

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-ЦИРКОНИЙ

Рудницкий Э.А., Беспалов В.М., Трифоненков А.Л.  
Научный руководитель – д-р техн. наук, проф. Сидельников С. Б.

*Сибирский федеральный университет*

Высокий спрос на кабельную продукцию из алюминиевых сплавов, приводит к распространению исследований в данной отрасли. Так, в рамках Госбюджетной НИР (по конкурсу №218) учеными СУФ, совместно с сотрудниками компании РУСАЛ разработана серия алюминиевых сплавов с различным содержанием циркония, легирование которым сопровождается возникновением уникальных свойств, когда сохраняются высокие значения прочности и электропроводности при температурах свыше 150-200 °С.

Из предложенных сплавов с помощью литейно-прокатного агрегата (г. Иркутск, ОАО «ИрКАЗ») получен пруток диаметром 9,5 мм. Изготовление прутка данного сечения, также возможно с помощью совмещения методов литья, прокатки и прессования на установке СЛИПП (г. Красноярск, ФГАО ВПО СФУ). Полученный пруток является заготовкой для последующего производства проволоки диаметром 2,0 мм.

В данной работе рассчитывается возможный маршрут волочения проволоки необходимых размеров, в основу которого положены исследования механических свойств разработанных сплавов.

Методика расчета основывается на исследованиях, описанных в работах Жилкина В.З., Истомина В.Н. и Гоголя И.С. (1969-1972 г.г.), позволяющих учитывать напряженное состояние в очаге деформации, неравномерность деформации по продольному сечению на входе и выходе из зоны деформации и упрочнение деформируемого металла, выраженное через коэффициент упрочнения ( $k_i^{yup}$ ). Основные формулы и параметры приведены ниже. Напряжение волочения определяется по формуле:

$$\sigma_i^{EOL} = \sigma_{E_{i-1}} \cdot k_i^{EOL},$$

где  $k_i^{EOL}$  – коэффициент напряжения волочения в соответствующем  $i$ -ом переходе, вычисляемый по формуле:

$$k_i^{EOL} = \frac{m(\lambda_i - 1)}{2(m - \cos\alpha)} \cdot \left[ \lambda_i + \frac{k_i^{yup} \frac{(m - \cos\alpha)}{m} - 0,5(\lambda_i - 1)\lambda_i}{1,5\lambda_i - \lambda_i^{3/2} \cdot \frac{\cos\alpha}{m} - 0,5} \right] + \frac{m}{3} \left( \sin\gamma_0 + \frac{k_i^{yup}}{\sqrt{\lambda_i}} \cdot \sin\gamma_{ki} \right)$$

где  $i$  – номер перехода волочения;  $\lambda_i$  – коэффициент вытяжки в  $i$ -ом проходе,  $\lambda_i = \left(\frac{d_i}{d_{i-1}}\right)^2$ ;  $d_i, d_{i-1}$  – диаметры проволоки соответственно до и после деформации;  $\alpha$  – принятый в оптимальной зоне минимальный полуугол волюки;  $m$  – коэффициент комплексной неравномерности деформации,  $m = \frac{\sin(\alpha + \gamma_0)}{\sin\gamma_0}$ ;  $\text{tg}\gamma_0, \gamma_0$  – коэффициент и угол трения на входе в зону деформации;  $\text{tg}\gamma_{ki}, \gamma_{ki}$  – коэффициент и угол трения на

выходе из волоки,  $\text{tg}\gamma_{ki} = \frac{\sqrt{\lambda_i}}{\text{ctg}\gamma_0 - (\sqrt{\lambda_i} - 1) \cdot \text{ctg}\alpha}$ ;  $k_i^{\text{упр}}$  – коэффициент упрочнения,  $k_i^{\text{упр}} = \frac{\sigma_{\text{в}i}}{\sigma_{\text{в}i-1}}$ ;  $\sigma_{\text{в}i}$ ,  $\sigma_{\text{в}i-1}$  – временное сопротивление разрыву до и после в  $i$ -ого перехода волочения.

Коэффициент запаса процесса можно определить двумя способами, зная временное сопротивление разрыву и напряжение волочения на данном переходе, либо через отношение коэффициента упрочнения металла к коэффициенту напряжения волочения в соответствующем переходе:

$$\eta_i^{\text{зап}} = \frac{\sigma_{\text{в}i-1}}{\sigma_i^{\text{вол}}} = \frac{k_i^{\text{упр}}}{k_i^{\text{вол}}}$$

Для выбора оборудования надо знать нагрузку на электродвигатель привода машины, поэтому необходимо рассчитать мощность волочения по переходам волочения, которую будем определять по следующей формуле (кВт):

$$N_i^{\text{вол}} = v_i^{\text{сек}} \cdot \sigma_i^{\text{вол}},$$

где  $v_i^{\text{сек}}$  – секундный расход металла,  $v_i^{\text{сек}} = F_i \cdot v_i$ ;  $F_i$  – площадь поперечного сечения проволоки на выходе из  $i$ -ой волоки;  $v_i$  – скорость волочения в  $i$ -ом переходе.

В качестве исходных данных для расчета принимаются следующие: усредненный (среднегеометрический) коэффициент трения  $\text{tg}\gamma_0$  на входе в зону деформации (волоки) –  $\text{tg}\gamma_0 = \sqrt[3]{0,11 \cdot 0,10 \cdot 0,09} = 0,0997$  в зависимости упрочненного состояния металла проволоки и материала волок (Ст – сталь, Вк – твёрдосплавный сплав, АТ – технический алмаз), откуда  $\gamma_0 = 5,7^\circ$ ; принятый в оптимальной зоне минимальный полуугол волоки  $\alpha = 11^\circ$ . В качестве основного оборудования выбираем однократную машину ВСМ 1/550 производства АО «АЗТМ» с мощностью двигателя  $N_{\text{аб}} = 40$  кВт и возможностью регулирования скорости от 1,18 до 4,14 м/с ( $v_1 = 1,18 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;  $v_2 = 1,84 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;  $v_3 = 2,74 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  и  $v_4 = 4,14 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ).

Расчеты, выполненные с учетом представленной выше информации, сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Расчетные данные маршрута волочения проволоки из Al-Zr сплава

$i$	$d_i$ , мм	$d_{i-1}$ , мм	$\lambda_i$	$\varepsilon$ , %	$\sum \lambda_i$	$\sum \varepsilon$ , %	$\sigma_{\text{в}i-1}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}i}$ , МПа	$k_i^{\text{упр}}$	$\sigma_i^{\text{вол}}$ , МПа	$\eta_i^{\text{зап}}$
1	9,5	8,2	1,34	25	1,34	25	123,2	149,6	1,21	86,8	1,7
2	8,2	7,2	1,30	23	1,74	43	149,6	160,1	1,07	91,0	1,8
3	7,2	6,4	1,27	21	2,20	55	160,1	167,1	1,04	89,8	1,9
4	6,4	5,7	1,26	21	2,78	64	167,1	173,0	1,04	92,4	1,9
5	5,7	5,1	1,25	20	3,47	71	173,0	175,1	1,01	92,2	1,9
6	5,1	4,6	1,23	19	4,27	77	175,1	177,4	1,01	88,8	2,0
7	4,6	4,2	1,20	17	5,12	80	177,4	178,3	1,01	82,9	2,2
8	4,2	3,8	1,22	18	6,25	84	178,3	179,6	1,01	88,5	2,0
9	3,8	3,4	1,25	20	7,81	87	179,6	180,2	1,00	95,3	1,9
10	3,4	3,1	1,20	17	9,39	89	180,2	180,6	1,00	84,9	2,1
11	3,1	2,8	1,23	18	11,51	91	180,6	191,0	1,06	92,6	2,1
12	2,8	2,55	1,21	17	13,88	93	191,0	203,7	1,07	93,3	2,2
13	2,55	2,33	1,20	17	16,62	94	203,7	214,9	1,06	96,9	2,2
14	2,33	2,15	1,17	15	19,52	95	214,9	224,1	1,04	95,1	2,4
15	2,15	2,00	1,16	13	22,56	96	224,1	231,7	1,03	93,2	2,5

Диаметр проволоки в соответствующем переходе определяют с помощью итерационного метода, т.е. изначально задается какой-то диаметр, меньший исходного, после чего проводят расчет по представленной выше методике с определением коэффициента запаса. Затем, при неудовлетворительном результате (коэффициент запаса меньше, либо больше необходимого), повторяют расчет с изменением соответствующего параметра. Расчеты повторяют до тех пор, пока не будет достигнут необходимый коэффициент запаса, либо задается требуемый коэффициент запаса и определяется диаметр проволоки на выходе из волюки. Особенностью такого подхода является то, что, зная механические свойства протягиваемого металла, можно добиться необходимых значений коэффициента запаса (устойчивости) процесса волочения.

Итоговый маршрут волочения состоит из 15 переходов: 9,5-8,2-7,2-6,4-5,7-5,1-4,6-4,2-3,8-3,4-3,1-2,8-2,55-2,33-2,15-2,00 мм. Дополнительные расчетные данные по определению основных параметров технологического маршрута волочения проволоки из сплава Al-Zr, представлены в таблице 2, где  $P_i^{\text{вол}}$  – сила волочения.

Таблица 2 – Дополнительные данные маршрута волочения проволоки

$i$	$d_i$ , мм	$F_i$ , мм <sup>2</sup>	$v_i$ , м/с	$v_i^{\text{сек}}$ , м/с·мм <sup>2</sup>	$k_i^{\text{вол}}$	$\sigma_{\text{в}i-1}$ , МПа	$\sigma_i^{\text{вол}}$ , МПа	$P_i^{\text{вол}}$ , Н	$N_{i\text{точно}}^{\text{вол}}$ , Н·м/с	$N_i^{\text{вол}}$ , кВт
1	8,2	52,8	1,18	62,3	0,704	123,2	86,8	4580,4	5404,8	5,4
2	7,2	40,7	1,18	48,0	0,608	149,6	91,0	3704,0	4370,8	4,4
3	6,4	32,2	4,14	133,2	0,561	160,1	89,8	2889,5	11962,5	12,0
4	5,7	25,5	4,14	105,6	0,553	167,1	92,4	2356,8	9757,3	9,8
5	5,1	20,4	4,14	84,6	0,533	173,0	92,2	1882,0	7791,6	7,8
6	4,6	16,6	4,14	68,8	0,507	175,1	88,8	1475,9	6110,4	6,1
7	4,2	13,9	4,14	57,4	0,468	177,4	82,9	1148,8	4756,0	4,8
8	3,8	11,3	4,14	47,0	0,496	178,3	88,5	1003,5	4154,5	4,2
9	3,4	9,1	4,14	37,6	0,531	179,6	95,3	865,1	3581,4	3,6
10	3,1	7,5	4,14	31,2	0,471	180,2	84,9	640,8	2653,0	2,7
11	2,8	6,2	4,14	25,5	0,513	180,6	92,6	570,1	2360,4	2,4
12	2,55	5,1	4,14	21,1	0,488	191,0	93,3	476,3	1971,9	2,0
13	2,33	4,3	4,14	17,7	0,476	203,7	96,9	413,0	1709,8	1,7
14	2,15	3,6	4,14	15,0	0,442	214,9	95,1	345,1	1428,7	1,4
15	2,00	3,1	4,14	13,0	0,416	224,1	93,2	292,7	1211,6	1,2

Резкий рост мощности волочения в третьем проходе вызван переходом волочения проволоки с первой скорости  $v_1 = 1,18 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  на четвертую  $v_4 = 4,14 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Таким образом, рассчитан маршрут волочения проволоки диаметром 2,0 мм из заготовки 9,5 мм за 15 переходов, определены секундный расход металла и мощность волочения в каждом переходе, что может быть использовано при промышленном проектировании технологии производства кабельной продукции из сплавов системы Al-Zr.