

ном АБФК сочетание важнейших технологических свойств: высокой «холодной» и «горячей» прочности и разупрочнения после образования отливки и последующего охлаждения. Это обеспечивает получение отливок высокого качества, а также минимальную трудоемкость процессов выбивки форм и очистки отливок от остатков защемленной керамики [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено повышение скорости и степени прохождения электролиза растворов АБФК в поле мощного ультразвука (интенсивность 8–10 Вт/см² при частоте 18–22 кГц). Разработана математическая модель кинетики электролиза раствора АБФК при УЗ-воздействии. Создана и реализована на ЭВМ методика расчета оптимальных технологических параметров подготовки бескремнеземного связующего для точного литья химически актив-

ных сплавов. Исследованы структура и свойства керамических корундовых форм на активированном АБФК-связующем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Моисеев В.С., Варфоломеев М.С., Муркина А.С., Шербакова Г.И.* // Литейщик России. 2012. № 5. С. 36.
2. *Знаменский Л.Г., Ивочкина О.В., Ерофеев В.В.* Активация физическими полями литейных процессов. Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2009.
3. *Шапошник В.А.* Кинетика электролиза. Воронеж: ВГУ, 1989.
4. *Металлофосфатные связующие и смеси* / Под общ. ред. И.Е. Илларионова. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1995.
5. Пат. 2478453 (РФ). Способ изготовления форм по выплавляемым моделям (варианты) / Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина, С.С. Верцюх. 2013.

УДК 621.774.37

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ДЛЯ ИТЭР

© 2014 г. Г.Л. Колмогоров, Ю.А. Бурдина, Т.В. Чернова, Е.К. Кобелева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)

Статья поступила в редакцию 13.02.13 г., подписана в печать 13.03.13 г.

Предложена методика определения оптимальной геометрии волоочильного инструмента при волочении биметаллической и триметаллической заготовок. Из условия минимума напряжения волочения получены зависимости для определения оптимальных углов конусности волоочильного инструмента, обеспечивающие минимальные значения напряжения волочения и наименьшее энергетические затраты при производстве биметаллических и триметаллических изделий.

Ключевые слова: биметаллическая заготовка, триметаллическая заготовка, волоочильный инструмента, оптимизация, угол конусности, напряжение волочения.

There was offered method of definition for optimal geometry with regard to drawing tool by drawing of bimetal and trimetal billets. Out of minimum condition for drawing stress were obtained dependences for determine of optimal angle of taper for drawing tool. These dependences provide minimal drawing stress and minimal energy inputs by bimetal and trimetal billets production.

Key words: bimetal billet, trimetal billet, drawing tool, optimization, angle of taper, drawing stress.

Колмогоров Г.Л. – докт. техн. наук, профессор кафедры динамики и прочности машин ПНИПУ (614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 13). Тел.: (342) 239-13-40. E-mail: dpm@pstu.ru.

Бурдина Ю.А. – аспирант этой кафедры. E-mail: yukat@mail.ru.

Чернова Т.В. – канд. техн. наук, доцент этой кафедры. E-mail: thernovs2009@yandex.ru.

Кобелева Е.К. – магистрант этой кафедры. E-mail: dpm@pstu.ru.

Явление, при котором прохождение электрического тока в некоторых материалах происходит без диссипации энергии, было обнаружено Х. Камерлинг-Оннесом и названо сверхпроводимостью. В настоящее время в России создано широкомаштабное производство низкотемпературных сверхпроводящих материалов для магнитных систем. Это производство является обязательством России по участию в строительстве Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) [1, 2].

Технические сверхпроводящие кабели представляют собой наноструктурные металломатричные композиционные конструкции из разнородных материалов с ультратонкими волокнами (диаметром 5–7 мкм) сверхпроводящих материалов. Для ИТЭР изготавливаются низкотемпературные сверхпроводники (длиной до 30 км), имеющие центральную часть (сердечник) в виде большого количества непрерывных сверхпроводящих микроволокон из Nb или сплава Nb—Ti, содержащихся в металлической матрице (оболочке) с высокой тепло- и электропроводностью [3]. Поперечные сечения некоторых сверхпроводников представлены на рис. 1.

Технология производства сверхпроводников включает получение литой заготовки, прессование и волочение на конечный размер с промежуточными отжигами. Операция волочения при этом является одной из самых трудоемких, продолжительных и ответственных в технологической цепочке изготовления сверхпроводников и в значительной степени определяет качество готовой продукции.

Технология волочения заключается в протягивании заготовки через конический волочильный инструмент, при этом сечение заготовки принимает форму минимального сечения инструмента (рис. 2)



Рис. 1. Поперечные сечения сверхпроводников

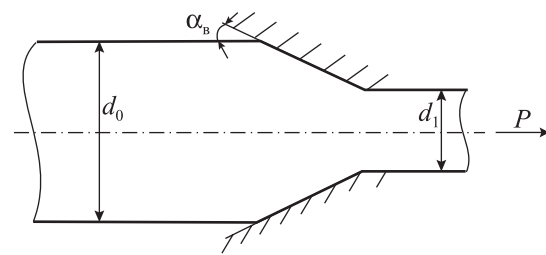


Рис. 2. Схема волочения монометаллического сверхпроводника

[4]. При производстве сверхпроводников количество переходов волочения составляет несколько десятков, поэтому актуальным является оптимизация геометрии волочильного инструмента.

Энергосиловые параметры при волочении определяются главным образом геометрией волочильного инструмента, одной из основных характеристик при этом является угол наклона образующей волочильного инструмента к оси волочения (α_b). Оптимизация угла α_b позволяет обеспечить минимальные значения напряжения волочения, что дает возможность снизить энергопотребление, уменьшить вероятность обрыва переднего конца заготовки, повысить единичные обжатия.

Пластическая деформация при волочении характеризуется коэффициентом вытяжки

$$\lambda = F_0/F_1 = d_0^2/d_1^2, \quad (1)$$

где F_0 и F_1 — площади сечения заготовки на входе в инструмент и выходе из него; d_0 и d_1 — соответствующие диаметры до и после прохода волочения.

Актуальной проблемой волочильного производства является минимизация значений напряжения волочения, что позволяет обеспечить минимальный расход энергии при волочении, увеличить единичные обжатия (вытяжку) за счет снижения вероятности обрыва переднего конца заготовки и повысить стойкость технологического инструмента. В технической литературе известны различные формулы для определения напряжения волочения проволоки и прутков, при этом наиболее понятной по физическому смыслу и применимости для практических расчетов является формула И.Л. Перлина [4]:

$$\sigma_{\text{вол}} = 2\ln(d_0/d_1)[\sigma_s + f\text{ctg}\alpha_{\text{п}}(\sigma_s - \sigma_0)] + \sigma_0, \quad (2)$$

где σ_s — среднее по зоне деформации значение сопротивления деформации; f — коэффициент внешнего трения; $\alpha_{\text{п}}$ — приведенный угол конусности волочильного инструмента: $\text{tg}\alpha_{\text{п}} = 0,65\text{tg}\alpha_b$; σ_s — напряжение противонапряжения.

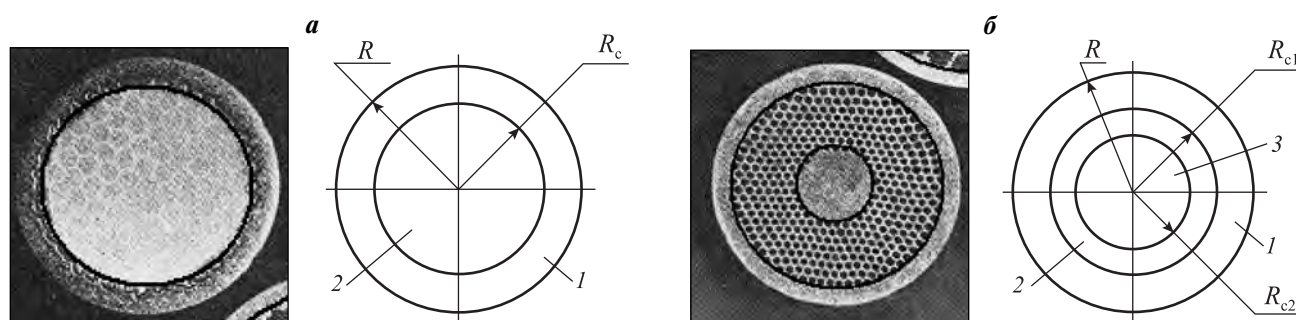


Рис. 3. Схематизация конструкций сверхпроводников на основе Nb—Ti-сплавов в виде биметалла (а) и триметалла (б)

1 — оболочка; 2 — промежуточный слой; 3 — сердечник

R — радиус проводника; R_{c1} — наружный радиус промежуточного слоя; R_{c2} — радиус сердечника

Недостаток формулы (2) состоит в том, что она не дает возможности определения оптимального значения угла конусности волоочильного инструмента. В то же время из теории и практики обработки металлов давлением известно, что при деформации в конических инструментах (волочение, прессование, гидроэкструзия) существуют оптимальные значения углов конусности инструмента, которые обеспечивают минимальные затраты энергии при пластическом деформировании. Дело в том что множитель $2 \ln d_0/d_1 = \ln \lambda$ в формуле (2), характеризующий степень деформации при волочении, не учитывает дополнительные сдвиговые деформации на входе в конический технологический инструмент и выходе из него. Подобное уточнение степени деформации при деформировании в коническом технологическом инструменте выполнено в работе [5], в соответствии с которым средняя по сечению степень деформации составляет

$$\varepsilon_{cp} = 2 \ln \left(\frac{d_0}{d_1} \right) + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_b, \quad (3)$$

где α_b — угол наклона образующей рабочего конуса волоки к оси волочения.

Второе слагаемое в формуле (3) учитывает сдвиговые деформации при входе в конический инструмент и выходе из него. С их учетом предложено определять и напряжение волочения:

$$\sigma_{вол} = \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_b \right) [\sigma_s + f \operatorname{ctg} \alpha_n (\sigma_s - \sigma_0)] + \sigma_0. \quad (4)$$

Учет дополнительных сдвиговых деформаций позволяет найти оптимальные углы конусности волоочильного технологического инструмента из условия минимума напряжения волочения, которое записывается следующим образом:

$$\frac{\partial \sigma_{вол}}{\partial \operatorname{tg} \alpha_b} = 0. \quad (5)$$

Продифференцировав выражение (4), после преобразований получим

$$\alpha_b^{opt} = \operatorname{arctg} \left[1,414 \sqrt{f \ln \lambda \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_s} \right)} \right]. \quad (6)$$

Принудительное противонапряжение в большинстве случаев отсутствует ($\sigma_0 = 0$), тогда соотношение (6) принимает вид

$$\alpha_b^{opt} = \operatorname{arctg} (1,414 \sqrt{f \ln \lambda}). \quad (7)$$

Данный подход использован для определения напряжения волочения биметаллической и триметаллической сверхпроводниковых заготовок (рис. 3). При этом рассматриваются в отдельности деформация сердечника и деформация оболочки.

Рассмотрим деформацию биметаллической сверхпроводниковой заготовки. Так, напряжение волочения при деформации сердечника определяется как

$$\sigma_{вол}^c = \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_b \right) \sigma_s^c + \sigma_0, \quad (8)$$

где σ_s^c — сопротивление деформации материала сердечника.

При записи выражения (8) полагаем, что оболочка и сердечник деформируются совместно без перемещения относительно друг друга, что позволяет принять коэффициент трения в (4) равным нулю.

Доля усилия волочения, приходящаяся на деформацию сердечника, составит

$$P = \sigma_{вол} F_c = F_c \left[\left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_b \right) \sigma_s^c + \sigma_0 \right], \quad (9)$$

где F_c — площадь сечения сердечника на выходе из инструмента.

Соответственно напряжение волочения при деформации оболочки равно

$$\sigma_{\text{вол}}^0 = \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} \right) [\sigma_s^0 + f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{п}} (\sigma_s^0 - \sigma_0)] + \sigma_0, \quad (10)$$

где σ_s^0 — сопротивление деформации материала оболочки.

Доля усилия волочения, приходящаяся на деформацию оболочки, при этом составит

$$P_0 = \sigma_{\text{вол}} F_0 = F_0 \left[\left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} \right) \sigma_s^0 + f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{п}} (\sigma_s^0 - \sigma_0) \right] + F_0 \sigma_0, \quad (11)$$

где F_0 — площадь сечения оболочки на выходе; f — коэффициент трения в зоне деформации.

Общее усилие волочения биметаллической заготовки после подстановки выражений (9), (11) и преобразований равно

$$P_{\text{вол}} = \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} \right) \times \{ \sigma_s F_c + F_0 [\sigma_s^0 + f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{п}} (\sigma_s^0 - \sigma_0)] \} + \sigma_0 (F_c + F_0). \quad (12)$$

Данному усилию волочения соответствует среднее по сечению биметаллической заготовки напряжение волочения

$$\sigma_{\text{вол}} = \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} \right) \times \{ \sigma_s \bar{F}_c + \bar{F}_0 [\sigma_s^0 f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{п}} (\sigma_s^0 - \sigma_0)] \} + \sigma_0, \quad (13)$$

где $\bar{F}_c = F_c/F_1$ — относительная площадь сердечника; $\bar{F}_0 = F_0/F_1$ — относительная площадь оболочки; F_1 — площадь сечения биметаллической заготовки на выходе.

Условие минимума напряжения волочения (13) запишется также в форме (5), что после дифференцирования и преобразований дает

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{в}}^{\text{опт}} = 1,414 \sqrt{\frac{f \bar{F}_0 (\sigma_s^0 - \sigma_0) \ln \lambda}{\bar{F}_c \sigma_s^c + \bar{F}_0 \sigma_s^0}} \quad (14)$$

и, соответственно,

$$\alpha_{\text{в}}^{\text{опт}} = \arctg \left[1,414 \sqrt{\frac{f \bar{F}_0 (\sigma_s^0 - \sigma_0) \ln \lambda}{\bar{F}_c \sigma_s^c + \bar{F}_0 \sigma_s^0}} \right]. \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что увеличение вытяжки и коэффициента трения приводит к росту оптимальных углов конусности технологического

инструмента. Противонапряжение снижает значение оптимальных углов. В условиях отсутствия принудительного противонапряжения ($\sigma_0 = 0$) уравнение (15) принимает вид

$$\alpha_{\text{в}}^{\text{опт}} = \arctg \left[1,414 \sqrt{\frac{f \bar{F}_0 \sigma_s^0 \ln \lambda}{\bar{F}_c \sigma_s^c + \bar{F}_0 \sigma_s^0}} \right]. \quad (16)$$

В общем виде для волочения биметаллических заготовок

$$\alpha_{\text{в}}^{\text{опт}} = \arctg \left[1,414 \sqrt{\frac{f \ln \lambda}{m k + 1}} \right], \quad (17)$$

где $m = \bar{F}_c/\bar{F}_0$ — показатель, характеризующий соотношение площадей сердечника и оболочки; $k = \sigma_s^c/\sigma_s^0$ — показатель, характеризующий соотношение механических свойств материалов сердечника и оболочки.

Выражение (17) позволяет для заданных значений коэффициента вытяжки λ и коэффициента трения f рассчитать значения оптимальных углов конусности и спроектировать геометрию волочильного инструмента из условия обеспечения минимального значения напряжения волочения.

На рис. 4 приведены результаты расчета оптимальных углов волочильного инструмента при производстве биметаллических изделий для $\lambda = 1,15$ в зависимости от параметра m для различных значений k . Расчеты выполнены для коэффициента трения $f = 0,1$ [6]. Видно, что с увеличением m значения оптимальных углов конусности рабочей волоки уменьшаются. Рост k также приводит к снижению оптимальных $\alpha_{\text{в}}$.

Следующим этапом рассмотрим деформацию сверхпроводниковой заготовки, состоящей из трех

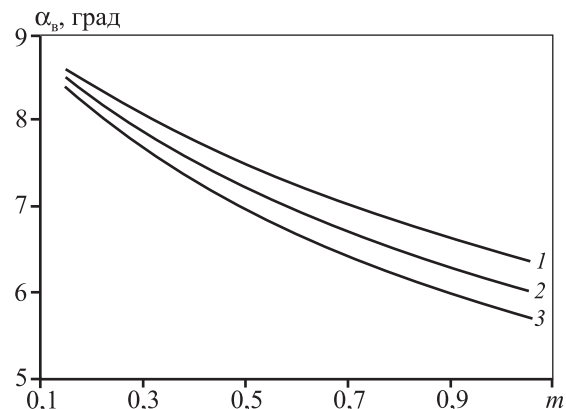


Рис. 4. Оптимальные углы при волочении биметаллической заготовки $k = 1,0$ (1), 1,25 (2), 1,5 (3)

слоев: центрального токостабилизирующего сердечника, сверхпроводящего промежуточного слоя и токостабилизирующей наружной оболочки (см. рис. 3, б).

Напряжение волочения при деформации центрального сердечника равно

$$\sigma_{\text{вол}} = \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} \right) \sigma_{s1} + \sigma_0. \quad (18)$$

Соответственно усилие, обеспечивающее пластическую деформацию центральной части, составит

$$P_1 = F_1 \left[\left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} \right) \sigma_{s1} + \sigma_0 \right], \quad (19)$$

где σ_{s1} — сопротивление деформации материала центральной части сверхпроводника; F_1 — площадь сердечника на выходе.

Аналогично для напряжения волочения при деформации промежуточного слоя, обеспечивающего сверхпроводящие свойства, имеем

$$\sigma_{\text{вол}} = \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} \right) \sigma_{s2} + \sigma_0. \quad (20)$$

Соответственно усилие, обеспечивающее пластическую деформацию сверхпроводящей части заготовки, равно

$$P_2 = F_2 \left[\left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} \right) \sigma_{s2} + \sigma_0 \right], \quad (21)$$

где σ_{s2} — сопротивление пластической деформации трансверсально-изотропной сверхпроводящей части, определяемой по правилу смеси для волокон Nb—Ti в медной матрице и волокон Nb в бронзовой матрице; F_2 — площадь промежуточного слоя на выходе.

Для внешней оболочки, находящейся в контакте с волочильным инструментом, имеем

$$\sigma_{\text{вол}} = \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} \right) [\sigma_{s3} + f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{п}} (\sigma_{s3} - \sigma_0)] + \sigma_0. \quad (22)$$

Соответственно доля усилия, обеспечивающая пластическую деформацию оболочки сверхпроводниковой триметаллической заготовки, составит

$$P_3 = F_3 \left[\left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} \right) [\sigma_{s3} + f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{п}} (\sigma_{s3} - \sigma_0)] + \sigma_0 \right], \quad (23)$$

где σ_{s3} — сопротивление деформации материала оболочки сверхпроводника; F_3 — площадь оболочки на выходе.

Полное усилие пластической деформации при волочении триметаллической сверхпроводящей композиционной заготовки равно сумме соотношений (21)—(23):

$$P = \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} \right) \times [F_1 \sigma_{s1} + F_2 \sigma_{s2} + F_3 \sigma_{s3} + f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{п}} (\sigma_{s3} - \sigma_0) F_3] + \sigma_0 (F_1 + F_2 + F_3). \quad (24)$$

Данному усилию соответствует усредненное по сечению этой заготовки значение напряжения волочения:

$$\sigma_{\text{в}} = \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} \right) \times [\bar{F}_1 \sigma_{s1} + \bar{F}_2 \sigma_{s2} + \bar{F}_3 \sigma_{s3} + f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{п}} (\sigma_{s3} - \sigma_0) \bar{F}_3] + \sigma_0, \quad (25)$$

где $\bar{F}_1 = F_1/F$, $\bar{F}_2 = F_2/F$, $\bar{F}_3 = F_3/F$ — относительные площади сечения каждого из слоев заготовки.

Формула (24) позволяет определить оптимальные углы конусности волочильного инструмента из условия минимума напряжения волочения триметаллической сверхпроводниковой заготовки, которое записывается в виде (5). После преобразований получаем

$$\alpha_{\text{в}}^{\text{опт}} = \operatorname{arctg} \left[1,41 \sqrt{\frac{f(\sigma_{s3} - \sigma_0) \bar{F}_3 \ln \lambda}{\sigma_{s1} \bar{F}_1 + \sigma_{s2} \bar{F}_2 + \sigma_{s3} \bar{F}_3}} \right]. \quad (26)$$

В случае отсутствия противонапряжения ($\sigma_0 = 0$) имеем

$$\alpha_{\text{в}}^{\text{опт}} = \operatorname{arctg} \left[1,41 \sqrt{\frac{f \sigma_{s3} \bar{F}_3 \ln \lambda}{\sigma_{s1} \bar{F}_1 + \sigma_{s2} \bar{F}_2 + \sigma_{s3} \bar{F}_3}} \right]. \quad (27)$$

При изготовлении триметаллических сверхпроводников внешнюю оболочку и сердечник обычно выполняют из одного материала (Cu), а промежуточный слой — из NbTi либо из Nb, поэтому в формулу (27) можно ввести упрощения ($\sigma_{s3} \equiv \sigma_{s1}$):

$$\alpha_{\text{в}}^{\text{опт}} = \operatorname{arctg} \left[1,41 \sqrt{\frac{f \bar{F}_3 \ln \lambda}{(\bar{F}_1 + \bar{F}_3) + n \bar{F}_2}} \right], \quad (28)$$

где $n = \sigma_{s2}/\sigma_{s3}$ — показатель, характеризующий соот-

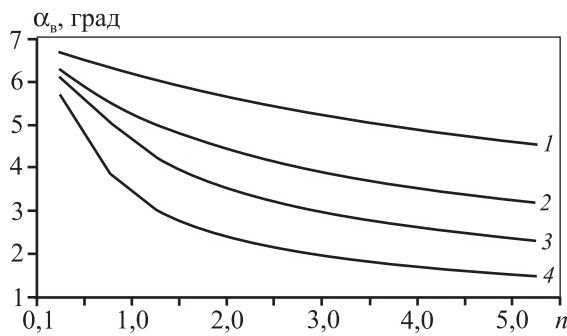


Рис. 5. Оптимальные углы инструмента при волочении биметаллической заготовки

1 – $\bar{F}_1 = \bar{F}_3 = 0,4$, $\bar{F}_2 = 0,2$; 2 – $\bar{F}_1 = \bar{F}_3 = 0,3$, $\bar{F}_2 = 0,4$;
3 – $\bar{F}_1 = \bar{F}_3 = 0,2$, $\bar{F}_2 = 0,6$; 4 – $\bar{F}_1 = \bar{F}_3 = 0,1$, $\bar{F}_2 = 0,8$

ношение механических свойств материалов сердечника и оболочки.

На рис. 5 приведены результаты расчета оптимальных углов волочильного инструмента при производстве триметаллических изделий для $\lambda = 1,15$ и $f = 0,1$ в зависимости от параметра n для различных значений относительных площадей сечения каждого из слоев. Видно, что с увеличением n значения оптимальных углов конусности рабочей волоки уменьшаются.

Таким образом, определены оптимальные углы наклона образующей конического волочильного инструмента к оси волочения для моно-, би- и триметаллической заготовок. Знание оптимального угла обеспечивает снижение напряжения волочения, что позволяет минимизировать энергозатраты, по-

высить единичные обжаты и стойкость технологического инструмента.

ВЫВОДЫ

1. Получены аналитические зависимости для расчета усилия и среднего напряжения при волочении моно-, би- и триметаллической заготовок.

2. Определены оптимальные углы конусности волочильного инструмента, обеспечивающие наименьшие значения напряжения волочения и минимальные энергетические затраты при производстве сверхпроводниковых изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сверхпроводимость: Опыт создания высокотехнологичного производства в ОАО «Чепецкий механический завод» // Нанотехнологии, экология пр-ва. 2009. № 1. С. 80.
2. Сверхпроводники. М.: ГНЦ РФ ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, 1998.
3. Шиков А.К., Никулин А.Ф., Силаев А.Г. и др. // Изв. вузов. Цв. металлургия. 2003. № 1. С. 36.
4. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. М.: Металлургия, 1971.
5. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1986.
6. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. 2-е изд. М.: Металлургия, 1973.