

УДК 621.778.04

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЗАГОТОВОК ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ВИБРАЦИОННЫМ ВОЛОЧЕНИЕМ

*Горбатюк С.М.¹, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Инжиниринг
технологического оборудования» (sgor02@mail.ru)*

Шаповал А.А.², к.т.н. (tungsten@yandex.ru)

Мосьпан Д.В.², к.т.н. (denys.mospan@gmail.com)

*Драгобецкий В.В.², д.т.н., профессор, зав. кафедрой
«Технологии машиностроения» (vldrag@kdu.edu.ua)*

¹ **Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»**
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

² **Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского**
(39600, Украина, Кременчуг, ул. Первомайская, 20)

Аннотация. Получение заготовок периодического профиля из никелевых и титановых сплавов является самостоятельной задачей в общей проблеме совершенствования технологии производства лопаток (однозамковых, двухзамковых). Выявлено, что при определенных схемах и режимах вибрационного деформирования (в частности, при виброволочении) наблюдается эффект периодического изменения диаметра прутка или проволоки по его оси. Установлено, что эффект периодического изменения диаметра прутка или проволоки при виброволочении связан с фрикционными колебаниями, потерей устойчивости при деформировании как при возникновении напряжений текучести в материале прутка, так и при образовании «шейки», а также как результат действия сил инерции. Получены зависимости, позволяющие определить условия неустойчивого деформирования и стабилизировать процесс получения периодического профиля путем управления параметрами процесса виброволочения.

Ключевые слова: вибрационное волочение, циклический подпор, периодический профиль, формообразование, инертные силы, самовыворачивающийся поршень.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-7-479-484

Производство заготовок периодического профиля под штамповку турбинных лопаток из труднодеформируемых никелевых и титановых сплавов чрезвычайно актуально и перспективно. Традиционная технология производства заготовок под штамповку лопаток, например из жаропрочного никелевого сплава ЖС6КП, изготовленных из прутков диаметром 40 – 50 мм, включает горячую прокатку за несколько десятков проходов с промежуточными нагревами. Заготовки турбинных лопаток меньшего диаметра получают обработкой резанием на токарных станках. Однако коэффициент использования металла по этой технологии не превышает 0,05 – 0,14 [1 – 4]. Заготовки периодических профилей так же можно получать асимметрической прокаткой металлических порошков с последующей механической обработкой [5, 6].

Получение заготовок периодического профиля из никелевых и титановых сплавов является самостоятельной задачей в общей проблеме совершенствования технологии производства лопаток (однозамковых, двухзамковых) [7]. Контроль свойств получаемой продукции целесообразно осуществлять методами неразрушающего контроля [8].

Изделия переменного сечения можно получать формообразованием в условиях сверхпластичности.

Основные преимущества способа связаны с большой деформационной способностью сверхпластических материалов, бесконтактными условиями деформирования и высокой устойчивостью процессов формоизменения. Эти изделия получают при условии, что одна из скоростей, определяющих кинематику процесса, постоянная, а другая изменяется по заданной программе. Способ эффективен в условиях мелкосерийного производства с широким ассортиментом изделий [9, 10]. Промышленное освоение этого процесса сдерживается недостатком знаний о формообразовании и кинематике очага деформации, а также низкой производительностью.

Эффективность и целесообразность промышленного применения процесса волочения с использованием колебаний звукового и ультразвукового диапазонов частот доказана работами многих исследователей [1 – 12]. Прерывистый характер деформирования при вибрации инструмента или обрабатываемого металла приводит к ряду положительных факторов, интенсифицирующих процессы металлообработки. При определенных схемах и режимах вибрационного деформирования (в частности, при виброволочении) наблюдается эффект периодического изменения диаметра прутка или проволоки по его оси. С одной стороны это можно расценивать как

отрицательный фактор, приводящий к искажению геометрии получаемого изделия. С другой стороны это открывает возможности для получения прутков и проволоки периодически повторяющегося сечения. В любом случае при отрицательной или положительной оценке этого фактора процессом необходимо управлять и знать его закономерности. Вероятно, это можно объяснить анализом следующих явлений.

Реализация условия, при котором одна из скоростей, определяющих кинематику процесса, постоянна, а другая изменяется по заданному закону. Периодический профиль заготовки впервые был получен при виброволочении с продольными колебаниями волоки [2] с определенной частотой колебаний. Однако существует целый арсенал способов изменения одной из скоростей при виброволочении: сообщение волоке или обрабатываемому металлу колебаний, направленных поперек или вокруг (вращательных) оси волочения и угловых. Кроме того, находит применение сочетание поперечных колебаний с продольными, волочение с циклическим подпором, волочение с пульсирующим противонапряжением, ступенчатое, двухступенчатое вибрационное волочение, волочение через две волоки, вибрирующие в противоположных фазах, трехступенчатое вибрационное волочение, волочение через систему из нескольких волок, нагружающихся поочередно.

Фрикционные автоколебания. В условиях трения твердых тел при постоянной или периодически силе тяги наблюдается неплавность скольжения, сопровождающаяся более или менее периодическими остановками. Возможные объяснения неустойчивости скольжения связаны с наличием падающей скоростной характеристики силы трения или появлением так называемого скачка ΔT силы трения при переходе от покоя к скольжению. В процессе каждого скачка происходит нарастание амплитуды нормально направленных асимметричных колебаний, приводящих к сжатию деформируемого материала. Проявлением этого вида колебаний в условиях виброволочения является нарушение закона движения вибрирующего инструмента и, как следствие, периодичность не только микрогеометрии, но и геометрии обрабатываемых заготовок. Оценить характер этого явления возможно при решении задачи упругопластического деформирования при виброволочении с заданием соответствующих граничных условий, связанных с законом трения, учитывающим фрикционные автоколебания.

Потеря устойчивости деформируемой системы. В процессах формообразования наблюдаются четыре типа пластической устойчивости деформируемого металла [3, 9]: полосы скольжения, сосредоточенное утонение, вторичные полосы скольжения, волнистость. В некоторых случаях периодический профиль заготовки может возникать при выходе из очага деформации в процессе виброволочения. Характер потери устойчивости происходит по схеме, отличной от эйлеровской.

Связь между деформирующей нагрузкой P и характерным перемещением U выражается кривой, вогнутой вниз. Такая зависимость $P-U$ наблюдается в условиях растяжения. Восходящий участок кривой соответствует устойчивым формам равновесия. В точке максимума нагрузка принимает стационарное значение, оставаясь постоянной при бесконечно малых изменениях U , соответствующих смежным формам равновесия. Состояние системы в точке максимума является критическим, а соответствующие значения $P = P_{кр}$ и $U = U_{кр}$ – критическими нагрузкой и перемещением. Критическая нагрузка $P_{кр}$ совпадает с максимальной несущей нагрузкой системы P_{max} . При такой нагрузке возможна локальная потеря устойчивости в виде местного утонения. Задача об устойчивости при упругопластическом деформировании решается путем исследования движения системы вблизи состояния равновесия. Неустойчивым является такое состояние, при котором малые возмущения вызывают движение, выводящее систему из окрестности равновесного состояния. Оценить критическую деформацию, при которой процесс пластического растяжения прутка, стержня или проволоки становится неустойчивым, возможно следующим образом.

Рассмотрим стержень, растягиваемый силой $P(t) = P_0 \sin(\omega t - A)$. В свою очередь текущее значение силы $P(t) = \sigma F$, где σ – нормальное напряжение в поперечном сечении прутка; F – площадь поперечного сечения; P_0 – амплитуда силы виброволочения; A – начальная амплитуда; ω – частота свободных колебаний вибровозбудителя.

При выполнении условия (1) образуется шейка.

$$dP = \left(\frac{d\sigma_1}{d\varepsilon} d\varepsilon + \frac{d\sigma_1}{d\dot{\varepsilon}} d\dot{\varepsilon} + \frac{d\sigma_1}{dt} dt \right) F + \frac{\sigma_1 dF}{d\varepsilon} d\varepsilon < 0, \quad (1)$$

где σ_1 – нормальное напряжение; ε – деформация; $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{d \ln l}{dt}$ – скорость деформации удлинения прутка; l – длина очага деформации.

Для деформируемого прутка возможны различные близкие состояния, для которых уменьшение сечения компенсируется ростом напряжений вследствие упрочнения. Однако материал деформируемой системы (прутка) имеет некоторые нарушения, так называемые слабые места как геометрического, так и структурного характера. Вследствие локальных отклонений от правильности формы и от условий неоднородности в одном из мест образуется и быстро развивается шейка. Преобразовав уравнение (1), получаем условие неустойчивого деформирования:

$$\frac{d\sigma_1}{d\varepsilon} = \frac{\sigma_1}{(1 + \varepsilon)}. \quad (2)$$

Для материала, упрочняющегося по степенному закону, реологические свойства которого

описываются зависимостью $\sigma = c\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m$, где n – показатель деформационного упрочнения $= \text{const}$; $m = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\varepsilon}}$ – показатель скоростного упрочнения материала $= \text{const}$; $c = \frac{\sigma_s}{D^{1/n}}$, где σ_s – статический предел текучести; D, n – постоянные величины для данного материала, $c = \text{const}$. При $m = 0$ материал не обладает вязкими свойствами, имеем $\varepsilon_{\text{кр}} = \frac{n}{1-n}$, где $\varepsilon_{\text{кр}}$ – критическая деформация.

Формирование периодического профиля произошло вне очага деформации под действием с одной стороны постоянного тянущего усилия, с другой стороны циклического подпора с противонапряжением при вибрировании волокна. В этих условиях, когда заготовка подвергается действию растягивающих и сжимающих нагрузок, после достижения максимальной (критической) нагрузки наступают условия неустойчивого равновесия. Для количественного описания и изучения неравновесных неустойчивых процессов [11] возможно использование равновесного подхода к отображению пластичности в рамках термодинамического и общесистемного подхода [12]. Для оценки степени деформации заготовки при выходе из очага деформации рационально использовать изменение площади поверхности деформируемой заготовки. Использование поверхности заготовки в качестве критерия деформации связано и с тем, что поверхность вообще является одним из основных дефектов кристаллической структуры [4, 13] и связана с образованием дополнительной поверхности заготовки.

Влияние инерционных сил. При виброволочении с достаточно высокой скоростью существенную роль начинают играть инерционные силы, возникновение и распространение волн в металле, локализация области пластической деформации и т.д. Последний фактор может привести к дестабилизации поперечных размеров получаемого изделия. Уравнения нежимаемости и движения имеют вид:

$$\text{div} \bar{v} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T(v_i)}{H(v_i)} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right) + \delta_{ik} \sigma_0 \right] + \rho F_i = \rho \frac{dv_i}{dt}, \quad (4)$$

где v – скорость перемещения частиц заготовки; $T(v_i)$ – интенсивность касательных напряжений; $H(v_i)$ – интенсивность скоростей деформаций сдвига; v_i – скорость течения металла при сдвиге; x_i, x_k – пространственные координаты, где $i = 1, 2, 3$; $k = 1, 2, 3$ – свободные индексы; δ_{ik} – символ Кронекера, $\delta_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = k \\ 0 & \text{при } i \neq k \end{cases}$, $\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$, где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения в координатах x_1, x_2, x_3 .

Вполне допустимо рассматривать процесс волочения в одномерной постановке, когда уравнения движения приобретают наиболее простой вид:

$$\rho \left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x_1} \right) = \frac{\partial \sigma_0}{\partial x_1} + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{T(v_1)}{H(v_1)} \frac{\partial v_1}{\partial x_1} \right), \quad (5)$$

где x_1, v_1 – пространственная координата и проекция скорости по оси x_1 .

Для идеально пластического материала при отсутствии конвекции это уравнение запишется следующим образом:

$$\rho \frac{\partial v_1}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_1}{\partial x_1}. \quad (6)$$

Учитывая, что деформации малы, т. е. $\frac{\partial l}{\partial x_1} \ll 1$, то

$$\frac{\partial v_1}{\partial t} = \frac{\partial^2 l}{\partial t^2}.$$

Поскольку

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial x_1} = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial x_1} = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\partial l}{\partial x_1} \right) = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial^2 l}{\partial x_1^2}, \quad (7)$$

то получаем волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 l}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial^2 l}{\partial x_1^2}, \quad (8)$$

где ρ – плотность материала деформируемой системы.

Поскольку в уравнении (8) $\frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} = \text{var}$, возникает

необходимость использования специальных методов его решения и анализа полученных результатов. Если принять допущение о справедливости гипотезы «плоских диаметральных сечений», решение можно представить в следующем виде. Элементарная энергия, необходимая для изменения скорости некоторой бесконечно малой массы материала dm в очаге деформации, равна импульсу, приложенному к данной массе силы:

$$d\Phi dt = dV_1 dm, \quad (9)$$

где Φ – инерционное усилие, приложенное к данной массе; t – время; V_1 – проекция скорости перемещения элемента заготовки на ось x_1 ; dm – бесконечно малая масса материала заготовки в очаге деформации.

Учитывая преимущественно осевое течение деформируемого материала, заменим дифференциалы скорости, времени и массы их значениями:

$$dm = \rho F dl; \quad (10)$$

$$dV_1 = V_0 \frac{dl}{l}; \quad (11)$$

$$dt = \frac{dl}{V_0}, \quad (12)$$

где V_0 – скорость волочения.

После преобразований получим:

$$d\Phi = \rho V_0^2 F \frac{dl}{l}. \quad (13)$$

Уравнение (1) принимает вид:

$$d(P \pm \Phi) = \sigma_1 dF + F d\sigma_1 = 0, \quad (14)$$

при этом

$$d\sigma_1 = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} d\varepsilon + \frac{\partial \sigma_1}{\partial \dot{\varepsilon}_1} d\dot{\varepsilon}_1 + \frac{\partial \sigma_1}{\partial t} dt. \quad (15)$$

Искомое условие приобретает вид:

$$\frac{1}{\sigma_1} \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial \sigma_1}{\partial \dot{\varepsilon}} d\dot{\varepsilon} + \frac{\partial \sigma_1}{\partial t} dt \right) = \frac{d\varepsilon}{1 + \varepsilon}. \quad (16)$$

При принятом законе деформационно-скоростного упрочнения получаем:

$$n\varepsilon^{n-1} \dot{\varepsilon}^m d\varepsilon + m\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^{m-1} d\dot{\varepsilon} + \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m) dt = \frac{\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m d\varepsilon}{1 + \varepsilon}. \quad (17)$$

Для материала с малым скоростным упрочнением $m \approx 0$ приходим к дифференциальному уравнению следующего вида:

$$n d\varepsilon + n d\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon d\varepsilon}{1 + \varepsilon}. \quad (18)$$

Утонение на образце появляется при следующем соотношении деформации и ее скорости:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \dot{\varepsilon}(0) [\varepsilon(n-1) - \ln(1+\varepsilon)]. \quad (19)$$

По аналогии для вязких материалов с малым деформационным упрочнением $n = 0$ получаем:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \dot{\varepsilon}(0) (1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2m}}. \quad (20)$$

Таким образом, при полученных соотношениях кинематических параметров волочения обеспечиваются условия устойчивого формообразования.

Двухстороннее сжатие элемента заготовки на выходе из очага деформации. Калибрующий пояссок волокна препятствует радиальному течению материала заготовки, что аналогично действию сил внешнего трения при осадке цилиндрических заготовок. Сжатие элемента заготовки на выходе из волокна может быть обеспечено путем применения упругой опоры. Последняя может быть выполнена в виде кольцевой емкости с деформируемыми стенками, заполненными жидкостью под давлением (рис. 1.) [1].

Более предпочтительно упругую опору выполнить в виде самовыворачивающегося поршня. Применяя подходы конструирования, изложенные в работах [14, 15], спроектирован новый вибродеформирующий узел (рис. 2).

В соответствии с принципом Сен-Венана действие радиальных усилий затухает по мере удаления от контактных поверхностей. Поэтому при двухстороннем сжатии заготовок в середине длины сжатого элемента заготовки возникает схема линейного напряженного состояния.

Выводы. Эффект периодического изменения диаметра прутка или проволоки при виброволочении связан с фрикционными колебаниями, потерей устойчивости при деформировании как при возникновении напряжений

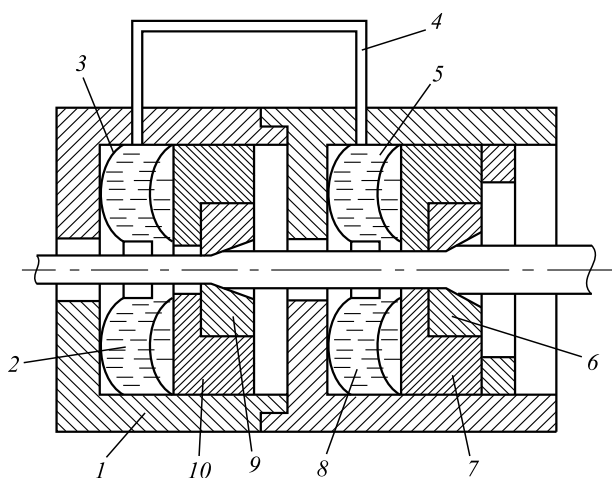


Рис. 1. Автоколебательное гидромеханическое устройство для волочения металла:
1 – корпус; 2, 8 – жидкость; 3, 5 – кольцевые емкости с упругими стенками; 4 – соединительный канал; 6, 9 – волокна; 7, 10 – волокодержатели

Fig. 1. Self-oscillatory hydromechanical device for metal drawing:
1 – case; 2, 8 – liquid; 3, 5 – ring containers with elastic walls;
4 – connecting channel; 6, 9 – drawers; 7, 10 – drawer holders

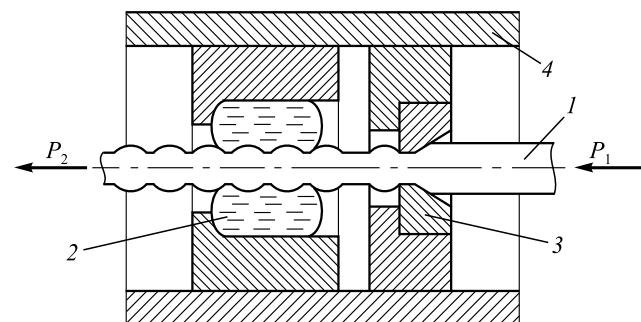


Рис. 2. Виброволочение с циклическим подпором при использовании в качестве упругой опоры самовыворачивающегося поршня:
1 – заготовка; 2 – самовыворачивающийся поршень; 3 – волока;
4 – волокодержатель

Fig. 2. Vibratory drawing with a cyclic support when the self-unscrewing piston was used as an elastic support of:
1 – billet; 2 – self-unscrewing piston; 3 – drawer; 4 – drawer holder

текучести в материале прутка, так и при образовании «шейки», а также как результат действия сил инерции.

Полученные зависимости позволяют определить условия неустойчивого деформирования и стабилизировать процесс получения периодического профиля путем управления параметрами процесса вибро-волочения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клименко В.М., Шаповал В.Н. Вибрационная обработка металлов давлением. – Киев: Техника, 1977. – 128 с.
2. Шаповал А. Н., Шаповал А. А. Разработка устройства для многоступенчатого вибрационного волочения металла // Цветные металлы. 2002. № 4. С. 77 – 82.
3. Федоров В.В. Основы эргодинамики и синергетики деформируемых тел. – Калининград: КГТУ, 2010. – 202 с.
4. Shlyk S., Khorolskyi V., Naumova M. Simulation of the chamfering process in dies // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. Vol. 2. No. 7(74). P. 42 – 47.
5. Gogaev K.A., Kalutskii G.Ya., Voropaev V.S. Asymmetric rolling of metal powders. I. Compactability of metal powders in asymmetric rolling // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2009. March. Vol. 48. Issue 3. P. 152 – 156.
6. Symonova A.A., Verezub O.N., Sycheva A.A. etc. Surface grain coarsening and surface during machining of ultra-grained titanium // Journal of Mining and Metallurgy. Sec. B. 2012. Vol. 48. No. 3. P. 378 – 389.
7. Mazur V.L. Opportunities and prospects of the ukrainian metallurgy development // Metallurgical and Mining Industry 2015. No. 11. P. 212 – 217.
8. Gorbatyuk S.M., Shapoval A.N., Rybakov V.S. etc. Nondestructive method of checking the quality of a semifinished product for tungsten wire // Metallurgist. 1999. Vol. 43. Issue 11 – 12. P. 561 – 565.
9. Малышев В.П., Абдрахманов Б.Т., Нурмагамбетова А.М. Плавкость и пластичность металлов. – М.: Научный мир, 2004. – 148 с.
10. Dragobetskii V.V., Shapoval A.A., Mospan D.V. etc. Excavator Bucket Teeth Strengthening Using a Plastic Explosive Deformation // Metallurgical and Mining Industry. 2015. No. 4. P. 363 – 368.
11. Kukhar V.V., Vasylevskyi O.V. Experimental research of distribution of strains and stresses in work-piece at different modes of stretch-forging with rotation in combined dies // Metallurgical and Mining Industry. 2014. No. 3. P. 71 – 78.
12. Огородников В. А., Савчинский И. Г., Нахайчук О. В. Напряженно-деформированное состояние при формировании внутреннего шлицевого профиля методом обжатия на оправке // Тяжелое машиностроение. 2004. № 12. С. 31 – 33.
13. Shapoval A.N., Gorbatyuk S.M., Gorbatyuk M.S. Improving the technology for making tungsten wire // Metallurgist. 1998. Vol. 42. Issue 9 – 10. P. 392 – 395.
14. Eron'ko S.P., Smirnov A. N., Tsuprun A.Yu. etc. Industrial tests of a new generation of cassette-type gates for metallurgical plants in Ukraine // Refractories and Industrial Ceramics. 2006. March. Vol. 47. Issue 2. P. 85 – 87.
15. Eron'ko S.P. Efficient slide-gate systems // Metallurgist. 2003. Vol. 47. Issue 3. P. 158 – 162.

Поступила 30 марта 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 7, pp. 479–484.

PHYSICAL PRINCIPLES OF MANUFACTURING OF PERIODIC PROFILE BARS BY VIBRATORY DRAWING

S.M. Gorbatyuk¹, A.A. Shapoval², D.V. Mos'pan², V.V. Dragobetskii²

¹ National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS), Moscow, Russia

² Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine

Abstract. Manufacturing of periodic profile bars of nickel and titanium alloys is an independent task in the general problem of improving blade manufacturing technology (single-locked, double-locked). It was found that under certain schemes and vibrational deformation modes (in particular, when vibratory drawing) the effect of periodic changes of the bar or wire diameter along its axis is observed. It also was found that the effect of the periodic variation of the diameter of the rod or wire at vibratory drawing is associated with friction fluctuations, loss of stability during deformation both during the yield stress in the bar material and the formation of a "neck", and also as a result of the action of the inertia forces. The dependences for determining the conditions of the unstable strain and stabilizing the manufacturing process of a periodic profile by controlling the parameters of the vibratory drawing were obtained.

Keywords: vibratory drawing, cyclic support, periodic profile, forming, inert forces, self-unscrewing piston.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-7-479-484

REFERENCES

1. Klimenko V.M., Shapoval V.N. *Vibratsionnaya obrabotka metallov davleniem* [Vibratory metal forming]. Kiev: Tekhnika, 1977, 128 p. (In Russ.).
2. Shapoval A.N., Shapoval A.A. Development of the unit for multi-stage vibration drawing of metal product. *Tsvetnye Metally*. 2002, no. 4, pp. 77–82.
3. Fedorov V.V. *Osnovy ergodinamiki i sinergetiki deformiruemyykh tel* [Basics ergodynamics and synergy of deformable bodies]. Kaliningrad: KGTU, 2010, 202 p. (In Russ.).
4. Shlyk S., Khorolskyi V., Naumova M. Simulation of the chamfering process in dies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015, vol. 2, no. 7(74), pp. 42–47.
5. Gogaev K.A., Kalutskii G.Ya., Voropaev V.S. Asymmetric rolling of metal powders. I. Compactability of metal powders in asymmetric rolling. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2009, vol. 48, Issue 3, pp. 152–156.
6. Symonova A.A., Verezub O.N., Sycheva A.A., Verezub N.V., Havin V.L., Kaptay G. Surface grain coarsening and surface during machining of ultra-grained titanium. *Journal of Mining and Metallurgy. Sec. B*, 2012, vol. 48, no. 3, pp. 378–389.
7. Mazur V.L. Opportunities and prospects of the ukrainian metallurgy development. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015, no. 11, pp. 212–217.
8. Gorbatyuk S.M., Shapoval A.N., Rybakov V.S. etc. Nondestructive method of checking the quality of a semifinished product for tungsten wire. *Metallurgist*. 1999, vol. 43, Issue 11–12, pp. 561–565. DOI: 10.1007/BF02463583.
9. Malyshev V.P., Abdrakhmanov B.T., Nurmagambetova A.M. *Plavkost' i plastichnost' metallov* [Fusibility and plasticity of metals]. Moscow: Nauchnyi mir, 2004, 148 p. (In Russ.).
10. Dragobetskii V.V., Shapoval A.A., Mospan D.V., Trotsko O.V., Lotous V.V. Excavator Bucket Teeth Strengthening Using a Plastic

- Explosive Deformation. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015, no. 4, pp. 363–368.
11. Kukhar V.V., Vasylevskiy O.V. Experimental research of distribution of strains and stresses in work-piece at different modes of stretch-forging with rotation in combined dies. *Metallurgical and Mining Industry*. 2014, no. 3, pp. 71–78.
 12. Ogorodnikov V.A., Savchinskii I.G., Nakhaichuk O.V. Stressed-strained state during forming the internal slot section by mandrel reduction. *Tyazheloe Mashinostroenie*. 2004, no. 12, pp. 31–33. (In Russ.).
 13. Shapoval A.N., Gorbatyuk S.M., Gorbatyuk M.S. Improving the technology for making tungsten wire. *Metallurgist*. 1998, vol. 42, Issue 9–10, pp. 392–395.
 14. Eron'ko S.P., Smirnov A. N., Tsuprun A. Yu., Belobrov Yu.N., Lario-nov A.A., Tokii A.N., Giesen R. Industrial tests of a new generation of cassette-type gates for metallurgical plants in Ukraine. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2006, vol. 47, Issue 2, pp. 85–87.
 15. Eron'ko S.P. Efficient slide-gate systems. *Metallurgist*. 2003, vol. 47, Issue 3, pp. 158–162.

Information about the authors:

S.M. Gorbatyuk, Dr. Eng., Professor, Head of the Chair “Engineering of Technological Equipment” (gorbatuksm@misis.ru)

A.A. Shapoval, Cand. Sci. (Eng.)

D.V. Mos'pan, Cand. Sci. (Eng.)

V.V. Dragobetskii, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Engineering Technology”

Received March 30, 2016
