

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ МАТРИЦЫ ПРИ ПРЕССОВАНИИ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Titov¹ V., Shmeleva² L.

1 – National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kiev, Ukraine;

2 – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kiev, Ukraine

FEATURES OF THE METAL FLOW IN THE CYLINDRICAL CHANNEL OF THE MATRIX AT THE COMPACTING WITH INTERMIXING

Рассмотрены особенности течения металла в цилиндрическом канале матрицы в новом процессе прессования с перемешиванием. Получено общее решение для поля скоростей перемещений на основании рассмотрения составляющих процессов обтекания цилиндра сплошной среды вследствие вращения инструмента. Показано, что полученные компоненты вектора скоростей позволяют выполнить анализ напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров процесса.

Применение нового процесса обеспечивает получение больших деформаций сдвига при прессовой обработке металлов и сплавов, в том числе в твердотелом состоянии и для порошковых материалов.

Ключевые слова: прессования с перемешиванием, большие деформации сдвига, скорости перемещения, кинематика процесса деформирования, теория пластического течения металлов, механика сплошных сред.

Введение

Перспективность использования наукоемкой техники машиностроения (летательных аппаратов, транспортных средств и других) определяется их надежностью и экономичностью в эксплуатации. Одним из основных факторов, который обеспечивает эти показатели, является применение эффективных металлов и сплавов с совокупностью высоких механических свойств прочности и пластичности, а также равномерной мелкодисперсной или специальной структурой.

Перспективность повышения механических свойств легированием металлов в последние годы снижается. Так за последние 40-50 лет удельная прочность конструкционных алюминиевых сплавов увеличилась с 15 до 24-28 км и, по прогнозу на ближайшие годы, может достигнуть 30-34 км. При этом удельные показатели модуля упругости практически не изменяются и находятся на уровне $(24-27) \cdot 10^3$ км [1, 2, 3]. Поэтому в середине прошлого столетия, как альтернатива, активно начали развиваться технологии производства композиционных материалов и изделий из них.

В последние десятилетия получило развитие перспективное направление повышения механических свойств путем формирования мелкодисперсной микроструктуры металлов и сплавов в условиях больших пластических деформаций сдвига при всестороннем сжатии [4, 5]. При реализации технологических схем обработки металлов деформацией простого сдвига при равноугловом прессовании [4, 5] или деформацией сдвига кручением при винтовом прессовании [6, 7] под высоким гидростатическим давлением теоретически и экспериментально обосновано, что развитие деформаций сдвига однозначно связано с дроблением структуры и повышением механических свойств. Существующие способы равноугового и винтового прессования, наряду с преимуществами, имеют и некоторые недостатки, к основным из которых можно отнести:

- неравномерность распределения свойств и структуры по сечению обрабатываемой заготовки;
- ограничение на величину деформации за один проход прессования, что повышает трудоемкость процесса;
- высокая энергоемкость и трудоемкость процесса деформирования;
- трудности, связанные с получением полуфабрикатов с большими габаритами, которые имеют большую длину и другие.

Частично эти недостатки решены при реализации процессов «Conform» [8] за счет возможности использования непрерывных полуфабрикатов и активных сил трения для реализации процесса.

Однако, эти процессы не решают задачу получения больших пластических деформаций сдвига за один проход заготовки, а также получения длинномерных полуфабрикатов.

В работе автора [9] описан разработанный и экспериментально обоснованный способ получения непрерывных полуфабрикатов прессованием, который позволяет получать непрерывные заготовки, практически, любых габаритов. Создание деформаций сдвига в прессуемом материале осуществляется активными силами трения инструмента, который совершает вращательное движение и расположен в рабочем канале матрицы для прессования.

Процессы деформирования металла при этой схеме реализации являются более сложными, чем при реализации простых схем сдвига (равноугольного и винтового прессования), однако характеризуются большой составляющей сдвиговой деформации. Поэтому изучение напряженно-деформированного состояния процесса прессования с кручением является важным этапом решения научно-технической задачи последующего проектирования и реализации этого процесса.

Цель

Целью настоящей статьи является исследование кинематических закономерностей течения металла как сплошной среды в цилиндрическом канале матрицы при прессовании с перемешиванием.

Исследование

При теоретическом анализе процесса рассмотрен рабочий канал матрицы цилиндрической формы радиуса R , в котором движется металл (сплошная среда) в направлении оси Ox . Внутри рабочего канала расположен инструмент также цилиндрической формы радиусом a , ось которого расположена перпендикулярно оси рабочего цилиндра и пересекает эту ось (рис. 1). В процессе пластической деформации инструмент вращается вокруг своей оси со скоростью ω .

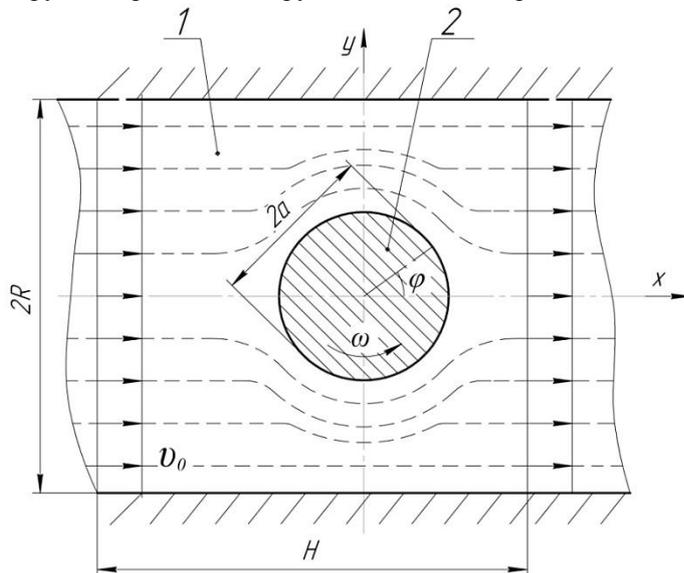


Рис. 1. Расчетная схема течения металла в поперечном сечении рабочего канала матрицы (1) штампа, внутри которого расположен вращающийся инструмент (2) цилиндрической формы

материальных частиц за счет вращения цилиндрического инструмента, окруженного движущейся материальной средой – V_2 . Тогда общий вектор скорости перемещения материальных частиц V_0 описывается векторной суммой:

$$\vec{V}_0 = \vec{V}_1 + \vec{V}_2.$$

В соответствии с принятым подходом, общее решение находим из рассмотрения задач обтекания цилиндра потоком сплошной среды (жидкости, металла) и задачи деформации этой среды обусловленной вращением инструмента цилиндрической формы.

Обтекание сплошной средой цилиндрического инструмента в рабочем канале матрицы

При прессовании металл движется вдоль рабочего канала и должен обтекать цилиндрический инструмент. Можно предположить, что это движение является идентичным течению вязкой несжимаемой жидкости. Схематично задача может быть рассмотрена как задача движения вязкой несжимаемой жидкости со скоростью V_0 в большом цилиндре радиусом R . Эта жидкость должна обтекать инструмент в форме цилиндра радиусом a , который расположен перпендикулярно движению жидкости и вращается с угловой скоростью ω .

Решение построено на основе рассмотрения плоской задачи о равномерном движении цилиндра в вязкой жидкости [10]. На больших расстояниях от цилиндра частицы движущейся среды будут практически неподвижны. Поэтому задача полностью эквивалентна задаче обтекания цилиндрического стержня потоком

Закономерности течения определяем с использованием общих уравнений механики сплошной среды [10, 11]. При определении скоростей перемещений материальных частиц сплошной среды использован подход [12], который основан на декомпозиции кинематики процесса деформирования. Его применение позволяет отдельно рассматривать составляющие скоростей перемещений материальных частиц заготовки в очаге деформаций, а потом на основе синтеза строить общее поле скоростей перемещений для рассматриваемого процесса.

В этой постановке процесс деформирования с кинематической точки зрения представляет собой векторную сумму составляющих скоростей перемещения материальных частиц за счет движения материала вдоль рабочего канала матрицы цилиндрической формы с обтеканием цилиндрического инструмента внутри этого канала – V_1 , а также скорости перемещения

вязкой среды, скорость которой на границе «внутренний цилиндр–вязкая среда» равна скорости движения этого цилиндра (рис. 1).

Замена задачи о движении тела в неподвижной жидкости [10, 11] задачей об обтекании неподвижного цилиндра позволяет считать задачу стационарной, т.е. правомерно предположение $\frac{dv}{dt} = 0$. Кроме того, переход к задаче об обтекании неподвижного стержня означает замену переменных: $x \rightarrow x' - v_0 t$; $y \rightarrow y'$; $x \rightarrow x' - v_0 t$; $y \rightarrow y'$.

Задача имеет цилиндрическую симметрию, поэтому удобнее работать в цилиндрической (на плоскости полярной) системе координат: $x = r \cos \varphi$; $y = r \sin \varphi$, а $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, тогда

$$\cos \varphi = \frac{x' - v_0 t}{\sqrt{(x' - v_0 t)^2 + y'^2}}, \quad r = \sqrt{(x' - v_0 t)^2 + y'^2}; \quad \sin \varphi = \frac{y'}{\sqrt{(x' - v_0 t)^2 + y'^2}} \quad (1)$$

Система уравнений движения для несжимаемой вязкой жидкости в отсутствии объемных сил имеет вид:

$$\begin{cases} (\nu \cdot \nabla) \nu = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \nu; \\ \operatorname{div}(\nu) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

где ρ, ν, η – плотность, кинематическая и динамическая вязкость жидкости, a, v_0 – радиус цилиндра и скорость движения жидкости.

Для малых чисел Рейнольдса $\left(\frac{v_0 a}{\nu} = \operatorname{Re}\right)$ нелинейным слагаемым $(\nu \cdot \nabla) \nu$ можно пренебречь, поскольку в этом случае $(\nu \cdot \nabla) \nu \ll \nu \Delta \nu$. Тогда система (2) сведется к виду:

$$\begin{cases} \nabla p = \eta \Delta \nu; \\ \operatorname{div}(\nu) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

Считаем, что начало координат находятся в центре круга, а положительное направление оси x совпадает с направлением движения течения. Применяя операцию div к первому уравнению системы (3), с учетом второго уравнения системы получим $\Delta p = 0$. Уравнение $\Delta p = 0$ в цилиндрической системе будет иметь вид:

$$\Delta p = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} = 0 \quad \text{или} \quad r \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (4)$$

Решение (4) ищем в виде $p = -\frac{A}{r} \cos \varphi$. После чего, для того чтобы найти поле скоростей, запишем проекции на орт e_r первого уравнения системы для плоского случая.

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial r} &= \eta \left[\Delta v_r - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right]; \\ \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

После использования в первом уравнении системы второго уравнения $\frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} = -\frac{\partial}{\partial r} (r v_r)$ получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\eta}{r^2} \left[r^2 \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial \varphi^2} + v_r + 3r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right], \quad (7)$$

решение которого будем искать в виде $v_r = \frac{f(r)}{r} \cos \varphi$.

Результатом решения уравнения (7) будут функционально определенные компоненты скоростей и давления:

$$p = -\frac{A}{r} \cos \varphi; \quad v_r = \left(B + \frac{C}{r^2} - \frac{A}{3\eta} r \right) \cos \varphi; \quad v_\varphi = \left(-B + \frac{C}{r^2} + \frac{2A}{3\eta} r \right) \sin \varphi. \quad (8)$$

Явный вид неизвестных, на данном этапе, коэффициентов A, B, C может быть определен лишь при наложении начальных и граничных условий. В данной статье будет рассмотрено два набора краевых условий:

первый будет сформулирован для задачи, где сплошная среда не имеет конечных границ и свободно обтекает вращающийся цилиндр; использование второго набора позволит учесть поведение среды в сильно ограниченном пространстве (в данной работе это радиус внешнего цилиндра). Такое рассмотрение позволит, во-первых, правильно проследить динамику движения среды обтекающей вращающийся цилиндр (первый набор краевых условий), во-вторых, даст возможность определить каким образом на динамику этой среды будет оказывать влияние пространственное ограничение.

Для начала рассмотрим, так называемую, бесконечную задачу. Будем считать, что на бесконечности все процессы, кроме начальной скорости сплошной среды затухают, то есть: $v_x|_{x \rightarrow \infty} = v_0$; $v_y|_{y \rightarrow \infty} = 0$.

Или в полярной системе координат:

$$v_r|_{r=a} = 0; \quad v_r|_{r \rightarrow \infty} = v_0 \cos \varphi; \quad v_\varphi|_{r \rightarrow \infty} = -v_0 \sin \varphi,$$

где первое условие означает наличие прилипания вещества сплошной среды на поверхности инструмента, и две следующие определенные из того, что в бесконечности все процессы, кроме начальной скорости сплошной среды затухают.

Используя начальные условия в системе решений (8), получим

$$p = p_0, \quad v_r = v_0 \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \cos \varphi, \quad v_\varphi = -v_0 \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \sin \varphi, \quad (9)$$

где p_0 – начальное давление в системе.

В качестве примера, распределение компонент скоростей перемещений для $a = 10$ мм, $v_0 = 1$ мм/с показано на рис. 2

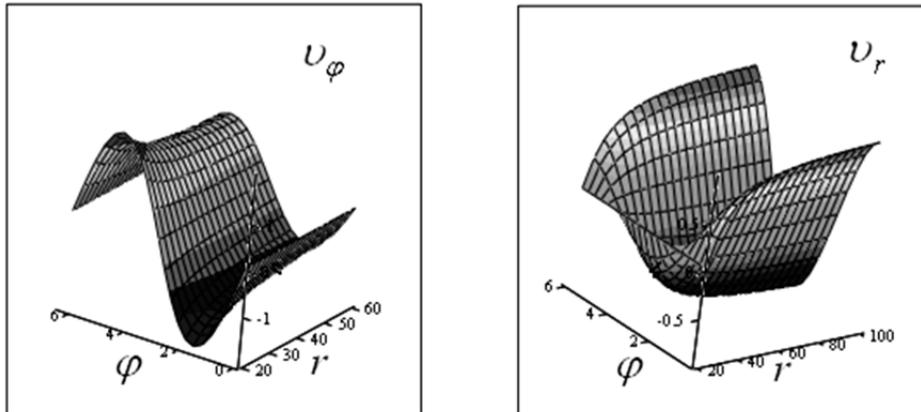


Рис. 2. Профили скоростей в полярной системе координат для случая затухания процессов на бесконечности

Определим компоненты скоростей перемещений в декартовой системе координат:

$$v_{1x} = v_0 \left(1 - a^2 \frac{(x - v_0 t)^2 - y^2}{[(x - v_0 t)^2 + y^2]^2}\right) \quad v_{1y} = -2a^2 v_0 \frac{(x - v_0 t)y}{[(x - v_0 t)^2 + y^2]^2} \quad (10)$$

Эти зависимости продемонстрированы на рис. 3. На рис. 3 круглая область в плоскости $x = 0$ и $y = 0$ определяет местонахождение расположения в координатах xOy вращающегося инструмента.

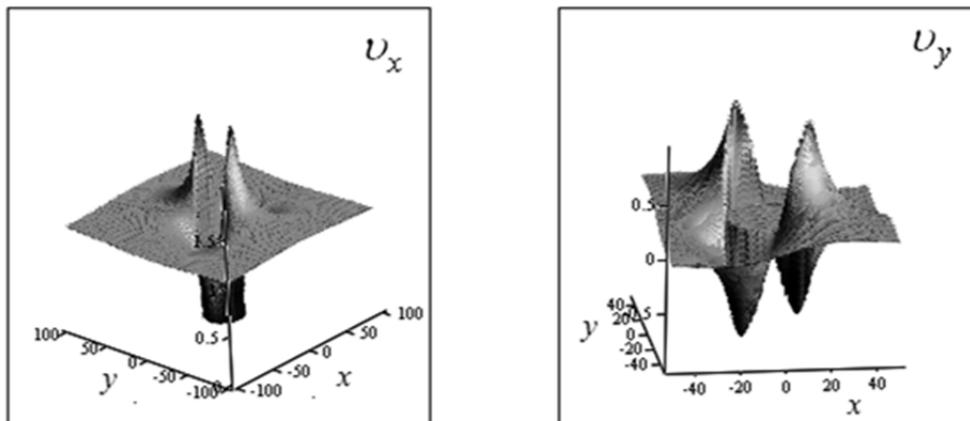


Рис. 3. Распределение компонент скоростей в декартовой системе координат

Подробнее можно рассмотреть динамику скоростей на плоскости для конкретных сечений оси Ox (рис. 4), или оси Oy (рис. 4). На этих рисунках область расположения инструмента обозначена схематически овалом на который указывает стрелка \downarrow .

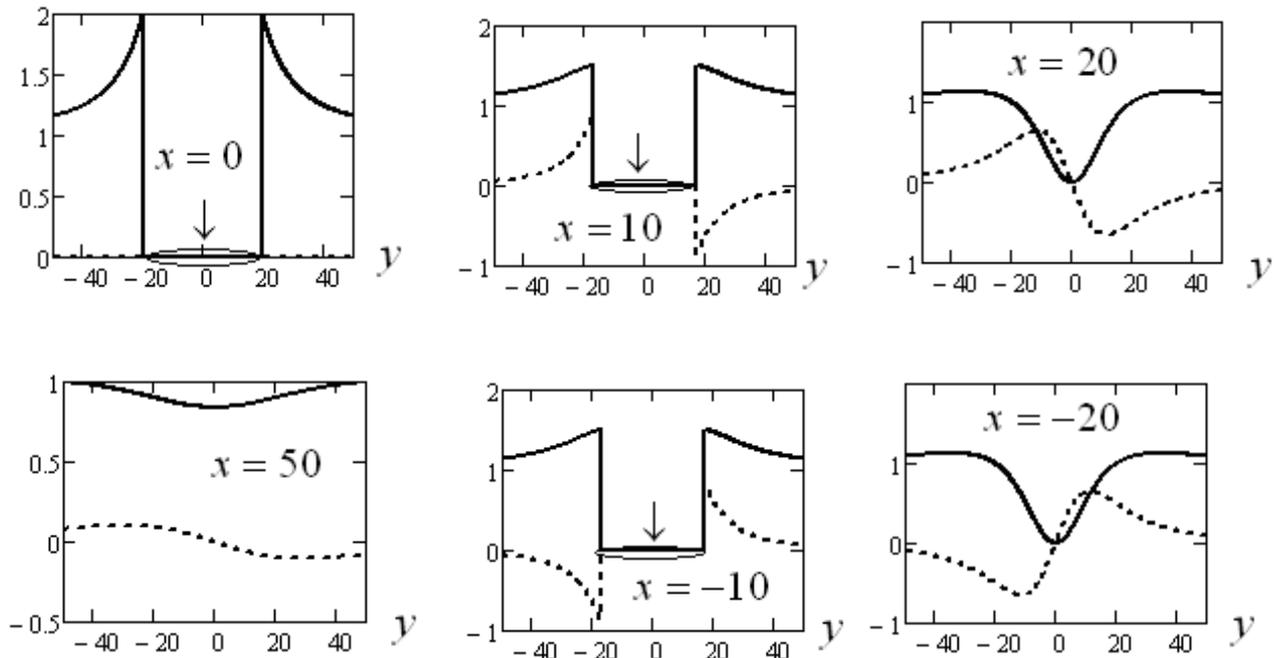


Рис. 4. Изменения скоростей v_{1x}, v_{1y} вдоль оси y для различных фиксированных значений $x : v_{1x} - v_{1y} \dots$

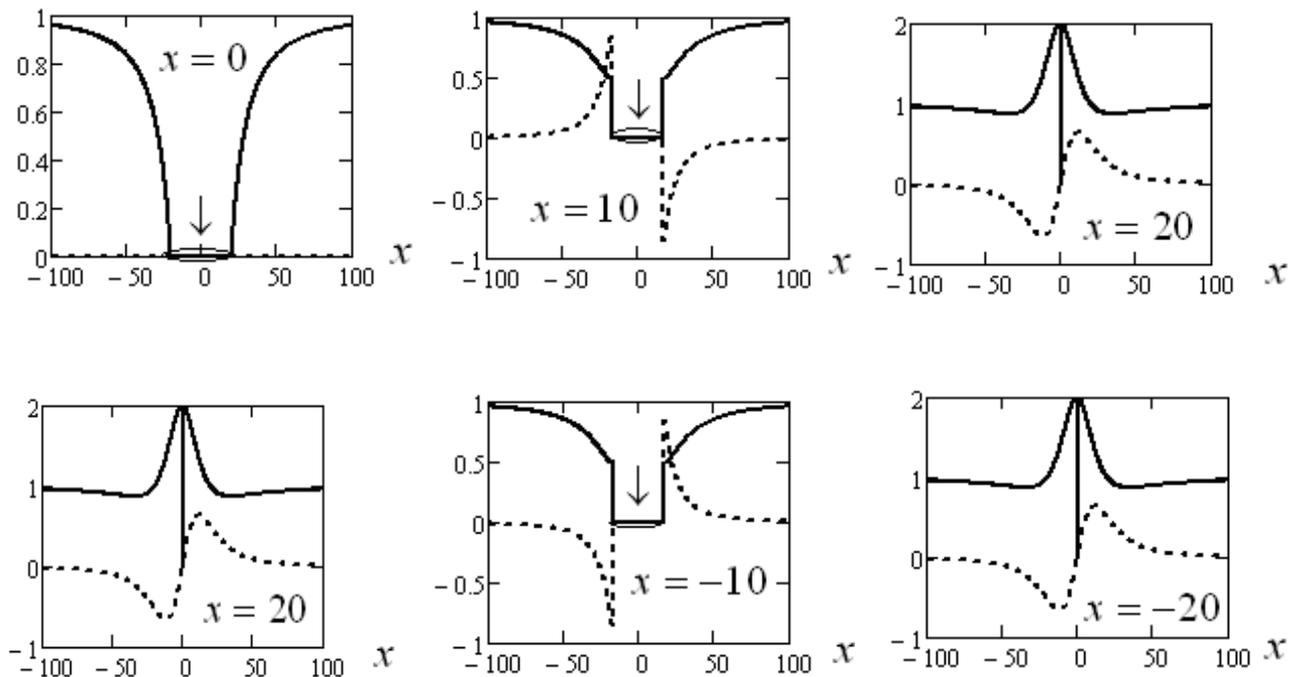


Рис. 5. Изменения скоростей v_{1x}, v_{1y} вдоль оси x для различных фиксированных значений $y : v_{1x} - v_{1y} \dots$

Если граничные условия сформулировать не в бесконечности, а на окружности радиуса R (радиус основания рабочего канала), то в результате использования следующих граничных условий:

$$v_r|_{r=a} = 0; \quad v_r|_{r \rightarrow R} = v_0 \cos \varphi; \quad v_\varphi|_{r \rightarrow R} = -v_0 \sin \varphi, \quad (11)$$

динамика скоростей перемещений приобретает более сложный вид. Это позволяет записать выражение для определения давления в системе рабочий канал штампа - инструмент:

$$p = p_0 + \frac{6\eta v_0}{r} \frac{a^2 \cos \varphi}{3Ra^2 - 2a^3 - R^3};$$

$$v_r = \frac{v_0}{3Ra^2 - 2a^3 - R^3} \left(-2a^3 - R^3 + \frac{1}{r^2} a^2 R^3 + 2a^2 r \right) \cos \varphi; \quad (12)$$

$$v_\varphi = \frac{v_0}{3Ra^2 - 2a^3 - R^3} \left(2a^3 + R^3 + \frac{1}{r^2} a^2 R^3 - 4a^2 r \right) \sin \varphi.$$

В качестве примера, распределение компонент скоростей перемещений для зависимостей (12) при $a = 10$ мм, $v_0 = 1$ мм/с, $R = 40$ мм, $\eta \approx 10^9$ Па, $p_0 = 0$ показано на рис.6.

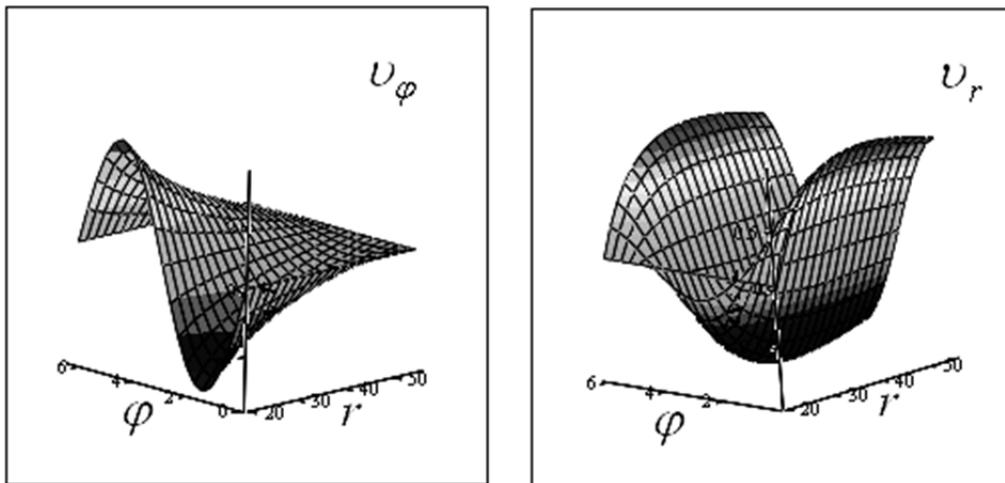


Рис. 6. Профили скоростей в полярной системе координат для случая затухания процессов на расстоянии радиуса R

Если для бесконечного случая давление в системе остается постоянным, то с учетом граничных условий (12) можно определить изменение давления (рис. 7).

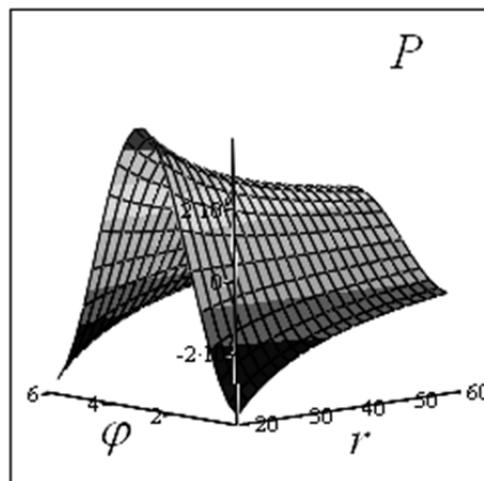


Рис. 7. Изменение давления в процессе обтекания инструмента

В декартовой системе координат составляющие вектора скорости обтекания цилиндрического инструмента описываются следующей системой:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 v_x = \frac{\nu_0 \left[-2a^3 - R^3 + \left(\frac{a^2 R^3}{(x - \nu_0 t)^2 + y^2} + 2a^2 \sqrt{(x - \nu_0 t)^2 + y^2} \right) (x - \nu_0 t)^2 \right]}{(3Ra^2 - 2a^3 - R^3) \left((x - \nu_0 t)^2 + y^2 \right)} \\
 v_y = \frac{\nu_0 \left(\frac{1}{(x - \nu_0 t)^2 + y^2} a^2 R^3 - 4a^2 \sqrt{(x - \nu_0 t)^2 + y^2} \right) y^2}{(3Ra^2 - 2a^3 - R^3) \left((x - \nu_0 t)^2 + y^2 \right)} \\
 v_y = \frac{\nu_0 y (x - \nu_0 t) \left[\frac{2a^2 R^3}{(x - \nu_0 t)^2 + y^2} - 2a^2 \sqrt{(x - \nu_0 t)^2 + y^2} \right]}{(3Ra^2 - 2a^3 - R^3) \left((x - \nu_0 t)^2 + y^2 \right)}
 \end{array} \right. \quad (13)$$

Полученные соотношения (13) графически показаны на рис. 8. Здесь плоскость в середине рисунка, расположенная в окрестности нуля определяет местонахождение инструмента.

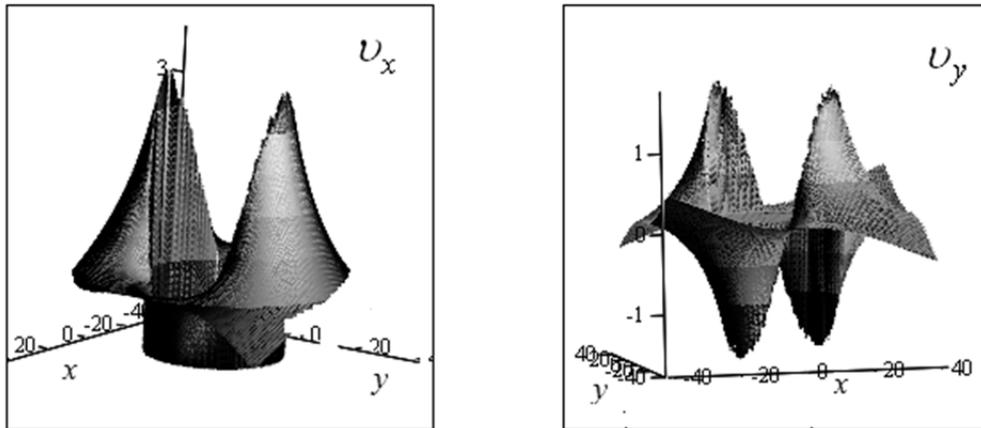


Рис. 8. Профили скоростей в декартовой системе координат

Движение сплошной среды вследствие вращения цилиндрического инструмента

Рассмотрим вращательное движение инструмента в неподвижной среде используя гидродинамические уравнения (3). Для рассмотрения вращательного движения инструмента справедливо предполагать, что траекториями всех частиц является окружности с центрами на оси Oz , т.е. $v_r = 0$ и $v_z = 0$. При таком предположении из уравнения несжимаемости - второго уравнения системы (3) будем иметь: $\frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} = 0$. Поэтому, для того, чтобы найти поле скоростей перемещений частиц сплошной среды при вращательном движении инструмента достаточно записать проекции на орт e_φ первого уравнения системы для плоского случая. Если считать, что давление, которое вызвано вращением стержня, не зависит от φ , то для единой φ -й компоненты скорости из системы (3) остается только одно дифференциальное уравнение:

$$\Delta v_\varphi - \frac{v_\varphi}{r^2} = 0. \quad (14)$$

Решение, будем искать в виде: $v_\varphi = f(r)C$. В результате получим: $v_\varphi = Ar + \frac{B}{r}$.

Считается, что цилиндр вращается в безграничной вязкой жидкости с постоянной угловой скоростью ω . При условии прилипания частиц жидкости к поверхности вращающегося инструмента и предположения, что на бесконечном удалении от инструмента скорость частиц жидкости обращается в ноль, краевые условия будут иметь вид:

$$v_{2\varphi}|_{r \rightarrow \infty} = 0; \quad v_{2\varphi}|_{r=a} = \omega a,$$

С учетом этих граничных условий имеем зависимость, показывающую, что с увеличением расстояния от границы инструмента тангенциальная компонента скорости затухает:

$$v_{2\varphi} = \frac{\omega a^2}{r}. \quad (15)$$

В случае ограничения затухания скоростей на границе рабочего канала матрицы тангенциальная компонента скорости перемещений примет вид:

$$v_{2\varphi} = \frac{\omega a^2}{R^2 - a^2} \left(-r + \frac{R^2}{r} \right). \quad (16)$$

Зависимость (16) обеспечивает более быстрое затухание скорости $v_{2\varphi}$ среды уже на уровне окружности радиусом R .

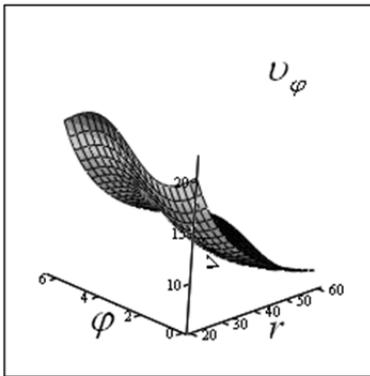


Рис. 9. Угловая компонента скорости перемещений при вращательном движении инструмента

Задача обтекания средой вращающегося цилиндрического инструмента

Рассмотрим совместно две задачи: 1) обтекания неподвижного цилиндрического инструмента вязкой несжимаемой средой, 2) вращение цилиндрического инструмента в окружающей сплошной среде. Суперпозиция двух задач в цилиндрической системе приводит к изменениям лишь угловой компоненты скорости v_φ и система решений сведется к: сумме решений (9) и (15) (случай, где граничные условия бесконечные), или сумме решений (12) и (16) (случай с краевыми условиями определенными на круге радиуса рабочего канала цилиндрической формы).

Поскольку радиальная составляющая скорости не меняется, то на рис. 9 представлена только углового компонента скорости:

Если же переходить к декартовой системе координат, то изменения будут в обоих компонентах скорости и v_{x0} и v_{y0} . И для бесконечного случая будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} v_{x0} = v_0 \left(1 + a^2 \frac{y^2 - (x - v_0 t)^2}{[(x - v_0 t)^2 + y^2]^2} \right) - \frac{\omega a^2 y}{(x - v_0 t)^2 + y^2} \\ v_{y0} = - \frac{2a^2 v_0 y (x - v_0 t)}{[(x - v_0 t)^2 + y^2]^2} + \omega a^2 \frac{x - v_0 t}{(x - v_0 t)^2 + y^2} \end{cases} \quad (17)$$

Зависимости (17) графически показаны на рис. 10.

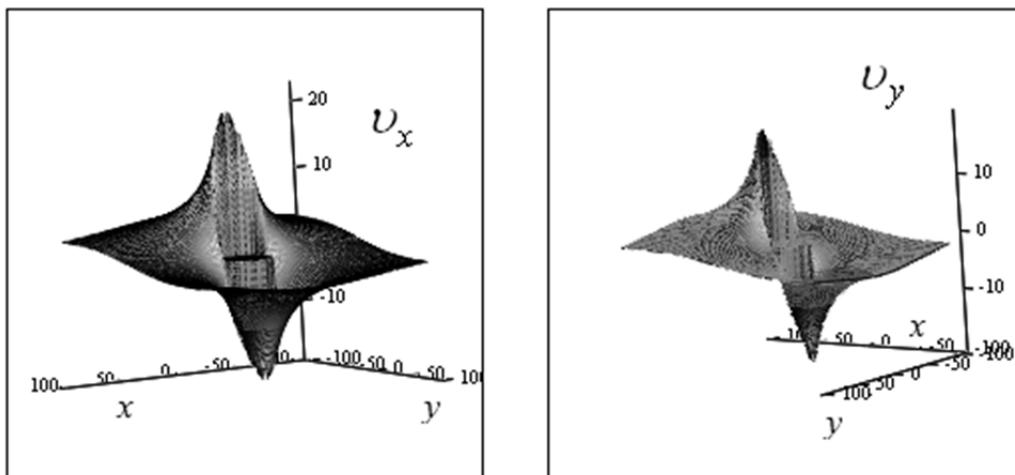


Рис. 10. Распределение скоростей перемещений в декартовой системе координат для бесконечных граничных условий

На рис. 10 плоский участок в окрестности нуля определяет область, где расположено сечение вращающегося инструмента. Для более детального рассмотрения приведем изменения скоростей v_{x0} и v_{y0} на плоскости для различных фиксированных значений x (рис. 11) и для различных фиксированных значений y (рис. 12).

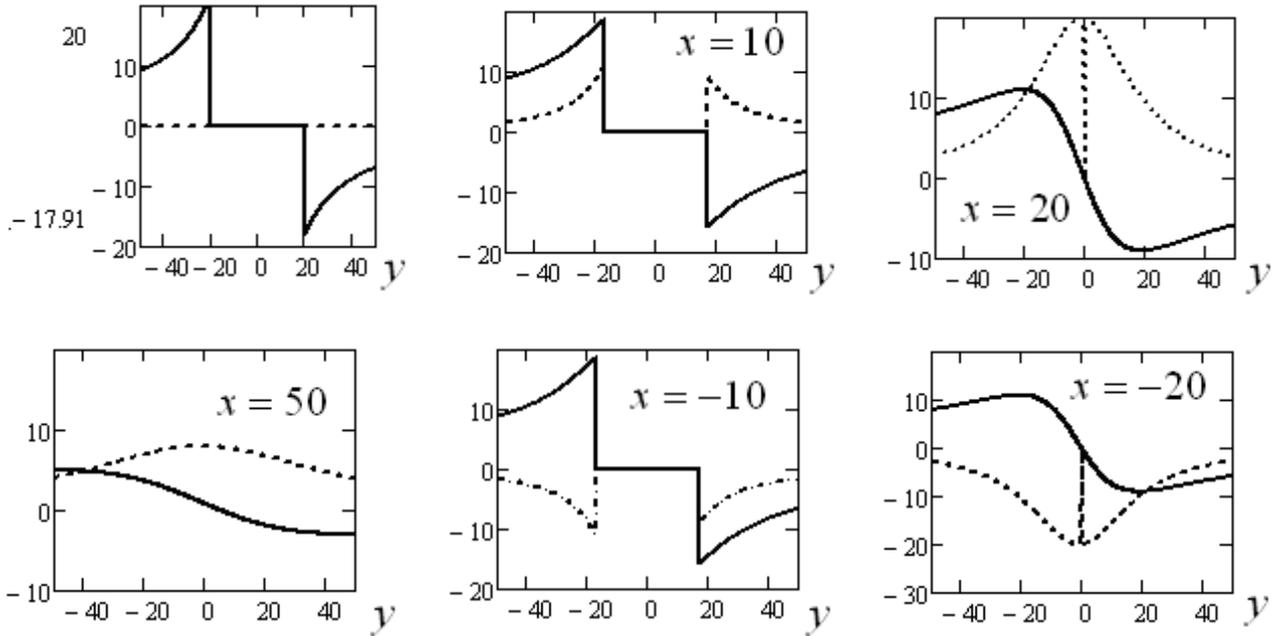


Рис. 11. Изменения скоростей v_{0x}, v_{0y} вдоль оси y для различных фиксированных значений x : $v_{0x} \rightarrow, v_{0y} \dots$

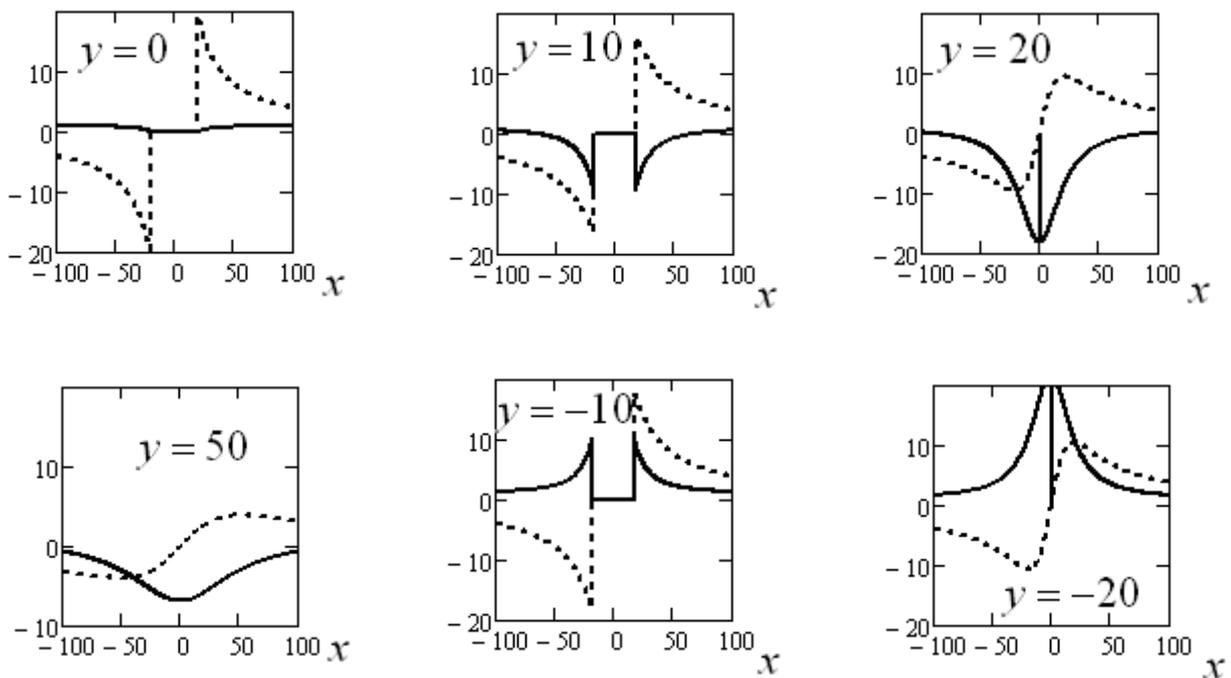


Рис. 12. Изменения скоростей v_{0x}, v_{0y} вдоль оси x для различных фиксированных значений y : $v_{0x} \rightarrow, v_{0y} \dots$

Для конечного случая компоненты скорости в декартовой системе координат следующие:

$$\begin{cases}
 v_{0x} = \frac{v_0}{3Ra^2 - 2a^3 - R^3} \times \\
 \times \left(-2a^3 - R^3 + 2a^2 \sqrt{(x - v_0 t)^2 + y^2} + a^2 R^3 \frac{(x - v_0 t)^2 - y^2}{\left[(x - v_0 t)^2 + y^2 \right]^2} + \frac{2a^2 y^2}{\sqrt{(x - v_0 t)^2 + y^2}} \right) \\
 - \frac{\omega a^2}{R^2 - a^2} \left(-1 + \frac{R^2}{(x - v_0 t)^2 + y^2} \right) y \\
 v_{0y} = \frac{2a^2 v_0}{3Ra^2 - 2a^3 - R^3} \frac{y(x - v_0 t)}{(x - v_0 t)^2 + y^2} \left(\frac{R^3}{(x - v_0 t)^2 + y^2} - \sqrt{(x - v_0 t)^2 + y^2} \right) + \\
 + \frac{\omega a^2}{R^2 - a^2} \left(-1 + \frac{R^2}{(x - v_0 t)^2 + y^2} \right) (x - v_0 t).
 \end{cases} \quad (18)$$

Полученные поля скоростей перемещения материальных частиц (17) и (18) позволяют произвести анализ напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров процесса прессования с перемешиванием для металлических материалов при использовании замкнутой системы уравнений механики сплошных сред [12, 13].

Анализ зависимостей (17) и (18) показывает, что использование процесса с перемешиванием позволяет получать в деформируемом металле большие пластические деформации сдвига. Это делает его перспективным для обработки не только металлов и сплавов, но и порошковых материалов, а также сплавов в твердожидком состоянии.

Выводы

С позиций механики сплошной среды и гидродинамики рассмотрены теоретические подходы к построению скоростей перемещений материальных частиц металла при реализации нового процесса прессования с перемешиванием для достижения больших деформаций сдвига. Такая обработка обеспечивает высокие показатели механических и пластических свойств. Перспективность рассмотренного способа заключается в возможности обработки полуфабрикатов больших габаритов и непрерывной длины.

Получены и проанализированы поля скоростей перемещения в виде компонент вектора перемещений материальных частиц деформируемой сплошной среды в цилиндрической декартовой системах координат в зависимости от габаритных размеров (радиуса) рабочего канала матрицы для прессования и инструмента цилиндрической формы, скорости прессования и угловой скорости вращения инструмента.

Использование замкнутой системы уравнений механики сплошных сред в теории пластического течения металлов позволяет провести анализ напряженно-деформированного состояния металла заготовки в очаге деформаций и энергосиловых параметров процесса прессования с перемешиванием.

Анотація. Розглянуто особливості течії металу в циліндричному каналі матриці в новому процесі пресування з перемішуванням. При русі всередині робочого каналу метал обтікає циліндричний інструмент, який обертається навколо своєї осі. Визначення швидкостей переміщення матеріальних часток виконано з використанням загальних рівнянь механіки суцільних середовищ і гідродинаміки, а також декомпозиції кінематики процесу деформування. Загальне рішення для поля швидкостей отримано на основі розгляду складових процесів обтікання циліндра суцільний середовищем з урахуванням обертання інструменту. Показано, що отримання компоненти вектора швидкостей дозволяє виконати аналіз напружено-деформованого стану та енергосилових параметрів процесу пресування з перемішуванням при використанні замкнутої системи рівнянь теорії пластичної течії металів.

Застосування нового процесу забезпечує отримання великих деформацій зсуву при пресовій обробці металів і сплавів, у тому числі в твердожидком стані і для порошкових матеріалів.

Ключові слова: пресування з перемішуванням, великі деформації зсуву, швидкості переміщення, кінематика процесу деформування, теорія пластичної течії металів, механіка суцільних середовищ.

Abstract. Features of the metal flow in the cylindrical channel of the matrix in new process of pressing with intermixing are considered. At the motion in the working channel the metal flows around the cylindrical instrument which has axial rotation. Definition of velocity of travel of the particles is executed with use of the general equations of a continuum mechanics and hydrodynamics, and also decomposition of kinematics of the deformation process. The general solution for the velocity field is received on the basis of consideration of the flow around of the cylinder by the continuum mechanics taking into account tool rotation. It is shown that deriving vector component of velocities allows making the analysis of the intense-deformed state and of the energy-power parameters of pressing process with intermixing at use of the equations closed system of the theory plastic flow of

metals. Application of new process secures deriving of major shear strains at the press processing of the metals and alloys, including the solid-liquid state and for powder materials.

Keywords: pressing with intermixing, high shear strain, moving velocity, kinematics of the deformation process, the theory of plastic flow of metals, continuum mechanics.

1. Фриляндер И.Н. Свойства композиционных материалов и эффективность их применения / Композиционные материалы – М.: Наука, 1981. – С. 5-11.
2. Белов А.Ф. Некоторые новые технологические принципы разработки конструкционных материалов на основе металлических сплавов / Металловедение и технология легких сплавов – М.: Наука, 1979 – С.5-8.
3. Бастц Дж. Время композитов пришло / Аэрокосмическая техника – 1989, № 2. – С. 181-186.
4. Валиев Р.З. Развитие равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых металлов и сплавов // Металлы – 2004, № 1, – С. 5-14.
5. Сегал В.М. Развитие обработки материалов интенсивной сдвиговой деформацией // Металлы – 2004, № 1. – С. 5-14.
6. Бейгельзимер Я.Е. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций / Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков Г.С. – Донецк, ф. ТЕАН, 2005. – 87 с.
7. Павленко Д.В. Применение винтовой экструзии для получения субмикроструктурной структуры и гомогенизации титанового сплава VT 3-1 / Павленко Д.В., Овчинников А.В., Качан А.Я., Шевченко В.Г., Бейгельзимер Я.Е., Заика Т.П., Решетов А.В., Кулагин Р.Ю. // Вестник двигателестроения, 2007, № 2. – С. 185-188.
8. Боткин А.В. Деформационные и силовые параметры процесса равноканального углового прессования длинномерной заготовки по схеме «Conform» / Боткин А.В., Валиев Р.З., Абрамов А.Н., Рааб А.Г. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением – 2009, № 11. – С. 8-14.
9. Патент 62940 Україна. МПК В21С 23/01(2006.1) Спосіб пресування виробів / Тітов В.А., Тривайло М.С., Вишневський П.С., (UA); заявник НТУУ «КПІ» – № u201101177; заявл. 02.02.2011; опубл. 26.09.2011, Бюл. 18.
10. Федорченко А.М. Теоретична фізика. Том 1. – К.: Вища школа, 1992. – 535с.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Том VI. – М. Наука, 1986. – 736с.
12. Тітов В.А. Некоторые перспективные направления развития процессов выглаживания конструкционных материалов / Тітов В.А., Тітов А.В. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» - 2009. - № 32. – С. 78-86.
13. Алексеев Ю.Н. Вопросы пластического течения металлов. - Харьков: Изв-во ХГУ, 1968. - 188 с.
14. Тітов В.А., Шамарін Ю.С., Долматов А.І., Борисевич В.К., Маковой В.О., Алексеенко В.М. Високошвидкісні методи обробки металів тиском – К.: КВІЦ, 2010. – 304 с.

REFERENCES

1. Friljander I.N. Svoystva kompozicionnyh materialov i jeffektivnost ih primenenija (Properties of composite materials and the efficiency of their use). Kompozicionnye materialy Moscow: Nauka, 1981, pp. 5-11.
2. Belov A.F. Nekotorye novye tehnologicheskie principy razrabotki konstrukcionnyh materialov na osnove metallicheskih splavov (Some new technological principles for structural materials based on metal alloys). Metallovedenie i tehnologija legkih splavov Moscow: Nauka, 1979, pp. 5-8.
3. Basc Dzh. Vremja kompozitov prishlo (It's time to composites). Ajerokosmicheskaja tehnika, 1989, no 2, pp. 181-186.
4. Valiev R.Z. Razvitie ravnokanalnogo uglovogo pressovaniya dlja poluchenija ultramelkozernistyh metallov i splavov (Development of equal-channel angular pressing for ultrafine metals and alloys). Metally, 2004, no 1, pp. 5-14.
5. Segal V.M. Razvitie obrabotki materialov intensivnoj sdvigovoj deformaciej (Development of data processing intensive shear deformation). Metally, 2004, no 1. pp. 5-14.
6. Bejgelzimer JA.E. Vintovaja jekstruzija – process nakoplenija deformacij (Screw Extrusion - the accumulation of strain). Bejgelzimer JA.E., Varjuhin V.N., Orlov D.V., Synkov G.S., Doneck, f. TEAN, 2005, 87 p.
7. Pavlenko D.V. Primenenie vintovoj jekstruzii dlja poluchenija submikrokristallicheskoj struktury i gomogenizacii titanovogo splava VT 3-1 (The use of screw extrusion for SMC structure and homogenization titanium alloy VT 3-1) .Pavlenko D.V., Ovchinnikov A.V., Kachan A.JA., Shevchenko V.G., Bejgelzimer JA.E., Zaika T.P., Reshetov A.V., Kulagin R.JU. Vestnik dvigatelestroenija, 2007, no 2, pp. 185-188.
8. Botkin A.V. Deformacionnye i silovye parametry processa ravnokanalnogo uglovogo pressovaniya dlinnomernoj zagotovki po sheme «Conform» (Deformation and power parameters of the process channel angular pressing lengthy procurement scheme «Conform»). Botkin A.V., Valiev R.Z., Abramov A.N., Raab A.G. Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem, 2009, no 11, pp. 8-14.
9. Titov V.A., Trivajlo M.S., Vishnevskij P.S. Sposib presuvannja virobiv [A method of pressing] Patent Ukrainy no 62940. A. 26.09.2011.
10. Fedorchenko A.M. Teoretichna fizika. Tom 1 (Theoretical Physics. Vol.1.), Kiev: Vishha shkola, 1992, 535 p.
11. Landau L.D., Lifshic E.M. Gidrodinamika. Tom VI ((Hydrodynamics. Vol. 1)), Moscow: Nauka, 1986, 736 p.
12. Titov V.A., Titov A.V. Nekotorye perspektivnye napravlenija razvitija processov vyglazhivaniya konstrukcionnyh materialov (Some perspectives for the development burnishing processes of structural materials). Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prac. Tematichnij vipusk: Novi rishennja v suchasnih tehnologijah. Harkiv: NTU «HPI», 2009, no 32, pp. 78-86.
13. Alekseev JU.N. Voprosy plasticheskogo techenija metallov (The issues of plastic flow of metals), Harkov. Izv-vo HGU, 1968, 188 p.
14. Titov V.A., SHamarin JU.C., Dolmatov A.I., Borisevich V.K., Makovej V.O., Alekseenko V.M. Visokoshvidkisni metodi obrobki metaliv tiskom (High Velocity Methods Metal Forming), Kyiv. KVIC, 2010, 304 p.