

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 α_m — расчетный угол канала матрицы; λ — 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:

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

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

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

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 (ω) 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 ψ — 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 ω 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_{π} использовались средние значения угла подъема спирали. Для трубы с наружным спиральным оребрением среднюю скорость истечения можно считать равной

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

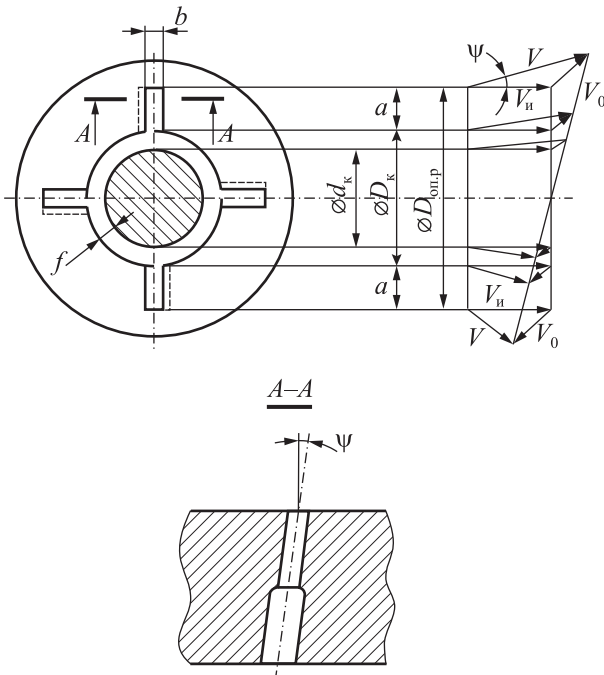


Схема течения металла при прессовании труб со спиральным оребрением

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_{π} — 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 ψ составляющие $R_{\text{в}}$ и T_{π} , 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 (ψ°)			
	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 сходимость 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-traline grained materials II / Eds. Yt. Zhu et al. TMS. 2002. P. 297—304.
10. *Bausier 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 vintootvornymi 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-tralinereduced materials II*. Eds. Yt. Zhu et al. TMS. 2002. P. 297—304.
10. *Bauser M., Saner G., Siebert 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., Bespalov 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., Raytbar 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.