

УДК 621.774.37 : 539.319

DOI dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-5-34-38

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВОЛОЧЕНИЯ ТРИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КОМПОЗИТОВ

© 2015 г. Г.Л. Колмогоров, М.В. Снигирева, Е.М. Аверьянова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)

Статья поступила в редакцию 16.12.13 г., доработана 03.07.15 г., подписана в печать 06.07.15 г.

Предложена методика определения оптимальных углов волоочильного инструмента для трехкомпонентной заготовки, учитывающая наличие калибрующего пояса волокна и обеспечивающая минимальное значение напряжения волоочения. Показано влияние технологических параметров на величину оптимальных углов конусности технологического инструмента. Для стандартных волок с фиксированным углом конусности получено соотношение для расчета оптимальной вытяжки, обуславливающей минимальные значения напряжения волоочения.

Ключевые слова: волоочение, триметалл, угол волоочения, вытяжка, оптимизация.

Для цитирования: Колмогоров Г.Л., Снигирева М.В., Аверьянова Е.М. Оптимизация технологии волоочения триметаллических сверхпроводниковых композитов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2015. No. 5. С. 34–38.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-5-34-38.

Kolmogorov G.L., Snigireva M.V., Aver'yanova E.M.

Optimization of drawing technology of trimetallic superconducting composites

A procedure of determining the optimal angles of the drawing tool for a three-component billet, which takes into account the presence of the finishing die cylinder and provides a minimal drawing stress, is proposed. The influence of manufacturing parameters on the magnitude of optimal conicity angles of the manufacturing tool is shown. The relationship for the calculation of the optimal drawing, which provides minimal drawing stress, is found for standard dies with a fixed conicity angle.

Keywords: drawing, trimetal, drawing angle, drawing, optimization.

Citation: Kolmogorov G.L., Snigireva M.V., Aver'yanova E.M. Optimizatsiya tekhnologii volocheniya trimetallicheskih sverkhprovodnikovyh kompozitov. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2015. No. 5. P. 34–38. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-5-34-38.

Введение

В технике широкое применение находят длинномерные триметаллические изделия, получаемые волоочением. В частности, к ним относятся низкотемпературные сверхпроводники, включающие оболочку и сердечник из токостабилизирующей меди, а также промежуточный слой, который является композитом, состоящим из ниобиевых волокон в матрице из высокооловянистой бронзы (рис. 1) [1–3].

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) [4–7].

Технология получения сверхпроводящих материалов — это многоступенчатый процесс. Среди операций, определяющих качество сверхпроводника, важное место занимает процесс многократного волоочения с промежуточными термообработками [8, 9]. При этом актуальной задачей является использование технологического инструмента, обеспечивающего минимальное усилие волоочения [10].

Колмогоров Г.Л. — докт. техн. наук, профессор кафедры динамики и прочности машин ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29). Тел.: (342) 239-13-40. E-mail: dpm@pstu.ru.

Снигирева М.В. — ст. препод. этой кафедры. E-mail: mvsnigireva@yandex.ru.

Аверьянова Е.М. — магистрант этой кафедры. E-mail: lenv92@mail.ru.

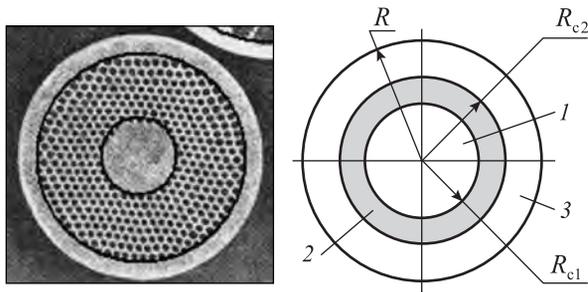


Рис. 1. Расчетная схема триметаллической заготовки
1 – сердечник; 2 – сверхпроводящий слой; 3 – оболочка
R – радиус проводника; R_{c1} – радиус сердечника;
 R_{c2} – наружный радиус сверхпроводящего слоя

Усилие волочения определяет величину деформации за проход и общее количество переходов многократного волочения.

Цель работы заключалась в определении оптимальных геометрических параметров технологического инструмента при производстве триметаллических сверхпроводников, обеспечивающих минимальные энергозатраты процесса.

Методика исследований

Пластическая деформация при волочении характеризуется коэффициентом вытяжки [11]

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

где d_0 и d_1 – диаметры сечения биметаллической заготовки соответственно на входе в инструмент и выходе из него.

При волочении триметаллической заготовки полагаем, что коэффициент вытяжки для центральной части (сердечника), промежуточного слоя и наружной части (оболочки) один и тот же.

Оптимизация технологического инструмента заключается в определении его оптимального угла конусности (α_B) (рис. 2), обеспечивающего минимальный расход энергии при волочении, что позволяет увеличить единичные обжатия (вытяжку) за счет снижения вероятности обрыва переднего конца заготовки и повысить стойкость технологического инструмента.

В настоящее время из существующих формул для определения напряжения волочения проволоки и прутков наиболее применимой является формула И.Л. Перлина [11]:

$$\sigma_{\text{вол}} = \ln \lambda [\sigma_s + f \text{ctg} \alpha_n (\sigma_s - \sigma_q)] + \sigma_q, \quad (2)$$

где σ_s – среднее по зоне деформации сопротивление деформации протягиваемой заготовки; f – коэффи-

циент внешнего трения между инструментом и заготовкой в зоне деформации; α_n – приведенный угол конусности волочильного инструмента; σ_q – напряжение противонапряжения.

Формула (2) широко используется в инженерной практике, однако она не дает возможности определения оптимального значения угла конусности волочильного инструмента. Данное обстоятельство связано с тем, что множитель $\ln \lambda$ в формуле (2), характеризующий степень деформации при волочении, не учитывает дополнительные сдвиговые деформации на входе в технологический инструмент и выходе из него.

Уточнение степени деформации при деформировании в коническом технологическом инструменте выполнено в работе [12], в соответствии с которым средняя по сечению степень деформации определяется как

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \text{tg} \alpha_B, \quad (3)$$

где α_B – угол наклона образующей рабочего конуса волокна к оси волочения.

С учетом сдвиговых деформаций (3) формула (2) принимает вид

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

Учет дополнительных сдвиговых деформаций позволяет определить оптимальные углы конусности волочильного технологического инструмента из условий минимума напряжения волочения:

$$\partial \sigma_{\text{вол}} / \partial \text{tg} \alpha_B = 0. \quad (5)$$

Другим недостатком формулы (2) является наличие приведенного угла волокна (α_n), который ре-

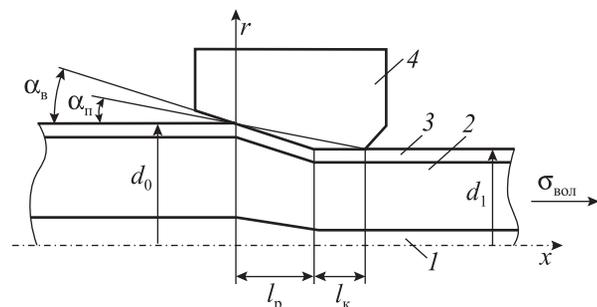


Рис. 2. Схема волочения триметаллической сверхпроводниковой заготовки
1 – сердечник; 2 – промежуточный слой; 3 – оболочка; 4 – проволока
 α_n – приведенный угол конусности инструмента; l_k – длина калибрующего пояса; l_p – протяженность очага деформации

комендуется принимать равным из соотношения $\text{tg}\alpha_{\text{п}} = 0,65 \text{tg}\alpha_{\text{в}}$ [11].

На самом деле $\text{tg}\alpha_{\text{п}}$ может изменяться в широком диапазоне в зависимости от длины калибрующего пояска волоки. Из геометрических соотношений рис. 2 следует

$$\text{tg}\alpha_{\text{п}} = \frac{\text{tg}\alpha_{\text{в}}}{1 + \bar{l}_{\text{к}}}, \quad (6)$$

где $\bar{l}_{\text{к}} = l_{\text{к}}/l_{\text{п}}$ — относительная длина калибрующего пояска; $l_{\text{к}}$ — длина калибрующего пояска; $l_{\text{п}}$ — протяженность очага деформации.

Формула (4) с учетом соотношения (6) применена в отдельности для внутренней части (сердечника), промежуточной части (композиционного сверхпроводникового слоя) и наружной части (оболочки) триметаллической заготовки.

Для сердечника, учитывая отсутствие его проскальзывания относительно оболочки, полагаем в формуле (4), что коэффициент трения равен нулю. Напряжение волочения при деформации сердечника определяется соотношением

$$\sigma_{\text{вол1}} = \left(\ln\lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \text{tg}\alpha_{\text{в}} \right) \sigma_{\text{s1}} + \sigma_{\text{q}}, \quad (7)$$

где σ_{s1} — сопротивление деформации материала сердечника.

Напряжению волочения (7) соответствует затраченное на пластическую деформацию сердечника усилие

$$P_1 = F_1 \left[\left(\ln\lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \text{tg}\alpha_{\text{в}} \right) \sigma_{\text{s1}} + \sigma_{\text{q}} \right], \quad (8)$$

где $F_1 = \pi R_{\text{с1}}^2$ — площадь сечения сердечника на выходе из инструмента.

Аналогично, учитывая отсутствие проскальзывания промежуточного сверхпроводящего слоя триметаллической заготовки относительно токостабилизирующих слоев сердечника и оболочки, напряжение волочения этого слоя определяется соотношением

$$\sigma_{\text{вол2}} = \left(\ln\lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \text{tg}\alpha_{\text{в}} \right) \sigma_{\text{s2}} + \sigma_{\text{q}}, \quad (9)$$

где σ_{s2} — сопротивление деформации материала промежуточного слоя триметаллической заготовки.

Промежуточный сверхпроводящий слой представляет собой трансверсально-изотропную композиционную конструкцию, и его сопротивление пластической деформации определяется как средневзвешенное значение по сечению [13]:

$$\sigma_{\text{s2}} = c\sigma_{\text{sF}} + (1-c)\sigma_{\text{sM}}, \quad (10)$$

где c — объемное содержание сверхпроводящего волокна с сопротивлением деформации σ_{sF} ; σ_{sM} — сопротивление пластической деформации материала матрицы.

Доля усилия волочения, приходящегося на пластическую деформацию промежуточного слоя композиционной заготовки, составит

$$P_2 = F_2 \left[\left(\ln\lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \text{tg}\alpha_{\text{в}} \right) \sigma_{\text{s2}} + \sigma_{\text{q}} \right], \quad (11)$$

где $F_2 = \pi(R_{\text{с2}}^2 - R_{\text{с1}}^2)$ — площадь сечения промежуточного слоя триметаллической заготовки на выходе из инструмента.

Для внешней оболочки, находящейся в контакте с волочильным инструментом, напряжение волочения определяется соотношением

$$\sigma_{\text{вол3}} = \left(\ln\lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \text{tg}\alpha_{\text{в}} \right) \left[\sigma_{\text{s3}} + f \frac{1 + \bar{l}_{\text{к}}}{\text{tg}\alpha_{\text{в}}} (\sigma_{\text{s3}} - \sigma_{\text{q}}) \right] + \sigma_{\text{q}}, \quad (12)$$

где σ_{s3} — сопротивление деформации материала оболочки.

Напряжению волочения оболочки (12) соответствует затраченное на пластическую деформацию оболочки усилие

$$P_3 = F_3 \left\{ \left(\ln\lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \text{tg}\alpha_{\text{в}} \right) \times \left[\sigma_{\text{s3}} + f \frac{1 + \bar{l}_{\text{к}}}{\text{tg}\alpha_{\text{в}}} (\sigma_{\text{s3}} - \sigma_{\text{q}}) \right] + \sigma_{\text{q}} \right\}, \quad (13)$$

где $F_3 = \pi(R^2 - R_{\text{с2}}^2)$ — площадь сечения оболочки на выходе.

Общее усилие при деформировании триметаллической заготовки будет равно

$$P_{\text{вол}} = P_1 + P_2 + P_3, \quad (14)$$

что после подстановки выражений (8), (11), (13) и преобразований составляет

$$P = \left(\ln\lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \text{tg}\alpha_{\text{в}} \right) \times \left[\sigma_{\text{s1}} F_1 + \sigma_{\text{s2}} F_2 + \sigma_{\text{s3}} F_3 + f \frac{1 + \bar{l}_{\text{к}}}{\text{tg}\alpha_{\text{в}}} (\sigma_{\text{s3}} - \sigma_{\text{q}}) F_3 \right] + \sigma_{\text{q}} (F_1 + F_2 + F_3). \quad (15)$$

Данному усилию соответствует усредненное по сечению триметаллической композиционной заготовки значение напряжения волочения

$$\sigma_{\text{вол}} = \left(\ln \lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_{\text{в}} \right) \times \left[\sigma_{s1} \bar{F}_1 + \sigma_{s2} \bar{F}_2 + \sigma_{s3} \bar{F}_3 + f \frac{1 + \bar{l}_{\text{к}}}{\operatorname{tg} \alpha_{\text{в}}} (\sigma_{s3} - \sigma_q) \bar{F}_3 \right] + \sigma_q, \quad (16)$$

где $\bar{F}_1 = F_1/F$, $\bar{F}_2 = F_2/F$, $\bar{F}_3 = F_3/F$ — относительные площади после прохода каждого из слоев, составляющих триметаллическую сверхпроводниковую композиционную заготовку.

Результаты и их обсуждение

Формула (16) позволяет определить оптимальные углы конусности волоочильного инструмента из условия минимума напряжения волочения (5). Продифференцировав выражение (16) согласно условию (5), после преобразований, с учетом того, что и сердечник, и оболочка заготовки состоят из меди ($\sigma_{s1} \cong \sigma_{s3}$), получим оптимальное значение угла конусности инструмента:

$$\alpha_{\text{в}}^{\text{опт}} = \operatorname{arctg} 1,14 \sqrt{\frac{f \ln \lambda (\sigma_{s1} - \sigma_q) (1 + \bar{l}_{\text{к}}) \bar{F}_1}{\sigma_{s1} (\bar{F}_1 + \bar{F}_3) + \sigma_{s2} \bar{F}_2}}. \quad (17)$$

При отсутствии противонапряжения ($\sigma_q = 0$), что характерно для большинства случаев, оптимальный угол не зависит от сопротивления деформации материалов сердечника и оболочки и определяется соотношением

$$\alpha_{\text{в}}^{\text{опт}} = \operatorname{arctg} 1,14 \sqrt{\frac{f \ln \lambda \sigma_{s1} (1 + \bar{l}_{\text{к}}) \bar{F}_1}{\sigma_{s1} (\bar{F}_1 + \bar{F}_3) + \sigma_{s2} \bar{F}_2}}. \quad (18)$$

На рис. 3 приведены расчетные значения оптимальных углов волоочильного инструмента триметаллической заготовки в зависимости от относительной длины калибрующего пояска. При расчетах коэффициент трения принимался равным 0,05, что соответствует волочению упрочненной меди [11]; относительные площади сердечника, промежуточного слоя и оболочки равны 0,05, 0,4 и 0,55 соответственно; сопротивление деформации материалов сердечника и оболочки составляет 310 МПа, промежуточного слоя — 290 МПа [14, 15].

Из рис. 3 следует, что с увеличением длины калибрующего пояска оптимальные углы возрастают. Повышение вытяжки λ также приводит к росту оптимальных углов конусности технологического инструмента.

Геометрия волоочильного инструмента, как правило, стандартизирована, поэтому для стандартных

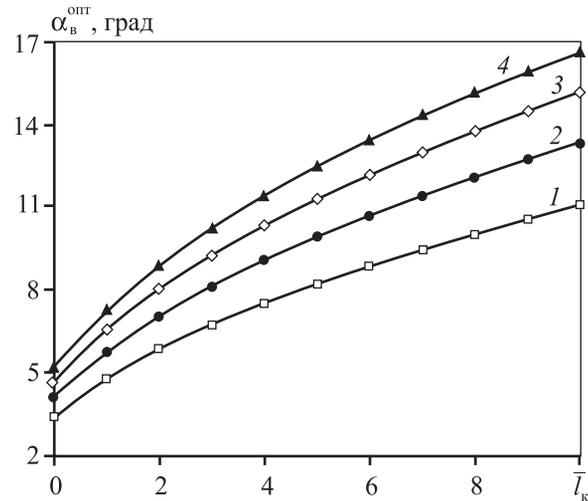


Рис. 3. Оптимальные углы при волочении

1 — $\lambda = 1,10$; 2 — 1,15; 3 — 1,20; 4 — 1,25

углов могут быть рекомендованы оптимальные значения коэффициента вытяжки, обеспечивающие минимальное напряжение волочения. Разрешая соотношение (18) относительно λ , получим выражение для оптимальной вытяжки триметаллической заготовки

$$\lambda_{\text{опт}} = \exp \left\{ 0,77 \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha_{\text{в}} [\sigma_{s1} (\bar{F}_1 + \bar{F}_3) + \sigma_{s2} \bar{F}_2]}{f \sigma_{s1} (1 + \bar{l}_{\text{к}}) \bar{F}_1} \right\}. \quad (19)$$

Выводы

1. Рассмотрена методика определения оптимальных углов волоочильного инструмента для трехкомпонентной заготовки, учитывающая наличие калибрующего пояска волокна. Ее применение позволяет минимизировать напряжение волочения.

2. Изучено влияние технологических параметров на величину оптимальных углов конусности технологического инструмента.

3. Для стандартных волок с фиксированным углом конусности предложена формула для определения оптимальной вытяжки, обеспечивающей минимальные значения напряжения волочения.

Литература

1. Шиков А.К., Никулин А.Д., Силаев А.Г., Воробьева А.Е., Паницырный В.И., Ведерников Г.П., Дерунова Е.А., Потанина Л.В., Плашкин Э.И., Судьев С.В. Разработка сверхпроводников для магнитной системы ИТЭР в России // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2003. No. 1. С. 36—43.

2. *Высоцкий В.С.* Крупномасштабные применения сверхпроводимости спустя столетие после ее открытия // *Электричество*. 2014. No. 11. С. 4—16.
3. *Flukiger R.* Materials for classical and high-Tc superconducting tapes and wires at 4.2 K // *Supercond. Sci. Technol.* 1997. Vol. 10. P. 872—875.
4. Сверхпроводимость: Опыт создания высокотехнологичного производства в ОАО «Чепецкий механический завод» // *Нанотехнологии, экология пр-ва*. 2009. No. 1. С. 80—83.
5. *Sessler A.M., Stix T.H., Rosenbluth M.N.* Build the international thermonuclear experimental reactor? // *Phys. Today*. June 1996. P. 22—25.
6. *Вишнева В.О.* Принципы технологического маркетинга сверхпроводников как объекта nanoиндустрии // *Цвет. металлы*. 2013. No. 7 (847). С. 15—22.
7. *Devred A., Backbier I., Besette D., Bevillard G., Gardner M., Jong C., Lillaz F., Mitchell N., Romano G., Vostner A.* Challenges and status of ITER conductor production. // *Supercond. Sci. Technol.* 2014. Vol. 27. No. 4. P. 044001.
8. *Никулин А.Д., Шиков А.К., Силаев А.Г., Воробьева А.Е., Давыдов И.И., Чукин А.М., Малафеева О.В., Панцырный В.И., Хлебова Н.Е., Беляков Н.А., Мареев К.А.* Способ изготовления композитного сверхпроводника на основе соединения Nb₃Sn: Пат. 2069399 (РФ). 1996.
9. *Young M., Gregory E., Adam E., Marancik W.* Fabrication and properties of an aluminum-stabilized NbTi multifilament superconductor // *Adv. Cryogen. Eng.* 1978. Vol. 24. P. 383—388.
10. *Колмогоров В.Л.* Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Изд-во УГТУ—УПИ, 2001.
11. *Перлин И.Л., Ерманок М.З.* Теория волочения. М.: Металлургия, 1971.
12. *Колмогоров Г.Л., Филиппов В.Б., Кузнецова Е.В., Трофимов В.Н.* Степень деформации при волочении композитной заготовки. // *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2004. No. 5. С. 39—42.
13. *Кристensen Р.* Введение в механику композитов / Пер. с англ. М.: Мир, 1982.
14. *Anne W. West, Rees D. Rawlings.* The microstructure and mechanical properties of Nb₃Sn filamentary superconducting composites // *J. Mater. Sci.* 1979. Vol. 14. Iss. 5. P. 1179—1186.
15. *Shojiro Ochiai, Kozo Osamura.* Strength and elongation of multifilamentary Nb₃Sn superconducting composite materials with small amounts of Nb₃Sn compound // *J. Mater. Sci.* 1987. Vol. 22. Iss. 6. P. 2175—2180.
2. *Высоцкий В.С.* Крупномасштабные применения сверхпроводимости спустя столетие после ее открытия // *Электричество*. 2014. No. 11. P. 4—16.
3. *Flukiger R.* Materials for classical and high-Tc superconducting tapes and wires at 4.2 K. *Supercond. Sci. Technol.* 1997. Vol. 10. P. 872—875.
4. Sverhprovodimost': Opyt sozdaniya vysokotekhnologichnogo proizvodstva v OAO «Chepeckij mekhanicheskij zavod» [Superconductivity: Experience in creating high-tech production at JSC «Chepetsky Mechanical Plant»]. *Nanotekhnologii, ehkologiya proizvodstva*. 2009. No. 1. P. 80—83.
5. *Sessler A.M., Stix T.H., Rosenbluth M.N.* Build the International thermonuclear experimental reactor? *Phys. Today*. June 1996. P. 22—25.
6. *Vishnyova V.O.* Principy tekhnologicheskogo marketinga sverhprovodnikov kak ob"ekta nanoindustrii [Principles of technology marketing superconductors as an object nanoindustry]. *Tsvetnye metally*. 2013. No. 7 (847). P. 15—22.
7. *Devred A., Backbier I., Besette D., Bevillard G., Gardner M., Jong C., Lillaz F., Mitchell N., Romano G., Vostner A.* Challenges and status of ITER conductor production. *Supercond. Sci. Technol.* 2014. Vol. 27. No. 4. P. 044001.
8. *Nikulin A.D., Shikov A.K., Silaev A.G., Vorob'eva A.E., Davydov I.I., Chukin A.M., Malafeeva O.V., Pansyrnyi V.I., Khlebova N.E., Belyakov N.A., Mareev K.A.* Sposob izgotovleniya kompozitnogo sverhprovodnika na osnove soedineniya Nb₃Sn [A method of manufacturing a composite superconductor-based compound Nb₃Sn]: Pat. 2069399 (RF). 1996.
9. *Young M., Gregory E., Adam E., Marancik W.* Fabrication and properties of an aluminum-stabilized nbtI multifilament superconductor. *Adv. Cryogen. Eng.* 1978. Vol. 24. P. 383—388.
10. *Kolmogorov V.L.* Mekhanika obrabotki metallov davleniem [Mechanics metal forming]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo UGTU—UPI, 2001.
11. *Perlin I.L., Ermanok M.Z.* Teoriya volocheniya [The theory of drawing]. M.: Metallurgiya, 1971.
12. *Kolmogorov G.L., Filippov V.B., Kuznecova E.V., Trofimov V.N.* Stepen' deformacii pri volochenii kompozitnoj zagotovki [The degree of deformation in the drawing of the composite perform]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2004. No. 5. P. 39—42.
13. *Kristensen R.* Vvedenie v mekhaniku kompozitov [Introduction to the mechanics of composites]. M.: Mir, 1982.
14. *Anne W. West, Rees D. Rawlings.* The microstructure and mechanical properties of Nb₃ Sn filamentary superconducting composites. *J. Mater. Sci.* 1979. Vol. 14. Iss. 5. P. 1179—1186.
15. *Shojiro Ochiai, Kozo Osamura.* Strength and elongation of multifilamentary Nb₃Sn superconducting composite materials with small amounts of Nb₃Sn compound. *J. Mater. Sci.* 1987. Vol. 22. Iss. 6. P. 2175—2180.

References

1. *Shikov A.K., Nikulin A.D., Silaev A.G., Vorob'eva A.E., Pansyrnyi V.I., Vedernikov G.P., Dergunova E.A., Potanina L.V., Plashkin E.I., Sud'ev S.V.* Razrabotka sverhprovodnikov dlya magnitnoj sistemy ITER v Rossii [The development of superconductors for the ITER magnet system in Rus-