

УДК 612.762.4(03)

К.А. Гогаев, д.т.н., Г.Я. Калущкий, к.т.н., В.С. Воропаев, к.т.н.  
 Інститут проблем матеріалознавства ім. І.Н. Францевича НАН України, г.Київ

## ОСОБЕННОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Проведено дослідження асиметричної прокатки металевих порошків на приводних валках різного діаметру при їх однаковій кутовій швидкості. Співвідношення діаметрів валків становило  $1,12 \div 1,42$ . Встановлено, що асиметрична прокатка дозволяє усунути багато недоліків традиційної прокатки порошкових матеріалів, викликаних нерівномірним розподілом контактних напруг по ширині прокату. Дослідження контактних напруг в осередку деформації дозволило встановити характерні риси розподілу нормальної напруги на валках різних діаметрів та визначити кутові параметри прокатки в залежності від співвідношення діаметрів валків.

Researches asymmetric rolling of metal powders on work rolls different diameters at their identical angular speed. The ratio of diameter work rolls made  $1,12 \div 1,42$ . It is established, that asymmetric rolling allows to remove many lacks traditional rolling the powder materials, caused by non-uniform distribution of contact pressures on width of product. Research of contact pressures in the center of deformation has allowed to establish prominent features of distribution of a normal pressures on rolls different diameters and to determine angular parameters rolling in depending of ratio of diameters rolls..

Прокатка порошков и гранул находит широкое применение при получении длинномерных полуфабрикатов и изделий в виде пористых и беспористых листов и лент биметаллических и многослойных материалов, высоколегированных и высокопрочных сплавов.

Однако переработка порошка и гранул методом прокатки и изготовление из них полуфабрикатов в виде листов, лент и полос не нашла широкого применения по многим причинам.

Неравномерность распределения нормальных контактных напряжений в очаге деформации по ширине проката часто приводит к разрушению проката.

Из-за отсутствия как переднего так и заднего натяжения при прокатке часто происходит отклонение проката от прямолинейных размеров (так называемое явление серповидности).

Высокое давление при прокатке из-за больших углов захвата материала, особенно при прокатке гранул, создают значительный упругий прогиб и упругое сплющивание валков, что приводит к продольной и поперечной разнотолщинности, а также неплоскостности.

Известна возможность использования метода асимметричной прокатки для получения плоского проката из металла традиционного способа производства. Прокатку производят с рассогласованием окружных скоростей рабочих валков путем изменения угловой скорости одного из валков при их одинаковом диаметре или путем использования рабочих валков разного диаметра, вращающихся с одинаковыми угловыми скоростями. Вопросы теории и технологии асимметричной прокатки освещены в работах Выдрин В.Н., Грудева А.П., Чекмарева А.П., Сеницына В.Г., Пучковой Л.М. и др.[1, 2, 3, 4, 5]. Применение такой прокатки позволило значительно повысить точность и качество проката, сократить количество проходов при прокатке за счет увеличения степени обжатия и намотку упростить систему автоматического регулирования и управления процессом прокатки.

Асимметричная прокатка порошкового материала только начала изучаться. В работе, опубликованной в 1993 году [6], были рассмотрены вопросы влияния соотношения скоростей, начального зазора между валками, объема подаваемого порошка на давление прокатки, относительную плотность и толщину ленты. В работе [7], кроме этого, изучалось влияние соотношения скоростей на опережение при прокатке. В работе [8] изучалось влияние соотношения скоростей (в пределах  $1,00 \div 1,33$ ) на давление, относительную плотность и толщину ленты. В экспериментах использовался электролитический медный порошок. Во всех случаях было показано, что в сравнении с традиционной симметричной прокаткой давление на валки при прокатке лент уменьшается на 25%, а относительная плотность ленты на 15% больше при таком же давлении на валки. Исследования проводились при использовании приводных рабочих валков одинакового диаметра с изменением угловой скорости одного из валков.

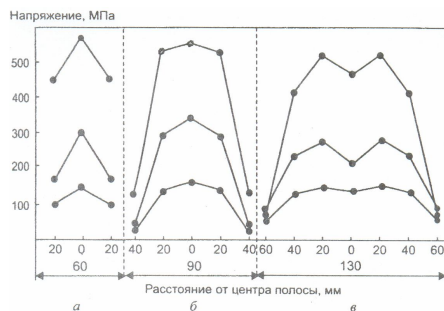


Рис.1. Распределение контактных нормальных напряжений при прокатке алюминиевого порошка:  
 $a - b / ld < 4$ ;  $b - b / ld = 5-6$ ;  $c - b / ld > 7$

Исследование распределения нормальных контактных напряжений по ширине проката из алюминиевого порошка при традиционной прокатке, проведенного с помощью валка, вдоль оси которого были установлены через каждые 20мм шесть точечных силоизмерительных мездоз, показало, что характер распределения нормальных контактных напряжений в очаге деформации по ширине проката аналогичен прокатке компактного материала (рис. 1). Ширина прокатываемых лент была 60, 90 или 130 мм [9, 10].

Максимум давления, как и при прокатке компактных материалов, не всегда располагается посередине ленты. При прокатке широких лент, у которых  $b/ld > 7$  ( $b$  – ширина ленты,  $ld$  – длина дуги прокатки), появляются два максимума давлений.

Разность нормальных контактных напряжений в центре и по краям полосы приводит к появлению значительных продольных напряжений растяжения по кромкам на выходе полосы из валков. При таких условиях становится практически неосуществимой прокатка полосы из порошка на гладкой бочке, так как зарождающиеся на кромках трещины, интенсивно разрастаясь, могут достичь центра полосы. Единственно возможный путь устранения этого явления – уменьшение давления прокатки, или создание заднего и переднего натяжения ленты. Но при уменьшении давления в многих случаях невозможно сформировать полосу из порошка, а создать заднее натяжение материала, т.е. порошка, нереально. Переднее натяжение создать невозможно из-за низкой прочности ленты, сформированной из порошка.

Выход из данной ситуации – создание таких условий прокатки, которые обеспечивали бы значительное снижение продольных напряжений растяжения вне зависимости от изменения давления.

Такие условия могут быть созданы при асимметричной прокатке за счет того, что формирование структурных элементов происходит в очаге деформации при наличии высоких касательных напряжений в сочетании с гидростатическим давлением. Это позволяет значительно эффективнее достичь беспористого состояния материала и обеспечить надежный металлический контакт между деформируемыми частицами. Эффект достигается за счет рассогласования окружных скоростей приводных рабочих валков прокатной клетки.

Показано [9, 10, 11], что асимметричная прокатка порошков позволяет устранить многие недостатки, препятствующие развитию этого процесса.

Авторами проведена исследовательская работа, целью которой было изучить уплотняемость порошковых материалов и закономерность изменения угловых параметров при асимметричной прокатке металлических порошков [12, 13]. Это позволило ответить на главный вопрос: какое рассогласование окружных скоростей приводных рабочих валков является оптимальным?

Уплотняемость и угловые параметры изучали с помощью точечных месдоз, установленных на пяти парах валков с отношениями диаметров больших валков  $D_{(б)}$  к диаметрам меньших валков  $D_{(м)}$ , равными 1,00; 1,12; 1,20; 1,32; 1,42. В качестве материалов для исследования использовали железный порошок, порошок электролитического титана, алюминиевый порошок и алюминиевые гранулы размером 1 – 2 мм. Исследования проводились на прокатном стане ДУО 170, оси валков в котором располагались в горизонтальной плоскости. Угловая скорость валков составляла 17,1 об/мин, ширина ленты – 16 мм. В качестве регистрирующего прибора использовали светолучевой осциллограф Н117/1.

Обработка осциллограмм показала, что, в отличие от традиционной (симметричной) прокатки, при прокатке с рассогласованием окружных скоростей рабочих валков величина контактных напряжений в очаге деформации на границе порошок – валок значительно отличаются друг от друга.

При всех соотношениях диаметров, начиная с  $D_{(б)} / D_{(м)} = 1,12$  и выше максимальное контактное нормальное напряжение на ведомом (меньшем) валке всегда больше, чем на ведущем (большем) валке. Поэтому не может быть однозначной зависимости плотности проката от максимального контактного нормального напряжения. Визуальный осмотр лент показывает, что поверхность лент, примыкающая к валку меньшего диаметра, имеет практически беспористую структуру, в то время как на стороне, примыкающей к валку большего диаметра, видны отдельные частицы порошкового материала с различимыми между ними границами. И эта разница более отчетливо проявляется при увеличении отношения диаметра большего валка к меньшему.

Поскольку максимальные контактные нормальные напряжения на валках при асимметричной прокатке отличаются друг от друга, невозможно построить единую диаграмму уплотняемости.

Мы построили диаграммы уплотняемости отдельно относительно большего и меньшего валков в сравнении с диаграммой уплотняемости при симметричной прокатке, определенной нами при равенстве диаметров валков (рис. 2, 3). Для прокатки использовали железный порошок и электролитический титан - материалы, которые значительно отличаются по прочности и пластичности. Во всех случаях максимальное контактное нормальное напряжение  $\sigma_{\max(м)}$  на меньшем валке было всегда выше, чем  $\sigma_{\max(б)}$  на большем валке.

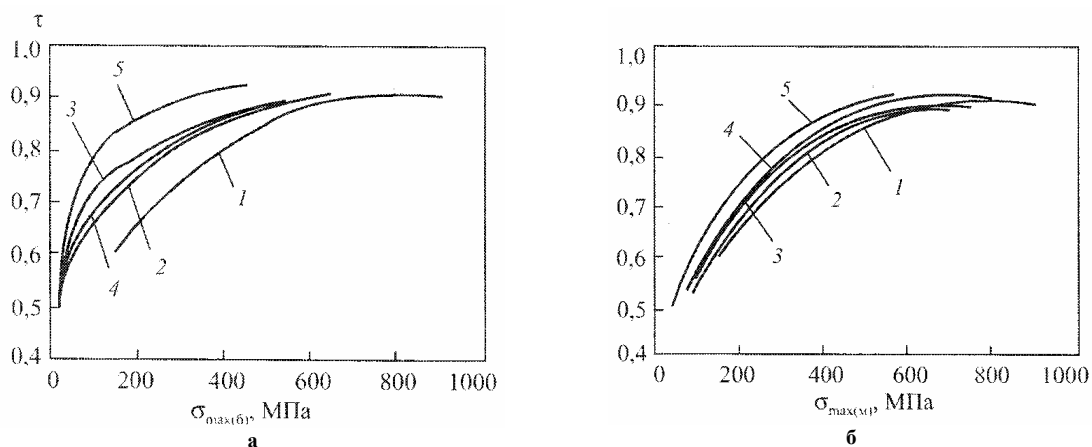


Рис.2. Диаграммы уплотняемости проката из железного порошка при различных соотношениях диаметров приводных валков 1,00 (1); 1,12(2); 1,20(3); 1,32(4); 1,42(5)

$\sigma_{\max(б)}$ ,  $\sigma_{\max(м)}$  - максимальное контактное нормальное напряжение соответственно на большем (а) и меньшем (б) валках (здесь и на рис.3)

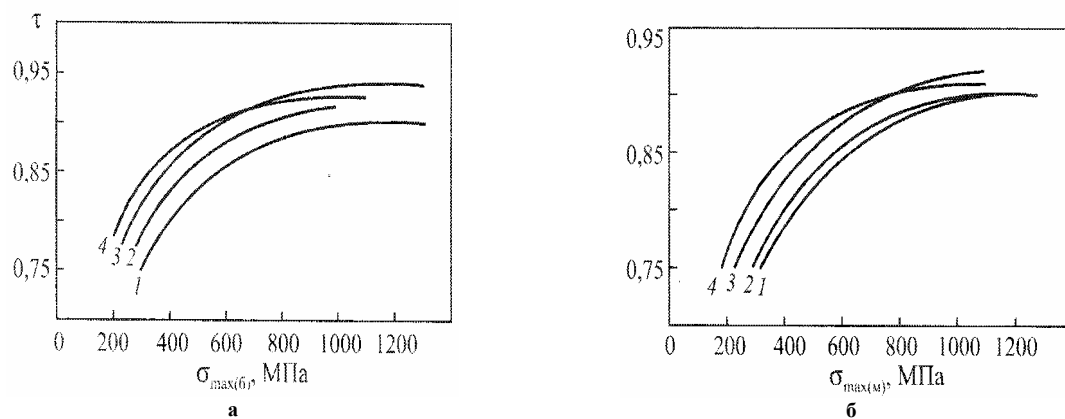


Рис. 3. Диаграммы уплотняемости проката из электролитического титана при соотношениях диаметров приводных валков 1,00 (1); 1,12(2); 1,20(3); 1,32(4); 1,42(5)

При получении лент одной и той же плотности максимальное контактное нормальное напряжение при традиционной (симметричной) прокатке всегда было выше, чем при асимметричной прокатке, как на большем, так и на меньшем валках.

При асимметричной прокатке усилие на валки значительно уменьшается. Давление на валки снижается с увеличением рассогласования окружных скоростей валков в пределах исследованных нами параметров. Так, например, увеличение рассогласования скоростей или увеличение отношения диаметров валков с 1,12 до 1,42 снижает давление на валки от 20% до 50%. Таким образом, столь значительное снижение давления уменьшает упругую деформацию и прогиб валков, повышает точность и плоскостность проката.

Важнейшими характеристиками процесса прокатки металлических порошков, особенно асимметричной, являются угловые параметры, которые геометрически определяют деформационные и силовые взаимодействия рабочих валков в очаге деформации. Наиболее важными являются угол прокатки  $\alpha_p$  и нейтральный (критический) угол  $\gamma$ , методика определения которых разработана и величины которых могут быть определены с достаточной точностью.

Значения углов прокатки, а также нейтральных углов при прокатке металлического порошка экспериментально были определены с помощью точечных месдоз.

При прокатке беспористого компактного материала, а также при уплотняющей прокатке пористых листов угол прокатки (или угол захвата) мал и ограничен толщиной ленты на входе и выходе из валков. Угол прокатки сыпучего тела устанавливается произвольно в зависимости от условий прокатки и в несколько раз превышает угол захвата при тонколистовой прокатке компактного материала.

При симметричной прокатке угловые параметры на обоих валках изменяются одинаково. Плоскость раздела зон отстаивания и опережения при вертикальной прокатке параллельна плоскости по линии центров валков.

Нами впервые изучены закономерности изменения угловых параметров  $\alpha_p$  и  $\gamma$  при асимметричной прокатке металлических порошков в зависимости от плотности проката, контактного давления и рассогласования окружных скоростей валков. На основании полученных результатов удалось установить оптимальное рассогласование окружных скоростей приводных рабочих валков.

При асимметричной прокатке на характер изменения и величину угловых параметров в сочетании с давлением и плотностью проката дополнительно влияет рассогласование окружных скоростей приводных рабочих валков прокатного стана.

Проведенные исследования показали, что при прокатке порошков железа, титана, алюминиевого порошка и алюминиевых гранул закономерность изменения угловых параметров от давления практически одинакова, а прилагаемые усилия - разные.

Нами было установлено, что при всех соотношениях диаметров валков (в отличие от симметричной прокатки) угол прокатки и нейтральный угол, сначала увеличиваются до определенного значения  $\sigma_{max}$  как на большем, так и на меньшем валках. После этого угловые параметры, несмотря на значительный рост давления прокатки, не изменяются. Период и интенсивность увеличения углов зависит от соотношения  $D_{(б)}/D_{(м)}$ .

Таким образом, угловые параметры на валках имеют два периода: начальный неустойчивый, когда давление влияет на их изменение, и устойчивый, когда оно не влияет, а параметры зависят только от соотношения диаметров рабочих валков.

Начиная с соотношения диаметра валков  $D_{(б)}/D_{(м)} = 1,32$  все угловые параметры на валке меньшего диаметра резко увеличиваются, а на валке большего - уменьшаются. Выравниваются дуги прокатки и уменьшается нейтральный угол  $\gamma$  на валке большего диаметра до минимального уровня или до нуля.

Комплексный анализ изменения угловых параметров в зависимости от давления при прокатке, плотности проката и рассогласования окружных скоростей рабочих валков показывает значительное влияние скоростного фактора. Построены графики зависимости угловых параметров от отношения  $D_{(б)}/D_{(м)}$  при различной относительной плотности проката из различных порошковых материалов. На рис.4 показана такая зависимость при прокатке железного порошка, когда относительная плотность проката  $\tau = 0,60 - 0,90$ . Видно, что значения углов  $\alpha_p$  и  $\gamma$  интенсивно растут на меньшем валке и резко уменьшаются на большем начиная с соотношения  $D_{(б)}/D_{(м)} = 1,20 - 1,25$ . Эта закономерность не зависит ни от плотности проката, ни от вида порошковых материалов. Таким образом, можно считать, что при асимметричной прокатке отношение  $D_{(б)}/D_{(м)} = 1,20 - 1,25$  является тем критерием, который

разделяет два периода – начальный неустойчивый и устойчивый. Начиная с этого отношения при его увеличении углы  $\alpha_p$  и  $\gamma$  интенсивно растут на меньшем валке и снижаются на большем валке. Нейтральный угол на большем валке при асимметричной прокатке с соотношением  $D_{(б)}/D_{(м)} = 1,42$  не превышал  $1,5^\circ$ .

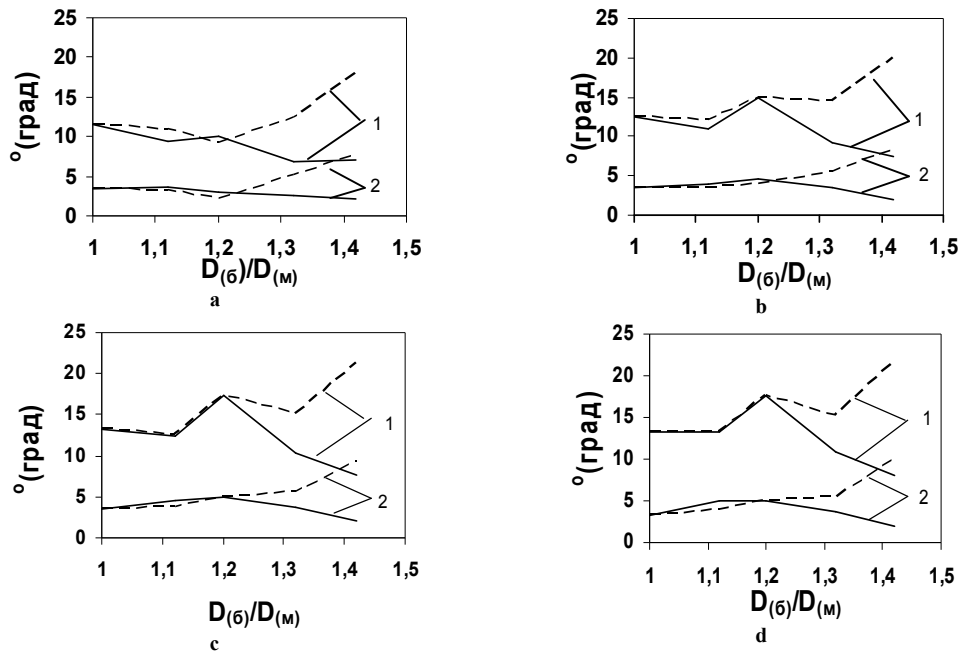


Рис.4. Зависимость  $\alpha_p$  (1) и  $\gamma$  (2) от изменения соотношения  $D_{(б)}/D_{(м)}$  и плотности проката  $\tau = 0,60$  (а);  $0,7$  (в);  $0,80$ (с);  $0,90$  (d) при прокатке железного порошка;сплошная линия - больший валок, пунктирная – меньший

При прокатке алюминиевых гранул со значительной деформацией частиц порошкового материала нейтральный угол, равный  $1,5^\circ$ , был зафиксирован уже при соотношении  $D_{(б)}/D_{(м)} = 1,32$  (рис. 5).

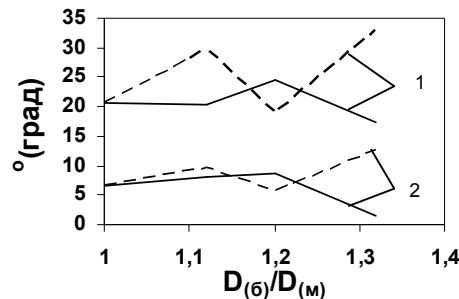


Рис.5. Зависимость  $\alpha_p$  (1) и  $\gamma$  (2) от изменения соотношения  $D_{(б)}/D_{(м)}$  при прокатке алюминиевых гранул 1-2 мм: относительная плотность проката  $\tau = 0,98$ , толщина ленты – 1,5 мм; сплошная линия - большой валок, пунктирная – меньший

Таким образом, рост нейтрального угла на меньшем валке и уменьшение его на большем при асимметричной прокатке приводит к существенному изменению положения нейтрального сечения между зонами отставания и опережения (рис. 6).

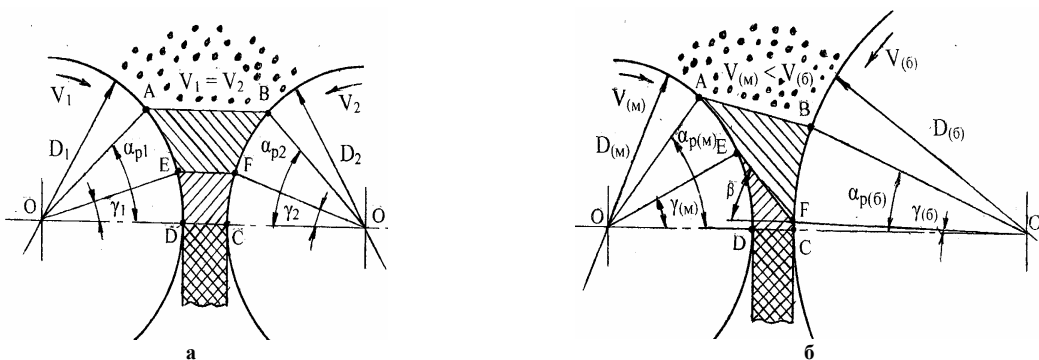


Рис. 6. Очаг деформации при симметричной (а) и асимметричной (в) прокатке:  $D_1 = D_2$ ;  $D_{(б)} > D_{(м)}$ ;  $\alpha_{p1} = \alpha_{p2}$ ;  $\gamma_1 = \gamma_2$ ;  $\alpha_{p(б)} < \alpha_{p(м)}$ ;  $\gamma_{(б)} < \gamma_{(м)}$ ; ABFE – зона отставания; EFCD – зона опережения, EF – нейтральное сечение

При симметричной прокатке нейтральное сечение EF параллельно линии центров валков и растягивающие напряжения активны в очаге деформации при неравномерной деформации материала в зоне опережения. При асимметричной прокатке, когда нейтральное сечение EF расположено под углом  $\beta$  к линии центров валков значительно активизируется сдвиговая деформация частиц под давлением и уменьшается влияние растягивающих напряжений. Чем больше угол  $\beta$ , тем более активны сдвиговые деформационные процессы в очаге деформации.

### Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что асимметричная прокатка порошковых материалов позволяет устранить многие недостатки традиционной прокатки, вызванные неравномерным распределением контактных напряжений по ширине проката.

При асимметричной прокатке порошковых материалов максимальные контактные напряжения на валке меньшего диаметра всегда больше, чем на валке большего диаметра.

Показано, что плотность проката зависит не только от максимальных контактных напряжений, но и от соотношения диаметров валков.

Установлено значительное снижение контактного давления при асимметричной прокатке лент такой же плотности, как и при традиционной прокатке.

Существенное влияние рассогласование окружных скоростей рабочих валков за счет разности их диаметров оказывает на изменение угловых параметров как на большем, так и на меньшем валках. При отношении диаметра большего валка к диаметру меньшего 1,25 и более (за счет изменения угловых параметров) создаются благоприятные условия для активации сдвиговых процессов в очаге деформации.

На основе полученных результатов может быть разработана новая технология производства тонколистового проката со значительным сокращением затрат энергоресурсов и материала.

### Список литературы

1. Выдрин В.Н. Динамика прокатных станов – Свердловск: Metallurgizdat, 1960. – 255с.
2. Грудев А.П. Теория прокатки – М.: Metallurgiya, 1970. – 358с.
3. Чекмарев А.П. Теория продольной прокатки – Харьков: Наука, 1965. – 212с.
4. Сеницын В.Г. Несимметричная прокатка листов и лент – М.: Metallurgiya, 1984. – 210с.
5. Пучкова Л.М. Исследование энергосиловых и кинематических параметров процесса холодной несимметричной тонколистовой прокатки. Автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Москва. – 1977.
6. Masaki S., Hirohata T., Zhu O.B. Compacting metal powder by differential speed rolling. Adv. Technol. Plastisity, 1993. P. 182 – 187.
7. Masaki S., Hirohata T., Naga T. Characteristics of electrolytic copper powder compaction by differential speed rolling. ZSME Int.Z.C., 1997. – №40(3). – P.518-524.
8. Hirohata T., Masaki S., Shima S. Experiment on metal powder compaction by different speed rolling. Journal of Materials Processing Technology, 2001. – P. 113-117.
9. Калущий Г.Я., Гогаев К.А., Воропаев В.С. Перспектива развития прокатки металлических порошков и гранул // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: Тематич. сб. науч. тр. – Краматорск: Донецк. гос. металлург. академия, 2007. – С. 508 – 512.
10. Калущий Г.Я., Гогаев К.А., Воропаев В.С., Непомнящий В.С. Опыт прокатки металлических порошков и гранул с использованием асимметричных схем деформирования // Порошковая металлургия. – 2007 - №3/4. – С. 115 – 120.
11. Пат. 77719 Україна. Спосіб одержання листів, смуг і стрічок з металевих порошків і гранул / Калущий Г.Я., Гогаев К.А., Воропаев В.С. – Опубл. 25.01.07. Бюл. №1.
12. Гогаев К.А., Калущий Г.Я., Воропаев В.С. Асимметричная прокатка металлических порошков I. Уплотняемость металлических порошков при асимметричной прокатке // Порошковая металлургия. – 2009 - №3/4. – С.36–42.
13. Гогаев К.А., Калущий Г.Я., Воропаев В.С. Асимметричная прокатка металлических порошков II. Угловые параметры асимметричной прокатки // Порошковая металлургия. – 2009 - №5/6 – С. 35 – 42.