

## ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЯ ИЗ СПЛАВА WC + 20%Co

Ю.Н. Тюрин\*, С.Н. Кульков\*\*, О.В. Колисниченко\*, И.М. Дуда\*

\*Институт Электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины (Киев)  
Украина

\*\*Институт физики и прочности материаловедения СО РАН (Томск)  
Россия

Поступила в редакцию 14.07.2009

Импульсно-плазменная обработка поверхностного слоя изделия из твердого сплава WC+ 20%Co изменяет размер кристаллитов на 10 – 20% и обогащает связующий металл Co сложными карбидами типа  $W_6Co_6C$ ,  $W_3Co_3C$  и неравновесными карбидами составов  $W_2C$ ,  $WC_{1-x}$ ,  $W_6C_{2.54}$ . Образуется внутренние напряжения (сжатия!) до 800 МПа.

Промышленные испытания показали, что после импульсно-плазменной обработки повышается в 2 – 4 раза износостойкость рабочей поверхности прокатных валков, изготовленных из твердого сплава WC + 20%Co.

**Ключевые слова:** импульсно-плазменная обработка, внутренние напряжения, износостойкость, кристаллиты, прокатные валы.

Импульсно-плазмова обробка поверхневого шару виробу із твердого сплаву WC + 20%Co змінює розмір кристалітів на 10 – 20% й збагачує спо-лучний метал Co складними карбідами типу  $W_6Co_6C$ ,  $W_3Co_3C$  й нерівновісними карбідами складів  $W_2C$ ,  $WC_{1-x}$ ,  $W_6C_{2.54}$ . Утворюються внутрішні напруження (стиснення!) до 800 МПа.

Промислові випробування показали, що після ім-пульсно-плазмової обробки підвищується в 2 – 4 рази зносостійкість робочої поверхні прокатних валів (шайб), виготовлених із твердого сплаву WC + 20%Co.

**Ключеві слова:** імпульсно-плазмова обробка, внутрішні напруги, зносостійкість, кристаліти, прокатні вали.

Impulse-plasma processing in a surface tungsten carbide roll WC + 20%Co changes the size crystallite on 10 – 20%, enriches binding metal Co complex carbide type  $W_6Co_6C$ ,  $W_3Co_3C$  and no equilibrium carbide structures  $W_2C$ ,  $WC_{1-x}$ ,  $W_6C_{2.54}$ . Internal pressure (compression are formed!) up to 800 МПа. Industrial tests have shown, that wear resistance of a working surface tungsten carbide roll (WC + 20%Co), after impulse-plasma processing, increase in 2 – 4 times.

**Keywords:** impulse-plasma treatment, internal stresses, durability, crystallites, forming rolls.

### ВВЕДЕНИЕ

В металлургической промышленности используют прокатные валки (шайбы), изготовленные из твердого сплава ВК-20 (WC 80%, Co 20%). Работоспособность калибрующей части прокатной шайбы зависит от изменения размеров и шероховатости рабочей поверхности. Как правило, при увеличении размера калибра на 0,06 мм, после 600 – 700 тонн проката, шайбы заменяются и ремонтируются.

Назовем три процесса, приводящих к износу поверхности прокатных шайб [1]. Это диссоциация карбида и растворение его составляющих в нагретом до 1000° С деформируемом сплаве на основе железа. Микроразру-

шение зерен карбидов. Разупрочнение связующей фазы кобальта и унос частично растворившихся карбидов вольфрама и не растворившихся зерен. Механизм разрушения поверхностного слоя калибров шайб включает также процессы диффузионного растворения карбидов в нагретом до 1000° С, деформируемом сплаве.

Известны десятки методов упрочнения поверхности твердых сплавов [1 – 6]. Наибольший интерес представляет лазерное упрочнение. После лазерного упрочнения микротвердость поверхностного слоя увеличивается до 35000 МПа. Это объясняется образованием карбидов типа  $W_2C$ , который имеет более высокую твердость, чем WC (на 10000

– 14000 МПа). При этом изменяется структура и состав связующего материала в твердом сплаве.

Если плотность энергии при обработке не превышает  $80 \text{ Дж/см}^2$ , то происходит насыщение связки продуктами деструкции монокарбида WC. При плотности энергии  $80 \div 100 \text{ Дж/см}^2$  образуются сложные карбиды  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ , которые разупрочняют сплав, вследствие уменьшения содержания в связке металлического кобальта. При плотности энергии  $140 \div 280 \text{ Дж/см}^2$  в связующем слое появляются сложные карбиды с нарушенной стехиометрией (типа  $\text{Co}_x\text{W}_y\text{C}_z$ ), а также заметно увеличивается количество полукарбидов  $\text{W}_2\text{C}$  и кубического карбида WC.

Для повышения износостойкости твердых сплавов с содержанием кобальта  $3 \div 6\%$  плотность энергии не должна превышать  $80 \text{ Дж/см}^2$ , сплавов с содержанием кобальта  $6 \div 8\%$  –  $100 \text{ Дж/см}^2$ ,  $10\%$  –  $120 \text{ Дж/см}^2$  и  $20\%$  –  $180 \text{ Дж/см}^2$ . При низкоэнергетическом облучении агрегатное состояние сплава практически не изменяется [3 – 6].

## ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

В ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины разработана импульсно-плазменная технология изменения свойств поверхности твердосплавных и стальных изделий. Исследования показывают, что при импульсном высокоэнергетическом воздействии в поверхностном слое изделия наблюдаются высокие скорости нагрева и охлаждения, упруго-пластическая деформация поверхностного слоя и, как следствие, интенсификация практически всех известных механизмов диффузии [7 – 8].

Формирование высокоэнергетических импульсов осуществляется в плазматроне путем реализации в нем нестационарных детонационных режимов горения горючих газовых смесей ( $\text{C}_3\text{H}_8$  и  $\text{O}_2$ ) между двумя коаксиальными электродами.

Энергетические параметры продуктов нестационарного детонационного горения (импульсной плазменной струи) определяли решением двумерной нестационарной задачи распространения детонационной волны (ДВ)

в электрическом поле между двумя коаксиальными электродами плазматрона. В результате был изготовлен импульсный плазматрон (рис. 1), который состоит из детонационной камеры 1, где осуществляется формирование горючей газовой смеси и инициирование детонационного ее сгорания. Плазматрон имеет центральный электрод – анод 2, конический электрод – катод 3, испаряемый электрод – 5. Электроды включены в электрическую цепь к специальному источнику питания – 6.

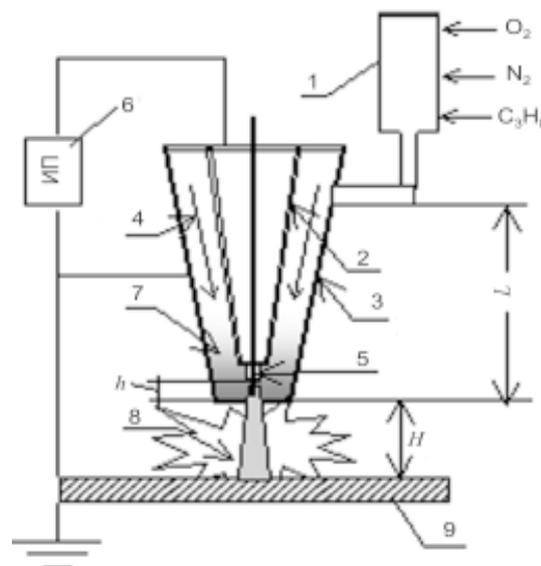


Рис. 1. Схема импульсно-плазменного устройства

При инициировании детонации продукты сгорания поступают из детонационной камеры в межэлектродный зазор – 4 и замыкают электрическую цепь. Стационарное детонационное сгорание горючих газов переходит в нестационарное, которое получает дополнительную энергию через электропроводный слой продуктов сгорания – 7. При выбросе плазменной струи – 8 из плазматрона, она замыкает электрическую цепь между электродом – анодом и поверхностью изделия – катодом – 9.

В результате прохождения по этой струе электрического тока, плазма дополнительно нагревается за счет Джоулева тепловыделения. Расходуемый электрод – 5 обеспечивает ввод в плазменную струю легирующих элементов.

Энергетические характеристики плазменных струй на выходе из плазматрона имеют зависимость от напряженности электрического поля и длины межэлектродного зазора.

В результате экспериментального исследования установлено [7], что при длине межэлектродного зазора  $L = 200$  мм и напряженности электрического поля  $400 \div 500$  кВ/м плазменная струя имеет температуру  $20000$  К, а скорость  $6$  км/с. Плотность электрического тока в плазменной струе составляет  $J = (1 - 7) \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup>, а температура  $25000$  К. Тепловой поток в изделии может изменяться в диапазоне  $(0,1 \div 5) \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Величина потока тепла зависит от прохождения электрического тока по плазменной струе к поверхности образца. Изолированный от “земли” образец не коммутирует электрический ток, и поверхность обрабатывается только энергией плазменной струи [7].

Управление энергетическими характеристиками импульса осуществляется изменением технологических параметров: емкости конденсаторов  $C = 600 - 1200$  мкФ, расстоянием до поверхности изделия  $H$ , а также включением изделия в электрическую цепь как катод или изолировано.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ

Проводилась импульсно-плазменная обработка образцов – WC + 20%Co, изготовленных методами порошковой металлургии по стандартной технологии.

Обработка осуществлялась по 5 режимам, табл. 1.

Таблица 1

Номер режима обработки	Энергия плазменного импульса, Дж	Дистанция от плазматрона до образца, мм	Количество импульсов обработки	Подключение образца
1	3000	30	2	катод
2	3000	45	6	катод
3	3000	50	5	нейтрален
4	3000	50	10	нейтрален
5	3000	50	20	нейтрален

Для анализа эффективности было проведено рентгеновское исследование образцов на дифрактометре ДРОН-УМ1 с фильтрованным  $\text{CuK}_\alpha$  излучением. Съемка велась по точкам с шагом  $0,05^\circ$ . Индексирование рентгеновских линий тетрагональной фазы осуществлялось по табл. ASTM. Определение параметров решетки проводилось по отражениям в интервале углов  $20 < 2\theta < 120$ . Разде-

ление перекрывающихся рентгеновских максимумов осуществлялось с помощью компьютерной программы на основе минимизации отклонения суммарного аппроксимирующего профиля от экспериментального. Параметры тонкой кристаллической структуры определялись по уширению рентгеновских линий с использованием зависимостей “Холла-Вильямсона”, из которых определены ОКР и микродисторсия решетки [8]. В качестве аппроксимирующих функций использовались функции типа Коши [9]. В качестве эталона для определения инструментального уширения использовался грубозернистый  $\alpha$ -кварц.

Типичная рентгенограмма приведена на рис. 2 (образец в исходном состоянии). В основном присутствуют дифракционные отражения от карбида вольфрама и очень слабый пик (111) кобальта с несколько измененным параметром.

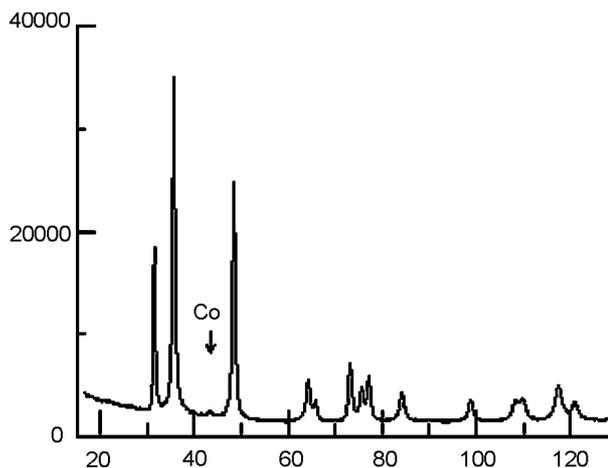


Рис. 2. Типичная рентгенограмма образца.

Обработка поверхности энергией импульсной плазмы приводит к тому, что в поверхностном слое отражения карбида вольфрама уширяются, а на месте отражений кобальта появляется множество отражений, по видимому, принадлежащие сложной смеси различных фаз в связующей фазе Co, рис. 3. Характерно, что изменение количества импульсов приводит к изменению фазового состава связки.

По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы. По карбиду вольфрама – структуру не меняет, все образцы имеют кристаллическую решетку ГПУ, параметры отличаются не значительно,

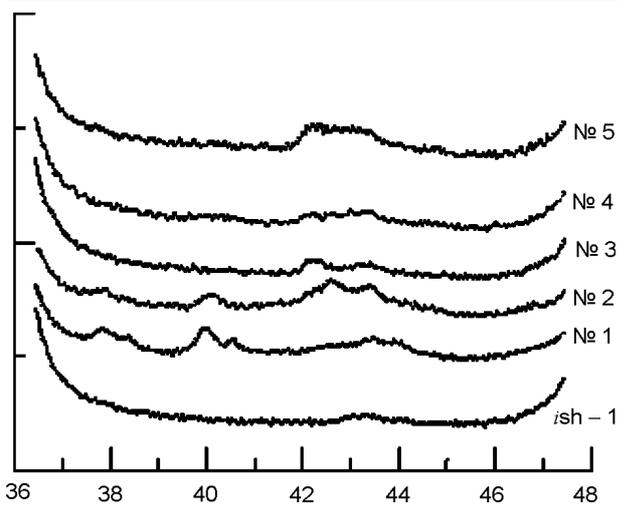


Рис. 3. Изменения в дифракционной картине. После обработки в интервале углов связи.

имеет место хорошее согласие с табличными значениями. Более точный анализ позволяет заметить некоторое уменьшение параметров примерно на 0,1% (разное для разных образцов). Расчет внутренних напряжений (сжатия!) дает значения от 780 МПа для образца № 1 и до 450 МПа для образца № 5 (по последнему пику). Все данные хорошо ложатся на зависимость “Холла-Вильямсона”, из которой определены ОКР и микродисторсия решетки, рис. 4. Зависимость “Холла-Вильямсона” строили в координатах

$$b \cos Q/L - \sin Q/L,$$

где  $b$  – уширение линий,  $Q$  – угол дифракции линий,  $L$  – длина волны. Полученные точки аппроксимируются прямыми, наклон которых дает учетверенную микродисторсию решетки, а отсегаемый участок по оси  $Y$  – обратную величину увеличению Областей Когерентного Рассеяния (ОКР) [9].

В целом, можно говорить о том, что импульсно-плазменная обработка приводит к увеличению ОКР рентгеновских лучей и увеличению микродисторсии. Исследования по-

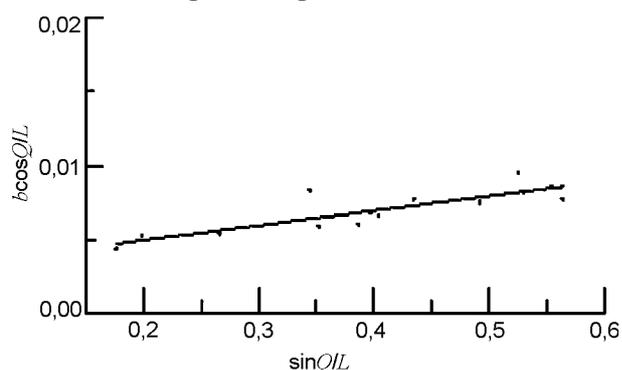


Рис. 4. Типичная зависимость “Холла-Вильямсона”.

казали, что происходит рост кристаллитов, связанный с перераспределением дефектов (дислокаций) в карбиде вольфрама, что, по-видимому, и сопровождается образованием напряжений сжатия.

Проведены исследования изменения связующей фазы (кобальт). В исходном состоянии кобальт – ГЦК со слегка измененным параметром. Импульсно-плазменная обработка приводит к появлению сложной смеси фаз – ГПУ-Co, сложных карбидов типа  $W_6Co_6C$ ,  $W_3Co_3C$  и неравновесных карбидов составов  $W_2C$ ,  $WC_{1-x}$ ,  $W_6C_{2,54}$ , по-видимому, находящихся в связующей фазе.

Все это позволяет сделать заключение о том, что при обработке формируется неравновесная структура связующей фазы, за счет чего возникают внутренние напряжения сжатия, которые, естественно, должны увеличить “работоспособность” материала, табл. 2.

Таблица 2

Номер режима обработки	Размер кристаллитов, нм	Микроискажения, $\langle e \rangle \cdot 10^3$	Остаточные напряжения (сжатия), МПа
Исходный	25	2,39	–
1	33	2,47	780
2	35	2,62	700
3	29	2,77	450
4	29	2,41	530
5	32	3,07	450

В результате анализа образцов были выбраны режимы импульсно-плазменной обработки рабочей поверхности калибров прокатных шайб. Этот режим обработки обеспечивает максимальные сжимающие напряжения в поверхностном слое при минимальных микроискажениях и минимальном изменении кристаллитов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ

Импульсно-плазменная обработка прокатных шайб осуществлялась на установке, рис. 5, содержащей генератор импульсной плазмы – 1, устройство для крепления твердосплавных шайб – 2, манипулятор для вращения изделий – 3. Обработка шайб осуществлялась импульсной плазменной струей при следующих режимах: емкость конденсаторов 1000 мкФ, напряжение 3,2 кВ, индуктивность  $3 \cdot 10^{-2}$  мГн. Плазмообразующим газом являлись продукты сгорания горючей газовой

смеси кислород, воздух и пропан-бутан, содержащей избыток пропана от стехиометрического состава.

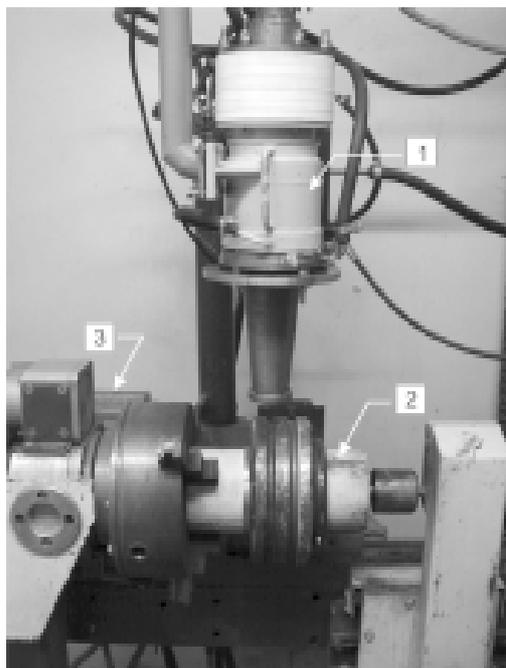


Рис. 5. Вид установки для упрочняющей обработки прокатных шайб.

Изменение режимов обработки осуществлялось использованием различной дистанции от плазматрона до упрочняемой поверхности и изменением времени обработки. Легирующие элементы в плазму не вводились. Обработка осуществлялась на дистанции упрочнения 50 мм. Время обработки изменялось в зависимости от диаметра и размера прокатных шайб, табл. 3.

При импульсно-плазменной обработке осуществляется модифицирование тонкого рабочего слоя (до 40 мкм) без нагрева всего изделия. В результате, после упрочняющей обработки, геометрические размеры шайбы не изменились. Изменился только цвет поверхности изделия из-за осаждения углерода

Таблица 3

Номер режима упрочнения	Энергия импульса, Дж	Дистанция от плазматрона до изделия, мм	Время обработки, сек	Подключение изделия
2	3000	50	120	нейтрален
3	3000	50	180	нейтрален
4	3000	50	360	нейтрален

и образования слоя окислов “цвета побежалости”.

Были проведены сравнительные испытания обработанных импульсной плазмой и не обработанных прокатных шайб. Испытания осуществлялись на металлургическом предприятии, в процессе прокатки катанки  $\varnothing 6,5$  мм из рядовых кипящих и спокойных марок стали на клети № 127. Критерием работоспособности калибров шайб являлся увеличение диаметра формируемой проволоки.

Испытания показали, что стойкость шайбы, обработанной импульсной плазмой по режиму 2 составила 1200 т (стойкость не обработанных шайб на этой же клети 700 т). В результате удельный износ слоя на обработанной поверхности твердого сплава в 2,5 раза ниже, чем на необработанной, табл. 4.

Испытание пары шайб, обработанных по режиму 3 и 2, показали, что удельный износ первого калибра снизился в 1,9 раза, а второго, обработанного по режиму 2, в 2,4 раза (стойкость не обработанных шайб на этой же клети составила 700 т при допустимой выработке 0,06 мм) (см. табл. 2). Следующая пара шайб показала, что стойкость калибров увеличилась, соответственно, в зависимости от режимов обработки от 1,5 раз (3 режим) до 3,7 раза (2 режим).

Испытание шайб, увеличенного диаметра до 208 мм (режим 4), при прокатке катанки

Таблица 4

$\varnothing$ шайбы, мм	Режим плазменной обработки	Результаты испытания прокатных шайб						Эффективность плазменной обработки, %
		Обработанных плазмой			Не обработанных плазмой			
		Объем проката (M), т	Износ калибра (Z), мм	Удельный износ $J(pdy)$ т/мм	Объем проката (N), т	Износ калибра (S), мм	Удельный износ $J = N/S$ т/мм	
152	2	1200	0,04	30000	700	0,06	11666	250
166	2	870	0,04	21750	700	0,06	11666	240
166	3	870	0,04	43500	700	0,06	11666	370
208	4	2500	0,16	15625	1800	0,24	7500	208

Ø5,5 на клетки № 218 показали, что стойкость обработанной импульсной плазмой калибра составила 2500 т при износе 0,16 мм. Стойкость не обработанных шайб составляет 1800 т, при износе 0,24 мм. Соответственно, мы наблюдаем увеличение износостойкости обработанной поверхности более чем в 2,35 раза (см. табл. 2).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате импульсно-плазменной обработки твердосплавных изделий происходит изменение поверхностного слоя: изменяется размер кристаллитов на 10–20%, идет обогащение связующего металла Со сложными карбидами типа  $W_6Co_6C$ ,  $W_3Co_3C$  и неравновесными карбидами составов  $W_2C$ ,  $WC_{1-x}$ ,  $W_6C_{2.54}$ . В результате образуются внутренние напряжения (сжатия!) до 800 МПа.

Промышленные испытания показали, что износостойкость поверхностного слоя твердосплавных прокатных шайб многократно (250–370%) повышается после импульсно-плазменной обработки. Импульсно-плазменная упрочняющая обработка осуществляется без нагрева и без изменения структурного состояния всего изделия. Эффективность упрочнения зависит от количества и плотности мощности плазменных импульсов воздействия.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Коротаев А.Д., Тюменцев А.Н., Суховаров В.Ф. Дисперсное упрочнение тугоплавких металлов. – Новосибирск.: Наука, 1989. – 211 с.
2. Подураев В.Н., Диваев А.В., Сенченко А.Э. Упрочнение твердосплавного режущего инструмента лазерным и радиационным излучением//Станки и инструменты.– 1990.– № 9. – С. 18-20.
3. Блиновский В.А., Бровер Г.И., Цырбий И.К. Состояние поверхностных слоев лазерно-легированного твердого сплава ВК8//ФХОМ. – 1991. – № 4. – С. 111-115.
4. Мокрицкий Б.Я., Кабалдин Ю.Г. Комбинированное упрочнение твердосплавного инструмента//ФХОМ.–1991. – № 5. – С. 153-154.
5. Кикин П.Ю., Пчелинцев А.И., Русин Е.Е. Повышение теплостойкости и износостойкости быстрорежущих сталей лазерным ударно-волновым воздействием//ФХОМ. – 2003. – № 5. – С. 15-17.
6. Гуреев Д.М., Ламтин А.П., Чулкин В.Н. Влияние импульсного лазерного излучения на состояние кобальтовой прослойки твердых сплавов//ФХОМ. – 1990. – № 1. – С. 51-54.
7. Тюрин Ю.Н., Жадкевич М.Л. Плазменные упрочняющие технологии. – К.: Наукова Думка, 2008. – 215 с.
8. Williamson G.K., Hall W.H.//Acta Metall. – 1953. – № 1. – P. 22-31.
9. Morosin B., Graham R.A. Shock Waves in Condensed Matter//Elsevier Sci. Publ. – 1984. – № 2 – P. 355-362.

© Ю.Н. Тюрин, С.Н. Кульков, О.В. Колисниченко, И.М. Дуда, 2009.