

УДК 67.017

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАДАННОГО КОМПЛЕКСА СВОЙСТВ ИЗ ГРАНУЛИРУЕМОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЭП741НП

Татьяна Геннадьевна Жукова

*Студентка 4 курса,
кафедра «Материаловедение»,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научные руководители: А.И. Логачёва⁽¹⁾, Ю.А. Курганова⁽²⁾,
кандидат технических наук, профессор-исследователь, заместитель начальника отдела
института ОАО «Композит»⁽¹⁾, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
«Материаловедение»⁽²⁾*

В настоящее время активно ведутся разработки по усовершенствованию дисков газотурбинных двигателей (ГТД) в авиа- и ракетостроении. Диск ГТД входит в состав ротора турбины и служит для установки рабочих лопаток, создающих крутящий момент, и передачи этого момента с лопаток на вал. Диск расположен в роторе после камеры сгорания и на него оказывает воздействие следующий спектр нагрузок:

- газовые, вызванные перепадом давления в газовом тракте двигателя и изменением скорости и направления газового потока;
- массовые, возникающие при вращении ротора двигателя;
- температурные, которые возникают из-за неравномерного нагрева и/или охлаждения деталей, различного коэффициента линейного расширения их материалов.

К материалу дисков ГТД предъявляется сложный комплекс свойств:

- высокий уровень длительной и кратковременной прочности во всем диапазоне рабочих температур 1050 МПа;
- низкая чувствительность к концентраторам напряжений при статическом нагружении;
- высокая пластичность при длительном и кратковременном нагружении;
- достаточно высокое сопротивление малоциклового усталости;
- стабильность структуры и фазового состава;
- хорошая технологичность.

В настоящее время основным материалом для изготовления диска ротора турбины служат жаропрочные никелевые сплавы.

Повышение требований к материалам по жаропрочности и связанное с этим усложнение состава сплавов привело к тому, что стало проблематичным получение заготовок деталей.

Решением обозначенной проблемы стала технология гранульной металлургии.

Гранульная металлургия стала технологией, которая позволяет получать новые материалы, в том числе композиционные, с заданными свойствами.

Данная технология включает в себя такие этапы, как: получение порошков, изготовление заготовок и их последующую обработку, что дает возможность получать изделия с заданным комплексом свойств, размеров и формы без использования последующей механической обработки.

Технология гранульной металлургии обеспечивает ряд следующих особенностей, полученного материала:

- минимальную дендритную и зональную ликвацию, что в свою очередь позволяет реализовать высокий уровень равномерности механических характеристик во всем объеме деталей;

- существенное улучшение деформируемости материалов, при этом в ряде технологических процессов деформировать материал не требуется, поскольку возможным становится получение деталей с окончательными размерами сложной формы;
 - лучшую обрабатываемость механическим инструментом, что существенно снижает трудозатраты и себестоимость;
 - возможность получать целые сложные узлы, ранее изготавливаемые из отдельных деталей, которые затем соединяли сваркой или другими способами.
- На сегодняшний день известно два способа получения гранул:
- газоструйное распыление жидкого металла;
 - центробежное плазменное распыление.

Газоструйное распыление используют реже из-за содержания большого количества неметаллических частиц, попавших вследствие получения жидкого металла расплавлением в керамическом тигле, по сравнению с плазменным распылением. Во втором случае получение гранул идет за счет распыления высокоэнергетической плазмой вращающегося с большой скоростью электрода заданного сплава.

В ОАО «Композит» для получения гранул используют центробежное плазменное распыление быстровращающегося электрода на установке центробежного распыления (УЦР).

Основными этапами технологии гранульной металлургии являются:

1. Контроль качества исходной заготовки для получения гранул
2. Распыление жидкого сплава (металла);
3. Рассев гранул, сепарация и очистка их от металлических и неметаллических включений;
4. Засыпка гранул и их герметизация в капсулах;
5. Газостатическая обработка;
6. Термическая обработка (ТО);

1. Контроль качества исходного сырья для получения гранул

Исходным материалом для получения гранул служит электрод из материала, который нужно распылить – в данном случае из никеля и его сплавов. Электрод имеет диаметр 55 или 75 мм, длину – 600 мм. Геометрия параметров связана с техническими характеристиками устройства подачи электрода в камеру распыления. Электроды из никелевых сплавов получают методом двойного переплава – вакуумно-индукционная плавка (ВИП) и вакуумно-дуговая плавка (ВДП). Для того, чтобы получить гранулы соответствующего качества требуется осуществление входного контроля исходного материала. Входной контроль проходит в две стадии: визуальный осмотр и химический анализ.

На первой стадии входного контроля проводится осмотр электрода на наличие вмятин, выпуклостей, проверяется геометрия, размеры электрода должны соответствовать размерам на чертеже. Для определения наличия полостей электрод проверяется с помощью УЗК (ультразвуковой контроль).

На второй стадии проводится химический анализ на наличие кислорода. Этот анализ является наиболее важным, так как предельное содержание кислорода в электроде из никелевых сплавов должно составлять не более 0,007 масс. % из – за того, что наличие кислорода отрицательно сказывается на прочностных, коррозионных и жаростойких характеристиках.

Химический анализ проводится методом восстановительного плавления в соответствии с ГОСТ. После проведения входного контроля делается вывод о пригодности проверяемого электрода для получения гранул. Он должен соответствовать следующим требованиям:

- не иметь поверхностных дефектов;
- иметь овальность не более 0,05 мм;

- соответствовать размерам, указанным на чертеже;
- не иметь полостей;
- содержание кислорода не должно превышать 0,007 масс. %.

Если электрод соответствует предъявляемым требованиям, то он отправляется в дальнейшее производство. В противном случае – бракуется.

2. Распыление жидкого сплава (металла)

Процесс получения гранул можно разделить на четыре стадии:

1. Плавление торца вращающейся заготовки;
2. Формирование жидкой капли на вращающемся торце;
3. Охлаждение капли при полёте в среде инертного газа;
4. Кристаллизация гранулы.

Для получения гранул используется технология центробежного распыления плазмой вращающегося электрода на установках УЦР-4.

После данных этапов мы получаем готовые гранулы разного фрикционного состава. Поэтому дальше осуществляется рассев гранул на рабочие фракции и их магнитная и электростатическая сепарации.

3. Рассев гранул, сепарация и очистка их от металлических и неметаллических включений

Самым основным и эффективным этапом для снижения металлических и керамических включений является рассев и сепарация гранул.

Металлические включения попадают в гранулы в результате изнашивания стальных барабанов во время плавки электрода в УЦР. Понизить их содержание позволяет установка электромагнитной сепарации.

Отделить рабочую фракцию гранул позволяет установка отсева, которая была модернизирована на ОАО «Композит», благодаря чему рассев и магнитная сепарация проходят на одной установке.

После гранулы, требуемого размера, подвергаются электростатической сепарации на установке СЭС, в процессе которой возможно извлечение до 95 % неметаллических включений.

4. Засыпка гранул и их герметизация в капсулах

В повышении качества гранул важную роль играет их засыпка в капсулы и герметизация на установке СНВ 6.12 (печь сопротивления нагрева вакуумная). На этом этапе для хорошего срачивания гранул в установке предусмотрена термическая дегазация гранул, осуществляемая посредством нагрева в высоком вакууме перед засыпкой в капсулы. Герметизация капсулы осуществляется путем электроннолучевой заварки ее приемного отверстия.

Этот процесс позволяет значительно понизить значение кислорода, соединений углерода, водорода, азота.

5. Газостатическая обработка

Следующим этапом является газостатическая обработка. Здесь заполненные капсулы гранулами подвергаются газостатическому уплотнению под действием высоких температуры (1100...1220 °С) и давления (до 200 Мпа).

Газостатическая обработка позволяет получать заготовки высокого качества. Полученный никелевый сплав ЭП741НП технологией гранульной металлургии, широко используется для получения дисков ГТД в авиа- и ракетостроении. Химический состав сплава и назначение каждого элемента представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав сплава ЭП741НП и назначение каждого элемента

Элемент	Содержание, %	Назначение
Ni	51,26 - 59,38	основа
Co	15 - 16,5	Введение кобальта оказывает положительное влияние на жаропрочность и технологичность (ковкость). Это влияние особенно полезно, когда сплавы сильно легированы титаном, вольфрамом, молибденом, бором вместе с алюминием
Cr	8 - 10	Улучшает окислостойкость и, кроме того, согласно данным П.Л. Грузина, повышает энергию связи атомов в твердом растворе системы Ni-Cr-Fe
W	5,2 – 5,9	Вольфрам, молибден, ниобий, рений и кремний при комплексном легировании вводят вместе с титаном или алюминием, т. к. эффект упрочнения получается более значительным, особенно в области высоких температур, нежели раздельное введение этих элементов. Вольфрам и молибден, присутствуя в твердом растворе, оказывают благоприятное влияние, повышая его термическую стойкость путем торможения процессов разупрочнения при высоких температурах. Они повышают температуру рекристаллизации твердого раствора. В присутствии бора и углерода вольфрам и молибден могут входить в состав упрочняющих фаз (боридов и карбонитридов)
Al	4,8 – 5,3	Оказывает очень сильное влияние на повышение жаропрочных свойств никелевых сплавов, причем тем больше, чем выше его содержание
Mo	3,5 – 4,2	Улучшение прочностных характеристик при высоких температурах
Nb	2,4 – 2,8	Способствует повышению термической стойкости твердого раствора, а при введении в достаточном количестве участвует в образовании интерметаллидной фазы типа Ni ₃ Nb или входит в состав γ'-фазы, а также состав карбидов. В сплавах с содержанием ниобия порядка 3-5%, обладает меньшей склонностью к трещинообразованию при сварке. Введение ниобия в сочетании с другими легирующими элементами сильно повышает пластичность сплавов при длительных испытаниях в горячем состоянии. Он также сильно измельчает зерно благодаря образованию карбидов и благоприятно действует на упрочнение приграничных объемов. Но при чрезмерно высоком комплексном легировании титаном, алюминием, молибденом, вольфрамом и другими элементами жаропрочность сплавов снижается, т. к. образуются первичные интерметаллидные фазы в виде грубых скоплений, вызывающих охрупчивание
Ti	1,6 - 2	Введение в сплавы 2,5-3,0 % Ti способствует образованию высокодисперсных интерметаллидных фаз при умеренных температурах, увеличивая тем самым сопротивление сплава пластической деформации и повышая 100-ч длительную прочность
Fe	до 0,5	В сложнелегированных жаропрочных сплавах введение железа несколько ухудшает жаропрочные свойства и содержание его не должно превышать 1-%

Продолжение таблицы 1

Элемент	Содержание, %	Назначение
Si	до 0,5	Способствует повышению рабочей температуры
Mn	до 0,5	Положительно влияет на механические свойства и жаростойкость, уменьшает вредное влияние серы
C	0,02 – 0,06	Несмотря на малое содержание, углерод в жаропрочных никелевых сплавах оказывает большое влияние на их структуру и свойства, так как образует не только труднорастворимый карбид титана, но и карбиды хрома типа $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3
Mg	до 0,02	Понижает вредное влияние серы
B	до 0,015	Бор сравнительно мало растворяется в гамма-твердом растворе при умеренных температурах и при старении выделяется в виде боридных фаз различного состава, преимущественно по границам и на стыках зерен. Максимальная жаропрочность вероятнее всего относится к максимальной растворимости бора в гамма-твердом растворе. Ведение до 0,015% В не повышает кратковременной прочности и твердости, но увеличивает пластичность, определяемую при кратковременных и длительных испытаниях. Бор отрицательно влияет на окислостойкость сплавов
Zr	до 0,015	Жаропрочные свойства сплавов на никелевой основе улучшаются, когда в них вводят малые добавки бора, щелочноземельных и редкоземельных элементов: кальция, бария, церия, бериллия и циркония. Добавки кальция, бария, циркония, бора и церия способствует измельчению частиц упрочняющей γ' -фазы. Также они повышают жаропрочность и пластичность сплава при рабочих температурах и деформируемость сплава в горячем состоянии
Ce	до 0,015	
P	до 0,015	Оказывают вредное влияние на свойства сплава
S	до 0,009	

Для достижения требуемого комплекса свойств ($\sigma_b = 1290$ МПа, $\sigma_{0,2} = 865$ МПа, $\delta_5 = 9,8$ %, $\psi = 11,3$ %) необходимо выбрать соответствующий режим последующей термической обработки сплава.

6. Режим термической обработки

Для достижения необходимых свойств этот этап является определяющим. На ОАО «Композит» проведена термическая обработка по двум ступеням:

- первая ступень представляет собой нагрев сплава с шагом температуры 50 °C (табл. 2);
- вторая ступень – нагрев сплава с шагом температуры 10 °C (табл. 3).

Сравнивая результаты полученных экспериментальных данных, видно, что самым оптимальным является режим из второй ступени эксперимент 2 (рис. 1).

Как видно из графиков, самым лучшим режимом, обеспечивающим заданный комплекс свойств, является режим второй ступени эксперимент № 2 (рис. 2).

Анализ структурных исследований материала после проведения соответствующего режима на микроскопе марки «AxioVert A1» были получены следующие снимки структуры (рис. 3, 4).

Таблица 2. Свойства сплава ЭП741НП после ТО первой ступени

Режим ТО	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %
Эксперимент №1: Закалка: Загрузка при 700 °С, нагрев до 1150 °С, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе. Старение: Загрузка при 700 °С, нагрев до 870 °С, выдержка 16 часов, охлаждение с печью до 760 °С, выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе.	1200	800	11	13
Эксперимент №2: Закалка: Загрузка при 700 °С, нагрев до 1200 °С, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе. Старение: Загрузка при 700 °С, нагрев до 870 °С, выдержка 16 часов, охлаждение с печью до 760 °С, выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе.	1280	850	10,5	12,3
Эксперимент №3: Закалка: Загрузка при 700 °С, нагрев до 1250 °С, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе. Старение: Загрузка при 700 °С, нагрев до 870 °С, выдержка 16 часов, охлаждение с печью до 760 °С, выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе.	1250	830	10,7	12,7

Таблица 3. Свойства сплава ЭП741НП после ТО второй ступени

Режим ТО	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %
Эксперимент №1: Закалка: Загрузка при 700 °С, нагрев до 1200 °С, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе. Старение: Загрузка при 700 °С, нагрев до 870 °С, выдержка 16 часов, охлаждение с печью до 760 °С, выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе.	1260	820	10,4	11,3
Эксперимент №2: Закалка: Загрузка при 700 °С, нагрев до 1210 °С, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе Старение: Загрузка при 700 °С, нагрев до 870 °С, выдержка 16 часов, охлаждение с печью до 760 °С, выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе	1300	870	10,3	12
Эксперимент №3: Закалка: Загрузка при 700 °С, нагрев до 1220 °С, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе. Старение: Загрузка при 700 °С, нагрев до 870 °С, выдержка 16 часов, охлаждение с печью до 760 °С, выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе.	1280	840	10,5	11,5

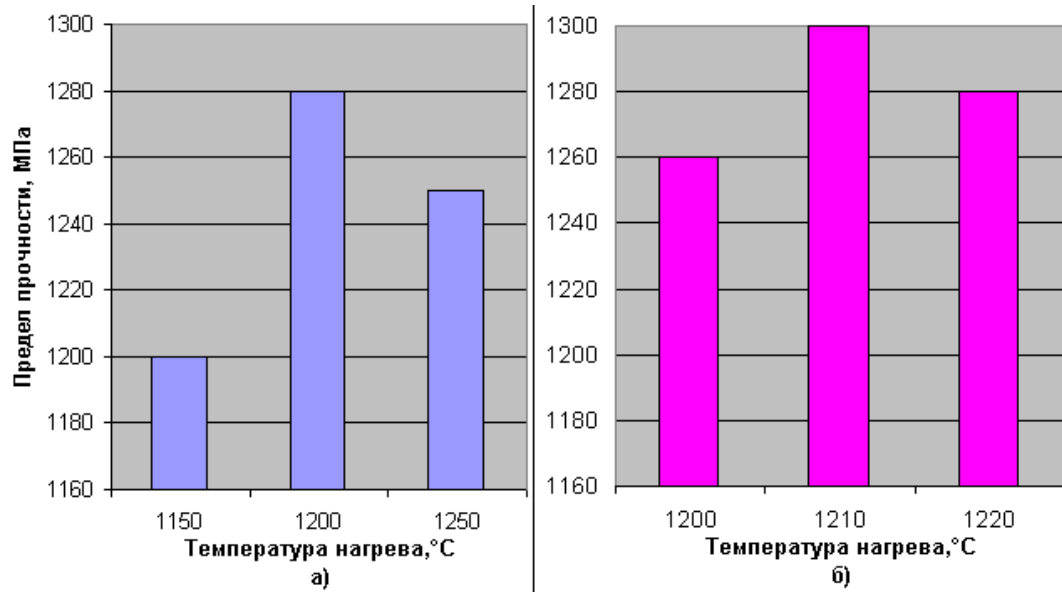


Рис. 1. Зависимость предела прочности от температуры нагрева: график зависимости предела прочности от температуры нагрева с шагом 50°C (а) и с шагом 10°C (б)

Термическая обработка никелевого сплава ЭП741НП

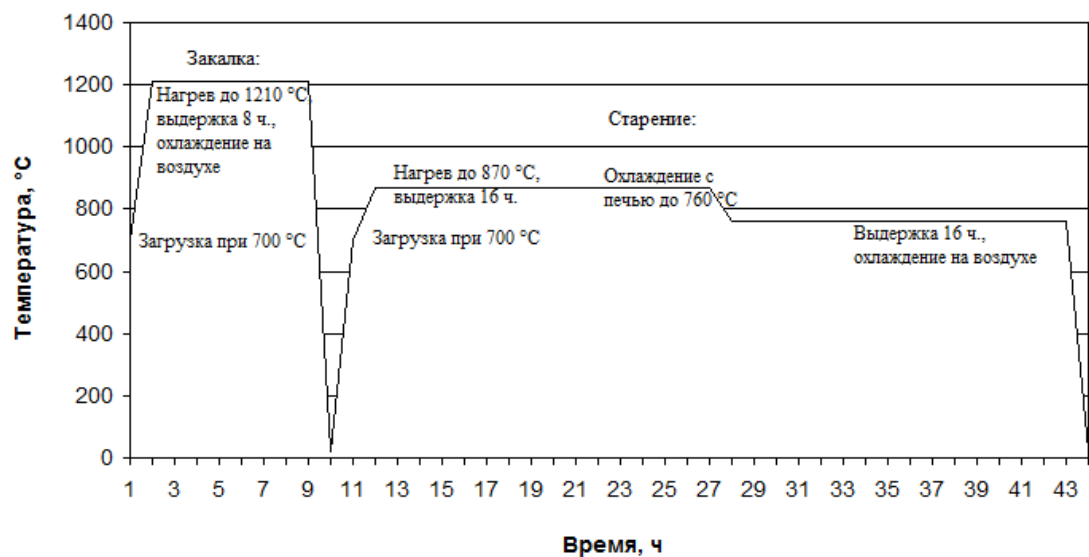


Рис. 2. Режим термической обработки никелевого сплава ЭП741НП

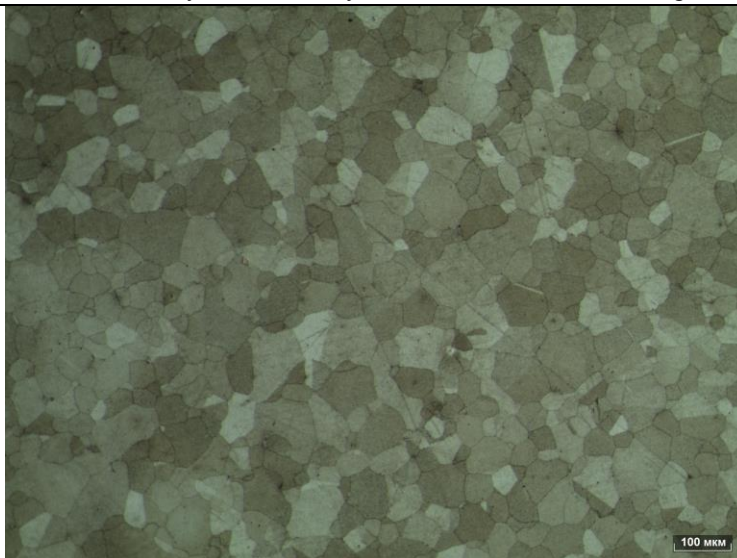


Рис. 3. Структура сплава ЭП741НП при увеличении x100

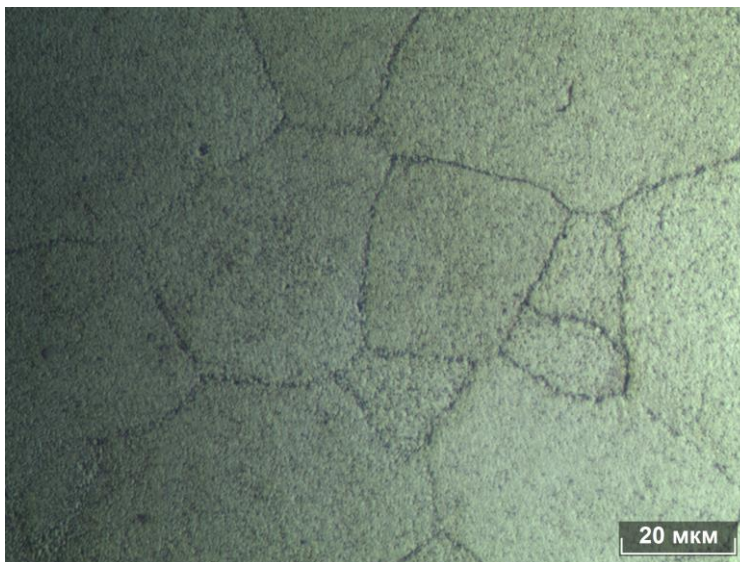


Рис. 4. Структура сплава ЭП741НП при увеличении x1000

После проведения ТО по указанному режиму мы получаем равноосную мелкозернистую структуру с четкими границами между зернами. Таким образом, в работе продемонстрировано обоснование выбора ТО для материала диска ГТД на основе никеля, полученного методом гранульной металлургии.

Литература

1. Жаропрочные никелевые литейные сплавы равноосной и направленной кристаллизации / Л.В.Тарасенко, М.В. Унчикова - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э Баумана, 2005. - 18с.
2. Ф.Ф. Химушин. Жаропрочные стали и сплавы. - М.: Металлургия, 1969. - 752с.
3. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок : изд. В 2-х т. / Под ред. Симса Ч.Т., Столоффа Н.С. Хагеля / Под ред. Шалина Р.Е.-М.: Металлургия, 1995. - 384с.
4. А.Г. Берсенева, А.В. Логунов, А.И. Логачева / Проблемы повышения качества жаропрочных сплавов, получаемых методом металлургии гранул // Вестник МАИ. 2008. №3. С.8.
5. Physical Metallurgy / Robert W. Cahn and Peter Haasen – М.: 1996. - 942с.
6. Фатхулин О.Х. и др. / Разработка перспективных технологий для жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. 1999. №3.С53.

7. Гарибов Г.С. / Современный уровень развития порошковой металлургии жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. 2000. №6. С.58.
8. Голованов В.И., Логачева А.И., Логунов А.В., Разумовский И.М. / Тезисы доклада «Пути повышения качества гранулированных жаропрочных сплавов» // Материалы 25-й Международной научно – практической конференции «Композиционные материалы в промышленности». Ялта 2005. С.30.
9. Мусиенко В.Т. / Некоторые итоги разработки технологии производства гранул жаропрочных никелевых сплавов для изготовления изделий авиакосмической техники // Технология легких сплавов. 2000. №6. С.72.