

## СИЛОВЫЕ УСЛОВИЯ ПРЕССОВАНИЯ ЛЕГКОСПЛАВНЫХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ СО СПИРАЛЬНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

© 2016 г. **А.Е. Афанасьев, В.Р. Каргин, Б.В. Каргин**

Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ)  
им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

*Статья поступила в редакцию 10.06.15 г., доработана 20.08.15 г., подписана в печать 27.08.15 г.*

На основе методики И.Л. Перлина, основанной на балансе активных и реактивных сил, предложено уравнение для расчета усилия прессования бурильных труб со спиральным оребрением. Поперечное сечение спиральной трубы представлено в виде гладкой трубы с винтовым расположением волокон металла и внешних спиральных ребер. В формулу добавлена составляющая, учитывающая энергию, затрачиваемую на винтовое движение металла. Показано, что усилие прессования, полученное по модернизированной формуле, на 28 % больше, чем для равновеликой по площади гладкой трубы. Выявлено, что увеличение угла подъема спирали ребер приводит к росту усилия по сравнению с таковым для продольно-оребрённых труб.

*Ключевые слова:* легкосплавная бурильная труба, спиральное оребрение, усилие прессования.

**Афанасьев А.Е.** — аспирант кафедры обработки металлов давлением СГАУ (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34).  
E-mail: alexander.afanasiev@alcoa.com.

**Каргин В.Р.** — докт. техн. наук, профессор той же кафедры. E-mail: vrkargin@mail.ru.

**Каргин Б.В.** — канд. техн. наук, доцент той же кафедры. E-mail: kargin163@gmail.com.

**Для цитирования:** *Афанасьев А.Е., Каргин В.Р., Каргин Б.В.* Силовые условия прессования легкосплавных бурильных труб со спиральным оребрением // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 2. С. 58–63.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-2-58-63.

*Afanasyev A.E., Kargin V.R., Kargin B.V.*

### **Force conditions for light-alloy spiral-finned drill pipe extrusion**

Following I.L. Perlin's technique based on active and reactive forces balance, the formula was suggested to calculate extrusion force for spiral-finned drill pipes. The spiral pipe cross section was regarded as a smooth tube with a screw arrangement of metal fibers and external spiral fins. A component introducing energy spent for the screw motion of metal was added to the formula. It was shown that the extrusion force obtained by the modified formula is 28 % higher than the same for a smooth pipe of equal area. It was discovered that the increase of fin helix angle leads to the increase of force compared to that of longitudinally finned pipes.

*Keywords:* light-alloy drill pipe, spiral finning, extrusion force.

**Afanasyev A.E.** — Postgraduate of the Department of processing of metals pressure (PMP), Samara State Aerospace University (SSAU). (443086, Russia, Samara, Moskovskoe shosse, 34). E-mail: alexander.afanasiev@alcoa.com.

**Kargin V.R.** — Dr. Sci. (Tech), Prof., Department PMP of SSAU. Tel.: +7 (927) 602-38-86. E-mail: vrkargin@mail.ru.

**Kargin B.V.** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Prof., Department PMP of SSAU. E-mail: kargin163@gmail.com.

**Citation:** *Afanasyev A.E., Kargin V.R., Kargin B.V.* Silovye usloviya pressovaniya legkosplavnykh buril'nykh trub so spiral'nyim orebreniem. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya.* 2016. No. 2. P. 58–63. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-2-58-63.

## Введение

Легкосплавные бурильные трубы со спиральным оребрением по наружной поверхности, изготавливаемые методом горячего прессования, находят широкое применение в бурильной технике. Благодаря наличию винтового оребрения они существенно снижают площадь контактного взаимодействия бурильной колонны со стенками скважины, уменьшая тем самым возникновение прихвата. Оребрение также способствует турбулизации потока промывочной жидкости в

призабойной зоне и улучшает ее промывку, что благоприятно сказывается на показателях бурения [1].

Перспективным способом производства труб с наружным спиральным оребрением является прессование с винтовым истечением металла [2–14]. При этом возможны различные технологические варианты. Согласно одному из них [3–5] трубы с наружными винтообразными ребрами можно получить путем прессования в матрицу, попереч-

ное сечение которой имеет сходство с таковым для нарезного ствола оружия. Нарезка сообщает вращательное движение металлу трубы, когда он выходит из матрицы. Матрица и игла остаются неподвижными в ходе процесса. Смазка поверхности иглы позволяет трубе вращаться вокруг нее. В другом варианте для интенсификации закручивания металла заготовки перед входом в винтовые каналы матрицы иглу вращают в направлении, совпадающем с направлением закручивания металла в винтовых каналах матрицы [8].

Установлено [5], что наиболее рациональным способом прессования труб с наружным спиральным оребрением является способ закрутки ребер непосредственно в канале матрицы.

Для обоснования выбора рациональной технологии прессования легкосплавных бурильных труб с наружным винтовым оребрением необходимо знать усилие и крутящий момент, так как характер изменения этих параметров напрямую зависит от угла подъема спирали ребер: его увеличение вызывает повышение пластических сдвигов в плоскости, перпендикулярной оси трубы, и соответственно, усилия [14].

Целью настоящей работы являлась разработка аналитических уравнений для анализа силовых условий прессования труб со спиральным оребрением с учетом винтового истечения металла.

## Методика расчета

В настоящее время для расчета усилия прессования наиболее часто применяется формула И.Л. Перлина, основанная на методе баланса мощностей активных и реактивных сил [15–17]:

$$P = R_M + T_{кр} + T_M + T_{п}, \quad (1)$$

где  $R_M$  — нормальная сила на пресс-шайбе, необходимая для осуществления основной пластической деформации прессования без учета сил трения;  $T_{кр}$ ,  $T_M$ ,  $T_{п}$  — нормальные силы на пресс-шайбе, необходимые для преодоления сил трения, возникающих соответственно на рабочей поверхности контейнера и иглы, зеркала матрицы и калибрующего пояска.

Эта формула является наиболее удобной для анализа усилия прессования труб с винтовым оребрением, так как она представлена в виде суммы составляющих реактивных сил, каждая из которых отражает влияние отдельных факторов на величину  $P$ . Проведем корректировку данной

формулы применительно к условиям прессования труб с винтовым истечением металла.

Поперечное сечение спиральных труб представляет собой сложную фигуру, образованную сопряжением ребер и гладкой части трубы. Из-за сложности его контура задача нахождения крутящего момента и усилия аналитически не решена. Поэтому спиральную трубу можно представить состоящей из нескольких элементов: гладкой трубы с винтовым расположением волокон металла и  $N$  внешних спиральных ребер, для которых аналитические решения известны. Тогда составляющую  $R_M$  можно записать как сумму сил отдельно для гладкой трубы ( $R_{M,г}$ ) и ребер ( $R_{M,р}$ ), т.е.

$$R_M = R_{M,г} + NR_{M,р}. \quad (2)$$

Для учета деформации кручения в формулу (2) необходимо ввести дополнительную составляющую, тогда

$$R_M = R_{M,г} + NR_{M,р} + R_B. \quad (3)$$

Окончательно зависимость для определения полного усилия прессования спиральных труб примет вид

$$P = R_{M,г} + NR_{M,р} + R_B + T_{кр} + T_M + T_{п}. \quad (4)$$

При прессовании спиральных труб в обжимной зоне имеет место разделение металла заготовки на локальные объемы в соответствии с количеством каналов ребер в матрице. В локальных объемах, прилегающих к ним, наблюдается тангенциальное течение металла. В связи с этим деформированное состояние при формоизменении ребер в пределах локального объема в первом приближении рассматривается как плоское, а локальный объем — в виде прямоугольной полосы площадью  $F_{н,р}$ , определяемой из соотношения

$$F_{н,р} = K_{ор} \frac{F_k}{N}. \quad (5)$$

Здесь  $F_k$  — площадь поперечного сечения контейнера;  $K_{ор}$  — коэффициент оребрения трубы [19]:

$$K_{ор} = \frac{NF_p}{F_{тр}},$$

где  $F_p$  и  $F_{тр}$  — площади поперечного сечения соответственно одного ребра и спиральной трубы.

Для расчета  $R_{M,р}$  использовали известную формулу И.Л. Перлина, полученную для прессования прямоугольного ребра из прямоугольного локального объема [15]:

$$R_{м,р} = 1,1 \frac{\alpha_m}{\sin \alpha_m} F_{н,р} S_{дс} \ln \lambda. \quad (6)$$

Здесь  $\alpha_m$  — расчетный угол канала матрицы;  $\lambda$  — коэффициент вытяжки;  $S_{дс}$  — среднее значение сопротивления деформированию в обжимной зоне:

$$S_{дс} = \sqrt{S_{дн} S_{дк}},$$

где  $S_{дн}$  и  $S_{дк}$  — сопротивления деформации металла заготовки соответственно при входе в обжимную зону и на ее выходе.

Формулы для определения  $R_{м,т}$ ,  $T_{кр}$  и  $T_m$  в случае прессования гладкой части трубы с неподвижной иглой, по данным работы [4] с учетом уточнений, имеют следующий вид:

$$R_{м,т} = \left[ 1,1 \frac{F_k(1 - K_{оп})}{\cos^2(\alpha_m/2)} - \frac{\pi d_k^2}{4 \cos^2(\alpha_{иг}/2)} \right] S_{дс} \ln \lambda,$$

$$T_{кр} = \pi [L_n - (0,6 + 0,27/\sqrt{\lambda})(D_n - d_k)] \times (D_n f_{кр} + d_k f_{иг}) S_{дн}, \quad (7)$$

$$T_m = \left[ \frac{\pi(D_n^2 - d_k^2)}{4 \sin \alpha_m} - \frac{abN}{\sin \alpha_m} \right] f_m S_{дс} \ln \frac{D_n - D_k}{D_k - d_k}.$$

Здесь  $D_n$  и  $L_n$  — соответственно диаметр и длина заготовки после распрессовки;  $D_k$ ,  $d_k$  — соответственно наружный и внутренний диаметры готовой трубы;  $f_{кр}$ ,  $f_{иг}$ ,  $f_m$  — значения коэффициентов трения соответственно на рабочей поверхности контейнера, иглы и зеркале матрицы;  $a$  и  $b$  — длина и толщина ребра соответственно;

$$\alpha_{иг} = \arcsin \left( \frac{d_k}{D_n} \sin \alpha_m \right).$$

Для аналитической оценки составляющей  $R_B$  при прессовании с кручением использовали метод баланса мощностей активных и реактивных сил. Мощность, необходимую для создания винтового истечения, равную произведению внешнего момента кручения ( $M$ ) на искомую угловую скорость вращения ( $\omega$ ) трубы на выходе из матрицы, приравнивали мощности, передаваемой пресс-штемпелем, определяемой произведением нормальной силы на пресс-шайбе ( $R_B$ ) на скорость прессования ( $v_{п}$ ), т.е.

$$R_B v_{п} = M \omega, \quad (8)$$

Откуда

$$R_B = M \frac{\omega \lambda}{v_{п}}, \quad (9)$$

где  $v_{п}$  — осевая скорость истечения.

Используя соотношение между угловой и поступательной скоростями истечения:

$$\omega = \frac{2\pi}{B} v_{п}, \quad (10)$$

окончательно получим

$$R_B = M \lambda \frac{2\pi}{B}. \quad (11)$$

Здесь  $B$  — шаг спирального оребрения, равный

$$B = \pi D_k / \operatorname{tg} \psi,$$

где  $\psi$  — угол подъема спирали.

На большей части обжимной зоны заготовки сопротивление пластическому скручиванию ( $M_{сопр}$ ) является максимальным, поэтому момент кручения  $M = 0$ . При движении к выходу из обжимной зоны сопротивление металла пластическому скручиванию уменьшается, а момент скручивания, приложенный к заготовке со стороны винтовых каналов инструмента, возрастает. Затем возникает ситуация, когда в некотором сечении заготовка будет испытывать пластическое скручивание. Этому моменту соответствует условие  $M = M_{сопр}$ .

В связи с этим величину крутящего момента, необходимого для закручивания трубы на заданный угол, можно подсчитать по известным уравнениям в зависимости от геометрии сечения и сопротивления деформации металла у выхода из обжимной зоны. Крутящий момент представим как сумму моментов, необходимых для поворота гладкой части трубы и ребер, т.е.

$$M = M_T + \sum_{i=1}^N M_{pi}, \quad (12)$$

где  $i$  — число ребер.

Значения  $M_T$  и  $M_{pi}$  определяются из выражений [18]

$$M_T = F_{тр} R_{ср} t S_{дк},$$

$$M_{pi} = \frac{1}{4} a_i b_i^2 S_{дк}, \quad (13)$$

где  $F_{тр}$  — площадь поперечного сечения трубы без ребер;  $R_{ср}$  — средний радиус трубы;  $t$  — толщина стенки трубы.

При выводе формулы для расчета  $T_{п}$  с учетом интенсивного скольжения металла заготовки относительно винтовых каналов инструмента сделаем допущение, что деформация кручения происходит преимущественно в области калибрующего пояса, причём

$$T_{\Pi} = T_{\text{пм}} + T_{\text{пи}}, \quad (14)$$

где  $T_{\text{пм}}$  и  $T_{\text{пи}}$  — силы трения, возникающие на поверхностях калибрующего пояска матрицы и иглы соответственно.

По данным рисунка полная скорость истечения частиц элементарного слоя при винтовом истечении с угловой скоростью  $\omega$  равна

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_i + \mathbf{V}_0, \quad (15)$$

где  $V_0 = \omega d/2$  — окружная скорость.

Для трубы с наружным спиральным оребрением

$$V = V_i \left( \cos \frac{d}{D_{\text{оп.п}}} \psi \right)^{-1}, \quad (16)$$

где  $d$  — текущий диаметр;  $D_{\text{оп.п}}$  — диаметр окружности, описанной относительно наружных ребер трубы.

Так как полная скорость истечения меняется по высоте ребер, уменьшаясь к центру вращения по линейному закону, то в расчетах составляющей  $T_{\Pi}$  использовались средние значения угла подъема спирали. Для трубы с наружным спиральным оребрением среднюю скорость истечения можно считать равной

$$V_{\text{и.ср}} = \frac{V_i}{\cos[0,5\psi(1 + D_{\text{к}}/D_{\text{оп.п}})]}. \quad (17)$$

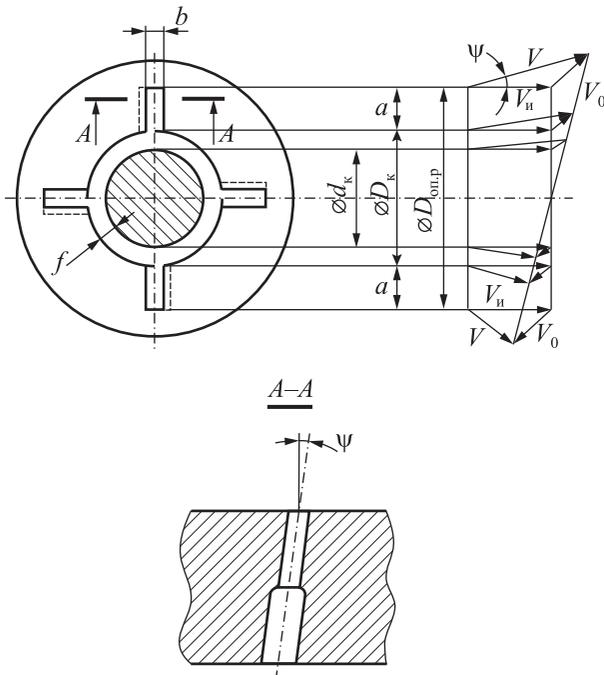


Схема течения металла при прессовании труб со спиральным оребрением

Применяя уравнение равенства активных и реактивных мощностей для прессования трубы с наружным спиральным оребрением из круглой полой заготовки, получаем следующее уравнение:

$$T_{\Pi} v_{\Pi} = (2a + b) N l_{\text{в}} S_{\text{дк}} f_{\text{пм}} \frac{V_i}{\cos[0,5\psi(1 + D_{\text{к}}/D_{\text{оп.п}})]} + (\pi D_{\text{к}} - N) l_{\text{в}} S_{\text{дк}} f_{\text{пм}} \frac{V_i}{\cos[\psi D_{\text{к}}/D_{\text{оп.п}}]} + \pi d_{\text{к}} l_{\text{в}} S_{\text{дк}} f_{\text{пи}} \frac{V_i}{\cos[\psi d_{\text{к}}/D_{\text{оп.п}}]}, \quad (18)$$

где  $l_{\text{в}}$  — длина винтового участка;  $f_{\text{пм}}$ ,  $f_{\text{пи}}$  — коэффициенты трения по калибрующему пояску матрицы и иглы соответственно;  $v_{\Pi}$  — скорость прессования.

Окончательно можно записать

$$T_{\Pi} = \lambda_{\text{в}} S_{\text{дк}} \left\{ \left[ \pi D_{\text{к}} \frac{N}{\cos[\psi D_{\text{к}}/D_{\text{оп.п}}]} + \frac{(2a + b)N}{\cos[0,5\psi(1 + D_{\text{к}}/D_{\text{оп.п}})]} \right] f_{\text{пм}} + \frac{\pi d_{\text{к}}}{\cos[\psi D_{\text{к}}/D_{\text{оп.п}}]} f_{\text{пи}} \right\}. \quad (19)$$

## Результаты и их обсуждение

Для анализа полученного уравнения (4) проведен расчет силовых условий прессования бурильной трубы из алюминиевого сплава Д16 с тремя наружными спиральными ребрами прямым методом на неподвижной игле со скоростью истечения  $V_i = 2$  м/мин. В расчетах приняты следующие значения параметров:  $D_{\text{оп.п}} = 200$  мм;  $D_{\text{к}} = 140$  мм;  $d_{\text{к}} = 100$  мм;  $b = 30$  мм;  $K_{\text{оп}} = 0,32$ ;  $\lambda = 11,6$ ; диаметр контейнера — 370 мм; угол конуса матрицы — 75°; размеры полой заготовки  $\varnothing 362 \times 130 \times 720$  мм; температура прессования 440 °С. Значения коэффициентов трения и сопротивления деформации взяты на основе рекомендаций [15]:  $f_{\text{кр}} = f_{\text{м}} = 0,5$ ;  $f_{\text{иг}} = f_{\text{пи}} = 0,1$ ;  $f_{\text{пм}} = 0,2$ ;  $S_{\text{дм}} = 38$  МПа;  $S_{\text{дк}} = 64$  МПа. Результаты расчета приведены в таблице.

Из анализа представленных данных следует, что полное усилие прессования с учетом контура оребрения по формулам (2), (6) и (7) на 28 % выше, чем усилие прессования равновеликой по площади гладкой трубы [15]. По мере увеличения  $\psi$  составляющие  $R_{\text{в}}$  и  $T_{\Pi}$ , определяемые по уравнениям (11) и (19), возрастают из-за увеличения полной скорости истечения и поверхностного трения в

**Расчетные значения усилия прессования спиральных труб с наружным оребрением**

Параметр	Угол подъема спирали ребер ( $\psi^\circ$ )			
	0°	15°	30°	45°
$R_B/R_{MT}$	0	0,02	0,06	0,11
$T_{II}(\psi)/T_{II}(0)$	1,00	1,06	1,24	1,65
$P(\psi)/P(0)$	1,00	1,02	1,04	1,09

винтовых каналов инструмента, что также повышает полное усилие прессования.

При  $\psi = 0$ ,  $B = \infty$ ,  $R_B = 0$ ,  $T_{II}(\psi) = T_{II}(0)$ ,  $P(\psi) = P(0)$  можно получить формулу для расчета усилия прессования продольно оребренных труб. Значение  $P$ , рассчитанное по предлагаемой методике для рассматриваемой трубы, отличается в пределах 8 % от полученного экспериментально усилия, определенного в момент начала основной стадии прессования через давление на плунжере в главном цилиндре горизонтального гидравлического пресса усилием 50 МН.

**Заключение**

Хорошая сходимости расчетных и экспериментальных значений  $P$  позволяет рекомендовать полученные аналитические уравнения для инженерных расчетов усилий прессования спиральных труб как с наружным, так и внутренним оребрением, а при  $d_k = 0$  — и для спиральных профилей звездообразной формы.

**Литература**

1. Файн Г.М., Макаров Е.М. Состояние и перспективы производства и применения труб нефтепромыслового сортамента из алюминиевых сплавов // Территория нефтегаз. 2007. No. 5. С. 66—70.
2. Scribner A.W. Metal extrusion: Pat. 3107787 (USA). 1963.
3. Шевченко А.А., Черкасов Н.К., Коваль А.Т. Конструирование матриц для прессования труб с винтовым истечением металла // Кузн.-штамп. пр-во. 1976. No. 2. С. 6—8.
4. Шухат О.М. Прессование винтовых и кольцевых профилей и труб // Кузн.-штамп. пр-во. 1977. No. 6. С. 25—27.
5. Старостин Ю.С., Каргин В.Р. Исследование процесса прессования труб с винтообразными ребрами // Эффективность прессового производства и качество пресс-изделий. М.: ВИЛС, 1983. С. 82—85.

6. Yang D.Y. Analytical and Experimental investigation into lubricated three — Dimensional Extrusion of general helical sections // CIPP Ann. 1986. Vol. 35. No. 1. P. 169—172.
7. Каргин В.Р. Конструирование инструмента для прессования труб со спиральным оребрением // Кузн.-штамп. пр-во. 1991. No. 2. С. 26—28.
8. Каргин В.Р. Способ прессования труб с наружным винтовым оребрением: Пат. 1690883 (РФ). 1991.
9. Beygelzimer Y., Orlov D., Varyakhin V. A new severe plastic deformation method: twist extrusion // UI-trialine grained materials II / Eds. Yt. Zhu et al. TMS. 2002. P. 297—304.
10. Bauser M., Saner G., Siegert K. Extrusion Second Ed-ohio. USA, ASM International Material Park, 2006.
11. Бережной В.А. Оценка практических возможностей винтовой экструзии // Технология легких сплавов. 2006. No. 4. С. 143—146.
12. Петров А.П., Еремеев Е.В., Беспалов А.В. Возможности конечно-элементного моделирования винтового прессования // Технология легких сплавов. 2007. No. 1. С. 38—41.
13. Bahadori Sh., Ranjbar., Mousavi S.A., Akbari A. Examination of an aluminum alloy behavior under different routes of twist extrusion // Mater. Sci. Eng. A. 2011. Vol. 528. No. 21. P. 6527—6534.
14. Северденко В.Н., Мурас В.С., Суходрев Э.Ш. Горячее гидродинамическое выдавливание режущего инструмента. Минск: Наука и техника, 1974.
15. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования. М.: Металлургия, 1974.
16. Ерманок М.З. Прессование панелей из алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1974.
17. Ерманок М.З., Каган Л.С., Головинов М.Ф. Прессование труб из алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1992.
18. Старостин Ю.С., Головинов М.Ф., Каргин В.Р. Ребристые трубы из алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1983.
19. Верховод В.К., Пастушкин В.Т., Сморок В.С. Метод расчета усилий прессования ребристых труб // Производство труб. М.: Металлургия, 1969. Вып. 21. С. 37—43.

**References**

1. Fayn G.M., Makarov E.M. Sostoyaniye i perspektivy proizvodstva i primeneniya trub neftepromyslovogo sortamenta iz alyuminievyykh splavov [Condition and prospects of production and application of pipes of an oil-field range from aluminum alloys]. *Territoriya neftegaz*. 2007. No. 5. P. 66—70.

2. *Scribner A.W.* Metal extrusion: Pat. 3107787 (USA). 1963.
3. *Shevchenko A.A., Cherkasov N.K., Koval A.T.* Konstruirovaniye matrits dlya pressovaniya trub s vintovym is-techeniem metalla [Designing of matrixes for pressing of pipes with the screw expiration of metal]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 1976. No. 2. P. 6—8.
4. *Shukhat O.M.* Pressovanie vintovykh i kol'tsevykh profilei i trub [Pressing of screw and ring profiles and pipes]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 1977. No. 6. P. 25—27.
5. *Starostin Yu.S., Kargin V.R.* Issledovanie protsessa pressovaniya trub s vintootobraznymi rebrami. In: *Effektivnost' pressovogo proizvodstva i kachestvo press-izdelii* [Research of process of pressing of pipes with spiral edges. In: *Efficiency of press production and quality of press products*]. Moscow: VILS, 1983. P. 82—85.
6. *Yang D.Y.* Analytical and Experimental investigation into lubricated three. Dimensional Extrusion of general helical sections. *CIPP Ann.* 1986. Vol. 35. No. 1. P. 169—172.
7. *Kargin V.R.* Konstruirovaniye instrumenta dlya pressovaniya trub so spiral'nym orebreniem [Designing of the tool for pressing of pipes with spiral fins]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 1991. No. 2. P. 26—28.
8. *Kargin V.R.* A way of pressing of pipes with external screw fins: Pat. 1690883 (RF). 1991.
9. *Beygelzimer Y., Orlov D., Varyakhin V.* A new severe plastic deformation method: twist extrusion. In: *UI-tralane grained materials II*. Eds. Yt. Zhu et al. TMS. 2002. P. 297—304.
10. *Bauser M., Saner G., Siegert K.* Extrusion Second Ed-ohio. USA, ASM International Material Park, 2006.
11. *Berezhnaya V.A.* Otsenka prakticheskikh vozmozhnostei vintovoi ekstruzii [Assessment of practical opportunities of screw extrusion]. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2006. No. 4. P. 143—146.
12. *Petrov A.P., Yeremeyev E.V., Bepalov A.V.* Vozmozhnosti konechno-elementnogo modelirovaniya vintovogo pressovaniya [Possibilities of final and element modeling of screw pressing]. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2007. No. 1. P. 38—41.
13. *Bahadori Sh., Ranjbar., Mousavi S.A., Akbari A.* Examination of an aluminum alloy behavior under different routes of twist extrusion. *Mater. Sci. Eng. A*. 2011. Vol. 528. No. 21. P. 6527—6534.
14. *Severdenko V.N., Muras V.S., Sukhodrev E.Sh.* Goryachee gidrodinamicheskoe vydavlivaniye rezhushchego instrumenta [Hot hydrodynamic expression of the cutting tool]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1974.
15. *Perlin I.L., Raytbarg L.H's.* Teoriya pressovaniya [Theory of pressing]. Moscow: Metallurgiya, 1974.
16. *Ermanok M.Z.* Pressovanie panelei iz alyuminievykh splavov [Pressing of panels from aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1974.
17. *Ermanok M.Z., Kagan L.S., Golovinov M.F.* Pressovanie trub iz alyuminievykh splavov [Pressing of pipes from aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1992.
18. *Starostin Yu.S., Golovinov M.F., Kargin V.R.* Rebristye trub iz alyuminievykh splavov [Ridge pipes from aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1983.
19. *Leader V.K., Pastushkin V.T., Smorshchok V.S.* Metod rascheta usilii pressovaniya rebristykh trub. In: *Proizvodstvo trub* [Metod of calculation of efforts of pressing of ridge pipes. In: *Production of pipes*]. Moscow: Metallurgiya, 1969. Vol. 21. P. 37—43.