

УДК 621.762.4(03)

**В. С. Воропаев, Г. Я. Калущкий, Е. А. Потипака***Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН Украины***ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОГО ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ПРИ СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ РАБОЧИХ ВАЛКОВ**

*Исследованы силовые и угловые параметры асимметричной прокатки порошков железа, титана и алюминиевых гранул на валках разного диаметра, вращающихся с одинаковой угловой скоростью. Рассогласование окружных скоростей рабочих валков при асимметричной прокатке составляло от 12% до 42%. Установлено, что контактное нормальное напряжение при асимметричной прокатке на валке большего диаметра всегда меньше, чем на валке меньшего диаметра независимо от рассогласования окружных скоростей валков и прокатываемого материала. Показано, что рассогласование окружных скоростей валков создаёт условия для снижения силовых параметров и активации сдвиговых процессов в очаге деформации. Чтобы создать такие условия рассогласование скоростных параметров рабочих валков должно быть не менее 20%.*

*Ключевые слова:* прокатка, металлический порошок, гранулы, асимметрия.

*Рис. 4. Табл. 1. Форм. 1. Лит. 9.*

**В. С. Воропаєв, Г. Я. Калущкий, Е. О. Потіпака****ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНОГО ПРОЦЕСУ ПРОКАТКИ МЕТАЛЕВИХ ПОРОШКІВ ПРИ ШВИДКІСНІЙ АСИМЕТРІЇ РОБОЧИХ ВАЛКІВ**

*Досліджені силові та кутові параметри асиметричної прокатки порошків заліза, титану та алюмінієвих гранул на валках різного діаметру, що обертаються з однаковою кутовою швидкістю. Неузгодженість окружних швидкостей робочих валків при асиметричній прокатці становило від 12% до 42%. Установлено, що контактна нормальна напруження при асиметричній прокатці на валку більшого діаметру завжди менша, ніж на валку меншого діаметру незалежно від неузгодженості окружних швидкостей валків та матеріалу, який прокатується. Показано, що неузгодженість окружних швидкостей валків створює умови для зниження силових параметрів і активації зсувних процесів в осередку деформації. Щоб створити такі умови неузгодженість швидкісних параметрів робочих валків повинне бути не менш 20%.*

*Ключові слова:* прокатка, металевий порошок, гранули, асиметрія.

**V. Voropaev, G. Kalutsky, E. Potipaka****STUDY OF PROCESS ROLLING OF METAL POWDERS USE OF VELOCITY ASYMMETRY OF WORKERS ROLLS**

*Power and angular parameters asymmetric rolling of powders of iron, the titan and aluminium granules on rolls the different diameters, rotating with identical angular speed are investigated. The mismatch of district speeds of workers rolls at asymmetric rolling made from 12% to 42%. It is established, that contact normal pressure at asymmetric rolling on roll greater diameter always smaller, than on roll smaller diameter irrespective of a mismatch district speeds rolls and work material. It is shown, that the mismatch of district speeds rolls creates conditions for decrease in power parameters and activation of shift processes in the deformation centre. To create such conditions a mismatch of workers rolls should be not less than 20%.*

*Keywords:* a rolling, a metal powder, granules, asymmetry.

Как правило, порошковые материалы прокатывают в симметричном очаге деформации. Суть симметричной прокатки состоит в том, что порошок поступает из бункера в очаг деформации, для которого характерны одинаковые геометрические, скоростные, граничные условия на обоих валках.

Процесс прокатки можно рассматривать как процесс непрерывного прессования. В отличие от прокатки компактных материалов при прокатке порошковых материалов не соблюдается закон сохранения объема прокатываемого материала. При прокатке порошкового тела его объем уменьшается. В то же время соблюдается закон постоянства массы:

$$V_1 = zV_2 \quad (1)$$

где  $z$  – коэффициент уплотнения (отношение плотности сырого проката  $\gamma_{\text{л}}$  к насыпной плотности порошка  $\gamma_{\text{п}}$ .)

Как было установлено исследователями [1], при прокатке порошков контактное напряжение и деформация материала по ширине проката распределяются неравномерно. И эта неравномерность, возрастающая с увеличением плотности проката, приводит к появлению значительных растягивающих напряжений и разрушению пористого проката на выходе из валков.

При прокатке компактного материала с этим явлением достаточно успешно борются, создавая по ходу прокатки заднее и переднее натяжение ленты. При прокатке порошкового материала сделать это невозможно. Единственный выход – создать натяжение как заднее, так и переднее непосредственно в очаге деформации. Такой эффект можно получить при рассогласовании окружных скоростей рабочих валков прокатного стана [2,3].

Асимметричная прокатка порошкового материала находится на стадии изучения. В публикациях японских исследователей [4-6] было рассмотрено влияние соотношения скоростей, начального зазора между валками, объема подаваемого порошка на давление прокатки, относительную плотность и толщину ленты, влияние соотношения скоростей валков на опережение при прокатке. Во всех случаях было показано, что в сравнении с традиционной симметричной прокаткой давление на валки уменьшается на 25%, а плотность ленты на 15% больше при одинаковых силовых условиях на валки.

Проведенные в Институте проблем материаловедения НАН Украины эксперименты по асимметричной горячей прокатке гранул алюминиевых сплавов с использованием приводных рабочих валков разного диаметра показали, что асимметричная прокатка позволяет избежать значительного количества брака [7-9]. Кроме того, в работе [9] с помощью точечных мездоз были замрены контактные нормальные напряжения в очаге деформации и угловые параметры. Установлено, что во всех случаях, независимо от прокатываемого порошкового материала максимальное контактное нормальное напряжение со стороны меньшего валка всегда больше, чем со стороны большего валка.

Целью работы является - исследование возможности использования асимметричной прокатки для порошкового материала и определение оптимальных параметров прокатки.

Для этой работы были изготовлены пары валков разного диаметра, что позволило получить рассогласование окружных скоростей валков от 10% до 42% при одинаковой угловой скорости валков. Все валки были оснащены точечными мездозами, что позволило одновременно на двух валках произвести замер контактного нормального напряжения и угловых параметров в очаге деформации. Эксперименты проводились на порошках железа, титана и алюминиевых гранулах с размером гранул 1-2 мм.

Измерение контактного нормального напряжения при асимметричной прокатке показало, что во всех случаях при всех давлениях прокатки как максимальное, так и текущие значения контактного напряжения на меньшем валке всегда были больше, чем на большем валке и намного меньше, чем при симметричной прокатке при  $D_{(б)}/D_{(м)} = 1$  (табл.). Основным критерием оценки была плотность получаемого проката  $\tau$ .

**Таблица 1. Зависимость максимальных контактных нормальных напряжений от отношения диаметров валков и относительной плотности лент при прокатке железного порошка**

$\tau$	$D_{(б)}/D_{(м)}=1$	$D_{(б)}/D_{(м)}=1,12$		$D_{(б)}/D_{(м)}=1,20$		$D_{(б)}/D_{(м)}=1,32$		$D_{(б)}/D_{(м)}=1,42$	
	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\sigma_{\max(б)}$ , МПа	$\sigma_{\max(м)}$ , МПа						
060	135	60	130	35	120	45	120	65	75
070	230	145	217	95	210	125	200	57	143
080	370	270	345	225	330	255	315	114	240
090	650	520	545	525	585	475	565	315	435

Комплексный анализ изменения угловых параметров в зависимости от давления при прокатке, плотности проката и рассогласования окружных скоростей рабочих валков показывает значительное влияние скоростного фактора. На рис. 1 показана зависимости углов прокатки  $\alpha_p$  и нейтральных углов  $\gamma$  от отношения  $D_{(б)}/D_{(м)}$  при различной относительной плотности проката  $\tau$  при прокатке железного порошка. Как видно из графиков во всех случаях, начиная с рассогласования окружных скоростей валков на 20% (отношения диаметра большего валка к диаметру меньшего валка  $D_{(б)}/D_{(м)} = 1,20$ ) и более, происходит устойчивое изменение угловых параметров. Угол прокатки  $\alpha_p$  и нейтральный угол  $\gamma$  на большем валке уменьшаются при всех плотностях прокатываемого материала (или давления), а на валке меньшего диаметра они увеличиваются.

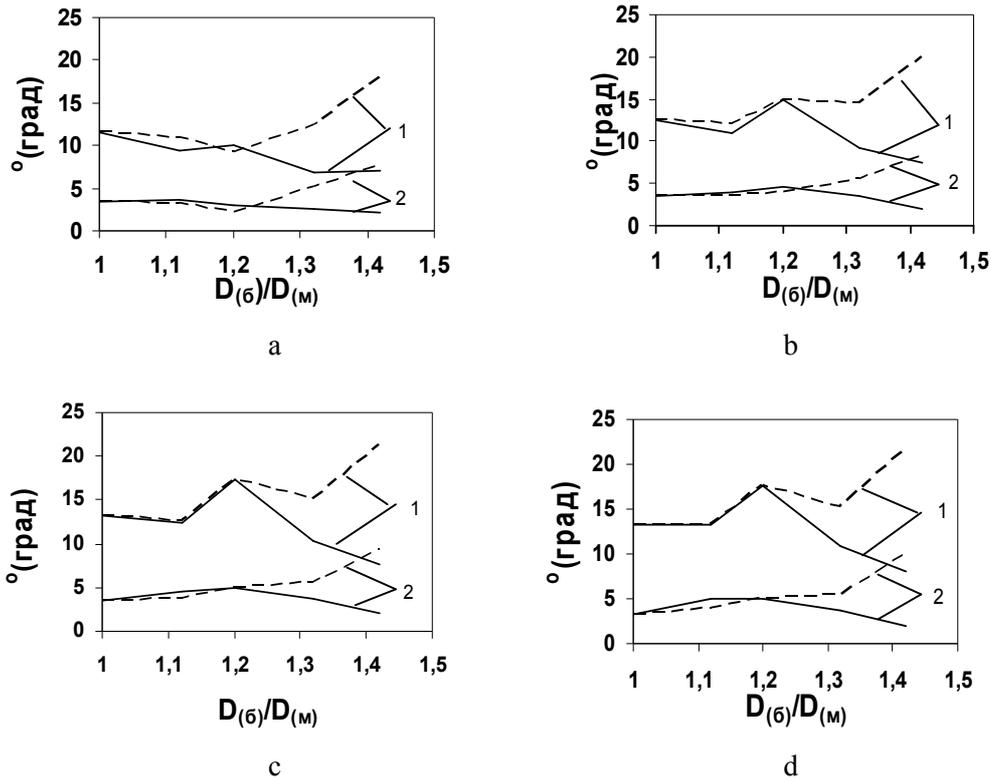


Рис. 1. Зависимость угла прокатки  $\alpha_p$  и нейтрального угла  $\gamma$  от изменения соотношения  $D_{(б)}/D_{(м)}$  и плотности проката  $\tau$ : а - 0,60; б - 0,70; с - 0,80; д - 0,90 — - больший валок; --- - меньший валок; 1 -  $\alpha_p$ ; 2 -  $\gamma$ .

Большое влияние на качество проката оказывает усилие прокатки. Чем больше усилие, оказываемое на рабочие валки, тем больше неравномерный зазор между валками из-за упругой деформации и изгиба валка.

Для определения усилия прокатки были изготовлены прокатные валки, на которых без перевадки можно было прокатать один и тот же порошковый материал, как в условиях симметричной, так и асимметричной прокатки. Одна часть валка с диаметрами 196,5 мм предназначалась для симметричной прокатки, другая часть диаметрами 218 мм и 175 мм – для асимметричной прокатки. Отношение диаметра большего валка к диаметру меньшего валка составляло 1,25.

Под нажимные винты прокатной клетки были установлены месдозы с тензодатчиками, которые фиксировали усилие при прокатке.

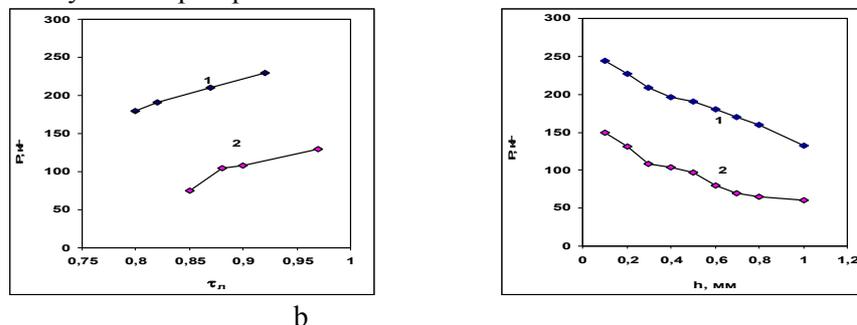


Рис. 2. Зависимость усилия прокатки  $P$  от относительной плотности проката  $\tau_n$  (а) и зазора между валками  $h$  мм (б) при прокатке ленты шириной 60мм из железного порошка. 1 – симметричная прокатка; 2 - асимметричная прокатка.

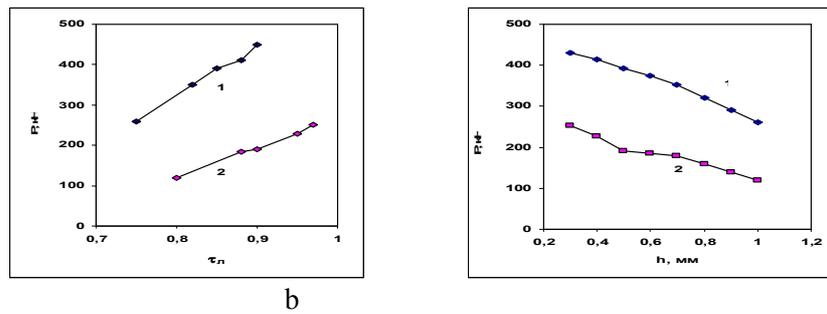


Рис. 3. Зависимость усилия прокатки от плотности проката  $\tau_r$  (а) и зазора между втулками  $h$  мм (б) при прокатке ленты шириной 60 мм из порошка электролитического титана. 1 – симметричная прокатка; 2 – асимметричная прокатка.

Как видно из представленных графиков (рис. 2,3) усилие прокатки как железного порошка, так и порошка электролитического титана, при асимметричной прокатке значительно меньше, чем при симметричной, и при более высокой плотности проката.

Установлено устойчивое постоянство уменьшения усилия (почти в 2 раза) при асимметричной прокатке как порошка железа, так и порошка титана, при изменении зазора между валками и плотности проката. Ещё одной особенностью асимметричной прокатки является сильный нагрев ленты, что связано со значительной сдвиговой деформацией частиц под давлением. На основании проведенных исследований установлено основное различие между симметричной и асимметричной прокаткой порошковых материалов (рис. 4).

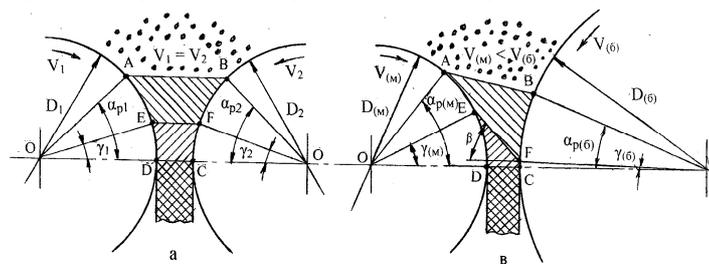


Рис.4. Очаг деформации при симметричной (а) и асимметричной(в) прокатке порошковых материалов

$D_1 = D_2$ ;  $D_{(б)} > D_{(m)}$ ;  $\alpha_{p1} = \alpha_{p2}$ ;  $\gamma_1 = \gamma_2$ ;  $\alpha_{p(б)} < \alpha_{p(m)}$ ;  $\gamma_{(б)} < \gamma_{(m)}$ ; ABFE – зона отставания; EFCD – зона опережения.

Благодаря существенным изменениям угловых параметров происходит поворот нейтрального сечения EF между зонами отставания и опережения на угол  $\beta$  к сечению ODCO. При таком повороте значительно активизируется сдвиговая деформация частиц порошка под давлением валков и уменьшаются растягивающие напряжения. Чем больше угол  $\beta$ , тем более активны сдвиговые деформационные процессы в очаге деформации. Направленные в противоположные стороны силы трения по дугам контакта ED и BF создают переднее и заднее натяжение и, кроме того, блокируя друг друга, уменьшают общее давление на валки. Благодаря этому асимметричная прокатка позволяет устранить многие недостатки, присущие традиционной прокатке.

**Выводы.** В результате проведенных исследований установлено, что асимметричная прокатка металлических порошков с рассогласованием окружных скоростей при разных диаметрах валков по сравнению с традиционной симметричной прокаткой позволяет избежать значительного количества брака при прокатке, повысить производительность прокатки, качество и точность проката. За счёт снижения усилия прокатки (почти в 2 раза) представляется возможным повысить плоскостность и точность проката по ширине. Исследование силовых и угловых параметров асимметричной прокатки показало, что оптимальное рассогласование скоростных параметров рабочих валков находится в пределах 20-40% в зависимости от прокатываемого порошкового материала.

1. Каташинский В. П. Неравномерность деформации и распределение напряжений по ширине порошкового проката / В. П. Каташинский, Г. А. Виноградов, Г. Я. Калущий / Порошковая металлургия. – 1975. – №12. – С. 28–32.
2. Синецын В. Г. Несимметричная прокатка листов и лент / В. Г. Синецын / М.: Металлургия – 1984. – 167 с.
3. Николаев В. Г. Теория и технология несимметричной прокатки / В. А. Николаев, В. Л. Мазур, А. К. Голубченко, Е. В. Бинкевич / М.: Информат. – 1996. – 262 с.

4. Masaki S., Hirohata T., Zhu Q. B. Compacting metal powder differential speed rolling. *Adv. Technol Plasticity* 1 (1993) – P. 182–187.
5. Masaki S., Hirohata T., Haga T. Characteristics of electrolytic copper powder compaction by differential speed rolling. *ISME Int. J.C* 40(3) (1997). – P. 518–524.
6. Hirohata T., Masaki S., Shima S. Experiment on metal powder compaction by differential speed rolling. *JMPT* – V. 111, issues 1-3, 2001. – P. 113–117.
7. Патент України на винахід №77719. Спосіб одержання листів, смуг и стрічок з металевих порошків і гранул. – Г. Я. Калуцький, К. О. Гогаєв, В. С. Воропаєв. – 2007.
8. Калуцкий Г. Я. Опыт прокатки металлических порошков и гранул с использованием асимметричных схем деформирования / Г. Я. Калуцкий, К. А. Гогаев, В. С. Воропаев, В. В. Непомнящий / Порошковая металлургия. – 2007. – №2/4. – С. 508–512.
9. Калуцкий Г. Я. Перспективы развития прокатки металлических порошков и гранул / Г. Я. Калуцкий, К. А. Гогаев, В. С. Воропаев/ Тематич. научн. тр. – Краматорск: ДГМА. – 2007. – С. 508–512.

Стаття прийнята до друку 26.03.2015.