



## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК ДЛЯ СВАРКИ УГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

**В. Н. ШЛЕПАКОВ**, д-р техн. наук, **Ю. А. ГАВРИЛЮК**, **А. С. КОТЕЛЬЧУК**, кандидаты техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрено современное состояние разработки порошковых проволок для сварки углеродистых и низколегированных сталей. Приведены основные характеристики сварочных порошковых проволок, которые разработаны в ИЭС им. Е. О. Патона в последние годы, а также свойства металла сварного шва и сварных соединений, выполненных этими проволоками. Перечислены рекомендуемые области применения этих проволок.

*Ключевые слова:* электродуговая сварка, порошковая проволока, низкоуглеродистые и низколегированные стали, состояние разработок, области применения

За последнее десятилетие механизированная и автоматизированная сварка порошковой проволокой стала основной альтернативой ручной дуговой сварке штучными покрытыми электродами и механизированной сварке проволокой сплошного сечения в защитных газах. Увеличение потребления сварочных порошковых проволок в развитых странах обусловлено объективными технико-экономическими преимуществами, такими, как высокая производительность, отличные оперативные характеристики, стабильное качество и гарантированные механические свойства швов при сварке сталей различного назначения. Обобщенные показатели объемов производства и применения сварочных порошковых проволок оцениваются на уровне 11 % в странах Западной Европы, 19 % в США, 27 % в Японии и свыше 36 % в Республике Корея. Основными областями их применения являются судостроение, сооружение буровых платформ, производство конструкций и строительство мостов, изготовление резервуаров и котлов, промышленное и транспортное машиностроение.

Относительно распределения объемов потребления проволок по классам прочности сталей эксперты дают следующие оценки. Доля проволок для сварки сталей с пределом текучести до 500 МПа составляет 92 %, низколегированных сталей с пределом текучести свыше 500 МПа — 4 %, сталей, предназначенных для эксплуатации при низких температурах, — около 2 %. Доля сталей, устойчивых против атмосферной коррозии, а также прочих специализированных сталей составляет остальное. Заметными темпами развивается потребление порошковых проволок для сварки нержавеющей сталей.

Развитию и применению сварки порошковыми проволоками способствовало создание современной технологии их изготовления, отвечающей международным стандартам качества. Цель настоящей статьи — представить результаты последних разработок отечественных порошковых проволок, а также области их эффективного применения.

**Металлургические, технические и технико-экономические характеристики сварочных порошковых проволок.** Сварочные порошковые проволоки принято разделять на классы в зависимости от того, требуется ли обеспечивать дополнительную газовую защиту расплавленного металла (газозащитные) или в этом нет необходимости (самозащитные). Соответственно по составу сердечника порошковые проволоки разделяют на газозащитные — рутиловые, основные и «metal-core» (с металлическим типом сердечника); самозащитные — карбонатно-флюоритные, оксидно-фторидные и пр. По назначению порошковые проволоки классифицируют на проволоки общего и специализированного назначения (в частности, проволоки для сварки с принудительным формированием шва).

Металлургические преимущества порошковых проволок главным образом заключаются в сравнительно легкой и гибкой адаптации свойств проволоки к составу и свойствам свариваемой стали, в обеспечении возможности управления тепловложением при сварке. Применение специальной обработки компонентов сердечника проволоки, обработки ее поверхности, а также нанесение защитного покрытия позволяет добиться стабильно низкого уровня содержания диффузионного водорода в металле шва ниже  $5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  [1].

Технологические преимущества порошковых проволок обеспечиваются высокой стабильностью горения дуги, малым разбрызгиванием электродного металла, благоприятной формой швов при сварке в различных пространственных поло-

жениях. Применение самозащитных порошковых проволок в полевых и монтажных условиях обеспечивает простоту ведения процесса сварки, маневренность, которые обусловлены отсутствием необходимости организации дополнительной защиты расплавленного металла. Кроме того, благодаря специальной конструкции оболочки и композиции сердечника самозащитные порошковые проволоки в сравнении с газозащитными имеют более высокую эффективность защиты расплавленного металла при сварке на открытых площадках под воздействием ветровых потоков.

Технико-экономические преимущества порошковых проволок главным образом заключаются в высокой производительности плавления, которая обусловлена высокой плотностью тока, а также дополнительным присадочным материалом сердечника (железным порошком). Производительность плавления порошковых проволок с металлическим сердечником достигает 7,2...9,6 кг/ч. Дополнительный аспект — экономия энергии и затрат тепла, которые оцениваются на уровне 0,5...0,9 кВт·ч/кг наплавленного металла (рис. 1), если сравнивать сварку порошковыми проволоками со сваркой проволокой сплошного сечения. При использовании порошковых проволок достигается более равномерное радиальное проплавление металла [2–4].

Санитарно-гигиенические свойства современных порошковых проволок находятся на уровне свойств проволок сплошного сечения (особенно это относится к порошковым проволокам рутилового типа и проволок типа «metal-core»).

Классификационные требования и показатели свойств порошковых проволок для сварки сталей различных классов, а также технические требования к порошковым проволокам унифицированы в международных стандартах ISO 17632:2004, ISO 17633:2004, ISO 18276:2005, Евростандарте EN 758 и национальных стандартах AWS, DIN, JIS, ГОСТ, ДСТУ и др.

Большинство мировых производителей использует технологию изготовления порошковых проволок из холоднокатаной ленты. При этом собственно изготовление проволоки осуществляется на одной технологической линии, которая включает агрегат формовки оболочки проволоки (различных конструкций) из стальной ленты с непрерывным заполнением смесью порошков сформованного профиля и многократный волочильный стан, где осуществляется редуцирование проволоки до готового размера.

Преимуществами такой технологии является малое количество оборудования и персонала, низкие энергозатраты, возможность изготовления проволок очень широкой номенклатуры с быстрой перестройкой производства (высокая оперативность производства). Эта технология реализована с различными способами редуцирования заготовок и зак-

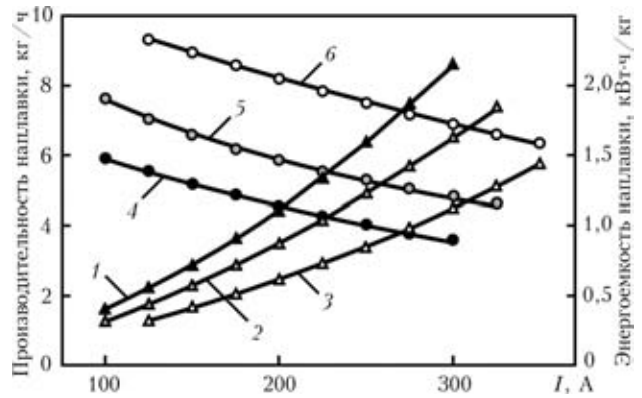


Рис. 1. Типичные показатели производительности (1–3) и энергоёмкости (4–6) наплавки при использовании порошковых проволок и проволок сплошного сечения диаметром 1,2 мм для механизированной сварки: 1, 4 — порошковая проволока с металлическим; 2, 5 — то же с рутиловым сердечником; 3, 6 — проволока сплошного сечения

лючительной обработкой сформованной проволоки. Изготовление порошковой проволоки из трубной заготовки (бесшовной) требует большего количества технологических переделов, что соответственно увеличивает затраты на производство.

Полный цикл технологии изготовления порошковой проволоки при всех схемах включает ряд подготовительных, промежуточных, вспомогательных и заключительных операций, играющих важную роль в получении качественного продукта производства. Готовая порошковая проволока поставляется в соответствии со стандартизированными методами намотки и упаковки (рядная намотка на катушки или провололочные каркасы или в контейнеры типа «Marathon» по стандарту EN 759). Система обеспечения качества (стандарты ISO) предусматривает использование сквозной инспекции со строгим документированием процедур. Этим обусловлено широкое применение современной техники управления, привлечение квалифицированного персонала, хорошее аналитическое оснащение производства. В частности, на ГП «Опытный завод сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона» используют приборы непрерывного контроля и мониторинга заполнения проволоки для осуществления контрольно-измерительных функций и документирования (рис. 2).

**Порошковые проволоки для сварки в защитных газах.** В последние годы в ИЭС им. Е. О. Патона в соответствии с европейским стандартом EN 758 и ДСТУ (ГОСТ) 26271 разработаны порошковые проволоки нового поколения марок ПП-АН59, ПП-АН63, ПП-АН69 с рутиловым типом сердечника, предназначенные для сварки углеродистых и низколегированных сталей массового назначения, а для сварки высокопрочных низколегированных сталей — ПП-АН61, ПП-АН67. Эти проволоки имеют трубчатую конструкцию и выпускаются диаметрами от 1,2 до 2,0 мм.



Рис. 2. Прибор контроля заполнения шихтой формуемой оболочки порошковой проволоки двухслойной конструкции на агрегате формовки (ГП «Опытный завод сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона»)

Основу мирового рынка составляют проволоки для сварки в углекислом газе или смеси  $Ar + CO_2$  сталей с пределом текучести от 400 до 500 МПа. Созданы проволоки для сварки низколегированных сталей, устойчивых против атмосферной коррозии и эксплуатирующихся при пониженных температурах. С каждым годом возрастают объемы применения проволок для сварки сталей с пределом текучести до 700 МПа и выше.

Расширение применения проволок с металлическим сердечником связано с развитием автоматизированных и роботизированных процессов сварки. Новые проволоки, обеспечивающие хорошую форму швов, малое количество брызг и аэрозолей, пригодны для сварки во всех пространственных положениях. Для автоматизированной и роботизированной сварки в судостроении и машиностроении разработаны проволоки ПП-АН70, ПП-АН70М, ПП-АН72, ПП-АН74 с металлическим сердечником, которые демонстрируют более высокие сварочно-технологические свойства, чем проволока Св-08Г2С. Некоторые характеристики этих порошковых проволок приведены в табл. 1. Производство указанных порошковых проволок освоено на ГП «Опытном заводе сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона».

Газозащитные порошковые проволоки трубчатой конструкции марок ПП-АН61, ПП-АН63, ПП-АН72 и ПП-АН74 предназначены для полуавтоматической сварки, а ПП-АН70М, кроме того, — для автоматической (роботизированной) сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Проволоки марок ПП-АН70М, ПП-АН72, ПП-АН74 — проволоки типа «metal-core». При сварке этими порошковыми проволоками для защиты ре-

комендуют использовать газовую смесь  $Ar + CO_2$  (80 + 20 %). При сварке проволоками марок ПП-АН61 и ПП-АН63 в качестве защитного газа можно использовать  $CO_2$  или газовую смесь  $Ar + CO_2$ .

Основные области применения порошковых проволок нового поколения для сварки в защитных газах следующие. Проволоку марки ПП-АН61 используют при изготовлении железнодорожных вагонов, в автомобилестроении, при изготовлении оборудования, предназначенного для эксплуатации в условиях высоких переменных нагрузок и абразивного износа, для сварки сосудов и металлоконструкций различного назначения, а также в судостроении; проволоку марки ПП-АН63, ПП-АН72 и ПП-АН74 — для сварки во всех пространственных положениях в судостроении, строительстве и изготовлении металлоконструкций; проволоку марки ПП-АН70М — при сварке в нижнем положении и на горизонтальной плоскости при выполнении заполняющих швов в машиностроении и изготовлении транспортных средств и металлоконструкций.

#### Самозащитные порошковые проволоки.

Разработкой и производством самозащитных порошковых проволок в промышленных масштабах занимались преимущественно в США и странах СНГ. За последние два десятка лет номенклатура выпуска (по количеству марок) сократилась в результате снижения объемов производства проволок с ненадежными технологическими характеристиками. Интерес мирового рынка к этому классу проволок сохраняется на достаточно высоком уровне. Особенно это касается строительно-монтажных работ (строительство трубопроводов, резервуаров, металлургических агрегатов, мостовых переходов, промышленное строительство, судостроение). Основа производства — это проволоки для сварки сталей с пределом текучести 400...500 МПа. Отдельную группу составляют проволоки для сварки трубопроводов. В ИЭС им. Е. О. Патона, кроме широкоизвестных проволок двухслойной конструкции, созданы также трубчатые самозащитные порошковые проволоки малого диаметра с сердечником фторидно-основного типа. Композиция сердечника позволяет снизить содержание кремния и алюминия в металле шва и обеспечивает требуемую ударную вязкость сварных соединений при низких температурах.

Важной подгруппой этого класса проволок являются проволоки для сварки с принудительным формированием шва (электрогазовая сварка). В настоящее время наблюдается увеличение потребности в таких проволоках в странах СНГ, в частности, России. Основными потребителями являются строители мостов, резервуаров, металлургических комплексов. Налаживается работа комплексов сварки труб «Стык» нового поколения (рис. 3).

Т а б л и ц а 1. Классификационные характеристики и свойства порошковых проволок для сварки в защитных газах

Марка проволоки	Классификация по ГОСТ 26271, EN 758 и AWS	Диаметр, мм	Система легирования, мас. %	Гарантируемые механические свойства					
				$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	Соответствие требованиям $KCV_{min} = 35$ Дж/см <sup>2</sup> при температуре, °С		
							-20	-30	-40
ПП-АН61	ПГ-49-А4У Т46 4Z РСМ1 Н5 Е81Т1-К2	1,2	0,06 С	490	580	20	Да	Да	
		1,4	1,3 Мn						
		1,6	0,4 Si						
		2,0	1,6 Ni						
ПП-АН63	ПГ-44-А2У Т42 2РС1 Н10 Е71-Т1	1,2	0,07 С	440	530	22	Да		
		1,4	1,3 Мn						
		1,6	0,4 Si						
		2,0							
ПП-АН67	ПГ-59-А3В5 Т59 3 РС1 Н5 Е71-Т1	1,2	0,08 С	590	650	18	Да		
		1,4	1,2 Мn						
		1,6	0,4 Si						
		2,0	1,2 Ni 0,3 Cr 0,3 Мо						
ПП-АН70М	ПГ-44-А3В Т42 2 МС3 Н5 Е71-Т1	1,2	0,08 С	420	540	22	Да		
		1,4	1,4 Мn						
		1,6	0,5 Si						
		2,0							
ПП-АН72	ПГ-48-А3В Т48 5 МС1 Н5 Е71-Т1	1,2	0,08 С	480	540	24		$KCV_{min} = 47$ Дж/см <sup>2</sup>	
		1,4	1,0 Мn						
		1,6	0,3 Si 2,2 Ni						
ПП-АН74	ПГ-59-А3В Т59 5РС1 Н10 Е71-Т1	1,2	0,06 С	590	680	24		То же	
		1,4	1,3 Мn						
		1,6	0,4 Si 2,5 Ni 0,4 Мо						

В табл. 2 и 3 приведены характеристики некоторых самозащитных порошковых проволок, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона. Самозащитные порошковые проволоки двухслойной конструкции ПП-АН3 и ПП-АН7 предназначены для полуавтоматической сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей толщиной более 5 мм. Проволока ПП-АН3 применяется при сварке дорожно-строительных машин, промышленного оборудования, металлоконструкций сооружений, а проволока ПП-АН7 — при сварке промышленного оборудования, в транспортном машиностроении, при строительстве прибрежных конструкций, а также ремонте промышленного оборудования (рис. 4).

Самозащитная порошковая проволока трубчатой конструкции ПП-АН60 рекомендуется для полуавтоматической сварки во всех пространственных положениях при изготовлении технологического оборудования, транспортных и грузоподъемных устройств, сооружений буровых платформ и строительных конструкций.

Самозащитная порошковая проволока двухслойной конструкции ПП-АН19Н, предназначенная для автоматической электрогазовой сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей толщиной от 8 до 32 мм, главным образом применяется в процессе сварки вертикальных сты-

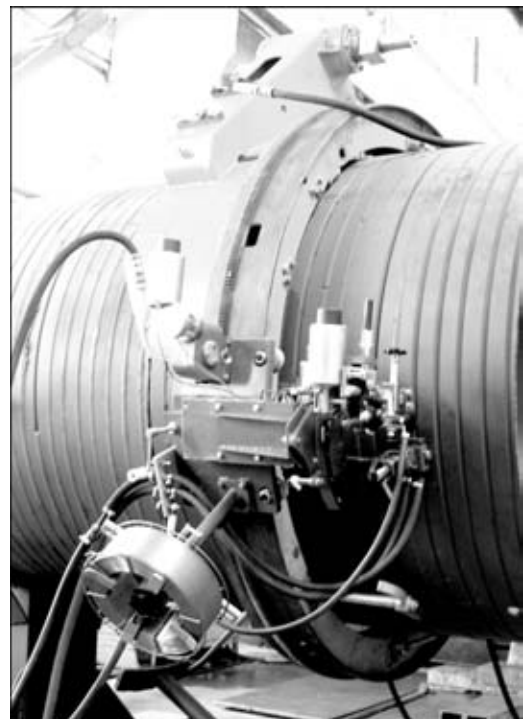


Рис. 3. Сварочный аппарат комплекса «Стык» нового поколения для автоматизированной электродуговой сварки порошковой проволокой с принудительным формированием шва неповоротных стыков труб большого диаметра (производитель — ОАО «Каховский завод электросварочного оборудования»)



Таблица 2. Классификационные характеристики и свойства наплавленного металла, выполненного самозащитными порошковыми проволоками

Марка проволоки	Классификация по ГОСТ 26271, EN 758 и AWS	Диаметр, мм	Система легирования, мас. %	Гарантируемые механические свойства наплавленного металла					
				$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	Соответствие требованиям $KCV_{min} = 35$ Дж/см <sup>2</sup> при температуре, °С		
							-20	-30	-40
ПП-АН3	ПС-44-А3Н Т42 3ZS3 Н10 Е70-TG	2,8; 3,0	0,09С 1,2Mn 0,35Si	440	560	22		Да	
ПП-АН7	ПС-44-А3В Т42 3ZS3 Н10 Е71-TG	2,4	0,08С 1,1Mn 0,35Si	440	540	22		»	
ПП-АН60	ПС-49-А3В Т49 3ZS3 Н10 Е71-TG	1,2; 1,4; 1,6	0,08С 1,1Mn 1,3Ni 0,8Al	490	590	22			Да

Таблица 3. Классификационные характеристики и свойства специализированных самозащитных порошковых проволок

Марка проволоки	Классификация по ГОСТ 26271, EN 758 и AWS	Диаметр, мм	Система легирования, мас. %	Гарантируемые механические свойства наплавленного металла					
				$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	Соответствие требованиям $KCV_{min} = 35$ Дж/см <sup>2</sup> при температуре, °С		
							-20	-30	-40
ПП-АН19Н	ПС-39-А2(Р)ВП Т42 2Z S3 H5 EG72-TG	2,4; 3,0	0,09С 1,4Mn 0,4Si 0,5Ni	390	520	22	Да		
ПП-АН30	ПС-54-А3УП — соответствует Е81-TG	2,4	0,07С 1,7Mn 0,5Si 0,4Mo 0,07V	540	630	18			Да
ПП-АН30ВС	ПС-57-А3УП — соответствует Е91-TG	2,0; 2,4	0,07С 1,7Mn 0,5Si 0,6Ni 0,5Mo	570	690	18			$KCV_{min} =$ $= 47$ Дж/см <sup>2</sup>



Рис. 4. Ремонтная сварка порошковой проволокой ПП-АН7 металлургического оборудования на ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф. Э. Дзержинского», г. Днепропетровск [5]

ковых соединений способом снизу вверх при изготовлении различных металлоконструкций, включая суда, корабли и баржи, пролетные строения мостов, резервуары и бункера (рис. 5).

Самозащитные порошковые проволоки двухслойной конструкции ПП-АН30 и ПП-АН30ВС разработаны для автоматической монтажной сварки стыковых соединений труб диаметром от 520 до 1420 мм с использованием принудительного формирования шва (электрогазовый процесс). Проволоку ПП-АН30ВС можно применять для сварки стыковых соединений труб из низколегированных сталей класса прочности Х80.

В заключение следует отметить, что интенсивное развитие рынка потребления порошковых проволок свидетельствует о перспективности создания современных производств этого вида сварочного материала. Предпочтение отдают производству проволок с лучшими оперативными характеристиками, малыми потерями металла на разбрызгивание и малым выделением сварочного аэрозоля. При выборе программ производства необходимо учитывать структуру мирового потребления, в котором наибольшие объемы занимают проволоки малых диаметров для сварки сталей



Рис. 5. Сварка порошковой проволокой ПП-АН9Н с принудительным формированием вертикальных стыковых швов пролетных конструкций Подольско-Воскресенского мостового перехода через р. Днепр в г. Киеве

массового применения и сталей повышенной прочности. Благодаря успешному выполнению инновационного проекта, инициированного Национальной академией наук Украины, путем модернизации оборудования и усовершенствования технологического процесса на ГП «Опытный завод сварочных материалов ИЭС им. Е. О. Патона» достигнут уровень производства порошковых проволок, который отвечает современным требо-

ваниям обеспечения качества продукции. По техническим показателям и качеству порошковые проволоки новой номенклатуры соответствуют международным стандартам и конкурентоспособны на мировом рынке. В то же время технология их производства позволяет ориентироваться преимущественно на сырьевую базу Украины.

1. *Походня И. К.* Металлургия дуговой сварки конструкционных сталей и сварочные материалы // Автомат. сварка. — 2008. — № 11. — С. 63–75.
2. *Шлепаков В. Н.* Современные методы исследования, прогнозирования и оценки свойств сварочных порошковых проволок // Тр. III Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ «Сварочные материалы. Разработка. Технология. Производство. Качество». — Днепропетровск, 2004. — С. 27–31.
3. *Шлепаков В. Н., Наумейко С. М.* Самозащитные порошковые проволоки для сварки низколегированных сталей // Автомат. сварка. — 2005. — № 4. — С. 31–33.
4. *Влияние состава сердечника порошковой проволоки и защитного газа на стабильность процесса дуговой сварки* / В. Н. Шлепаков, А. С. Котельчук, С. Н. Наумейко, А. В. Билинец // Там же. — 2005. — № 6. — С. 18–22.
5. *Механізоване ремонтне зварювання порошковым дротом агрегатів металургійного комплексу* / В. М. Шлепаков, В. М. Ігнатюк, О. С. Котельчук, Ю. М. Гитин // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. — К.: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ, 2006. — С. 520–526.

State-of-the-art of development of flux-cored wires for welding carbon and low-alloyed steels is considered. The main characteristics of flux-cored welding wires, developed at the E. O. Paton Electric Welding Institute over the recent years are given, as well as the properties of the metal of welds and welded joints made with these wires. Recommended applications of these wires are listed.

Поступила в редакцию 16.11.2009

**Труды VI Международной конференции «Лучевые технологии и применение лазеров» / Под ред. проф. Г. Туричина, 23–25 сент. 2009 г., Санкт-Петербург. — Спб., Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 430 с.**

Книга содержит труды VI Международной научно-технической конференции «Лучевые технологии и применения лазеров», включающие последние достижения в области физических основ и математического моделирования лучевых технологий: лазерной сварки, перфорации, резки и других современных процессов лазерной обработки материалов. Авторами статей являются известные специалисты со всего мира.

**Книга содержит следующие разделы:**

- ✓ физические основы лучевых технологий (9 докладов),
- ✓ нанопотоника (4 доклада),
- ✓ математическое моделирование лучевых технологий (15 докладов),
- ✓ технологии резки, перфорации, маркировки, гравировки и очистки (11 докладов),
- ✓ технологии сварки, пайки наплавки и прототипирования (21 доклад),
- ✓ оборудование для лучевых технологий (8 докладов),
- ✓ контроль качества и безопасность (2 доклада),
- ✓ применение лазеров в медицине (4 доклада),
- ✓ экономические аспекты лазерных и лучевых технологий (1 доклад).

