

СМИРНОВ Е.Н., МИТЬЕВ А.П. (ДонНТУ), ГРИГОРЬЕВ М.В. (ЗАО «ВИЗАВИ»),
ЗУБ В.В. (ММЗ «ИСТИЛ-ДМЗ»), ГАМИДОВ В.А. (ДонНТУ)

РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ОСЕВОЙ УСАДОЧНОЙ РАКОВИНЫ И ПОРИСТОСТИ В НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ БЛЮМАХ

Разработан новый метод моделирования процесса прокатки непрерывнолитых слитков (блюмов и заготовок), позволяющий учитывать особенности их строения при исследовании динамики уплотнения осевой зоны последних во время деформации. С использованием предложенного метода в лабораторных условиях изучены особенности динамики изменения удельного сопротивления ρ модельных образцов в зависимости от величины суммарной вытяжки μ_{Σ} и величины усадочной раковины. Анализ результатов лабораторной апробации предложенного метода моделирования позволяет говорить о правомерности его использования для исследования процессов деформирования непрерывнолитых блюмов и заготовок.

Программой развития прокатного производства Украины до 2010 года предусмотрено производство свыше 80% сортового и листового проката с использованием непрерывнолитой заготовки. Реализация поставленной задачи в столь короткие сроки требует решения такой важной проблемы, как трансформация технологических схем производства прокатной продукции на использование непрерывнолитой заготовки взамен горячекатаной. Особенно актуально решение этой проблемы для случая прокатки крупных сортовых профилей ответственного назначения, в том числе и из непрерывнолитых блюмов большого сечения, в связи с таким дефектом макроструктуры готового проката, как неплотность средних слоев и наличие в них трещин [1, 2].

По аналогии с производством крупносортовых профилей из слитков [3], при производстве данного вида продукции из непрерывнолитых слитков (блюм или заготовка) также оправданным является существование двух точек зрения по вопросу об образовании внутренних дефектов. Согласно одной из них, внутренние дефекты крупных профилей являются следствием неудовлетворительного качества непрерывнолитых слитков, в которых еще до прокатки при кристаллизации и охлаждении после разливки образовались трещины или другие дефекты, переходящие в процессе прокатки в готовый профиль. По другой внутренние дефекты, обнаруживаемые в макроструктуре крупных профилей, образуются в процессе прокатки в связи с неблагоприятными условиями деформации крупных сечений. Внутренние дефекты могут при этом образовываться и из вполне качественных непрерывнолитых слитков.

Подтверждением данного вывода может служить тот факт, что проводимые в последние годы в данной области научно-исследовательские работы сконцентрировали свое внимание на двух направлениях:

- повышение качества непрерывнолитого слитка;
- исследование влияния различных факторов процесса прокатки на качество готового проката.

В большинстве исследований, связанных с первым направлением, основное внимание уделяется более полному учету условий непрерывной разливки и охлаждения как до, так и после затвердевания [4–8]. При этом считается, что механизм кристаллизации таких блюмов хорошо изучен [9,10]. Согласно полученным результатам, затвердеванием по оси непрерывнолитых заготовок управляет процесс периодического образования пустот, рыхлости и перемычек (мостов) по принципу мини-слиток. Причем

вынужденные отклонения от стационарности непрерывной разливки оказывают решающее влияние на образование усадочной раковины.

Развитие второго направления предопределило то обстоятельство, что используемые на заготовочных и сортовых станах схемы прокатки и конструкции калибров учитывают только оптимальные варианты формоизменения, способствующие получению необходимого поперечного сечения раската. Как правило, они разработаны для получения сортового проката из предварительно обжатой заготовки и включают два или три передела по схеме «слиток — обжимной — заготовочный и сортовой станы». Сортовой прокат из непрерывнолитого слитка изготавливают, как правило, за один передел и реже за два. По этой причине выбор условий прокатки приобретает решающее значение для обеспечения минимальных затрат и требуемого качества готового проката [11].

Ввиду сложности математического описания процессов обработки металлов давлением теоретический анализ напряженно-деформированного состояния часто встречает значительные трудности, особенно при больших деформациях и сложных схемах нагружения [12]. Поэтому во многих случаях экспериментальные исследования являются более предпочтительными, а иногда и единственно возможными [13].

В связи с этим актуальными задачами являются:

— разработка экспериментального метода моделирования и исследования процесса прокатки непрерывнолитого слитка на основе зависимости материала типа проводимости от пористости материала от величины суммарной степени деформации;

— экспериментальное определение оптимальных сечений литой заготовки, которая обеспечивает получение конкурентоспособного проката в соответствии с международными стандартами.

При разработке нового метода физического моделирования в качестве базовой была принята гипотеза, сущность которой заключается в следующем: зависимость величины осевой пористости и подсадочной ликвации от суммарной степени деформации в непрерывнолитых слитках носит экспоненциальный характер, то есть существует критическая величина суммарной степени деформации после достижения которой, изменения осевой пористости и подсадочной ликвации практически не наблюдается.

Исследованию пористости металлов, а также оценке ее влияния на служебные свойства последних посвящено большое количество работ. Для разрабатываемого метода наибольший интерес представляют данные о влиянии пористости материала на свойства типа проводимости [14]. Как показал анализ имеющихся литературных данных, зависимость удельного сопротивления материала ρ от его пористости во многих случаях также носит экспоненциальный характер с выраженным пределом насыщения. Кроме того, с точки зрения задач, которые призван решить разрабатываемый метод моделирования, принципиальным моментом является тот факт, что вышеописанный характер зависимости имеет и свинец, широко используемый в качестве материала для моделирования процессов обработки металла давлением. Поэтому, правомочным становится его выбор в качестве моделирующего материала для разрабатываемого метода физического моделирования, а именно: создавая в литом модельном образце различную величину усадочной раковины и, измеряя динамику изменения удельного сопротивления ρ раската во время прокатки в каждом пропуске, можно судить о степени уплотнения литой структуры последнего.

Исследования, по оценке эффективности предлагаемого метода физического моделирования для изучения процесса уплотнения литой структуры металла во время прокатки, выполнили в лаборатории кафедры «Обработка металлов давлением» Донецкого национального технического университета. В этой цели лабораторный стан 100 был оснащен месдозами для снятия силовых параметров процесса прокатки, датчиками

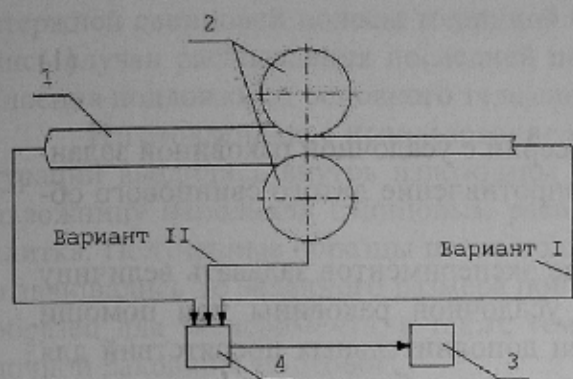


Рис. 1. Принципиальная схема измерения сопротивления R модельных образцов: 1 — прокатная полоса; 2 — валки; 3 — осциллограф; 4 — мост постоянного тока

величина сигнала поступающего на осциллограф мала. Отклонение шлейфа, при максимальной обжатии, не превышало 3–4 мм на длине участка записи равного длине образца.

С целью получения стабильной величины сигнала на входе осциллографа, был предложен II вариант схемы, предусматривающий измерение сопротивления между началом полосы и валком, т.е. частью полосы находящейся в очаге деформации. Обработка результатов калибрующей прокатки модельных образцов по данному варианту схемы показала, что уровень сигнала возрос как минимум в 2–3 раза. Наклон кривой приобрел четко выраженный характер. Внешний вид типовой осциллограммы представлен на рис. 2.

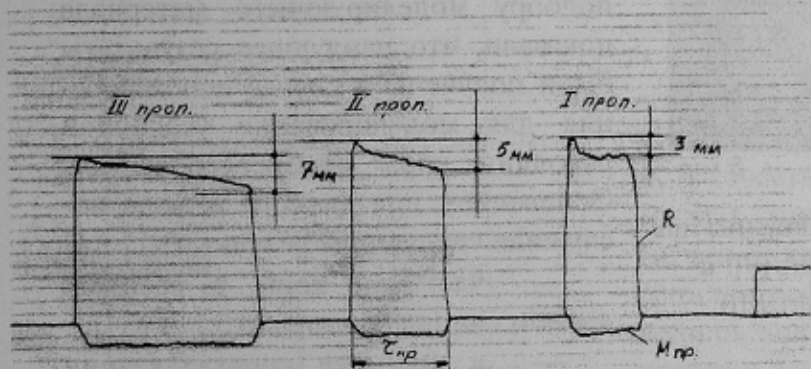


Рис. 2. Осциллограмма изменения сопротивления R свинцовых образцов по проходам: $h_0=45,4$ мм; $b_0=36,8$ мм; $L_0=163,0$ мм; $\rho_0=0,844$ Ом×мм; материал — свинец

требуемого размера. Проведенное исследование структуры литых модельных свинцовых образцов одной серии при помощи продольных и поперечных темплетов показало наличие в последних трех зонах кристаллизации и незначительной осевой пористости. Такая же структура характерна и для непрерывнолитого слитка [15].

На основании вышесказанного было предложено осуществлять оценку величины пористости и усадочной раковины исходя из следующего критерия:

контроля крутящего момента, а также комплексом аппаратуры для измерения электрического сопротивления образца при прокатке: мостом постоянного тока Мо-62 и осциллографом Н145. Принципиальная схема измерения приведена на рис. 1. В ходе первоначального исследования, опробовали два варианта схемы измерения. В случае реализации варианта I, измерение электрического сопротивления производили между началом и концом образца. Данная схема в наибольшей степени отвечает принципам физического подобия. Однако, как показала обработка результатов калибрующей прокатки модельных образцов, величина сигнала поступающего на осциллограф мала. Отклонение шлейфа, при максимальной обжатии, не превышало 3–4 мм на длине участка записи равного длине образца.

Согласно данным работы [14], существенное влияние на величину электрического сопротивления оказывает чистота исходного материала и структура литого слитка. С целью минимизации влияния данного фактора на точность проведения эксперимента и достижения наибольшей степени физического подобия, все модельные образцы в пределах серии изготавливали из одной партии свинцового расплава путем отливки в изложницы

$$K_p = \frac{\rho_{обр}}{\rho_{эт.обр}}, \quad (1)$$

где $\rho_{обр}$ — удельное сопротивление i — го образца серии с усадочной раковинной заданной формы и размера, Ом · м; $\rho_{эт.обр}$ — удельное сопротивление литого свинцового образца в серии, Ом · м.

Введение данного критерия позволило в ходе экспериментов задавать величину исходной пористости образцов и моделируемой усадочной раковины при помощи цифр. При этом введение в моделирующий образец дополнительных препятствий для движения электрического тока в виде усадочной раковины, будет приводить к росту удельного сопротивления ρ , т.е. величина критерия K_p всегда больше 1.

При выборе материала для моделирования усадочной раковины исходили из того, что он должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- создавать препятствия для движения электрических зарядов;
- физически моделировать вид усадочной раковины, как по форме, так и по размерам.

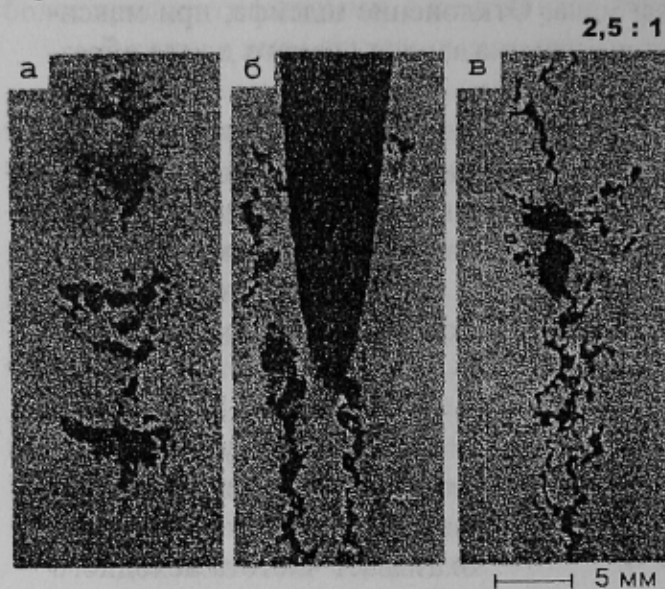


Рис. 3. Формы усадочной раковины на продольных шлифах различных сталей [9]: а — 38 Мн 6; б — S 30/Z; в — сталь 10 CrMo 9 10

оторвавшиеся частички остаются внутри слитка, а не всплывают на его поверхность, создавая тем самым дополнительные препятствия для движения электрических зарядов;

- задаваясь величиной и схемой расположения частичек, можно создавать различные конструкции усадочной раковины (рис. 3).

Наиболее сложной проблемой при изготовлении образцов стал механизм создания необходимой осевой усадочной раковины по центру литого слитка. С этой целью было опробовано 3 типа сердечника, которые предварительно размещали внутри изложницы перед заполнением последней расплавом свинца:

- свинцовая подложка с наклеенными кусочками пробки;
- стержень с пробковым материалом;
- стержень с пробковым материалом специальной конфигурации.

Как показали проведенные исследования, наилучшие результаты были получены при использовании в качестве подложки или в качестве материала для изготовления

Механизм кристаллизации непрерывнолитых блюмов и длинных заготовок считается хорошо изученным [4–8]. Поэтому, на первом этапе работ в качестве прототипа для моделирования формы усадочной раковины были приняты только те ее конструкции (рис. 3), описание которых было сделано в работе [9].

Проведенные эксперименты по подбору моделирующего материала показали, что наилучшие результаты были получены в случае использования для моделирования усадочной раковины коры пробкового дерева. Основанием для данного вывода послужили следующие результаты:

- частички коры в расплавленном свинце не сгорают;
- в процессе кристаллизации

стержней свинцовой полосы толщиной 0,7–0,8 мм. При меньшей ее толщине наблюдались случаи расплавления последней после заливки, а при большей — отдельные отслоения подложки от основного тела слитка.

Изготовленные с использованием свинцовой полосы стержни различной конфигурации вводились внутрь изложницы и закреплялись строго по центру. После этого изложницу наполняли свинцовым расплавом и производили процесс кристаллизации слитка. Полученные образцы после полной кристаллизации извлекались из изложницы и зачищались до заданного размера поперечного сечения. Из каждого слитка вырезался образец для эксперимента, а также темплеты для контроля осевой пористости и усадочной раковины заготовок.

Для проведения эксперимента было изготовлено четыре серии образцов сечением 37×45 мм. Величина критерия K_p , характеризующего усадочную раковину, в каждой серии была постоянной и изменялась от 1 (прокатка литых свинцовых образцов без усадочной раковины) до 12 (образцы со стержнем специальной конструкции). Для прокатки опытных образцов использовался комплект валков, позволяющий получать заготовку квадратного сечения по системе ромб – квадрат с кантовкой после каждого прохода на 90° . Перед прокаткой каждого образца проводились следующие контрольные измерения:

- ширина образца B , мм;
- высота образца H , мм;
- длина образца L , мм;
- электрическое сопротивление R , Ом.

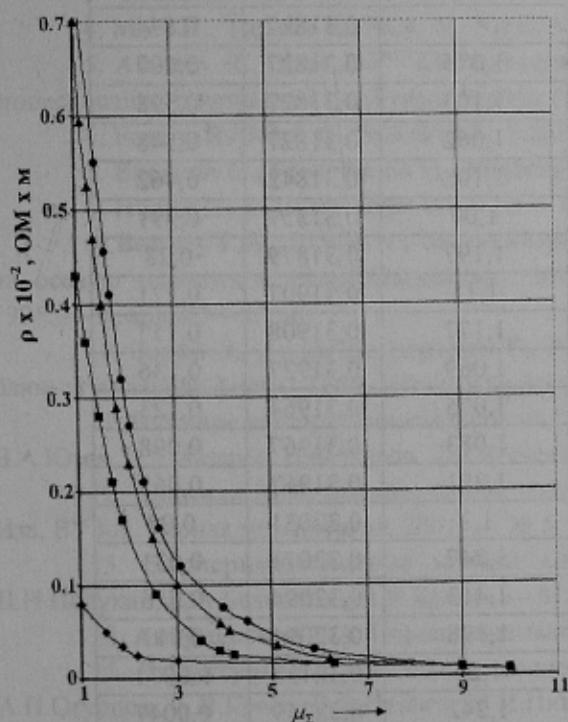


Рис. 4. График зависимости удельного сопротивления свинцовых образцов ρ от суммарной вытяжки μ_Σ при разных величинах усадочной раковины: 1 — $K_p=1,0$; 2 — $K_p=5,0$; 3 — $K_p=10,0$; 4 — $K_p=12,0$

После осуществления контрольных замеров, образцы задавались в валки обезжиренные ацетоном и прокатывались вместе с медными проводниками, подключение которых осуществлялось в соответствии со схемами 1 и 2 (рис. 1).

Во время прокатки образцов в каждом пропуске производилась запись динамики изменения величины их сопротивления R . В качестве измерительного моста использовался стандартный мост постоянного тока, сигнал от которого подавался на шлейфовый осциллограф Н145. После пропуска производили повторный контрольный обмер образцов и данные заносили в таблицу.

Обработка полученных экспериментальных данных позволила расчетным путем определить следующие величины:

- вытяжка, μ ;
- площадь сечения образца после каждого прохода S , мм^2 ;
- удельное сопротивление образца ρ , Ом·м.

Величину удельного сопротивления образца, а также раскатов после каждого прохода определяли из выражения:

$$R = \rho \cdot S / L_{рас}, \quad (2)$$

где R — электрическое сопротивление образца, Ом; ρ — удельное сопротивление свинца, Ом·м; S — площадь поперечного сечения раската, мм²; $L_{рас}$ — длина раската после пропуска, мм.

Результаты прокатки модельных образцов с различной величиной осевой усадочной раковины сводились в итоговые таблицы. В таблице представлены результаты прокатки модельных образцов с усадочной раковинной, характеризуемой величиной критерия $K_p=10,24$. На основании данных таблиц были построены зависимости удельного сопротивления свинцовых образцов ρ от суммарной вытяжки μ_Σ для различной величины осевой усадочной раковины заготовок K_p (рис. 4).

Анализ полученных графических зависимостей показывает, что с ростом осевой усадочной раковины величина удельного сопротивления ρ свинцовых образцов возрастает. При этом полученные кривые имеют экспоненциальный вид. В качестве предела приближения экспоненты служит прямая, равная минимальному значению удельного сопротивления для используемого материала. Применительно к условиям рассматриваемого примера эта величина равна удельному сопротивлению чистого свинца: $\rho_{Pb}=2,08 \cdot 10^{-7}$ Ом·м.

Таблица. Динамика изменения удельного сопротивления ρ при прокатке свинцового образца ($K_p=10,24$)

№ мм	Размеры образца, мм			Площадь, мм ²	Вытяжка μ_i	R, Ом	ρ , Ом·м
	H	B	L				
0	45,4	36,8	63	1670,7		0,31827	0,844
1	42	37	70	1554	1,075	0,31827	0,707
2	38,8	36,3	75	1408,4	1,103	0,31827	0,598
3	37,9	35	77	1326,5	1,062	0,31827	0,548
4	35,4	34	83	1203,6	1,102	0,31842	0,462
5	34,5	32	90	1104	1,09	0,31857	0,391
6	31,8	29	105	922,2	1,197	0,31879	0,28
7	31	26,87	120	830,8	1,11	0,31907	0,221
8	28	25,2	144	705,6	1,177	0,31908	0,157
9	27,5	24	155	660	1,069	0,31927	0,136
10	26,7	23	160	614,1	1,075	0,31964	0,123
11	26	21,8	185	566,8	1,083	0,31967	0,098
12	21	20,9	230	438,9	1,291	0,31967	0,061
13	21	19	255	399	1,1	0,32031	0,05
14	18,5	17,3	335	320,1	1,247	0,32071	0,031
15	15,3	14,8	455	226,4	1,413	0,32094	0,016
16	14	13,5	557	189	1,198	0,32094	0,011
17	12,5	12	680	150	1,26	0,32138	0,0071
18	11,5	10,5	830	120,8	1,242	0,32249	0,0047
19	10,8	10,7	925	115,6	1,045	0,32249	0,004

Оценку достоверности полученных результатов дополнительно выполнили с позиции физического подобия процессов уплотнения усадочной раковины и пористости. Так, по данным работы [2] в стальных непрерывнолитых блюмах и заготовке при суммарной вытяжке $\mu_\Sigma > 10$ осевая пористость не изменяется. Аналогичный вывод сделан и в работах [1]. Анализ приведенных на рис. 4 зависимостей позволяет сделать практически такой же вывод. При суммарной вытяжке $\mu_\Sigma > 10$ удельное сопротивление модель-

ных образцов становится практически одинаковым, а дальнейшее увеличение вытяжки приводит к незначительному изменению удельного сопротивления. Хорошее совпадение характера зависимости уплотнения осевой пористости в стальных непрерывнолитых слитках и в модельных образцах позволяет говорить с одной стороны о корректности предложенного метода физического моделирования, а с другой стороны — о возможности его использования для исследования процессов производства проката из непрерывнолитого металла в лабораторных условиях.

Таким образом, разработан новый метод физического моделирования процесса прокатки непрерывнолитых слитков (блюмов и заготовок), позволяющий учитывать особенности их строения при исследовании динамики уплотнения осевой зоны последних во время деформации. С использованием предложенного метода в лабораторных условиях изучены особенности динамики изменения удельного сопротивления ρ модельных образцов в зависимости от величины суммарной вытяжки μ_{Σ} и величины усадочной раковины. Анализ результатов лабораторной апробации предложенного метода моделирования позволяет говорить о правомерности его использования для исследования процессов деформирования непрерывнолитых блюмов и заготовок.

Список литературы

1. Кан Ю.Е., Кугушин А.А. Проблемы производства сортового проката из непрерывнолитых заготовок // Труды второго конгресса прокатчиков. — М.: Черметинформация, 1998. — С. 304.
2. Курандо И.Г., Афанасьев С.И., Нестеров С.Д. Технологические аспекты совмещения МНЛЗ с сортовыми прокатными станами // Сталь, 1996. — № 7. — С. 31–33.
3. Чижигов Ю.М. Прокатываемость стали и сплавов. — М.: Metallurgizdat — 451 с.
4. Mori H., Tanaka N., Sata N., Nirai M. Trans ISIJ. 12 (1972) Nr/ 2, S. 102/111.
5. Albery R., Birat J.-P. "Electromagnetic stirring and Product Quality", In: Continuous casting and product quality, International Conference Biarritz (1976), The metals Society, London (1977), S. 116/124.
6. Foster, Rudolph G., Stercken K. Stahl u. Eisen 102 19820 Nr. 25/26, S.1277/1284.
7. Engstrom G., Fredriksson H., Rogberg B. Scand. J. Metallurgy 12 (1983) S. 3/12.
8. Huang L., Schwerdtfeger K.: Stahl u. Eisen 101 (1981) Nr. 3, S 153/157.
9. Виннер Г.А., Якоби Х., Вюнненберг К. Влияние структуры кристаллизации и скорости литья на осевую пористость непрерывнолитых заготовок из различных марок стали // Черные металлы, 1995. — февраль. — С. 56.
10. Зовка Э., Андре Б., Бертрам Р., Рженчик Х. Модернизация установки непрерывного литья блюмов на заводе фирмы Тесен Шталь в Дуйсбурге // Черные металлы, 1995. — октябрь. — С. 33–36.
11. Влияние конструкции калибров на формирование дефектов на поверхности сортового проката / В.А.Юзов, И.Е.Назаров, П.Ф.Жаров, Д.В.Кошелев, Г.Ф.Шилов // Сталь, 1999. — № 12. — С. 35–37.
12. Бровман М.Я. О возможности уменьшения пористости при обработке металлов давлением // Изв. ВУЗов. Черная металлургия, 2001. — № 5. — С. 35–37.
13. Экспериментальные методы механики деформируемых твердых тел / В.К.Ворнцов, П.И.Полухин, В.А.Белевитин, В.В.Бринза — М.: Металлургия, 1990. — 480 с.
14. Андриевский Р.А. Порошковое материаловедение — М.: Металлургия, 1991. — 205 с.
15. Структурная и химическая неоднородность блюмовых заготовок, отлитых на МНЛЗ ДМК / А.П.Огурцов, А.В.Гресс, В.В.Несвет, М.И.Пикус, Л.Л.Ермилина // Процессы литья, 2001. — № 2. — С. 19–28.

© Смирнов Е.Н., Митьев А.П., Григорьев М.В., Зуб В.В., Гамидов В.А., 2002