

мента;  $V_1$  – объем пластической зоны;  $V_2$  – объем жесткопластической зоны;

$S_2$  – поверхность  $0 \leq x \leq x^*$ ,  $y=0$ ;

$S_3$  – поверхность  $x^* \leq x \leq S_1$ ,  $y=F_1(x)$ ;

$S_4$  – поверхность  $S_1 \leq x \leq S_2$ ,  $y=F_1(x)$

$S_6$  – поверхность  $0 \leq x \leq S_4$ ,  $y=F_2(x)$ ;

$S_7$  – поверхность  $x^* \leq x \leq S_1$ ,  $y=0$ ;

$S_8$  – поверхность  $x=S_1$ ,  $0 \leq y \leq h_1$ .

Действительное температурное поле  $\theta_1(x, y)$ ,  $\theta_2(x, y)$  дает минимум функционалу (18). Минимизацию функционала (18) целесообразно провести методом Рунта. Зададим температуру в виде:

$$\theta_1 = \theta_0 + \sum_{k=1}^{N_A} A_k a_k(x, y); \quad (19)$$

$$\theta_2 = \theta_0 + \sum_{k=1}^{N_A} A_k a_k(x, y) + \sum_{k=1}^{N_B} B_k b_k(x, y)$$

где  $a_k(x, y)$ ,  $b_k(x, y)$  – функции координат;  $A_k$ ,  $B_k$  – варьируемые постоянные.

После подстановки (19) в выражение (18) и взятия интегралов функционал становится функцией варьируемых параметров  $A_k$ ,  $B_k$  и его минимум находится путем решения относительно  $A_k$ ,  $B_k$  систем уравнений:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial A_k} = 0, \quad k = 1, \dots, N_A; \quad (20)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial B_k} = 0, \quad k = 1, \dots, N_B.$$

Уравнение (20) представляют собой систему линейных алгебраических уравнений вида:

$$\sum_{l=1}^{N_A} F_{kl}^{(AA)} A_l + \sum_{l=1}^{N_B} F_{kl}^{(AB)} B_l = F_k^{(A)}, \quad k = 1, \dots, N_A; \quad (21)$$

$$\sum_{l=1}^{N_A} F_{kl}^{(BA)} A_l + \sum_{l=1}^{N_B} F_{kl}^{(BB)} B_l = F_k^{(B)}, \quad k = 1, \dots, N_B,$$

где коэффициенты  $F$  представляют из себя суммы объемных и поверхностных интегралов от координатных функций  $a_k$ ,  $b_k$ . Функции  $a_k$ ,  $b_k$  должны выбираться так, чтобы точно выполнялись граничные условия (10) и (15).

Решение этих уравнений с применением программного обеспечения не представляет трудностей и может использоваться при проектировании технологических процессов непрерывного прессования металлов методом Конформ.

#### Список литературы

1. Современные способы непрерывного прессования труб, профилей и проволоки / Локшин М.З., Шамраев В.Н., Авдеев В.В., Богатов В.Ю. // Технология легких сплавов. 1992. №10. С. 60–65.
2. Горохов Ю.В., Солопко И.В., Суслов В.П. Расчет минимальной длины контейнера при непрерывном прессовании способом «Конформ» // Цветные металлы. 2010. №10. С. 81–85.
3. Определение температуры металла в очаге деформации при непрерывном прессовании методом Конформ / Горохов Ю.В., Сергеев В.М., Гилевич Ф.С. и др. // Технология легких сплавов. 1989. №12. С. 27–29.
4. Особенности пластического течения материала заготовки в деформационной зоне при непрерывном прессовании способом «Конформ» / Горохов Ю.В., Солопко И.В., Суслов В.П., Крылов М.А. // Цветные металлы. 2010. №12. С. 69–71.

#### Bibliography

1. Lokshin M. Z, Shamraev V. N, Avdeev V. V, Bogatov V. Ju. Modern ways of continuous pressing of pipes, profiles and a wire // Technology of easy alloys. 1992. №10. P.60–65.
2. Gorohov J.V., Solopko I.V., Suslov V.P. Raschet of the minimum length of the container at continuous pressing by way «Konform» // Nonferrous metals, 2010. №10. P.81–85.
3. Definition of temperature of metal in the deformation center at continuous pressing by a method of Konform / Gorohov J.V., Sergeev V. M, Gilevich F.S., etc. // Technology of easy alloys. 1989. №12. P.27–29.
4. Features of a plastic current of a material of preparation in a deformation zone at continuous pressing by way «Konform» / Gorohov J.V., Solopko I.V., Suslov V. P, Krylov M. A. // Nonferrous metals. 2010. №12. P.69–71.

УДК 621.77

Огарков Н.Н., Шеметова Е.С.

## ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ОБОЛОЧКИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ

Выполнен теоретический анализ процесса волочения биметаллической проволоки. Получены теоретические зависимости по определению толщины оболочки, при которой ее материал теряет устойчивость, что, как следствие, приводит к вспучиванию при волочении. Представлены значения полууглов волоки, соответствующие потере устойчивости при деформировании оболочки в зависимости от степени деформации, условий трения оболочки на поверхностях контакта с волокой и сердечником и от показателя упрочнения материала оболочки.

**Ключевые слова:** биметаллическая проволока, плакирующая оболочка, устойчивость деформации, внеконтактная деформация, полуугол волоки.

Run the theoretical analysis of the process of dragging bimetallic wire. Based on the definition of received theoretical shell thickness when her material loses sustainability and as a result, it vsučivaniû with voločenii. Shows the values poluuglov lines corresponding to loss of stability in strain of shell depending on the degree of deformation conditions friction shell on surfaces in contact with volokoj and cored, and from the mechanisms of material shell.

**Key words:** BI-metallic strip wire, plakiruûšaâ shell, sustainability deformation, vnekontaktnaâ deformation, poluugol lines.

Производство биметаллической проволоки требует соблюдения технических условий по толщине и качеству покрытий. Известно, что для каждого материала, характеризующегося склонностью к упрочнению, требуются различные степени обжатия, углы наклона канала рабочей части волоки и определенные условия трения. Чаще всего металл, используемый для покрытий (медь, алюминий, цинк, латунь), мягче металла сердечника (например, стали), поэтому покрытие деформируется интенсивнее и может сопровождаться потерей устойчивости. В таких случаях наблюдается внеконтактная деформация, приводящая к вспучиванию лакирующей оболочки, запрессованию волоки и обрыву проволоки [1–4]. Для устранения этого явления обычно рекомендуют накладывать ограничения на величину обжатия, коэффициента трения и угла наклона конусной части волоки.

Существующие рекомендации по устранению вспучивания лакирующей оболочки являются неоднозначными, поскольку получены в различных условиях волочения и для материалов лакирующей оболочки, склонность к упрочнению которых различна, обобщающих экспериментальных и теоретических исследований до настоящего времени проводилось недостаточно. Имеются лишь единичные теоретические разработки, накладывающие ограничения на условия волочения биметаллической проволоки без вспучивания лакирующей оболочки и, как следствие, без образования внеконтактной деформации.

В настоящей работе предлагается расчетный метод определения допустимых соотношений между углом рабочей части волоки, условиями трения на контакте с волокой, а также размерами сечения биметаллической проволоки и склонностью материала оболочки к упрочнению для условия волочения без ее вспучивания. При решении задачи допускаем, что начало вспучивания оболочки соответствует потере устойчивости материала перед входом под действием продольных напряжений, действующих на оболочку. Предполагаем, что при достижении усилия, соответствующего потере устойчивости, лакирующая оболочка может свободно скользить по сердечнику проволоки. Эффект упрочнения материала оболочки в процессе деформации описываем зависимостью [5–7]:

$$\bar{\sigma} = A(B + \bar{\varepsilon})^n, \tag{1}$$

где  $\bar{\sigma}$  – напряжение текучести материала оболочки;  $A, B$  – коэффициенты;  $\bar{\varepsilon}$  – эффективная деформация;  $n$  – коэффициент упрочнения.

Поскольку средний радиус оболочки перед входом в рабочую часть волоки не изменяется, то:  $d\varepsilon_\theta = 0$ ;  $\varepsilon_h = 0$ .

Из условия постоянства объема имеем  $d\varepsilon_l = d\varepsilon_h$ , или для постоянного соотношения  $\varepsilon_l = \varepsilon_h$ .

Согласно уравнениям Леви – Мизеса [5]

$$\frac{d\varepsilon_l}{\sigma_l - \sigma_\theta} = \frac{d\varepsilon_l}{\sigma_\theta} \text{ или } \varepsilon_l = 2\varepsilon_\theta. \tag{2}$$

Из уравнения (2) следует  $\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}}{2}\sigma_l$  и

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{2}{3}d\varepsilon_l = -\frac{2}{3}d\varepsilon_h.$$

Учитывая, что до входа в рабочую часть матрицы радиус сердечника является постоянным, продольное усилие, действующее на оболочку, определяется зависимостью:

$$P = \pi(R_n^2 - R_e^2)\sigma_l, \tag{3}$$

где  $R_n$  и  $R_e$  – начальные наружный и внутренний радиусы оболочки;  $\sigma_l$  – осевое напряжение оболочки.

Потери устойчивости материала оболочки возникают при условии, когда  $dP = 0$ , т. е.

$$\frac{d\sigma_l}{\sigma_l} = \frac{dh}{h} = -d\varepsilon_h = d\varepsilon_l. \tag{4}$$

В соответствии с условием (4) эффективная деформация и напряжение текучести материала оболочки определяются зависимостями:

$$\bar{\varepsilon} = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}n - B\right) = \frac{2}{\sqrt{3}}\varepsilon_l; \quad \bar{\sigma} = A\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^n = \frac{\sqrt{3}}{2\sigma_h} \tag{5}$$

Толщина оболочки в момент потери устойчивости, а соответственно в начале вспучивания, определяется как:

$$h = (R_n - R_e) \exp\left(\frac{\sqrt{3}}{2}B - n\right). \tag{6}$$

Значения  $h$ , соответствующие потере устойчивости материала оболочки, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Значения текущей толщины оболочки, соответствующие потере устойчивости для различных толщин оболочки и различных показателей упрочнения ее материала при  $B=1$**

$R_0 - R_l$	$n$				
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
0,25	0,537	0,511	0,486	0,462	0,440
0,5	1,075	1,023	0,973	0,925	0,880
1,0	2,15	2,046	1,946	1,851	1,761
2,0	4,302	4,092	3,893	3,703	3,522

Анализ полученных значений показывает, что с увеличением коэффициента упрочнения материала оболочки текущее значение ее толщины, соответствующее потере устойчивости материала оболочки при входе в рабочую часть волоки, уменьшается.

Осевая нагрузка, действующая на оболочку, в момент потери устойчивости равна:

$$P_0 = F_0 \frac{2}{\sqrt{3}} A \left(\frac{2}{\sqrt{3}}n\right)^n \exp\left(\frac{\sqrt{3}}{2}B - n\right), \tag{7}$$

где  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения оболочки.

С учетом размеров поперечного сечения оболочки выражение (7) преобразуется к виду:

$$P_0 = \pi(R_n^2 - R_g^2) \exp\left(\frac{\sqrt{3}}{2}B - n\right) \frac{2}{\sqrt{3}} A \left(\frac{2}{\sqrt{3}}n\right)^n \quad (8)$$

Поведение материала оболочки в очаге деформации и его взаимодействие с сердечником проволоки можно представить как деформацию трубы при волочении с движущейся оправкой (см. рисунок). Усилие волочения трубы  $P_1$  с движущейся оправкой равно [8]:

$$P_1 = \pi \bar{\sigma} (r_n^2 - r_g^2) \left(1 + \frac{\text{tg} \beta + \mu_1}{\text{tg} \alpha - \text{tg} \beta}\right) \ln \left(\frac{R_n - R_g}{r_n - r_g}\right), \quad (9)$$

где  $\mu_1$  – коэффициент трения материала оболочки о рабочую поверхность волоки;  $\beta$  – полуугол наклона внутренней поверхности оболочки при деформации в волоке;  $r_n, r_g$  – соответственно наружный и внутренний радиусы оболочки после волочения.

В практике волочения труб обычно считают, что  $\text{tg} \beta = \mu_2$ , поэтому выражение для силы волочения упрощается:

$$P_1 = \pi \bar{\sigma} (r_n^2 - r_g^2) \left(1 + \frac{\mu_1 + \mu_2}{\text{tg} \alpha - \mu_2}\right) \ln \left(\frac{R_n - R_g}{r_n - r_g}\right), \quad (10)$$

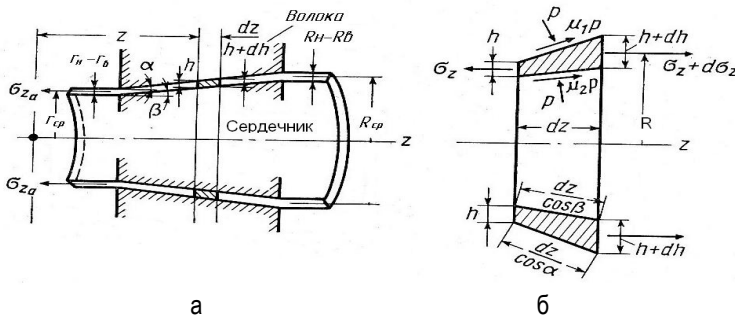
где  $\mu_2$  – коэффициент трения материала оболочки о сердечник проволоки.

Допуская, что усилие, приходящееся на оболочку, равно усилию волочения трубы из материала оболочки, приравняем усилия по зависимостям (8) и (9) и решим относительно полуугла волоки  $\alpha$ :

$$\alpha = \text{arctg} \frac{\mu_1 A \left(\frac{2n}{\sqrt{3}}\right)^n \left(\frac{R_n^2 - R_g^2}{r_n^2 - r_g^2}\right) \exp\left(\frac{2}{\sqrt{3}}B - n\right) + \mu_2 \bar{\sigma} \ln \left(\frac{R_n - R_g}{r_n - r_g}\right)}{A \left(\frac{2n}{\sqrt{3}}\right)^n \left(\frac{R_n^2 - R_g^2}{r_n^2 - r_g^2}\right) \exp\left(\frac{\sqrt{3}}{2}B - n\right) - \bar{\sigma} \ln \left(\frac{R_n - R_g}{r_n - r_g}\right)}$$

Или с учетом уравнения (5) получим

$$\alpha = \text{arctg} \frac{\mu_1 \left(\frac{R_n^2 - R_g^2}{r_n^2 - r_g^2}\right)^n \exp\left(\frac{2}{\sqrt{3}}B - n\right) + \mu_2 \ln \left(\frac{R_n - R_g}{r_n - r_g}\right)}{\left(\frac{R_n^2 - R_g^2}{r_n^2 - r_g^2}\right)^n \exp\left(\frac{\sqrt{3}}{2}B - n\right) - \ln \left(\frac{R_n - R_g}{r_n - r_g}\right)} \quad (11)$$



а – схема волочения оболочки; б – схема сил, действующих на элемент оболочки

Значения полуугла волоки, которые соответствуют потери устойчивости материала оболочки при входе в рабочую часть волоки, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения полууглов волоки для различных толщин оболочки и различных показателей упрочнения ее материала

$R_0 - R_i$	$\mu = 0,05$						
	$n$						
$r_0 - r_i$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
1,1	3,08	3,11	3,13	3,15	3,17	3,19	3,21
1,2	3,27	3,31	3,36	3,4	3,44	3,48	3,51
1,3	3,41	3,48	3,55	3,61	3,66	3,72	3,77
1,4	3,54	3,62	3,7	3,78	3,85	3,92	3,98
$R_0 - R_i$	$\mu = 0,1$						
	$n$						
$r_0 - r_i$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
1,1	6,15	6,20	6,25	6,29	6,33	6,37	6,40
1,2	6,51	6,60	6,69	6,78	6,85	6,93	7,0
1,3	6,81	6,94	7,07	7,18	7,3	7,40	7,50
1,4	7,05	7,22	7,37	7,52	7,67	7,80	7,92
$R_0 - R_i$	$\mu = 0,15$						
	$n$						
$r_0 - r_i$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
1,1	9,18	9,25	9,32	9,39	9,45	9,50	9,56
1,2	9,71	9,85	9,98	10,10	10,22	10,33	10,43
1,3	10,15	10,35	10,53	10,71	10,87	11,03	11,17
1,4	10,51	10,75	10,99	11,21	11,41	11,61	11,79
$R_0 - R_i$	$\mu = 0,2$						
	$n$						
$r_0 - r_i$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
1,1	12,16	12,26	12,35	12,43	12,51	12,58	12,65
1,2	12,86	13,04	13,21	13,37	13,52	13,66	13,79
1,3	13,43	13,68	13,92	14,15	14,36	14,57	14,75
1,4	13,89	14,21	14,51	14,80	15,06	15,32	15,56

Значения полууглов волоки в табл. 2 рассчитаны для значений коэффициентов  $B=1, \mu_1=\mu_2=\mu$ .

Анализ полученных значений показывает, что с увеличением степени обжатия, коэффициентов трения и склонности материала оболочки к упрочнению значения углов волоки, соответствующие потери устойчивости материала оболочки возрастают и, как следствие, увеличивается тенденция к вспучиванию оболочки при входе в рабочую часть волоки при волочении биметаллической проволоки.

Приведенные в таблице данные получены при равных значениях коэффициентов трения материала оболочки о по-

верхность волоки и сердечника, однако из формулы (11) следует, что влияние коэффициентов трения  $\mu_1$  и  $\mu_2$  на изменение угла  $\alpha$  различно. Более интенсивные влияния на изменение угла  $\alpha$  оказывает коэффициент трения материала плакирующей оболочки о рабочую поверхность матрицы.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании волок и разработке технологических процессов волочения биметаллической проволоки, обеспечивающие устойчивый процесс деформации плакирующей оболочки.

#### Список литературы

1. Внеконтактная деформация при волочении биметаллической проволоки с мягким покрытием. Сообщение 1 / Ю.И. Коковихин, М.Г. Поляков, И.Ш. Туктамышев, А.А. Кальченко // Изв. вузов. Черная металлургия. 1976. №2. С. 80–83.
2. Внеконтактная деформация при волочении биметаллической проволоки с мягким покрытием. Сообщение 2 / Ю.И. Коковихин, М.Г. Поляков, И.Ш. Туктамышев, А.А. Кальченко // Изв. вузов. Черная металлургия. 1976. №2. С. 73–75.
3. Шумилин И.М. Условия устойчивого волочения биметаллической проволоки // Сталь. 1977. № 12. С. 1124–1125.
4. Огарков Н.Н., Налимова М.В. Определение условия обратного течения металла при волочении проволоки с покрытием // Моделирование и развитие технологических параметров обработки металлов давлением. 1988. С. 104–111.

5. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.: ил.
6. Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Теория пластичности. М.: Металлургия, 1987. 352 с.
7. Реологические модели как основной элемент моделирования процессов обработки металлов давлением / Смирнов О.М., Тулупов С.А., Цепин М.А. и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2008. Вып. №2. С. 45–52.
8. Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш. Механика пластических деформаций при обработке металлов. М.: Машиностроение, 1968. 504 с.

#### Bibliography

1. Vnekontaktnáá voločenii bimetalličeskoj wire deformation when soft coated. Message 1/Y.I. Kokovihin, M.G. Poles, I. Sh. Tuktamyšev, A.A. Kal'čenko // News unstitutions. The steel industry. 1976. №2. P. 80–83.
2. Vnekontaktnáá voločenii bimetalličeskoj wire deformation when soft coated. Message 2/Y.I. Kokovihin, M.G. Poles, I.Sh. Tuktamyšev, A.A. Kal'čenko // News unstitutions. The steel industry. 1976. №2. P. 73–75.
3. Šumilin I.M. Conditions sustainable dragging bimetalličeskoj wire//Steel. №12.1977. P. 1124–1125
4. Ogarkov N.N., Nalimova M.V. Definition conditions reverse metal voločenii wire coated // Modelling and the development of technological metal processing options. 1988. P.104–111
5. Malinin N.N. Applied the theory of plasticity and creep. 2nd ed., pererab. And dop. «машиностроение»М., «engineering»,1975, 400 p.s il.
6. Arkulis G.E., Dorogobid V.G. Sushko G.E. Plasticity theory. M., 352: Metallurgy, 1987, 3–52 p.
7. The rheological model as the primary element modelling processing metal / Smirnov O.M, Tulupov S.A., and Cepin M.A. // Journal of MG TU. 2008. Vol. №2. P. 45–52.
8. Thomsen E., Young Ch, Kobaāši Sh. Najafzade mechanics plastic deformations when processing metals «engineering», 1968, 504 page.

УДК 621.771.06-589.4

Раскатов Е.Ю.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПИЛИГРИМОВОЙ ПРОКАТКЕ ТРУБ

Поставлена задача и представлена математическая модель процесса прокатки труб на пилигримовых станах. Определены силовые параметры процесса пилигримовой прокатки труб.

**Ключевые слова:** пилигримовая прокатка, напряжения, деформации, калибровка валков, моделирование, усилие прокатки, расчетная модель.

The problem is set and a mathematical model of the process of pilger rolling tubes is represented. The force parameters of pilger rolling tubes are identified.

**Key words:** pilger rolling, stress, working, roll grooving, modeling, roll force, computational model

Одним из основных способов производства бесшовных горячекатаных труб большого и среднего диаметров с разными толщинами стенок является прокатка на установках с пилигримовыми станами. Использование непрерывнолитых заготовок круглого сечения обеспечило значительные преимущества пилигримового способа производства бесшовных труб. В связи с освоением и расширением сортамента труб из легированных и труднодеформируемых марок сталей и сплавов и повышением требований к их качеству необходимо дальнейшее совершенствование технологического процесса производства труб на трубопрокатных установках с пилигримовыми станами для прокатки тонкостенных и толстостенных труб специального назначения и внедрение их в производство.

Основной проблемой, возникающей при пилигримовой прокатке непрерывнолитых заготовок, является обеспечение благоприятной схемы напряженно-деформированного состояния металла в очаге де-

формации, получение высоких механических свойств проката, однородной и мелкозернистой структуры металла, уменьшение поверхностных и внутренних дефектов. В связи с этим, важно определить напряженно-деформированное состояние непрерывнолитого металла в очаге деформации при пилигримовой прокатке, что позволит оценить течение и степень проработки литой структуры металла и возможность раскрытия поверхностных дефектов, то есть прогнозировать качество бесшовных труб. Это позволит также определить закономерности распределения тангенциальных и радиальных напряжений, возникающих в валках пилигримового стана от усилия прокатки.

Пилигримовая прокатка представляет собой периодический процесс, в котором сочетаются элементыковки в начальной стадии процесса и продольной прокатки, и предназначена для производства труб с заданной толщиной стенки. При пилигримовой прокатке цикл деформации гильзы в трубу осуществляет-