

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 621.771

Л.В. Радионова

Южно-Уральский государственный университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ ИЗГИБОМ В МНОГОРОЛИКОВОМ УСТРОЙСТВЕ

Аннотация. В статье описана математическая модель знакопеременной деформации изгибом проволоки на многороликовом устройстве. С помощью разработанной модели можно определить величину пластической зоны деформации изгибом в зависимости от диаметра проволоки и конструктивных особенностей роликового устройства, а также усилие протяжки проволоки через него. Предложенная модель позволяет выбирать конструкцию роликового устройства в зависимости от технологических параметров, а именно усилия протяжки через роликовое устройство, величины пластической зоны знакопеременной деформации в сечении проволоки и ее механических свойств.

Ключевые слова: волочение, проволока, знакопеременная деформация изгибом, многороликовое устройство.

MATHEMATICAL MODELING OF SIGN-VARIABLE BENDING DEFORMATION IN A MULTI-ROLLER DEVICE

Abstract. This article describes a mathematical model of the sign-variable bending deformation the wire on a multi-roller device. The model is used to calculate the zone of plastic deformation on the cross section of the wire and the pulling force through the multi-roller device. The calculation is depending on diameter of the wire and design the multi-roller device. The developed model enables you to choose design the multi-roller device according to process parameters: the pulling force, the necessary size of the zone of plastic deformation and mechanical properties of the wire.

Keywords: drawing, wire, sign-variable bending deformation, multi-roller device.

Основным способом получения проволоки различного назначения в настоящее время является волочение в монолитной волоке. Этот способ отличается относительной простотой, хорошо изученной теоретической и практической базой. Для его осуществления имеется необходимое оборудование, освоено производство инструмента. Однако волочение в монолитной волоке является процессом консервативным, так как в процессе обработки практически отсутствует возможность активного управления напряженно-деформированным состоянием в очаге деформации, которое в значительной степени определяет качество готовой продукции и эффективность процесса.

Деформация изгибом при обработке металлов давлением проводится для достижения различных целей, таких, как снятие остаточных напряжений (рихтовка), удаление окалины, производство проволоки растяжением с изгибом, а также может быть использована в качестве упрочняющей – разупрочняющей обработки [1 – 6].

По результатам обзора, сделанного в работе [1], в качестве устройства, позволяющего осуществлять знакопеременную деформацию, наиболее простым и эффективным является роликовое устройство.

Целью настоящей работы является разработка математической модели многороликового устройства, которая позволила бы определить проработку сечения проволоки знакопеременной деформацией изгибом,

требуемое количество роликов, необходимую и достаточную кривизну проволоки на роликах, усилие протяжки проволоки через роликовое устройство.

При обработке проволоки на многороликовом устройстве материал ее испытывает упругопластическую деформацию многократного переменного изгиба и растяжения.

Проволока при движении по роликам непрерывно изменяет свою кривизну как по величине, так и по знаку. Наибольшую кривизну она приобретет при переходе через ролики в точках плотного прилегания, здесь изгибающие напряжения достигают максимальной величины (рис. 1).

Поскольку проволока непрерывно движется, то все ее сечения проходят участки наибольшей кривизны и, таким образом, по всей длине она испытывает в разное время одинаковую наибольшую деформацию изги-

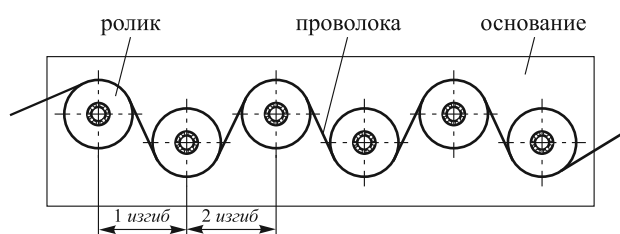


Рис. 1. Роликовое устройство для знакопеременной деформации изгибом

ба [5, 7]. Наряду с изгибом проволока испытывает также и растяжение. Диаграмма растяжения проволоки позволяет установить связь между напряжениями σ и деформациями ε . Однако она неудобна для пользования при расчетах, поэтому по ее данным может быть построена схематизированная диаграмма (рис. 2), согласно которой

$$\sigma = E\varepsilon \text{ при } \varepsilon \leq \varepsilon_{0,2};$$

$$\sigma = \sigma_{0,2} + E_1(\varepsilon - \varepsilon_{0,2}) \text{ при } \varepsilon \leq \varepsilon_{0,2},$$

где E – модуль упругости первого рода; E_1 – модуль упрочнения; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; $\varepsilon_{0,2}$ – относительная линейная деформация, соответствующая $\sigma_{0,2}$.

Рассмотрим напряжения в точках упругой и упруго-пластической зон поперечного сечения проволоки радиусом r , а также определим границу этих зон y_T (рис. 3).

Напряжение в упругой зоне поперечного сечения при $y \leq y_{T1}$ определяется по формуле

$$\sigma_1^y = E\chi_1 y = E \frac{y}{\rho}, \quad (2)$$

где $\chi_1 = \frac{1}{\rho}$ – кривизна осевой линии проволоки в месте плотного облегания ролика при первичном изгибе; ρ – радиус кривизны; y_{T1} – ордината границы упругой и пластической зон при первичном изгибе.

На границе упругой и упруго-пластической зон, т.е. при $y = y_{T1}$, имеем

$$\sigma_1^{y_{T1}} = E\chi_1 y_{T1} = \sigma_{0,2}. \quad (3)$$

Откуда получим $y_{T1} = \pm \frac{\sigma_{0,2}}{E\chi_1} = \frac{2\sigma_{0,2}}{Ed}$.

Из равенства (3) также следует, что пластические деформации при первичном изгибе начинают появляться, когда кривизна будет

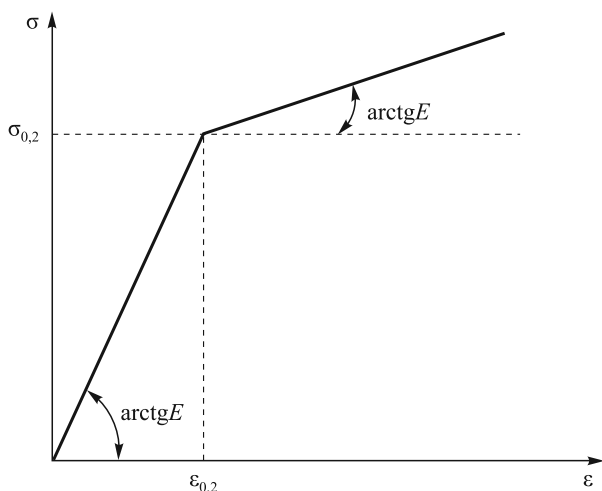


Рис. 2. Схематизированная диаграмма растяжения

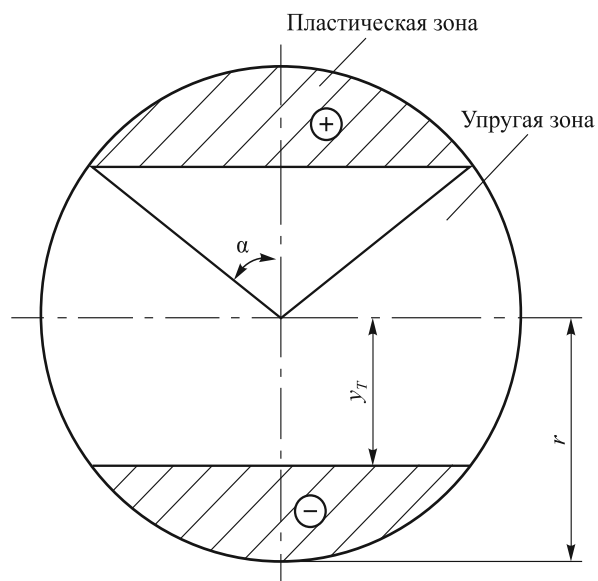


Рис. 3. Сечение проволоки

$$\chi \geq \frac{\sigma_{0,2}}{Ey_{\max}} = \frac{2\sigma_{0,2}}{Ed} \quad (4)$$

или

$$\rho_{T1} \leq \frac{Ed}{2\sigma_{0,2}}, \quad (5)$$

где ρ_{T1} – величина радиуса кривизны осевой линии проволоки, при которой начинают появляться пластические деформации первичного изгиба; d – диаметр проволоки.

Напряжения в пластической зоне поперечного сечения в соответствии с принятой схематизированной диаграммой упругого линейно-упрочняющегося тела определяются формулой

$$\sigma^{\text{пл}} = \sigma_{0,2} + E_1(\varepsilon - \varepsilon_{0,2}), \quad (6)$$

или, учитывая, что $\varepsilon_{0,2} = \frac{\sigma_{0,2}}{E}$, $\varepsilon = \chi_1 y$ и вводя обозначение $\lambda = 1 - \frac{E_1}{E}$, получим

$$\sigma^{\text{пл}} = \sigma_{0,2}\lambda + E_1\chi_1 y. \quad (7)$$

Наибольшее нормальное напряжение будет равно

$$\sigma^{\text{пл}} = \sigma_{0,2}\lambda + E_1\chi_1 y_{\max}. \quad (8)$$

Изгибающий момент в поперечном сечении проволоки на участке наибольшей кривизны при первичном изгибе будет равен

$$M_{\text{ил}} = \int_F \sigma y dF = \int_{F_y} \sigma^y y dF + \int_{F_{\text{пл}}} \sigma^{\text{пл}} y dF = (EI_{z1}^y + E_1 I_{z1}^{\text{пл}}) \chi_1 + 2\sigma_{T.V.} \lambda S_{z1}^{\text{пл}},$$

где F – площадь сечения проволоки; $I_{z1}^y = I_z - I_{z1}^{пл}$, I_{z1}^y – осевой момент инерции площади упругой зоны сечения; I_z – осевой момент инерции площади сечения относительно нейтральной линии (оси z); $I_{z1}^{пл}$ – осевой момент инерции площади пластической зоны сечения; $I_z = \frac{\pi d^4}{64}$; $I_{z1}^{пл} = 2 \frac{1}{2} \frac{F r^2}{4} \left(1 + \frac{2 \sin^3 \alpha \cos \alpha}{\alpha - \sin \alpha \cos \alpha} \right)$, где $\frac{1}{2} F = \frac{r^2}{2} (2\alpha - \sin 2\alpha)$; α – угол при ординате границы упругой и пластической зон y_T (см. рис. 3), $\alpha = \arccos \frac{y_T}{R}$; $S_{z1}^{пл}$ – статический момент площади растянутой (сжатой) части пластической зоны $S_{z1}^{пл} = \frac{2}{3} r^3 \sin^3 \alpha$.

Догрузка растяжением происходит упруго для всех точек сечения.

При $\varepsilon \leq \varepsilon_{0,2}$

$$\sigma_{раст} = E \varepsilon_{раст}, \quad (9)$$

где

$$\varepsilon_{раст} = \frac{4Q}{\pi d^2 E}, \quad (10)$$

где Q – усилие протяжки.

Следовательно,

$$\sigma_{раст1} = \frac{4Q_1}{\pi d^2}. \quad (11)$$

Для определения усилия протяжки можно воспользоваться формулой [8]

$$Q = \frac{0,34 \sigma_{0,2} d^3}{R+r} \left(1 + f \frac{R_1}{R} \right) n, \quad (12)$$

где $f \frac{R_1}{R}$ – трение в подшипниках роликов; n – число роликов. В данной формуле величина $R+r$ есть радиус кривизны проволоки при достаточно большом угле охвата ролика проволокой. Поскольку в рассматриваемом случае угол охвата должен быть минимальным, но позволяющим охватить знакопеременной деформацией все сечение проволоки, то величину $R+r$ следует заменить величиной ρ , определяемой непосредственно на роликовом устройстве для проволоки конкретного диаметра, что позволит получить более достоверное значение усилия протяжки через роликовое устройство:

$$Q = \frac{0,34 \sigma_{0,2} d^3 n}{\rho}.$$

Максимальное нормальное напряжение, создаваемое изгибом и растяжением, определяется как

$$\sigma_{max1}^{пл*} = \pm \sigma_{max1}^{пл} + \sigma_{раст1}. \quad (13)$$

Для упругой зоны $y \leq y_{T1}$ нормальное напряжение от изгиба и растяжения равно

$$\sigma_1^{y*} = \pm \sigma_1^y + \sigma_{раст1}. \quad (14)$$

Остаточные напряжения в проволоке могут быть определены в соответствии с теоремой А.А. Илюшина [9] разностью напряжений, возникающих при нагружении и разгрузке:

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1^* - \sigma_{разгр}. \quad (15)$$

Тогда справедливы выражения:

– для упругой зоны $y \leq y_{T1}$

$$\bar{\sigma}_1^{y*} = \sigma_1^{y*} - \sigma_{разгр1}^y = E \chi_1 y - \frac{M_{u1} y_{T1}}{I_{z1}}; \quad (16)$$

– для пластической зоны $y > y_{T1}$

$$\bar{\sigma}_1^{пл*} = \sigma_1^{пл*} - \sigma_{разгр1}^{пл} = \sigma_{0,2} \lambda + E_1 \chi_1 y - \frac{M_{u1} y_{max}}{I_{z1}}. \quad (17)$$

После прохождения первого ролика устройства проволока имеет остаточную кривизну

$$\chi_{ост1} = \chi_1 - \chi_{разгр1} = \chi_1 - \frac{64 M_{u1}}{E \pi d^4}. \quad (18)$$

Кривизна на втором ролике равна

$$\chi_2 = \chi_{ост1} + \chi_{изг}. \quad (19)$$

Изгибающий момент на втором ролике

$$M_{u2} = (E I_{z2}^y + E_1 I_{z2}^{пл}) \chi_2 + 2 \sigma_{0,2} \lambda S_{z2}^{пл}. \quad (20)$$

Ордината границы упругой и пластической зон сечения будет равна

$$y_{T2} = \pm \frac{\sigma_{0,2}}{E \chi_2}. \quad (21)$$

Угол $\alpha_2 = \arccos \frac{y_{T2}}{r}$.

Находим $\sigma_{раст2} = \frac{4Q_2}{\pi d^2}$ и, следовательно, нормальные напряжения на втором ролике будут равны

$$\sigma_{max2}^{пл*} = \pm \sigma_{max2}^{пл} + \sigma_{раст2}; \quad (22)$$

$$\sigma_2^{y*} = \pm \sigma_2^y + \sigma_{раст2}. \quad (23)$$

Напряжения разгрузки на втором ролике определяются как

$$\sigma_{разгр2}^y = \frac{M_{u2} y_{T2}}{I_z}; \quad (24)$$

$$\sigma_{разгр2}^{пл} = \frac{M_{u2} y_{max}}{I_z}. \quad (25)$$

Остаточные напряжения после второго ролика будут равны

$$\bar{\sigma}_2^{y*} = \sigma_2^{y*} - \sigma_{\text{разгр}2}^y \quad (26)$$

и

$$\bar{\sigma}_2^{\text{пл}*} = \sigma_2^{\text{пл}*} - \sigma_{\text{разгр}2}^{\text{пл}}. \quad (27)$$

Ординату точки перехода упругих деформаций в пластические с учетом остаточных напряжений определим по формуле

$$y_2 = \frac{\varepsilon_{0,2} y_1}{\frac{(\varepsilon_{\text{max}} + \varepsilon_{\text{ост}}) y_1}{r + \varepsilon_{\text{оступ}}}}. \quad (28)$$

Остаточные деформации определяются как

$$\varepsilon_{\text{ост}1}^y = \frac{\sigma_{\text{ост}}^y}{E}; \quad (29)$$

$$\varepsilon_{\text{ост}1}^{\text{max}} = \frac{\sigma_{\text{ост}}^{\text{max}}}{E}. \quad (30)$$

Деформация в точке y_2 определится как

$$\varepsilon_{y_2} = \frac{\varepsilon_{\text{max}2} y_1}{r} + \varepsilon_{\text{ост}}, \quad (31)$$

где

$$\varepsilon_{\text{max}2} = \frac{\sigma_2^{\text{пл}} - \sigma_{0,2}}{E_1} + \varepsilon_{0,2}. \quad (32)$$

Максимальное напряжение на втором ролике с учетом остаточных напряжений от первого ролика определяется по формуле

$$\sigma_{\text{изг+ост}2}^{\text{max}} = \sigma_{0,2} + E_1 \left(\varepsilon_{\text{max}2} + \varepsilon_{\text{ост}1} - \frac{\sigma_{0,2}}{E} \right). \quad (33)$$

Ордината границы упругой и пластической зон сечения будет равна

$$y_{T2} = \pm \frac{\sigma_{0,2}}{E\chi_2}. \quad (34)$$

Остаточные напряжения после изгиба на втором ролике определяются аналогично остаточным напряжениям после первого ролика (рис. 4).

Рабочие нормальные и остаточные напряжения для третьего, четвертого и т.д. роликов считаются аналогично напряжениям второго ролика.

Поскольку величина напряжений растяжения составляет в случае рассматриваемого роликового устройства менее 10 %, а расчеты с учетом растягивающих напряжений значительно усложняются, то напряжения растяжения учитывать не будем.

С помощью разработанной математической модели могут быть рассчитаны параметры роликового устройства. При этом в ходе выбора параметров роликового устройства необходимо достигать максимальной пластической проработки сечения проволоки без создания большого усилия протяжки Q и исключить обрывы проволоки на роликах, т.е. $\sigma_{\text{изг+ост}}^{\text{max}} < \sigma_B$. Пример результатов расчета параметров роликового устройства для обработки проволоки диаметром 3,1 мм приведен в табл. 1. Следует отметить, что шестирольковое устройство обеспечивает полноценное огибание только пяти роликов (см. рис. 1).

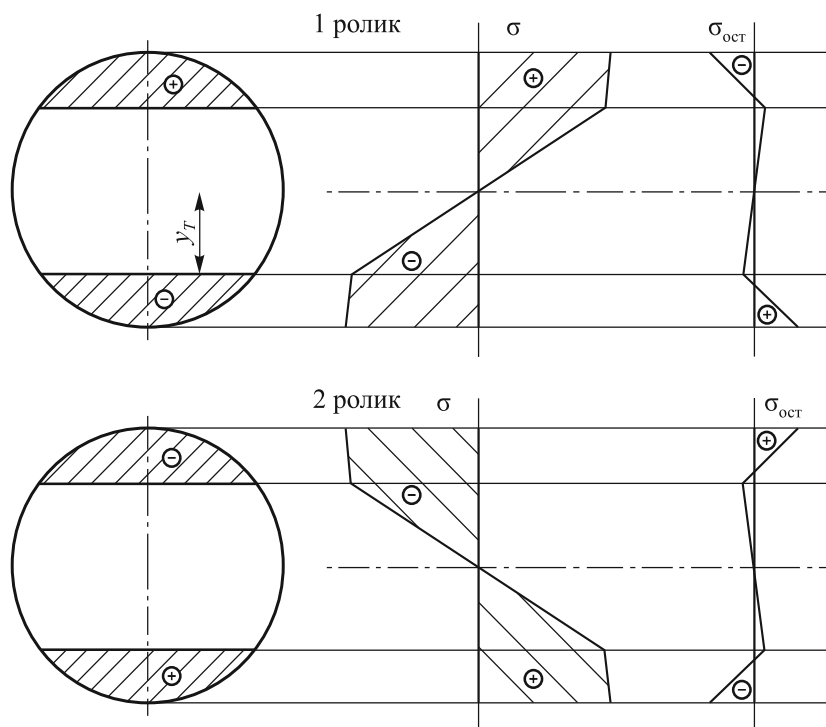


Рис. 4. Эпюры нормальных и остаточных напряжений

Таблица 1

Результаты расчета параметров настройки роликового устройства на математической модели

Номер ролика	Граница упругой зоны в проволоке, y_T , мм	Напряжения, возникающие в проволоке, $\sigma_{изг+ост}^{max}$, МПа	Усилие протяжки, Q , Н
1	–	–	–
2	0,56	1555	101
3	0,40	1573	203
4	0,31	1607	405
5	0,25	1640	608
6	0,22	1672	810

Исходные данные для расчета:

- диаметр обрабатываемой проволоки $d = 3,1$ мм;
- предел текучести металла $\sigma_{0,2} = 1500$ МПа;
- модуль нормальной упругости $E = 200\ 000$ МПа;
- модуль упрочнения $E_1 = 4000$ МПа;
- радиус кривизны проволоки на роликах $\rho = 75$ мм.

Для проверки адекватности разработанной математической модели был проведен лабораторный эксперимент, в ходе которого определялось усилие протяжки через роликовое устройство проволоки диаметром 4,10; 3,10; 2,70 и 2,40 мм (табл. 2) и сравнивалось с рассчитанным на математической модели. Для проведения лабораторных исследований использовался стан однократного волочения ВСМ 1/550. Усилие протяжки в ходе лабораторного эксперимента измерялось с помощью разработанного ранее устройства [10] и метода расчета, приведенного в работе [11]. Из табл. 2 видно, что усилия протяжки, полученные расчетным и экспериментальным путем, имеют достаточно высокую сходимость. Следовательно, разработанную модель можно использовать для технологических расчетов.

Таким образом, предложена математическая модель напряженно-деформированного состояния проволоки при протяжке через многороликовое устройство. Модель позволяет определить величину пластической зоны деформации изгибом в зависимости от диаметра проволоки и конструктивных особенностей роликового устройства, а также усилие протяжки проволоки через него. Также с помощью разработанной модели можно выбрать конструкцию роликового устройства в зависимости от технологических параметров, а именно усилия протяжки через роликовое устройство, величины

Таблица 2

Сравнение экспериментальных и расчетных усилий протяжки через шестироликовое устройство

Диаметр проволоки, d , мм	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Усилие протяжки расчетное, $Q_{расч}$, Н	Усилие протяжки экспериментальное, $Q_{эксп}$, Н
4,1	1000	1230,5	1250
3,1	1500	817,4	830
2,7	1590	560,4	570
2,4	1680	413,5	420

пластической зоны знакопеременной деформации в сечении проволоки, ее механических свойств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Харитонов В.А., Радионова Л.В., Зюзин В.И. Анализ процессов волочения проволоки с комбинированным нагружением. – Магнитогорск: МГТУ, 1999. – 40 с.
2. Колпак В.П., Суходольская Т.Ю. и др. Влияние механического воздействия на свойства сварочной проволоки // Металлургия и коксохимия. – Киев: Техника, 1987. Вып. 92. С. 23 – 26.
3. Гуль Ю.П., Перчун Г.И. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1990. № 3. С. 105.
4. Грачев С.В. Термическая обработка и сопротивление сплавов повторному нагружению. – М.: Металлургия, 1976. – 152 с.
5. Бояршинов М.Г., Киреев Е.М., Никифоров Б.А., Трусов П.В. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1984. № 10. С. 63 – 67.
6. Пат. 2183523 РФ. Способ изготовления высокоуглеродистой проволоки / Радионова Л.В., Харитонов В.А., Зюзин В.И. 2002. Бюл. № 17.
7. Туленков Ф.К. Об изменении напряженного состояния проволоки в процессе рихтовки ее на промежуточных этапах волочения // Стальные канаты: Межвуз. сб. – Киев: Техника, 1964. Вып. 1. С. 272 – 286.
8. Тарнавский А.Л. // Сталь. 1965. № 2. С. 182 – 184.
9. Илюшин А.А. Механика сплошной среды. 2-е изд. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 288 с.
10. Радонов А.А., Усатый Д.Ю., Сарваров А.С., Андросенко В.В. Определение момента на валу асинхронного двигателя при экспериментальных исследованиях. // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. Вып. 5. С. 125 – 129.
11. Радионова Л.В., Харитонов В.А. Проектирование ресурсосберегающих технологий производства высокопрочной углеродистой проволоки на основе моделирования. – Магнитогорск: МГТУ, 2008. – 171 с.

© 2013 г. Л.В. Радионова
Поступила 4 февраля 2013 г.