2\right) - 0,2099, \quad (3)$$

где η – коэффициент жесткости; $q_{ед}$ – единичное обжатие.

По результатам, полученным при моделировании волочения проволоки диаметром 4,80 мм из стали марки 51ХФА, было установлено, что уменьшение угла 2α с 12° до 6° приводит к снижению параметра Δ от максимального значения 2,24 до минимального 1,01 для маршрута I и от 1,78 до 0,85 для маршрута II.

С целью оценки энергозатрат при выборе рационального маршрута волочения произведен расчет усилия волочения проволоки приведенной в работе [7]:

$$P_{\text{вол}} = F_n \cdot \Phi_{\text{дон}} \cdot \sigma_B^{\text{сп}} \cdot \ln\left(\frac{F_{n-1}}{F_n}\right) \cdot (1 + f \cdot \text{ctg}\alpha), \quad (4)$$

где F_{n-1} и F_n – начальная и конечная площадь поперечного сечения проволоки, мм^2 ; $\Phi_{\text{дон}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительную работу пластической деформации сдвига; $\sigma_B^{\text{сп}}$ – среднее значение сопротивления пластической деформации за обжатие, зависящее от величины предшествующей деформации, Н/мм^2 ; f – коэффициент контактного трения; α – полуугол рабочего конуса волюки, град.

Результаты вычислений $P_{\text{вол}}$ в сравнении с полученными при моделировании в программном комплексе Deform-3d, приведены на рис. 6.

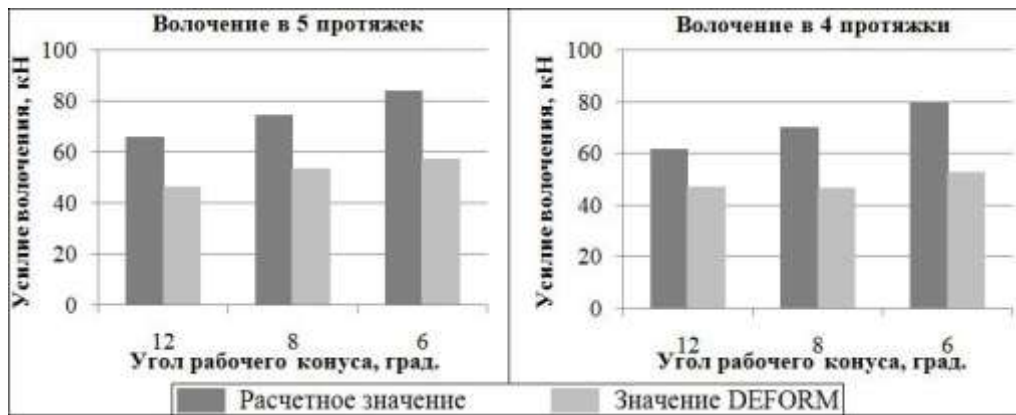


Рис. 6. Величина усилия волочения при различных вариантах моделирования волочения проволоки

Волочение проволоки в реальных условиях осуществляется на волочильных станах с максимальной мощностью двигателя 55 кВт. Согласно методике, изложенной в работе [8], была рассчитана затрачиваемая мощность N при волочении проволоки по маршрутам I и II. С учетом максимальной мощности двигателя волочильного стана наиболее рациональным вариантом является волочение проволоки в 5 протяжек

с применением волок с углом рабочего конуса $2\alpha = 8^\circ$. При этом расчетное значение мощности составит от 50 до 52 кВт.

Предлагаемая методика позволяет проектировать маршруты волочения, задавая напряженное состояние исключающее разрушение центральных слоев проволоки, что является особенно актуальным при волочении проволоки больших диаметров и высокопрочной стали.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Чеэрова, М.Н. Закономерности формирования зерна аустенита и их применение для повышения структурной однородности и качества пружинной проволоки: дис. ... канд. техн. наук / М.Н. Чеэрова. Нижний Новгород, 2008. – 288 с.
2. Совершенствование режимов деформации и инструмента при волочении круглой проволоки : монография / Харитонов В.А., Манякин А.Ю., Чукин М.В., Дремин Ю.А., Тикеев М.А., Усанов М.Ю. Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 174 с.
3. Харитонов, В.А. Производство пружинной проволоки. / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. – 151 с.
4. Губкин, С.И. Теория обработки металлов давлением / С.И. Губкин. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы черной и цветной металлургии, 1947. – 533 с.
5. Смирнов-Аляев, Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1978. – 368 с.
6. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – М.: Издательство иностранной литературы, 1954. – 648 с.
7. Битков, В.В. Технология и машины для производства проволоки / В.В. Битков. –Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 343 с.
8. Ресурсосбережение в метизном производстве (теория и практика работы Белорецкого металлургического комбината): Коллективная монография / В.И. Зюзин, Н.А. Клековкина, В.А. Харитонов и др. – Магнитогорск: МГТУ, 2001. – 163 с.