

**И.Ю.Приходько, М.А.Дедик,
К.А.Гогаев*, В.С.Воропаев*, А.И.Иценко***

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА
НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ ПОРОШКА ТИТАНА**

*Институт черной металлургии им. З.И. Некрысова НАН Украины
Институт проблем материаловедения НАН Украины

Приведен анализ и обоснование модели сопротивления деформации металлического порошка при его уплотнении в процессе несимметричной прокатки. Показаны результаты конечно-элементного математического моделирования этого процесса применительно к порошку титана с использованием экспериментальных данных. Процесс несимметричной прокатки порошка исследовали с помощью метода конечных элементов с применением модели, предложенной Ди Маджио.

Ключевые слова: порошок титана, несимметричная прокатка, уплотнение, модель, метод конечных элементов

Введение. Порошковые технологии получения изделий из титана и его сплавов привлекают все больше внимания в мировой практике, а теоретические вопросы по этой тематике занимают заметное место в научной литературе. В ряде работ [1–4] представлены теоретические подходы по изучению процесса формования полос прокаткой металлических порошков, рассмотрены практические методы получения компактных изделий путем прокатки металлических порошков и продемонстрирована принципиальная возможность создания компактной титановой ленты с удовлетворительными свойствами. Учитывая сложности получения компактных изделий из порошкового титана методом горячей деформации из-за высокого сродства титана к кислороду метод холодной прокатки порошка представляется достаточно дешевым и конкурентно способным, по сравнению с другими порошковыми технологиями. В работе [5] представлены данные по получению образцов титановых полос с применением метода асимметричной прокатки порошков. Установлено, что полосы, сформованные асимметричной прокаткой, имеют высокую плотность которая достигает 90-95% от плотности компактного титана. Такую высокую начальную плотность материала невозможно достичь обычными методами прокатки порошков. Это указывает на принципиальную возможность получить высококачественный материал после спекания и окончательной уплотняющей прокатки. Применение асимметричной прокатки при формовании порошковой титановой ленты открывает возможности создания технологии изготовления продукции с низкими энергетическими и трудовыми затратами.

Исследование и разработка оптимальных технологических режимов получения проката из порошка титана требует решения определенных экономических и технологических проблем. Применение методов математического моделирования процессов деформации порошка титана позволяет упростить исследовательский процесс и определить оптимальные направления в формировании порошка титана методами прокатки порошков. Математическое моделирование позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние, поля скоростей, изменения плотности, а также отработать оптимальные режимы процесса прокатки титанового порошка.

В процессе прокатки порошка в очаге деформации происходит сближение частиц, и порошок уплотняется. Объем исходного порошка в процессе прокатки уменьшается, хотя объем, занимаемый собственно частицами деформируемого материала, остается постоянным. Каждая частица порошка обладает свойствами цельного металла и способна при прокатке деформироваться [6].

Процесс прокатки порошков можно рассматривать как непрерывное формирование, начинающееся в той части очага деформации, которая определяется углом прокатки и завершающееся на выходе проката из зазора между валками. На процесс прокатки значительное влияние оказывает сыпучесть порошка: чем она лучше, тем легче осуществляется процесс прокатки. При плохой сыпучести и неправильно выбранной скорости прокатки (линейная скорость вращения валков существенно больше скорости поступления порошка в очаг деформации) порошок не прокатывается в сплошную заготовку [7].

Поступление порошка в очаг деформации может быть свободным (гравитационным) и активным. Прокатка может быть периодической и непрерывной. При периодической прокатке в бункер стана засыпают определенную порцию порошка и получают прокат заданной массы, а при непрерывной прокатке порошок в бункер подают постоянно, прокатывая длинномерную заготовку [8].

Состояние вопроса. С учетом развития современной вычислительной техники целесообразно проводить разработку математической модели с помощью численных методов. На данный момент использование метода конечных элементов (МКЭ) для моделирования подобных процессов является наиболее эффективным решением.

Одна из первых математических моделей сопротивления деформации сыпучих сред предложена Друккером и Прагером в 1957г. [9] на основе критерия текучести Мизеса. Данная модель предполагает монотонное упрочнение объемной деформации и развитие сдвиговых деформаций. В 1971г. Ди Маджио и Сандлер разработали упруго-пластическую купольную модель на основе модели Друккера-Прагера [10]. Эта модель учитывает величину дилатансии при сдвиговом нагружении (изменение объема материала, вызванное деформациями сдвига).

Математическая модель. Для моделирования сопротивления деформации порошка титана при обработке его давлением использовали купольную модель Друккерра-Прагера (КМДП). Данная модель описывает поверхность текучести в двухинвариантном пространстве.

В КМДП истинная деформация аддитивно раскладывается в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p, \quad (1)$$

где ε^e - упругая деформаций и ε^p - пластическая деформация.

Упругие напряжения определяются с помощью закона Гука:

$$\sigma = C \cdot \varepsilon^e, \quad (2)$$

где C – тензор модулей упругости.

КМДП состоит из двух поверхностей течения f_1 и f_2 уравнения (4-5).

В результате обработки экспериментальных данных установлено, что предельная поверхность для титанового порошка соответствует прямой линии (рис. 1). Исходя из этого поверхность f_1 описывается уравнением:

$$f_1 = \sqrt{J_2} - (\alpha + \theta I_1), \quad (4)$$

где $\sqrt{J_2}$ – корень квадратный из второго инварианта девиатора напряжений (интенсивность девиатора напряжений); α – коэффициент когезии при начальной плотности; θ – тангенс угла внутреннего трения; I_1 – первый инвариант тензора напряжений. Параметры α , θ обычно оцениваются в соответствии с данными, приведенными в работе [1].

Поверхность f_2 определяется соотношением:

$$f_2 = \sqrt{J_2} - \frac{1}{R} \sqrt{[p_b - p_a]^2 - [I_1 - p_a]^2}, \quad (5)$$

где R - отношение большой оси к малой в четверти эллипса, определяющего купольную часть поверхности. p_b – предельное давление, определяемое из эксперимента на гидростатическое сжатие. p_a – давление, при котором интенсивность девиатора напряжений достигает своего максимального значения [11].

Параметр p_b зависит от изменения объемной пластической деформации определяется по формуле [12]:

$$p_b(\varepsilon_v^p) = \frac{\left[\ln \left(1 - \frac{\varepsilon_v^p}{W} \right) \right]}{D}, \quad (6)$$

где W – параметр, который определяет максимально достижимое значение объемной пластической деформации; D – параметр упрочнения, который определяет значение давления при максимальной пластической деформации.

Известно, что объемная деформация ε_v^p равна:

$$\varepsilon_v^p = \ln \left(\frac{\rho_0}{\rho_{full}} \right) \quad (7)$$

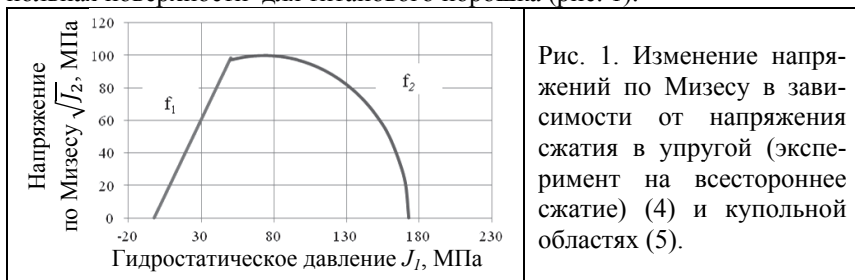
Параметр D определяется при максимальном значении ε_v^p , которое равно $-W$. Тогда D из формулы (6) равно:

$$D = \frac{\ln(2)}{p_b(\varepsilon_v^p)} \quad (8)$$

Параметр W определяется при $p_b(\varepsilon_v^p) \rightarrow 0$ и $D \rightarrow 1$, тогда W равно:

$$W = -\ln\left(\frac{\rho_0}{\rho_{full}}\right) \quad (9)$$

На основе полученных экспериментальных данных, полученных авторами, а также заимствованными из [1] были построены предельная и купольная поверхности для титанового порошка (рис. 1).



Условие пластического течения материала в КМДП записывается через ассоциированный закон течения:

$$\dot{\varepsilon}^p = \dot{\lambda}_1 \frac{\partial f_1}{\partial \sigma}, \quad (10)$$

если напряженное состояние соответствует поверхности f_1

$$\dot{\varepsilon}^p = \dot{\lambda}_2 \frac{\partial f_2}{\partial \sigma}, \quad (11)$$

если напряженное состояние соответствует поверхности f_2

$$\dot{\varepsilon}^p = \sum_{n=1}^2 \dot{\lambda}_n \frac{\partial f_n}{\partial \sigma}, \quad (12)$$

если напряженное состояние соответствует стыку поверхностей f_1 и f_2 .

$\dot{\lambda}_n$ — множители Лагранжа, f_n — поверхности текучести, описываемые уравнениями (4) и (5), которые идентифицируются индексом n ; — тензор напряжений.

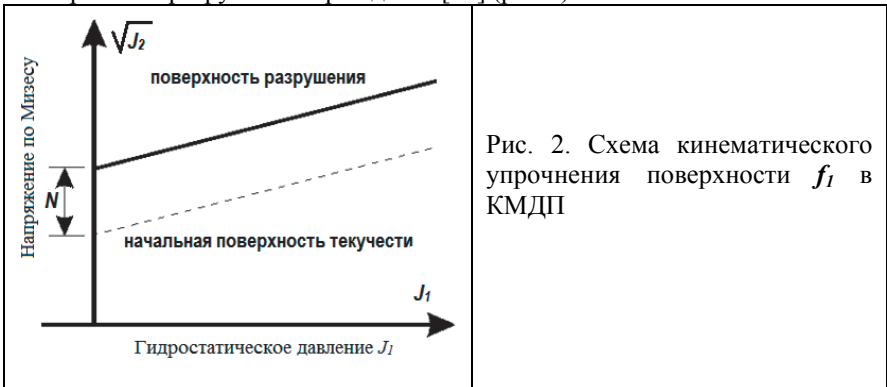
Данная модель по сравнению с классическими моделями зависимости пластических свойств от давления имеет возможность контролировать величину изменение объема материала при сдвиговой деформации. Это явление (дилатансия) происходит от того, что поверхность текучести имеет положительный наклон в пространстве $\sqrt{J_2} - J_1$. В моделях типа Друкера-Прагера и Мора-Кулона дилатансия происходит в течение всего времени приложения сдвигающих нагрузок, и во многих случаях это приводит к гораздо большей величине дилатансии, чем наблюдается в экспериментах. В КМДП, если активизирована поверхность текучести, дилатансия учитывается так же, как в моделях Друкера-Прагера и Мора-Кулона. Однако, в соответствии с законом упрочнения, купольная часть поверхности может сжиматься до тех пор, пока не произойдет пересечения купола с огибающей разрушающих значений. Локальная нормаль к поверхности текучести теперь вертикальна, и, следовательно, условие нормировки гарантирует, что не происходит дальнейшего увеличения объемной пластической деформации (дилатансии).

С помощью корректировки параметров, которые определяют скорость сжатия купольной части поверхности, можно внести экспериментальные данные по дилатансии в модель и получить определяющее соотношение, которое лучше описывает моделируемые физические процессы.

Другим преимуществом данной модели по сравнению с моделями Друкера-Прагера и Мора-Кулона является возможность моделирования пластического уплотнения материала. В указанных моделях все чисто объемные изменения являются упругими. В рассматриваемой модели объемные изменения являются упругими до тех пор, пока точка напряжения не попадает на купольную часть поверхности. Величина объемной пластической деформации (уплотнения) определяется законом упрочнения.

Таким образом, кроме учета дилатансии, введение купольной части поверхности добавляет в модель еще одну экспериментальную характеристику материала.

В КМДП учитывалось кинематическое упрочнение поверхности f_1 , что определяется кинематическими параметрами N и B . Кинематические параметры упрочнения позволяют начальной поверхности текучести f_1 , расположенной на расстоянии N от предела разрушения перемещаться к поверхности разрушения при сдвиге [13] (рис.2).



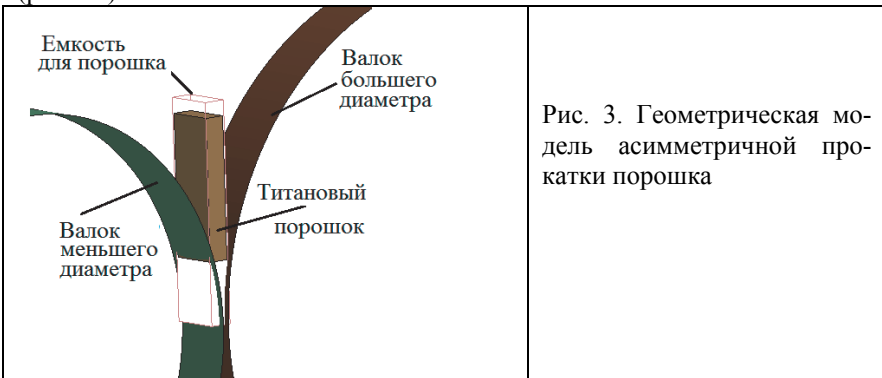
Введение тензора обратных напряжений позволяет сгладить угловой стык кривых f_1 и f_2 и общая зависимость напряжений по Мизесу от напряжения сжатия преобразовывается в одну гладкую кривую.

Приведенная выше модель сопротивления деформации титанового порошка при прокатке была положена в основу общей математической модели прокатки. Параметры КМДП для порошка титана с относительной плотностью 30% представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры математической модели сопротивления деформации порошка титана

Начальная (насыпная) плотность, ρ_0	1450 кг/м ³	Предельная величина растяжения, T	500 МПа
Начальный модуль сжатия, K	13 ГПа	Модуль кинематического упрочнения, B	10 ГПа
Начальный модуль сдвига, G	9 ГПа	Параметр кинематического упрочнения, N	6 МПа
Параметр кривой разрушения, α	3 МПа	Экспонента закона упрочнения, D	$4 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$
Линейный коэффициент кривой разрушения, θ	1,93	Коэффициент закона упрочнения, W	1,1325
Параметр R	1		

При моделировании процесса асимметричной прокатки порошка титана принимали следующие исходные данные: рабочие валки диаметром 150 мм и 198 мм, окружная скорость каждого валка 7.5 об/мин. Исходная форма порошка представляет собой параллелепипед шириной 15 мм, длиной 40 мм и толщиной 5.1 мм. Толщина проката 0.7 мм, ширина 16 мм (рис.3-4).



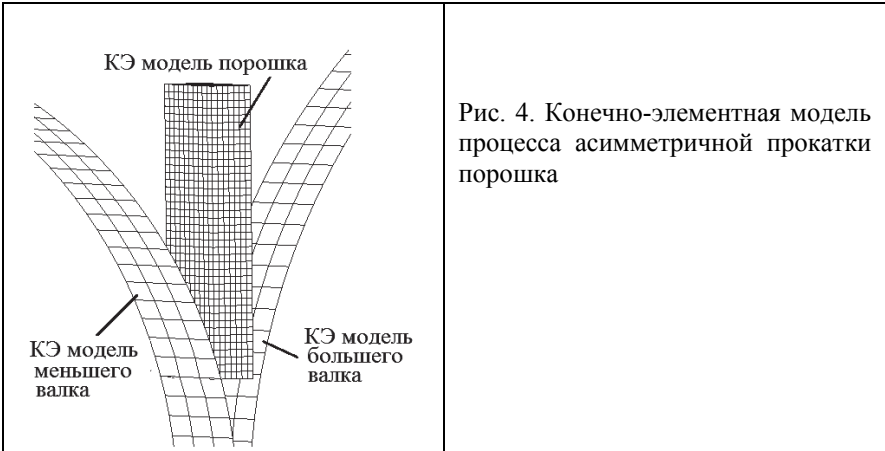


Рис. 4. Конечно-элементная модель процесса асимметричной прокатки порошка

Для формирования кромок прокатываемой полосы, а также для предотвращения потери исходной формы порошка дополнительно моделировали жесткие стенки в виде короба (рис. 3). Порошок поступает в раствор валков за счёт силы тяжести.

Анализ результатов моделирования

В результате моделирования определено напряженное состояние металла в очаге деформации и изменение плотности титана в процессе асимметричной прокатки. На рис. 5(а) - 5(б) представлены градиенты нормальных напряжений в очагах деформации металла со сторон валков меньшего и большего диаметров.

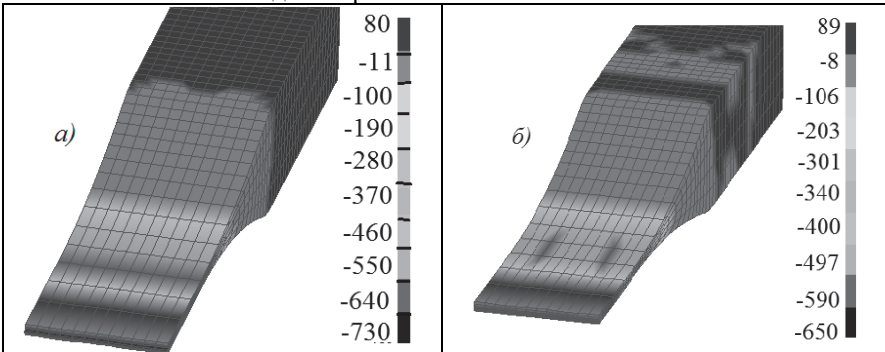


Рис. 5. – Нормальные напряжения в очаге деформации со стороны меньшего (а) и большего (б) валков, МПа

Со стороны валка меньшего диаметра максимальная величина напряжений составляет 730 МПа, в то время как со стороны валка большего диаметра максимальные напряжения составляют 650 МПа. Различие напряжений объясняется разностью диаметров (и линейной скоростью валков), а также различием длины дуги контакта.

На рис. 6. представлено распределение вдоль дуги контакта валков с порошком нормальных контактных напряжений и напряжений трения (касательных напряжений) вдоль направления прокатки со стороны меньшего и большего валков.

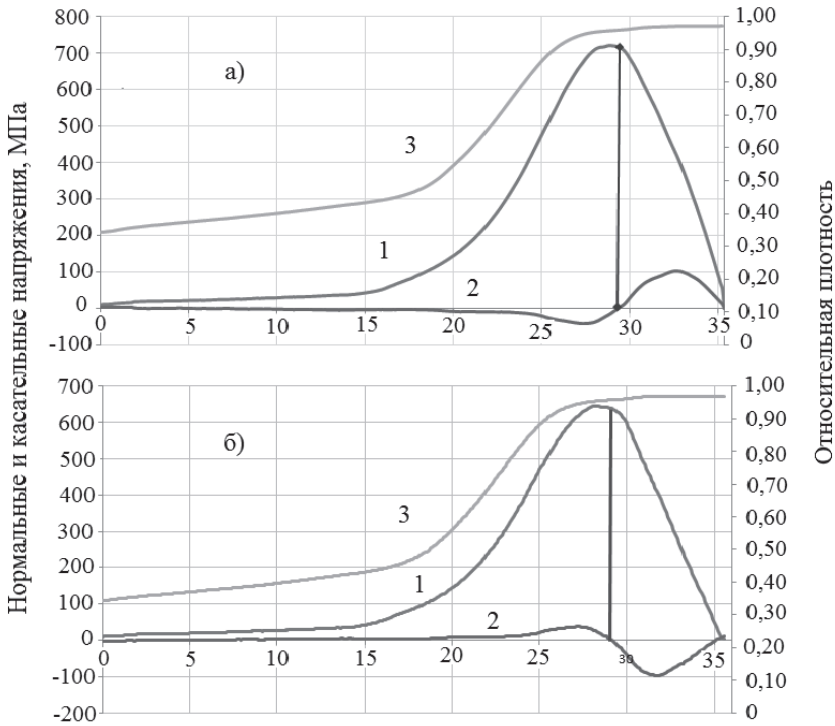


Рис. 6. Нормальные (1), касательные (2) напряжения и относительная плотность (3) в очаге деформации со стороны большего (а) и меньшего (б) валка.

Как следует из графиков, точка начала изменения направления действия напряжений трения, соответствующая нейтральному углу, возникает несколько дальше вершины купола нормальных контактных напряжений в направлении прокатки. Положение нейтральных углов со стороны большего и меньшего валков отличаются. Напряжения трения со стороны одного и другого валков в зонах отставания и опережения противоположно направлены. Из характера изменения напряжений трения в области нейтральных углов следует, что в этих областях присутствует зона прилипания, где скорости движения частиц соответствуют линейной скорости валков, так как напряжения трения при прохождении нейтрального угла не меняют свой знак мгновенно. Такой случай из области прокатки особо тонких сплошных металлических полос, в частности, фольги возможен,

когда в результате значительного упругого сплющивания рабочих валков в срединной области очага деформации формируется участок неизменной толщины полосы, так называемая «зона транспортировки» где её скорость равна линейной скорости валка. В нашем же случае прокатки полосы 0,7 мм при принятых абсолютно жесткими валках такой эффект может быть связан с изменением степени уплотнения.

При моделировании процесса прокатки тонких сплошных полос в очаге деформации используют гипотезу гипотезу плоских сечений и условие постоянства секундных расходов $v \cdot h = \text{const}$, где v – среднее по высоте значение линейной скорости полосы. В нашем случае прокатки, когда фактор формы очага деформации превышает 20 должно с достаточной точностью выполняться условие:

$$v \cdot h \cdot \rho_{\text{отн}} = \text{const}, \quad (13)$$

Отсюда, при известных значениях скорости полосы можно определять изменение относительной плотности в области изменения знака напряжений трения. А при известных значениях относительной плотности – изменение средней по высоте скорости.

Модель ДП определяет объемную пластическую деформацию, через которую вычисляется относительная плотность по формуле [14]:

$$\rho^{\text{отн}} = (\rho^{\text{начал}} \times e^{\varepsilon^{\text{vol}}}) / \rho^{\text{полн}}, \quad (14)$$

где $\rho^{\text{отн}}$, $\rho^{\text{начал}}$ и $\rho^{\text{полн}}$ – относительная, начальная и полная плотности; ε^{vol} – объемная пластическая деформация.

На рис. 7 представлено изменение относительной плотности титанового порошка в процессе прокатки. Конечная относительная плотность выходящего листа металла составляет 96%.

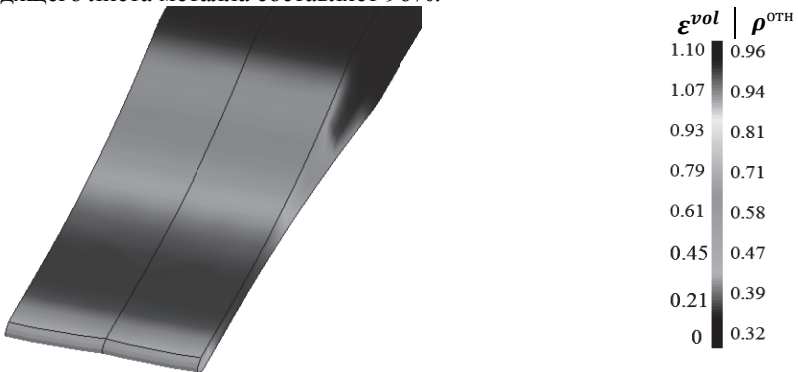


Рис. 7. Относительная плотность титана в процессе прокатки

На рис. 8 представлено изменение толщины Δh со стороны валка меньшего и большего диаметра на величину относительно начальной толщины. Положительная величина свидетельствует об изменении со стороны меньшего диаметра, а отрицательные значения – со стороны

валка большего диаметра (начальная толщина 5.1мм, конечная толщина – 0.7мм).



Рис. 8. Изменение толщины полосы при прокатке порошка титана

Как следует из рис. 6-7, конечная относительная плотность выходящего листа металла составляет 96-97%, что совпадает с экспериментальными данными.

Выводы

Процесс несимметричной прокатки порошка исследовали с помощью метода конечных элементов с применением КМДП, предложенной Ди Маджио и др. Определение параметров модели осуществлялось на основе экспериментов и анализа научных публикаций. Анализ результатов моделирования показал, что максимальные напряжения возникают в зоне очага деформации со стороны меньшего вала и достигают 730 МПа, а со стороны большего – 650 МПа, что подтверждается экспериментально.

Результатами расчетов подтверждено, что плотность прокатанного металла достигает 96-97% от значения сплошного титана, что совпадает с экспериментальными данными. Применение тензора «обратных напряжений» позволило достичь численной устойчивости решения.

Из характера изменения напряжений трения в области нейтральных углов следует, что в этих областях присутствует зона прилипания, где скорости движения частиц соответствуют линейной скорости валков, так как напряжения трения при прохождении нейтрального угла не меняют свой знак мгновенно.

С учётом закона постоянства секундных объёмов в очаге деформации применительно к прокатке пористых материалов $v \cdot h \cdot \rho_{отн}$ при известных значениях скорости полосы можно определять изменение относительной плотности, которая должна резко изменяться в области изменения знака напряжений трения. А при известных значениях распределения относительной плотности вдоль очага деформации можно определять изменение средней по высоте скорости.

Модель процесса несимметричной прокатки порошка титана можно считать отлаженной. С её помощью, варьируя диаметрами валков, скоростью их вращения и начальной плотностью порошка, можно оптимизиро-

вать параметры процесса, достигая заданных значений плотности, формы (кривизны) и обеспечением сплошности концов полосы с предотвращением расслоения.

1. *Виноградов Г.А., Каташинский В.П.* Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул. -М.: Металлургия. – 1979. – 224 с.
2. *Ложечников Е.Б.* Прокатка в порошковой металлургии. М.: Металлургия. – 1987. – 184 с.
3. *Мальцев М.В., Хромов В.Г., Малышкина З.Н.* Исследование получения и свойства металлокерамического электролитического титана. Труды ГПИ. Том XXVI, выпуск 15, Горький, 1970.
4. *Шмелев Л.С., Сорокин В.К.* Промышленное производство листового титана прокаткой порошков. «Цветные металлы». 1993. – № 10. – С. 49-50.
5. *Воропаев В.С., Калуцкий Г.Я., Подрезов Ю.Н.* Получение полос из порошка титана с использованием технологи асимметричной прокатки Порошковая металлургия, 2012, № 9-10, с.11-23
6. *Либенсон, Г. А.* Процессы порошковой металлургии : учеб. для вузов: в 2 ч./ Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий. – М.: МИСиС, 2001.
7. *Кипарисов, С. С.* Порошковая металлургия : учеб. для вузов / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон. – 2-е изд. – М. : Металлургия, 1991. – 431 с.
8. *Либенсон, Г. А.* Производство порошковых изделий : учеб. для вузов / Г. А. Либенсон. – М. : Металлургия, 1990. – 236 с.
9. *Drucker, D.C.*, "Soil mechanics and hardening theories of plasticity", American Society of Civil Engineers (ASCE) transaction, 1957, vol. 122, pp. 338-346.
10. *DiMaggio, F.L. Sandler*, IS Material model for granular soils. J Eng Mech Div 97 (1971). 935 – 950pp.
11. *A.F. Fossum, R.M. Brannon*. «THE SANDIA GEOMODEL: Theory and User's Guide» SANDIA REPORT. Sandia National Laboratories. Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550. Printed August 2004. 158pp.
12. *Joseph H. Amend*. «Application of a soil cap model to ground motion analysis» University of New Mexico Albuquerque, NM 87131/ Final Report // February 1978. 60pp.
13. *Colby C., etc.* «Three-Surface Elasto-Plastic Cap Model: Rate Formulation, Integration Algorithm and Tangent Operators». Seamans Center for Engineering Arts & Sciences Department of Civil and Environmental Engineering Center for Computer-Aided Design The University of Iowa Iowa City, Iowa 52242, USA. 1-34pp.
14. *Sandler, I.S., F.L. DiMaggio, and G.Y. Baladi*, "Generalized Cap Model for Geological Materials," Journal of the Geotechnical Engineering Division, Volume 102, GT7, pages 683-699, July 1976.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук С.А.Воробьем*

І.Ю.Приходько, М.О.Дедік, К.О.Гогаєв, В.С.Воропаєв, А.І.Іценко

Кінцево-елементний аналіз параметрів процесу несиметричного прокатування порошку титану

Наведено аналіз і обґрунтування моделі опору деформації порошку титану при його ущільненні в процесі несиметричного прокатування, а також результати кінцево-елементного математичного моделювання цього процесу з використанням експериментальних даних. Процес несиметричного прокатування порошку досліджували за допомогою методу кінцевих елементів із застосуванням моделі, що запропонована Ді Маджіо.

Ключові слова: порошок титану, несиметричне прокатування, ущільнення, модель, метод кінцевих елементів

I.Yu.Prihodko, M.A.Dedik, K.A.Goryaev, V.S.Voropaev, A.I.Icenko

Analysis of the asymmetrically rolling parameters of titanium powder

The analysis and validation of the model deformation resistance of the metal powder with its seal in the asymmetric rolling. The results of finite element mathematical modeling of the process with respect to the titanium powder with the use of IP-experimental data. The process of asymmetric rolling powder was investigated using the finite element method with the use of the model proposed by DiMaggio.

Keywords: titanium powder, asymmetric rolling, seal, model, finite element method