



УДК 669.187.56.002.2

## СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВАЛОВ РОТОРОВ ПАРОВЫХ И ГАЗОВЫХ ТУРБИН (ТРЕБОВАНИЯ, СОСТАВ и СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА)\*

А. К. Цыкуленко, Л. Б. Медовар, А. В. Чернец

Представлен обзор зарубежной печати, главным образом материалов международных конференций, посвященных проблемам энергетики. Рассмотрены и обобщены данные о сталях и сплавах, применяющихся для изготовления роторов паровых и газовых турбин за рубежом. При этом основное внимание уделено вопросам, которые могут представлять интерес для специалистов в области специальной электрометаллургии. В частности, освещены проблемы производства композитных валов роторов и крупных слитков из суперсплавов на никелевой основе.

Review of foreign publications, in particular materials of international conferences devoted to power engineering problems is given. Data about steels and alloys used in manufacture of rotors of steam and gas turbines abroad are considered. Here, a main attention was paid to the problems which can present interest to the specialists in the field of a special electrometallurgy. In particular, the problems of production of composite rotor shafts and large ingots from the nickel-based alloys are outlined.

**Ключевые слова:** валы роторов; композитные валы; роторные стали; теплоустойчивые стали; жаропрочные сплавы на никелевой основе

Эффективность и экологическая безопасность энергосистем непосредственно связаны с технологическими параметрами энергоблоков. Так, чем выше рабочие температура и давление в энергетической турбине, тем при прочих равных условиях выше ее КПД и меньше выбросов вредных веществ в окружающую среду.

Имеются два основных вида турбин: паровые и газовые. Они существенно различаются по конструктивным особенностям и технологическим параметрам. Как правило, газовые турбины работают при более высоких температурах и имеют меньшие габариты, чем паровые. Ротор газовой турбины значительно короче, как правило, набирается из дисков и чаще всего сварной. Заготовка ротора паровой турбины более протяженная и представляет собой вал, чаще всего моноблочный, имеющий в различных сечениях существенно разные диаметры. Ротор паровой турбины имеет в основном три секции: высокого, среднего (промежуточного) и низкого давления. Наибольшие габариты и наименьшая рабочая температура в секции низкого

давления. Соответственно к материалам этих секций предъявляются различные требования. Если главным требованием к материалу секций высокого и среднего давления является высокая длительная прочность, то для материала ротора секции низкого давления более важными являются прочность и вязкость. Здесь нужен материал и с большей прокаливаемостью. Паровая турбина может иметь и несколько роторов (по секциям), но применение моноблочного ротора экономически более выгодно. При этом ротор может быть сварным или цельнокованным.

Различные рабочие температуры и габариты роторов обусловили применение различных материалов при их изготовлении. В период 50-х–80-х годов паровые турбины для тепловых станций, работающих на угле, строились в основном на температуру пара до 550 °С. При этом наиболее распространенной для изготовления секций высокого и среднего давления роторов была сталь Cr–Mo–V-композиции с содержанием 1 % Cr. Для секции низкого давления стандартной была сталь 3,5 % NiCrMoV, имеющая более высокие вязкость и прокаливаемость. Повышение температуры до 550...600 °С потребовало использования Cr–Mo–V сталей с содержанием 12 % Cr, а для температур выше 600 °С применяли уже аустенитные стали и сплавы.

\* По материалам зарубежной печати.



Последнее двадцатилетие характеризуется интенсивным поиском оптимального состава роторных сталей и способа их производства. В 1980 г. германской фирмой «Saarstahl» (ныне «Saarschmiede») была предложена сталь 2 % CrMoNiWV для работы при температуре  $540 \pm 10$  °С, которая по сравнению со сталью 1 % CrMoV имеет более низкое содержание углерода и молибдена, а содержание хрома повышено до 2 %. Сохранение твердости обеспечивается введением в сталь 0,65 % W. Эта сталь имеет существенно большую вязкость, чем сталь 1 % CrMoV, и более высокую длительную пластичность при сохранении уровня длительной прочности. Ее физические свойства, такие как теплопроводность и термическое расширение, выше, чем у высокохромистых роторных сталей и соответствуют требованиям, необходимым при запусках и остановках турбины. Более высокая вязкость стали 2 % CrMoNiWV позволяет использовать ее для изготовления роторов большего диаметра и работающих с большей скоростью. А это, в свою очередь, обеспечивает применимость этой стали как в секциях высокого и среднего давления, так и в секции низкого давления, что дает возможность использовать цельнокованный вариант моноблочного ротора. Эта особенность стали обусловила внимание к ней во всем мире. Способом ее производства, оптимизацией состава, разработкой режима термической обработки занимались многие ведущие фирмы Европы, США, Японии, такие как «Siemens», «Alstom», «ASEA Brown Boveri» (ABB), «Rolls-Royce», «Boehler», Electric Power Research Institute (EPRI)D, «G. E. Power System», «Japan Steel Works», «Toshiba» и др. [1–5, 7, 8, 10, 12, 17, 18].

В рамках специального проекта (Европейская программа COST 505) из этой стали был создан EPRI-Eurore композитный ротор с секцией высокого давления диаметром 1250 мм и секцией низкого давления диаметром 1750 мм. Сталь для этого ротора выплавлялась в 120-тонной электродуговой печи, разливалась на электроды и переплавлялась в слитки ЭШП массой 95 т, диаметром 2300 мм и проковывалась на прессе усилием 60 МН на восьмигранник 1900 мм. Полученная заготовка после двух осадок проковывалась на моноблок диаметром 1800 мм для секции низкого давления и диаметром 1350 мм — для секции высокого давления. После отжига роторной заготовки на перлит при 690 °С ее подвергали нормализации при 950 °С и отпуску при 680 °С. Затем производили механическую обработку заготовки на диаметр 1700 мм для секции низкого давления и 1250 мм для секции высокого давления. Закалку и отпуск осуществляли в вертикальной печи. Заготовку под закалку нагревали в течение 31,5 ч до температуры 950 °С. в вертикальном устройстве с отверстиями для подачи воздушно-водяной струи на валок с регулируемым соотношением воздуха и воды, что обеспечило резкое охлаждение секции низкого да-

вления и более мягкую закалку секции высокого давления. Отпуск проводили при температуре 655 °С в течение 35,5 ч с последующим медленным охлаждением в печи до 250 °С, а затем на воздухе. После такой термообработки металл с пределом текучести 700 Н/мм<sup>2</sup> в секции высокого давления показал на тангенциальных образцах FATT = –15 °С, а на осевых образцах +40 °С. В секции низкого давления FATT осевых образцов составил +48 °С. Повторные испытания этого металла с пределом текучести 640 Н/мм<sup>2</sup> в секции высокого давления показали на тангенциальных образцах FATT = –28... –40 °С, на осевых образцах +26 °С, и на осевых в секции низкого давления +15 °С. Только за 6 лет (с 1988 по 1994 г.) было изготовлено 25 таких роторов. В последующие годы продолжалось совершенствование технологии производства европейского ротора. В частности, перед закалкой в заготовке стали делать прорези, разделяющие диски турбины секции низкого давления. Это повысило интенсивность охлаждения и позволило снизить FATT осевой части секции низкого давления на 20 °С. Кроме того, это дало возможность фирме «Siemens» перейти к изготовлению из этой стали моноблочных роторов диаметром 1750/1940 мм. С 1992 г. фирмой «Saarschmiede» изготовлено уже 89 моноблочных композитных заготовок роторов общей массой 2960 т [19].

Следует отметить, что с самого начала разработки стали 2 % CrMoNiWV особое внимание уделялось технологии ее выплавки. Была поставлена задача получения заготовок из высококчистой стали с однородной структурой. Поэтому при выплавке стали применялись самые современные технологии, такие как вакуум-углеродное раскисление и электрошлаковый переплав. Последний проводился в 165-тонной печи ЭШП в г. Фолкингене на фирме «Saarschmiede». В результате была получена сталь с содержанием, %: S 0,001, P 0,005, As 0,005, Sb 0,0008, Sn 0,005, Si 0,05. Низкое содержание кремния и серы в стали и последовательная кристаллизация металла при ЭШП обеспечивают однородную структуру крупнотоннажных заготовок без сульфидных шнуров.

Наряду с цельнокованными моноблочными роторами широкое распространение получили также сварные роторы. Сварной вариант моноблока позволяет использовать различные стали, в наибольшей степени отвечающие конкретным условиям эксплуатации каждой секции ротора. Непременным условием в этом случае является хорошая свариваемость стали. Поскольку сварные швы располагают, как правило, в наименее нагруженных частях вала ротора, к прочностным свойствам шва обычно предъявляют более низкие требования, чем к стали. Однако вязкостные характеристики металла шва должны быть выше, чем основного металла.

Наибольшее распространение при изготовлении сварных роторов паровых турбин получили стали, представленные в табл. 1. Стали 4, 7 обычно приме-



**Таблица 1. Химический состав и механические свойства стали крупных поковок, предназначенных для валов турбин и генераторов**

№ п/п	Тип стали по SEW 555	Содержание, %							Диаметр поковки, мм (максимальный)	$\sigma_{02}$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	KV, Дж
		C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V						
1	20CrMoNiV 4-7	0,20	<0,30	0,60	1,20	0,90	0,70	0,30	750	550	700	15	40	24
2	28CrMoNiV 4-9	0,28	<0,30	0,60	1,20	0,90	0,70	0,30	1000	550	700	15	40	24
3	30CrMoNiV 5-11	0,30	<0,30	0,60	1,20	1,10	0,70	0,30	1500	550	700	15	40	24
4	23CrNiMo 7-4-7	0,23	<0,30	0,70	1,80	0,70	1,00	–	1000	600	750	15	40	35
5	X21CrMoV 12-1	0,22	<0,30	0,60	12,00	1,00	0,70	0,30	1500	600	750	14	40	20
6	26NiCrMoV 8-5	0,26	<0,30	0,25	1,30	0,40	2,0	<0,15	500	650	800	15	40	39
									1000	600	750	16	40	47
7	26NiCrMoV 11-5	0,26	<0,30	0,25	1,50	0,40	3,0	0,10	500	750	900	14	40	55
									1250	700	850	15	40	63
									1800	600	750	16	40	63
8	26NiCrMoV 14-5	0,26	<0,30	0,25	1,50	0,40	3,50	0,10	1000	850	950	13	40	55
									1250	750	900	15	40	63
									1800	700	850	16	40	63

няют в секциях низкого давления сварных роторов, тогда как сталь 1 используется в секциях среднего и высокого давления при температуре до 550 °С. Сталь 5 предназначается как для сварных, так и для цельнокованных роторов, работающих при температуре выше 550 °С в секциях высокого давления. Для секций высокого давления цельнокованных роторов, работающих при температуре до 550 °С, используют сталь 3, а сталь 8 — в секциях низкого давления. За последние 15 лет качество этих сталей было существенно улучшено, что позволило изготавливать из них более крупные поковки. (табл. 2).

Основным классом роторных сталей, используемых при температуре выше 550 °С, являются стали с содержанием 12 % Cr. Они эксплуатируются уже свыше 40 лет. Первый ротор из такой стали был изготовлен в 1955 г. в Германии для работы при температуре 535 °С. С тех пор в мире были предприняты серьезные усилия по оптимизации состава этих сталей и совершенствованию технологии их выплавки, чтобы сделать возможным их эксплуатацию при температуре 600 °С и выше. Только в рамках одного общеевропейского проекта COST 501, предусматривающего разработку 9... 12 %-ных хромистых сталей для крупных отливок и поковок, велись работы в пяти направлениях по оптимизации состава стали с использованием различных механизмов упрочнения: А — нитридное упрочнение (0,1... 0,3 % N), В — боридное упрочнение

(0,005... 0,01 % В), D — легирование вольфрамом (до 2 % W), E — легирование вольфрамом и молибденом (по 1 % W и Mo), F — легирование молибденом (1... 2 % Mo). При этом для заготовок роторов предусматривалось использование сталей класса В, E, F. Наиболее успешные разработки, нашедшие промышленное применение, иллюстрирует табл. 3 [6, 9, 11, 13–15, 16].

Основной целью проекта COST 501 было создание сталей, имеющих длительную прочность не менее 100 МПа при эксплуатации 100 тыс. ч и температуре 600 °С, удлинение при испытании на ползучесть не менее 10 %, сквозную прокаливаемость в диаметре не менее 1200 мм и минимальный предел прочности 600...700 МПа. При этом показатели вязкости и чувствительности к охрупчиванию не должны были быть хуже, чем у обычных низколегированных роторных сталей и сталей с 12 % Cr. Наибольшие успехи были достигнуты при разработке сталей классов В, E и F. При этом наряду с легированием стали вольфрамом и молибденом для стали класса E использовали также легирование азотом. За последние годы из этих сталей только в Европе были изготовлены 22 ротора паровых турбин максимальным диаметром 1280 мм и массой до 45 т, предназначенных для работы при температуре 600...625 °С и давлении до 300 бар. Они использовались на 14 тепловых станциях мощностью до 950 МВт. Аналогичные стали были также

**Таблица 2. Новые стали для крупных поковок**

Тип стали	Содержание, %								Диаметр поковки, мм (максимальный)	$\sigma_{02}$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	KV, Дж
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W						
22CrMoNiWV 8-8	0,22	<0,10	0,70	2,10	0,85	0,75	0,30	0,65	2000	560	650	16	50	60
22CrNiMo 9-9	0,22	<0,10	0,20	2,30	0,70	2,20	<0,10	–	2000	700	800	13	50	81



**Таблица 3. Химический состав и механические свойства стали крупных поковок, предназначенных для эксплуатации при температуре 600 °С и выше**

Тип стали	Содержание, %									Диаметр поковки, мм (максимальный)	σ <sub>0,2</sub> , МПа	σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %	ψ, %	KV, Дж
	C	Cr	Mo	Ni	W	Nb	V	N	B						
X12CrMoWNB10-1-1	0,12	10,5	1,0	0,70	1,0	0,05	0,20	0,05	–	1500	700	800	15	45	30
X18CrMoNiNb	0,18	11,0	1,0	0,45	–	0,05	0,20	0,05	–	1500	550	780	–	–	–
X18CrMoVNB 9-1	0,18	9,5	1,50	0,50	–	0,05	0,25	0,010	0,010	1200	–	–	–	–	–

разработаны в Японии:ТМК1 (X14CrNiMoVNB10-1) и ТМК2 (X12CrNiMoWVNB10-2) для эксплуатации при температуре 593 и 600 °С соответственно. Успехи в разработке сталей класса E для роторов паровых турбин позволили использовать их и для изготовления дисков газовых турбин. Указанные выше подходы реализуются и дальше в рамках проекта COST 522 с целью создания высокохромистых мартенситных сталей для эксплуатации при температурах 630... 650 °С. В качестве основы взяты стали класса E, комплексно легированные азотом, бором, кобальтом, ванадием. Например, в Японии разработана сталь MTR10A (10CrMoWCoNbVB), предназначенная для эксплуатации при 630 °С [20–26].

Следует отметить, что высокохромистые стали также можно использовать при изготовлении моноблочных композитных роторов. Основной проблемой здесь является обеспечение сквозной прокаливаемости секции низкого давления. Чтобы решить эту проблему и достичь необходимой вязкости разрушения в центре поковки диаметром 1900 мм, японцы разработали на основе стали ТМК1 новую сталь с 9 % Cr и повышенным (до 1,1 %) содержанием никеля и оптимизированным содержанием ниобия.

Исключительно важное значение придается способу выплавки стали и ее дальнейшему переделу. Высокохромистые стали отличаются от низколегированных роторных сталей по термофизическим свойствам и параметрам кристаллизации, в частности усадки, поэтому кристаллизация этих сталей более сложная, особенно в крупных сечениях (иногда в диаметре более 2000 мм). Типичная схема производства стали класса E включает: выплавку стали в электродуговой печи, скачивание шлака и наводку нового, внепечное

рафинирование в печи-ковше, вакуумирование, разливку на электроды и ЭШП. Если нет возможности осуществить ЭШП, применяют электрошлаковую подпитку методами BEST или ESHT-J. Типичная термическая обработка состоит в гомогенизирующем отжиге (1070 °С), отжиге (720 °С) для осуществления механической обработки, аустенитизации (1060 °С) и двухступенчатом отпуске при 570 и 700... 720 °С.

Для эксплуатации при температурах выше 600...650 °С используются аустенитные стали и сплавы на никелевой основе с интерметаллидным упрочнением. Типичными представителями этих материалов, применяемых в роторах турбин, являются сталь А-286 и сплавы Инконель 706 и 718 (табл. 4). Общей проблемой для этих материалов при изготовлении поковок для роторов турбин является обеспечение стабильности их состава по титану и алюминию, а также предотвращение образования кристаллизационных дефектов в виде пятнистой ликвации, усугубляющейся с увеличением сечения и массы слитка.

Еще в 1986 г. фирма «Saarstahl» сообщила об успешном изготовлении ротора стационарной газовой турбины диаметром 620 мм и длиной 4230 мм из слитка ЭШП диаметром 1300 мм и массой 25 т. Сплавы Инконель 706 и 718 были разработаны компанией «ИНКО» в 1950-х годах. Сплав 718 сначала использовался в основном для изготовления дисков авиационных газовых турбин. Применение сплава 706 до недавнего времени было ограничено, поскольку для производства энергетических турбин использовались в основном стали, так как размеры поковок для энергетических турбин на порядок больше, чем для авиационных. Однако в связи с бурным развитием стационарных газовых турбин в последнее время интерес к этим сплавам существен-

**Таблица 4. Материалы для крупных поковок, предназначенных для эксплуатации при температуре 650 °С и выше (типичный состав)**

Материал	Содержание, %									
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Fe	Ti	Al	Nb	Mo
Сталь А-286*	0,02	1,00	0,20	15,0	26,0	Ост.	2,0	0,20	–	1,2
Инконель 706	0,03	0,20	0,20	16,0	41,5	40,0	1,8	0,20	16,0	–
Инконель 718	0,04	0,20	0,20	19,0	52,5	18,5	0,9	0,50	19,0	3,0

\* В стали А-286 содержится еще 0,3 % V.



но возрос. Компания «G. E. Power System» разработала новые классы газовых стационарных турбин, известных под названием F класс, с температурой газов 1260 °С и H класс с температурой газов 1427 °С, в которых используются роторы, изготовленные соответственно из сплавов 706 и 718 [27, 28].

Сплав 706 в отличие от сплава 718 не содержит молибдена, имеет пониженное содержание ниобия, алюминия, хрома, никеля и углерода, но повышенное содержание титана и железа. Хорошо сбалансированный состав обеспечивает этому сплаву преимущества по сравнению со сплавом 718 по склонности к сегрегации, работоспособности при высоких температурах, механической обрабатываемости. Это сплав дисперсионно-твердеющий со сложным механизмом упрочнения и он очень чувствителен к стабильности технологических факторов. Слитки из сплавов 706 и 718 изготавливают обычно по схеме ВИП- ЭШП-ВДП. Наибольший слиток, полученный до сих пор из сплава 706, имел диаметр 610 мм (нужно 915 мм), а из сплава 718 — диаметр 500 мм, тогда как необходимо, по крайней мере, диаметр 685 мм.

1. *Potthast E.* SAARSTAHL's pivotal role in the steamy world of power turbines // *Steel Times.* — 1987, May. — P. 234.
2. *Potthast E.* Material development in forged turbine shafts // *Ibid.* — 1990, June. — P. 313–315.
3. *Wiemann W., Engelke W., Potthast E.* Advanced 2 % CrMoNiWV steel for rotors with enhanced requirements // *The Third Inter. conf. on improved coal fired power plants (EPRI), San Francisco, April 2–4, 1991.*
4. *Wiemann W., Luft H., Potthast E.* HP, IP rotors and HP, LP combination rotors manufactured of advanced 2 % CrMoNiWV steel // *Conf. on materials for combined cycle power plant. — Institute of Metals, Sheffield, 1991.*
5. *Advanced 2 % CrMoNiWV steel for combined rotors / E. Potthast, J. Poppenhager, W. Wiemann, K. H. Mayer // 11th International Forgemasters Meeting, Terni, 1991.*
6. *Development of high strength 9...12 % CrMoV steels for high temperature rotor forgings / C. Berger, E. Potthast, R. Bauer, G. A. Honeyman // Ibid.*
7. *Potthast E., Viswanathan R., Wiemann W.* Advanced 2 % CrMoNiWV steel for combination rotors // *Ibid.*
8. *Potthast E., Schonfeld K. H., Levacher R.* High temperature forgings for power generation engineering // *3 European Workshop on High Temperature Materials, Stuttgart October 25–27, 1995.*
9. *Martensitic 11 % CrMoNiNb steel for turbine rotors in geothermal power stations / K. H. Schonfeld, R. Levacher, M. M. Manning, P. F. Murley // ASTM Symposium. — Forging, 1996, New Orleans.*
10. *EPRI-EUROPE rotor development for an advanced 2 % CrMoNiWV steel for combination rotors / E. Potthast,*

- R. Viswanathan, M. Brandle et al. // 13th International Forgemaster Meeting, Pusan, Korea, October 12–16, 1997.*
11. *Kern T. U., Schonfeld K. H.* Improved 10%CrMoWVNbN steel for gas turbine application — manufacturing and properties // *Ibid.*
12. *The effect of gashing and increased tensile strength on FATT of 2 % CrMoNiWV alloy steel rotor forgings / M. P. Manning, P. F. Murley, K. H. Schonfeld, R. Levacher // Ibid.*
13. *Melting of boron alloyed 10wt % Cr ESR steel for power generation machinery / N. Blaes, K. Langner, M. Maurischat, H. Wagner // Ibid.*
14. *Schonfeld K. H., Wagner H.* Experience in manufacturing and mechanical properties of turbine rotor forging and discs in improved 10 % CrMoWVNbN steel // *Advanced heat resistant steels for power generation, San-Sebastian, Spain, 1998.*
15. *Metallurgical procedure and results melting boron alloyed 10wt % Cr ESR steel for power generation machinery / M. Maurischat, N. Blaes, K. Langner, H. Wagner // Ibid.*
16. *Hanus R. F., Schonfeld K. H.* Transformation of knowledge and technology from research and development to the commercial production of heavy steel casting and forging for power engineering, made of advanced creep resistant steels // *5th International Charles Parsons Turbine Conference, Cambridge UK, July 3–7, 2000.*
17. *Kern T. U., Braendle M., Schonfeld K. H.* The potential of the European 2 % CrMoNiWV rotor forging material for power plant application // *14th International Forgemasters Meeting, Wiesbaden, Germany, September 3–8, 2000.*
18. *Manning M. P., Schonfeld K. H.* Effect of gashing and tempering parameters on FATT of 2 % CrMoNiWV alloy steel rotor forging // *Ibid.*
19. *Gerdes C., Bartsch H.* Steam turbine shafts of combined high pressure (low pressure rotors) // *Ibid.*
20. *Development and qualification of rotor steels for 600 to 650 °C application in COST 501/522 / T. U. Kern, H. Cerjak, K. H. Mayer et al. // Ibid.*
21. *Long-term investigations of specimens of 8 production rotors manufactured of the advanced martensitic 10 % Cr-steels X12CrMo(W)VNbN 101(1) / K. H. Mayer, T. U. Kern, K. H. Schonfeld et al. // Ibid.*
22. *Azuma T., Miki K., Tanaka Y.* Effect of boron on creep strengthening in 12 % Cr heat resistant steel // *Ibid.*
23. *Meyer W., Zeiler G., Bauer R.* Recent developments on 9 to 12 % chromium steel open die forging for steam and gas turbine application at Bohler // *Ibid.*
24. *Manufacturing of 12 % Cr rotor forging for high temperature steam turbines from electro slag hot topped ingot / M. Mikami, K. Morinaka, Y. Okamura et al. // Ibid.*
25. *Development and manufacturing of the new generation of advanced 12 % Cr steel rotor for 630 °C steam temperature / Y. Kagawa, F. Tamura, O. Ishiyama et al. // Ibid.*
26. *Development and trial manufacturing of 9 % CrMoNiVNB steel for combined high pressure and low pressure rotor forging / M. Mikami, K. Morinaka, K. Nakata et al. // Ibid.*
27. *Superalloy 706 forgings for land based turbines / T. Shibata, T. Takahashi, J. Taira, T. Kure // Ibid.*
28. *Thamboo S. V., Yang L., Schwant R. C.* Large forging of alloy 706 and alloy 718 for land based gas turbines // *Ibid.*

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 13.06.2001