

УДК 669.295

Канд. техн. наук А. Е. Волков

ООО «Научно-производственная фирма «Рутений», г. Екатеринбург, Россия

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА И УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА «ОБРАТНОГО И ВСЕСТОРОННЕГО ВИНТОВОГО ПРЕССОВАНИЯ»

*Рассмотрен новый метод деформации металлов – «Винтовое прессование». У металлов, обработанных различными методами интенсивной немонотонной пластической деформации, к которым относятся равноканальное угловое прессование, винтовая экструзия, всесторонняя ковка, улучшаются качество и свойства, в том числе прочность в 2–4 раза. Другой целью внедрения нового метода «Винтового прессования» является увеличение скорости и массы обрабатываемого металла по сравнению с существующими методами.*

**Ключевые слова:** винтовое прессование (ВП), обратное винтовое прессование (ОВП), всестороннее винтовое прессование (ВВП).

### Введение

Как известно, сильнодеформированные металлы за счет значительного изменения кристаллической структуры приобретают качественно новые свойства, многие из которых представляют практический интерес. В частности, они обладают высокой пластичностью в сочетании с большой прочностью. При создании авиационных сплавов данное сочетание представляет особый интерес.

Одновременно с уменьшением размера зерна различные сплавы проявляют повышенные пластические свойства, позволяя сокращать количество переходов за счет повышения степени деформации. Также особенно важно, что сплавы с меньшим размером зерен могут деформироваться при более низких температурах.

С практических позиций при горячей деформации металлов это означает снижение общих затрат, отходов и времени производства продукции.

### Эффективность применения новых методов немонотонного деформирования

Схемы, обеспечивающие немонотонное деформирование, создают предпосылки к накоплению большей по величине и равномерной по распределению деформации в металле, чем схемы, в которых внешняя нагрузка задает монотонное деформирование.

Для получения наиболее мелкозернистой структуры металлов за последнее время были разработаны новые методы, отличающиеся от традиционных методов деформации, таких как прокатка, ковка и прессование. В настоящее время среди специалистов в области материаловедения и металлофизики, устоялся термин Интенсивная Пластическая Деформация (ИПД) [1]. Также используется термин процесс накопления дефор-

мации (ПНД) [2]. Это не обычные операции обработки давлением, целью которых является, прежде всего, формоизменение заготовок, а процессы, призванные формировать структуру материалов, обеспечивающую заданные физико-механические свойства.

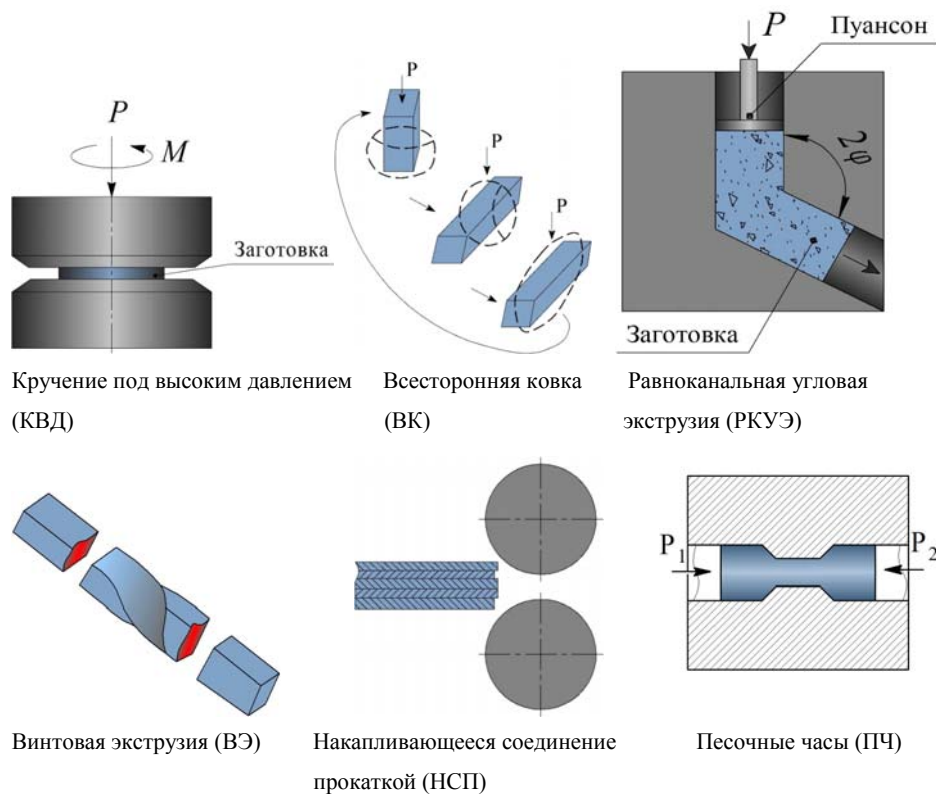
Эффект больших деформаций можно получить путем немонотонного формоизменения заготовок. Это используется в процессах обработки давлением, к которым относятся – кручение под высоким давлением, равноканальная угловая экструзия, всесторонняя ковка, винтовая экструзия и др.

Схемы немонотонного деформирования позволяют достигать наименьшей величины структуры зерна за более короткое время. При этом установлено, что это достижение не зависит от степени, скорости и давления деформации, но зависит от фактора варьирования направлением деформации или от скорости изменения направления деформации.

На рис. 1 показаны основные схемы процессов накопления деформации, которые были разработаны за последнее время.

Для определения степени измельчения структуры кристалла принята относительная степень накопленной деформации (параметр Одквиста). Величина  $\epsilon$  не имеет в литературе постоянного обозначения, ее называют по-разному: истинная степень деформации, параметр Одквиста, а также длина дуги траектории деформации в пятимерном пространстве Ильюшина.

Важную роль может играть сам вид траектории деформации (простое или сложное нагружение) и насколько существенно поворачиваются главные оси тензора скорости деформации в ходе деформации (монотонное или немонотонное течение материала). Параметр Одквиста позволяет количественно оценить



**Рис. 1.** Процессы накопления деформации, используемые для обработки объемных заготовок

влияние истории деформирования, в отличие от величины деформации его величина при циклическом нагружении будет расти с каждым циклом.

В таблице 1 показана величина параметра Оджвиста, в виде истинной степени деформации  $e$  для процессов монотонной и немонотонной деформации. Сравнение величин степени деформации  $e$  этих процессов показывает, насколько быстро методы немонотонной деформации могут измельчать структуру металла.

Очевидно, что деформация, накапливаемая кручением на 1÷3 оборота, является недостижимой для простых схем одноосного деформирования, поскольку это потребовало бы сжать или растянуть образец, более чем в 10 млн. раз.

Сегодня возрастает актуальность пересмотра деформационной схемы обработки металлов, сложившейся на различных предприятиях, где для деформации ис-

пользуются слитки большого диаметра, величина зерна которых находится в пределах от 10 до 100 тысяч микрон. Для получения высокой удельной прочности металла необходимо измельчать исходную структуру до  $0,1 \div 0,01$  мкм, что не представляется возможным с использованием традиционного деформационного оборудования. По последним данным различные сплавы, обработанные методом немонотонной пластической деформации, могут повышать прочность в два, три и даже четыре раза. Повышения прочности металла за счет легирования и деформации по обычной схеме до такой величины добиться невозможно.

Кроме изменения деформационной схемы металла, необходимо изменение в схеме нагрева металла. Как показала практика, новые скоростные методы нагрева показывают новые технологические возможности при повышении прочности металлов.

**Таблица 1** – Величина параметра Оджвиста, вычисленная для различных процессов

Кручение		Осадка (растяжение)		Осадка с кручением	
Число оборотов	$e$	$L_k/L_0 = H_0/H_k$	$e$	Число оборотов	$e$
0,25	4,5	2	0,7	0,25	7,5
1	18,2	5	1,6	1	30,2
2	36,4	10	2,3	2	60,3
3	54,6	1 000	6,9	3	90,4
4	72,8	1 000 000	13,8	4	121
5	91,0	10 000 000	16,1	5	151

Если рассмотреть зависимость формирования структуры от скорости нагрева, то можно отметить, что на всех этапах технологического передела стремятся к повышению скорости нагрева [3]. Экспериментально показано, что уровень прочности и пластичности титановых сплавов с применением скоростного нагрева, в пределах 25–250 °C/с, на 10–30 % выше, чем после традиционных методов нагрева. Применительно к титановым сплавам было установлено, что скоростной нагрев позволяет подавить охрупчивание и устранить интенсивное окисление и образование окалины, которые осложняют дальнейшую механическую обработку и увеличивают расход металла из-за необходимости удаления окисленного слоя.

Заказчики продукции металлургических предприятий, зная о возможностях новых методов деформирования, постепенно будут требовать от производителей повышения прочностных свойств металлов. Поэтому, на сегодня, становится актуальным пересмотр сложившейся технологической схемы производства деформационных металлов, путем обычной прокатки,ковки и прессования.

Новая технологическая схема на стадии плавления должна обеспечивать создание специализированных заготовок под деформацию с наименьшей величиной литого зерна [4], а новая технологическая схема нагрева и деформации должна обеспечивать получение наименьшей величины деформированного зерна с наименьшими временными и экономическими затратами.

#### **Новый метод немонотонного деформирования – «Обратное и Всестороннее Винтовое прессование»**

Для снижения общих затрат, отходов и времени производства при обработке металлов давлением в промышленном масштабе предложен новый метод «Обратного и Всестороннего Винтового прессования» (ОВВП).

Для того, чтобы осуществить процесс винтового прессования с наименьшими затратами необходима литая заготовка с наименьшей величиной зерна, где нет накопленной деформации. Такую заготовку, возможно, производить методом литья или жидкой штамповки, заполняя расплавом кристаллизаторы небольшого сечения с интенсивным перемешиванием расплава до момента его полной кристаллизации.

Формированию наименьшей величины зерна способствует интенсивный отвод тепла от кристаллизующегося расплава. Уменьшение сечения кристаллизатора позволяет увеличить скорость кристаллизации расплава металла. Но с технологической стороны уменьшение площади сечения кристаллизатора, можно проводить только до определенного предела, так как заготовка будет производиться не достаточно большого объема.

Площадь охлаждения и массу заготовки, возможно, увеличить за счет ее длины, но увеличение длины также необходимо проводить до определенного предела.

Наиболее оптимальные размеры заготовки под винтовое прессование необходимо подбирать исходя из массы деталей, которые производятся промышленностью. Например, если масса готовых деталей находится в пределах 150÷300 кг, то масса заготовки под интенсивную пластическую деформацию должна находиться в пределах 350÷500 кг. Например, для титановой заготовки, если принять площадь сечения в 1 дм<sup>2</sup>, для набора массы в 450 кг длина заготовки составит около 10 м.

При площади внутреннего сечения кристаллизатора, равной 1 дм<sup>2</sup>, круглый кристаллизатор будет иметь длину периметра равную 3,54 дм, квадратный кристаллизатор 4 дм, а треугольный кристаллизатор 4,56 дм. Это означает, что от расплава массой 450 кг тепло в круглом кристаллизаторе длиной 10 м, будет отводиться через боковую площадь равную 354 дм<sup>2</sup>, в квадратном через 400 дм<sup>2</sup>, а в треугольном 456 дм<sup>2</sup>. Как показывают расчеты, при различной геометрии сечения кристаллизатора будет различная скорость теплоотвода, наименьшая скорость теплоотвода будет у круглых кристаллизаторов, а наибольшая у треугольных кристаллизаторов.

Как показал опыт, при осуществлении различных видов интенсивной пластической деформации кручение заготовки позволяет с наибольшей эффективностью произвести измельчение структуры металла. Разработанные виды немонотонной пластической деформации имеют ограничение по массе деформируемых заготовок. Так, например, при использовании методов ВЭ и КВД ограничение по массе заготовок связано с очень большими силами трения, возникающими при деформации между металлом и инструментом. Увеличение массы заготовки приводит к увеличению трения и ограничению прочности инструмента, который начинает ломаться при осуществлении деформации.

Для увеличения объема деформируемого металла применяют метод всестороннейковки ВК. Но этот метод не позволяет деформировать металл с высокой скоростью. Всесторонняяковка не производит деформацию в замкнутом объеме инструмента, как следствие это снижает степень деформации и скорость измельчения структуры металла.

Чтобы решить проблему увеличения скорости деформации и увеличения массы деформируемой заготовки был разработан процесс комбинированного винтового прессования [5]. Для осуществления этого процесса наиболее эффективно использование литой заготовки большой длины и малого сечения. Это дает возможность нагревать заготовку скоростным электродотактным методом.

#### **Схема прессования**

Схема прессования изображена на рис. 2–12 и состоит из двух частей – «Обратного винтового прессования» (ОВП) и «Всестороннего винтового прессования» (ВВП). В качестве примера, на рис. 2 показана титановая заготовка массой 450 кг, длиной 10 метров,

треугольного сечения, площадью 1 дм<sup>2</sup>, со стороной равной 152 мм. После электроконтактного высокоскоростного нагрева заготовка на рис. 3 скручивается на *n*-оборотов.

На рис. 4 изображена схема прессования (набора металла) скрученной заготовки в штампе пуансоном. Внутреннее сечение штампа может быть различной геометрии – круглым, квадратным, шестигранным, треугольным и т.д. Скрученная заготовка, если рассматривать ее с торца, будет описывать вершинами граней окружность, которая будет вписана во внутренний контур штампа.

Для осадки заготовки в штампе наиболее подходит треугольная форма, куда вписывается эта окружность. Площадь скрученной треугольной заготовки и площадь треугольного сечения штампа имеют соотношение 1÷4. После прессования в штампе скрученной заготовки длиной 10 м, длина прессованной заготовки будет 2,5 м, при этом степень деформации составит:

$$\square = \frac{H_0 - H_k}{H_0} 100\% = 75\%,$$

где  $H_0$  – длина заготовки до деформации

$H_k$  – длина заготовки после деформации.

Заготовку наиболее эффективно прессовать двумя пуансонами.

На рис. 5 показан момент извлечения полученной заготовки, длиной 2,5 метра, площадью 4 дм<sup>2</sup> со стороной 304 мм из штампа, под действием одного из пуансонов. Заготовка на выходе из штампа попадает во втулку, которая начинает сразу скручивать заготовку на определенный угол. Величина скручивания будет зависеть от пластических свойств металла и температуры нагрева. Направление скручивания может совпадать с прежним направлением или может быть направлено в

противоположную сторону. Изменение направления скручивания позволяет более интенсивно измельчать структуру металла.

После скручивания производится очередная деформация заготовки в квадрат. На рис. 6 показано прессование пуансоном заготовки в штампе с внутренним квадратным сечением, где заготовка опирается на упор. При прессовании в квадрат, скрученная заготовка должна быть вписана в его внутренний контур, где диаметр окружности будет равен стороне квадрата длиной 351 мм. При этом площадь заготовки будет соотноситься к площади квадрата как 1: 3,08. После прессования заготовки будет получен квадрат со стороной 351 мм, длиной 812 мм.

На рис. 7 при выпрессовке из штампа, заготовка попадает во втулку, которая ее скручивает в очередной раз.

На рис. 8 показано прессование скрученной квадратной заготовки в круглом штампе. Конечная толщина заготовки в виде круглой шайбы будет равна 351 мм, то есть равна стороне будущего квадрата длиной 812 мм, который в дальнейшем будет прессоваться из этой шайбы, с изменением направления прессования на 90°. Прессование (рис. 10) шайбы, зажатой в штампе по толщине, производится по диаметру пуансонами с двух сторон. Два пуансона сжимают диаметр до размера 351 мм, а другие два пуансона, удерживая металл в напряжении, расходятся до размера 812 мм. На рис. 12 показан момент выхода квадратной заготовки из штампа под действием пуансона и ее скручивание втулкой. Далее скрученная заготовка может снова поступать на деформацию в штамп (рис. 8).

Процесс «Обратного винтового прессования» показан на рисунках с рис. 2 до рис. 9, а процесс «Всестороннего винтового прессования» изображен на рисунках с рис. 8 до рис. 12.



Рис. 2. Высокоскоростной электроконтактный нагрев заготовки

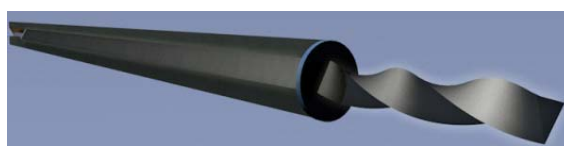


Рис. 3. Скручивание заготовки на *n*-оборотов

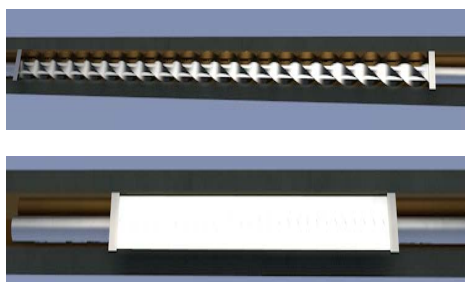


Рис. 4. Установка скрученной заготовки в треугольный штамп с последующим прессованием

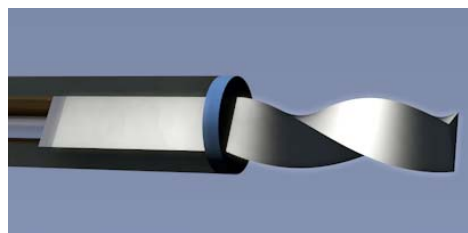


Рис. 5. Выпрессовка заготовки с повторным скручиванием

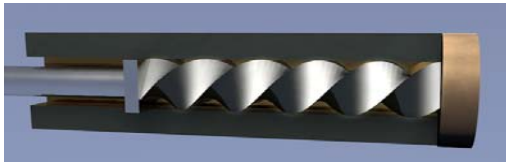


Рис. 6. Установка заготовки в квадратный штамп с последующим прессованием

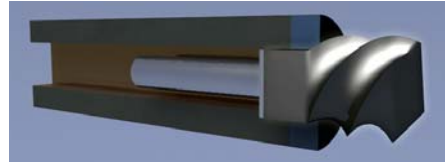


Рис. 7. Выпрессовка заготовки со скручиванием

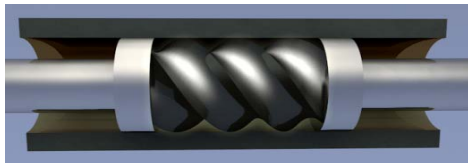


Рис. 9. Установка скрученной заготовки в круглый штамп с последующим прессованием

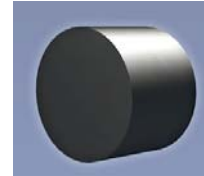
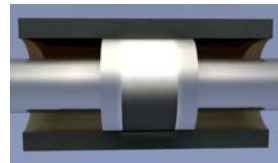


Рис. 9. Окончание прессования шайбы

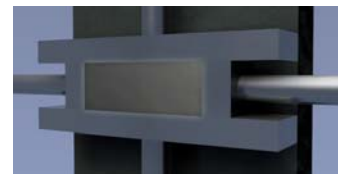
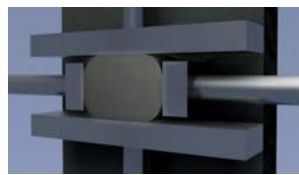
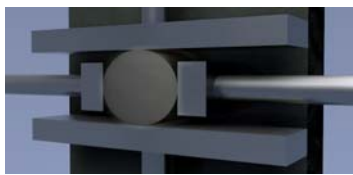


Рис.10. Стесненное прессование шайбы в квадра



Рис. 11. Окончание прессования

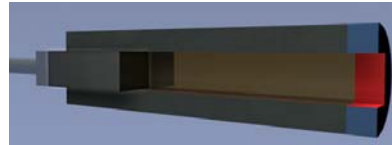
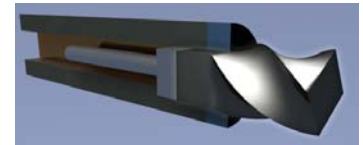


Рис. 12. Выпрессовка и скручивание заготовки



### Приближенный расчет величины зерна в титановой заготовке, обработанной методом «Винтового прессования» (ВП)

Для определения величины зерна, которую можно произвести методом ВП воспользуемся данными, полученными при обработке давлением слитков по обычной схеме деформации. Так, например, деформация титана может начинаться со слитков, имеющих диаметр 1000 мм, где величина зерна в среднем 50000 мкм [6]. После многоступенчатой деформации слитка до прутка диаметром 8 мм, величина зерна может достигать 5 мкм. Измельчение структуры зерна в 10000 раз достигается за счет растяжения деформируемой заготовки в 15625 раз. Согласно таблице 1 это соответствует параметру Одвишта, равному  $7,01e$ . Поэтому  $1e$  соответствует измельчению структуры зерна, примерно в 1425 раз. В качестве заготовки под винтовое прессование предлагается использовать литую титановую заготовку треугольным сечением  $1 \text{ дм}^2$ , длиной 10 м. Величина зерна этой заготовки будет в пределах 2000 мкм.

Заготовка подвергается скоростному электроконтактному нагреву, скручиванию и прессованию в штампе до длины 2,5 м. Далее идет попеременное скручивание – прессование, пока длина заготовки не достигнет размера 351 мм. За счет осадки заготовки длиной 10 м

до размера 351 мм, соотношение начальной длины к конечной составит 28,5. Согласно табл.1 это соответствует параметру Одвишта равному  $2,44e$ . По схеме обычной осадки измельчения структуры заготовки можно добиться в 3477 раз, то есть величина зерна достигнет 0,58 мкм.

Процесс винтового прессования помимо осадки содержит операцию кручения заготовки. Допустим, что заготовка скручена, в общем, на 30 оборотов. По аналогии с кручением заготовок методом КВД в наковальнях Бриджмена измельчение структуры зерна происходит за счет кручения параллельных плоскостей металла, расстояние между которыми составляет не более 0,5 мм. При свободном кручении заготовок расстояние между плоскостями скручивания составляет не менее 10 мм. В случае с винтовым прессованием расстояние между плоскостями можно принять, примерно 3 мм, так как этот процесс занимает промежуточное положение между свободным кручением заготовки и кручением заготовки в наковальнях Бриджмена. Поэтому, если длину заготовки 351 мм разбить на параллельные плоскости, расстояние между которыми будет 3 мм, таких плоскостей будет 117. Следовательно, каждая плоскость относительно соседней, будет скручена на  $30 : 117 = 0,26$  оборота. По табл. 1, согласно ко-

лонки кручения, параметр Одквиста достигнет 4,6e, что дополнительно позволит измельчить структуру. Поэтому общая величина параметра Одквиста, которая достигается путем кручения и прессования будет равна:

$$2,44 + 4,6 = 7,04e.$$

Следовательно, измельчение зерна исходной заготовки произойдет в 10000 раз, при этом величина структуры зерна уменьшится с 2000 мкм до 0,2 мкм.

После получения методом «Обратного винтового прессования» титановой шайбы высотой 351 мм и диаметром 602 мм, возможна, дальнейшая деформация по методу «Всестороннего винтового прессования». Для этого шайба прессуется в квадрат со стороной 351 мм Ч 351 мм, длиной 812 мм, который скручивается на три оборота и прессуется снова на шайбу исходного размера.

### Выводы

Для создания металлических заготовок большой массы с субмикроструктурной и нанокристаллической структурой, возможно, использовать новый метод прессования. Наиболее перспективно под новое прессование использование литых длинномерных заготовок, имеющих мелкозернистую структуру. Длинномерные заготовки возможно нагревать скоростным электроконтактным методом.

При практическом внедрении данного способа на предприятиях, возможно, поставлять на рынок заготовки металла с наноструктурой. Качество и цена этих заготовок будет значительно выше обычного металла в

слитках. Это позволит металлургическим предприятиям освоить новые сектора рынка, где удельная прочность металла может возрасти в 2÷4. Новое направление в области деформации будет особенно актуально для создания особопрочных металлов для авиастроения, космонавтики, атомной промышленности, судостроения, мостостроения и других отраслей промышленности.

### Список литературы

1. Кайбышев О. А. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов / О. А. Кайбышев, Ф. З. Утяшев ; отв. ред. О.А. Банных. – М. : Наука, 2002. – С. 141–153, 208–230.
2. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации / [Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С. Г. Синков]. – Донецк : Донецкая фирма наукоемких технологий НАН Украины (Фирма ТЕАН), 2003. – С. 25–76.
3. Гордиенко А. И. Применение скоростного нагрева для повышения механических и специальных свойств титановых сплавов / А. И. Гордиенко, В. В. Ивашко // Титан. – 2004. – № 2 (15). – С. 38–41.
4. Высокоскоростное затвердевание расплава (теория, технология и материалы) / [В. А. Васильев, Б. С. Митин, И. Н. Пашков и др.] – М. : СП Интермет инжиниринг, 1998. С. 35–65.
5. Волков А.Е. Способ Обратного винтового прессования (ОВП) и Всестороннего винтового прессования (ВВП) / А.Е. Волков // Заявка РФ №2013129568. – 2013. – С. 1–12.
6. Полуфабрикаты из титановых сплавов / [В. К. Александров, Н. Ф. Аношкин, А. П. Белозеров и др.] // Титановые сплавы. – М. : ВИЛС, 1996. – С. 5–27.

Одержано 19.12.2013

### Волков А.Є. Підвищення якості та поліпшення технологічних властивостей металів з використанням методу «зворотного і всебічного гвинтового пресування»

*Розглянуто новий метод деформації металів – «Гвинтове пресування». У металів, оброблених різними методами інтенсивної немонотонної пластичної деформації, до яких відносяться рівноканальне кутове пресування, гвинтова екструзія, всебічна ковка та ін поліпшуються якість і властивості, в тому числі міцність в 2–4 рази. Іншою метою впровадження нового методу «Гвинтового пресування» є збільшення швидкості і маси оброблюваного металу в порівнянні з існуючими методами.*

**Ключові слова:** гвинтове пресування (ГП), зворотне гвинтове пресування (ЗГП), всебічне гвинтове пресування (ВГП).

### Volkov A. Improvement the quality and technological properties of metals using the method of «Reverse and Comprehensive Twist Forming»

*New deformation method – Twist Forming – is presented for review. Metals worked by various intensive nonmonotonic plastic deformation methods including equal channel angular extrusion, twist extrusion, 3D forging may increase the strength by two-four times. The aim of the new Twist Forming method implementation is to increase the rate and weight of the worked metal as compared to the current methods.*

**Key words:** Twist forming, indirect twist extrusion, 3D twist extrusion.