

УДК 621.762.4(03)

Гогаев К. А.
Калуцкий Г. Я.
Воропаев В. С.
Колпаков А. С.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ЗА СЧЁТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СКОРОСТНОЙ АСИММЕРИИ РАБОЧИХ ВАЛКОВ

Прокатка порошковых материалов открывает широкие возможности создания и производства длинномерных изделий в виде листов и лент, многослойных материалов, высоколегированных и высокопрочных сплавов, а также уникальных материалов со специальными свойствами, которые невозможно получить иными способами.

Как правило, порошковые материалы прокатывают в симметричном очаге деформации. Суть симметричной прокатки состоит в том, что порошок гравитационно или принудительно 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.

Прокатка порошковых материалов во второй половине XX столетия широко использовалась при производстве пористого листового проката, используемого в различных отраслях промышленности, биметаллического проката, производства абразивного инструмента и т. п. Однако прокатка порошков не нашла более широкого применения из-за технологических трудностей, нестабильности свойств проката и большого количества брака при производстве высокоплотного проката. Как было установлено исследователями [1], при прокатке 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 только начала изучаться. Нам известны лишь несколько публикаций японских исследователей [4–6], в которых 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. Эксперименты проводились на лабораторном прокатном стане с диаметрами рабочих валков 50 мм на медном порошке. 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 таком же давлении 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 также избежать значительного количества брака: трещины по ширине ленты и отклонения ленты от прямолинейных размеров (серповидность) [7–9]. Кроме того, в работе [9] с помощью точечных месдоз были замерены нормальные контактные напряжения в очаге деформации и угловые параметры. Расшифровка осциллограмм показала, что во всех случаях, независимо от прокатываемого порошкового материала максимальные нормальные контактные напряжения 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 валки разного диаметра, что позволило, установив их на имеющийся прокатный стан, получить рассогласование окружных скоростей валков от 10 % до 42 % при одинаковой угловой скорости валков. Диаметры валков 139 мм, 150 мм, 168 мм и 198 мм. Все валки были оснащены точечными месдозами, что позволило при всех соотношениях скоростей валков 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.

Таблица 1

Зависимость максимальных нормальных контактных напряжений от отношения диаметров валков и относительной плотности лент при прокатке железного порошка и порошка электролитического титана

τ	$D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1$	$D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1,12$		$D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1,20$		$D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1,32$		$D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1,42$	
	σ_{max} , МПа	$\sigma_{max(\bar{o})}$, МПа	$\sigma_{max(m)}$, МПа	$\sigma_{max(\bar{o})}$, МПа	$\sigma_{max(m)}$, МПа	$\sigma_{max(\bar{o})}$, МПа	$\sigma_{max(m)}$, МПа	$\sigma_{max(\bar{o})}$, МПа	$\sigma_{max(m)}$, МПа
Железный порошок									
0,55	–	25	95	25	100	25	87	25	50
0,60	135	60	130	35	120	45	120	65	75
0,70	230	145	217	95	210	125	200	57	143
0,80	370	270	345	225	330	255	315	114	240
0,90	650	520	545	525	585	475	565	315	435

τ	$D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1$	$D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1,12$		$D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1,20$		$D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1,32$	
	σ_{max} , МПа	$\sigma_{max(\bar{o})}$, МПа	$\sigma_{max(m)}$, МПа	$\sigma_{max(\bar{o})}$, МПа	$\sigma_{max(m)}$, МПа	$\sigma_{max(\bar{o})}$, МПа	$\sigma_{max(m)}$, МПа
Электролитический титан							
0,75	300	245	290	200	225	150	170
0,80	410	330	415	270	330	225	270
0,85	580	465	590	380	490	335	490
0,90	1150	800	1050	580	770	560	770

Теоретически предсказать поведение порошкового материала при прокатке с различными соотношениями скоростных параметров практически невозможно. Поэтому экспериментальное исследование энергосиловых, кинематических параметров прокатки и свойств проката должно быть первоочередным. Аналитические и механико-математические расчеты должны опираться на экспериментальные исследования. Измерение нормальных контактного 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 $D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1$ (табл. 1). Основным критерием оценки была относительная плотность получаемого проката τ .

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 углов прокатки α_p и нейтральных углов γ от отношения $D_{(\bar{o})}/D_{(m)}$ при различной относительной плотности проката τ . На рис. 1, 2 показаны такие зависимости при прокатке железного порошка и алюминиевых гранул. Как видно из графиков во всех случаях, начиная с рассогласования окружных скоростей валков на 20 % (отношения диаметра большего валка к диаметру меньшего валка $D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1,20$) и более, происходит устойчивое изменение угловых параметров. Угол прокатки α_p и нейтральный угол γ на большем валке уменьшаются при всех плотностях прокатываемого материала (или давления), а на валке меньшего диаметра они увеличиваются.

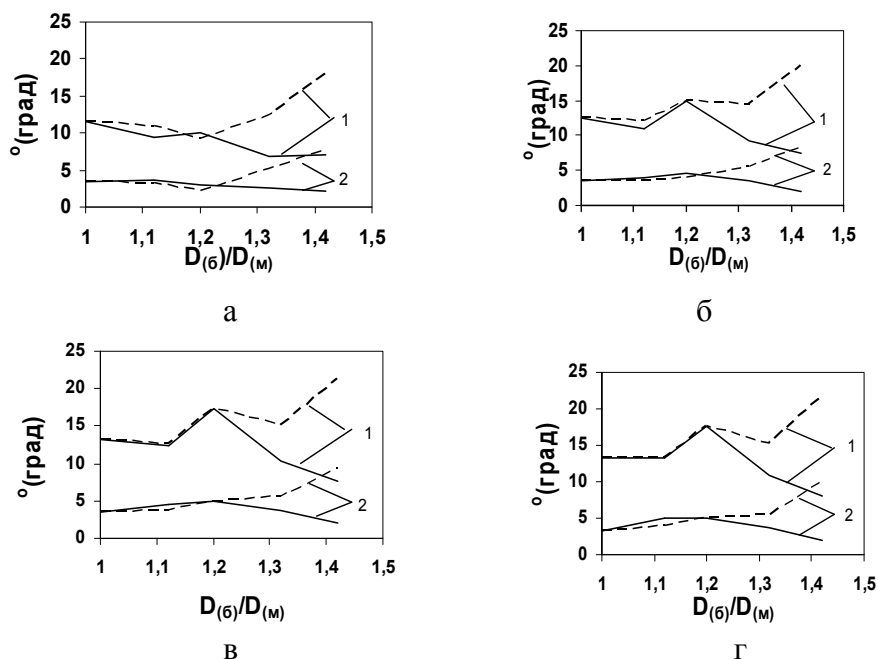


Рис. 1. Зависимость угла прокатки α_p и нейтрального угла γ от изменения соотношения $D_{(б)}/D_{(м)}$ и плотности проката τ :
 а – 0,60; б – 0,70; в – 0,80; г – 0,90; 1 – α_p ; 2 – γ ;
 ————— – больший валок;
 ———— – меньший валок

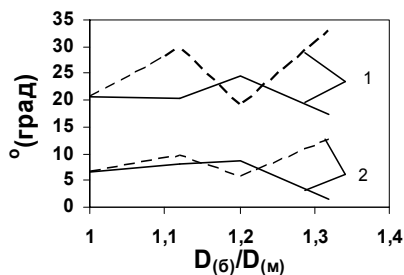


Рис. 2. Зависимость угла прокатки α_p и нейтрального угла γ от изменения соотношения $D_{(б)}/D_{(м)}$ при прокатке алюминиевых гранул 1–2 мм (относительная плотность проката $\tau = 0,98$; толщина ленты – 1,5 мм):
 1 – α_p ; 2 – γ ;
 ————— – больший валок;
 ———— – меньший валок

Исследовалось опережение при асимметричной прокатке порошков железа и алюминиевых гранул. Опережение при симметричной прокатке порошковых материалов исследовано крайне мало. Анализ информации, касающейся опережения при прокатке порошков, показал, что его величина при прокатке пористых лент относительной плотности 0,9 и менее – очень мала – не более 1 %. Это значительно меньше, чем при прокатке компактного материала, а значит, основным механизмом формирования пористого проката является структурная деформация, а также пластическая деформация частиц, посредством которой, в основном, заполняются поры.

При асимметричной прокатке опережение имеет свои особенности и значительно влияет на процесс прокатки. Опережение определяли с использованием общепринятой методики – нанесения кернов на валки с последующим измерением расстояния между ними на прокатанных лентах. При асимметричной прокатке не зарегистрировано ни одного случая опережения со стороны валка большего диаметра. В то же время при прокатке с соотношением

$D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1,42$ временами наблюдалось отрицательное опережение на валке большего диаметра, доходившее иногда до 9 %. На рис. 3 представлены графики опережения при прокатке лент относительно валка меньшего диаметра.

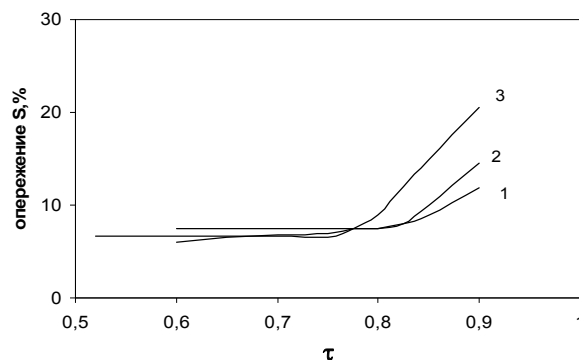


Рис. 3. Зависимость опережения S на валке меньшего диаметра от относительной плотности проката τ при прокатке железного порошка:

$$1 - D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1,20; 2 - D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1,32; 3 - D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1,42$$

Как видно из рис. 3 опережение при прокатке железного порошка начинается с относительной плотности проката 0,75–0,82 в зависимости от рассогласования скоростей. Большое влияние на опережение оказывает изменение $D_{(\bar{o})}/D_{(m)}$. Опережение значительно увеличивается с увеличением $D_{(\bar{o})}/D_{(m)}$.

При горячей прокатке алюминиевых гранул (гранулы перед прокаткой нагревались до 500 °С) установлено значительное влияние рассогласования окружных скоростей рабочих валков на опережение. Так, например, опережение проката при изменении отношения рабочих валков от 1,00 до 1,32 составляло соответственно 8 % при $D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1,00$ и 30 % при $D_{(\bar{o})}/D_{(m)} = 1,32$. Изменение усилия прокатки в пределах 450–1000 МПа не оказывало влияние на опережение.

Большое влияние на качество тонколистового проката оказывает усилие прокатки. Чем больше усилие, оказываемое на рабочие валки, тем больше неравномерный зазор между валками из-за упругой деформации и изгиба валка. При прокатке порошков это имеет большое значение, так как угол прокатки порошкового материала значительно превышает угол захвата при тонколистовой прокатке компактного металла и выше усилие прокатки.

Для того чтобы ответить на вопрос как изменяется усилие прокатки порошкового материала при асимметричной прокатке возможно лишь в сравнимых условиях. Для этой цели были изготовлены прокатные валки, на которых без перевалки 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.

Проточка поверхностей, на которых прокатывался порошок, производилась таким образом, чтобы при изменении зазора между валками устанавливались одинаковые зазоры в местах прокатки порошкового материала.

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

Как видно из представленных графиков (рис. 4, 5) 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. 6).

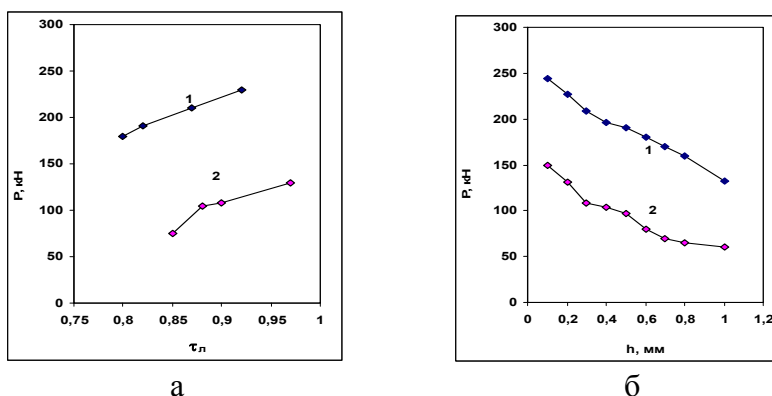


Рис. 4. Зависимость усилия прокатки P от относительной плотности проката τ_l (а) и зазора между валами h (б) при прокатке ленты шириной 60 мм из железного порошка: 1 – симметричная прокатка; 2 – асимметричная прокатка

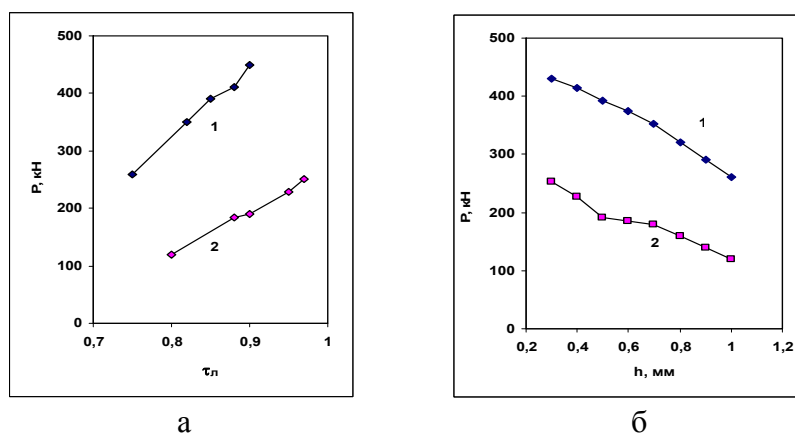


Рис. 5. Зависимость усилия прокатки P от плотности проката τ_l (а) и зазора между валами h мм (б) при прокатке ленты шириной 60 мм из порошка электролитического титана: 1 – симметричная прокатка; 2 – асимметричная прокатка

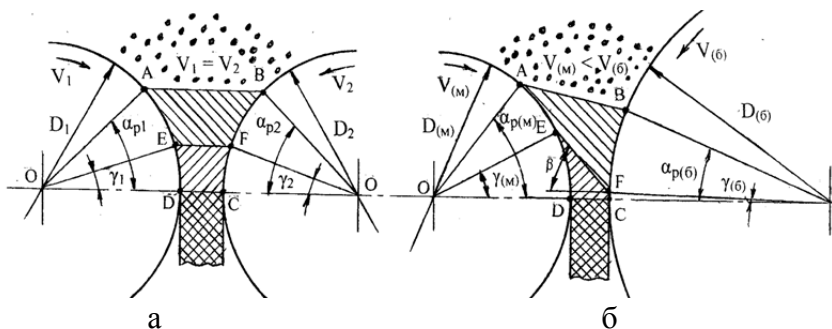


Рис. 6. Очаг деформации при симметричной (а) и асимметричной (б) прокатке порошковых материалов:

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

Благодаря существенным изменениям угловых параметров происходит поворот нейтрального сечения EF между зонами отставания и опережения на угол β к сечению $ODCO$. При таком повороте значительно активизируется сдвиговая деформация частиц порошка под давлением валков и уменьшаются растягивающие напряжения. Чем больше угол β , 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, улучшить 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каташинский В. П. *Неравномерность деформации и распределение напряжений по ширине порошкового проката* / В. П. Каташинский, Г. А. Виноградов, Г. Я. Калуцкий // *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. *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. *Compacting metal powder differential speed rolling* / S. Masaki, T. Hirohata, Q. B. Zhu. – *Adv. Technol Plasticity.* – 1(1993). – P. 182–187.
5. Masaki S. *Characteristics of electrolytic copper powder compaction by differential speed rolling* / S. Masaki, T. Hirohata, T. Haga // *ISME Int. J.C.* – 1997. – 40(3). – P. 518–524.
6. Hirohata T. *Experiment on metal powder compaction by differential speed rolling* / T. Hirohata, S. Masaki, S. Shima // *JMPT v.111.* – 2001. – Issues 1–3. – P. 113–117.
7. Пат. України на винахід № 77719. *Спосіб одержання листів, смуг и стрічок з металевих порошків і гранул* / Калуцкий Г. Я., Гогаев К. О., Воропаев В. С. ; заявник і патентовласник Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України. – № 20040604858; заявл. 21.06.2004; опубл. 15.01.2007, Бюл. 1.
8. *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. – № 3/4. – С. 115–125.
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.
10. Гогаев К. А. *Уплотняемость металлических порошков при асимметричной прокатке. Асимметричная прокатка металлических порошков I.* / К. А. Гогаев, Г. Я. Калуцкий, В. С. Воропаев // *Порошковая металлургия.* – 2009. – № 3/4. – С. 36–42.
11. Гогаев К. А. *Угловые параметры асимметричной прокатки. Асимметричная прокатка металлических порошков II.* / К. А. Гогаев, Г. Я. Калуцкий, В. С. Воропаев // *Порошковая металлургия.* – 2009. – № 5/6. – С. 35–40.
12. Гогаев К. А. *Опережение при асимметричной прокатке металлических порошков. Асимметричная прокатка металлических порошков III.* / К. А. Гогаев, Г. Я. Калуцкий, В. С. Воропаев // *Порошковая металлургия.* – 2009. – № 7/8. – С. 18–22.
13. Гогаев К. А. *Особенности и технологические параметры асимметричной прокатки металлических порошков* / К. А. Гогаев, Г. Я. Калуцкий, В. С. Воропаев // *Вісник НТУ України «КПІ».* – 2010. – № 60. – С. 89–93. – (Серія «Машинобудування»).

Гогаев К. А. – чл.-кор. НАН Украины, зав. отделом ИПМ НАН Украины;
Калуцкий Г. Я. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ИПМ НАН Украины;
Воропаев В. С. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ИПМ НАН Украины;
Колпаков А. С. – аспирант ИПМ НАН Украины.

ИПМ НАН Украины – Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, г. Киев.

НАН Украины – Национальная академия наук Украины, г. Киев.

E-mail: gogaev@ipms.kiev.ua; voropaev@ipms.kiev.ua

Статья поступила в редакцию 18.10.2012 г.