

ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ МЕТАЛЛУРГИИ ГРАНУЛ

Александр Германович БЕРЕСНЕВ родился в 1961 г. в городе Перми. Генеральный директор ОАО «Композит». Кандидат технических наук. Основные научные интересы — в области структурных механизмов разрушения конструкционных материалов. Автор 35 научных работ.

Alexander G. BERESNEV, Ph.D., was born in 1961 in Perm. He is the Director General at the «Composite» Public Corporation. His research interests are in structural destruction mechanisms for constructional materials. He has published 35 technical papers.

Александр Вячеславович ЛОГУНОВ родился в 1940 г. в городе Москве. Главный специалист ОАО «Композит». Доктор технических наук, профессор, лауреат Ленинской премии. Основные научные интересы — в области материаловедения и технологии жаропрочных материалов. Автор более 260 научных работ.

Alexander V. LOGHUNOV, D.Sci., was born in 1940 in Moscow. He is a Chief Specialist at the «Composite» Public Corporation. His research interests are in material science and technology of high-temperature materials. He has published over 260 technical papers.

Алла Игоревна ЛОГАЧЕВА родилась в городе Кольчугино Владимирской области. Начальник отдела ОАО «Композит». Основные научные интересы — в области разработки жаропрочных гранулированных и интерметаллидных сплавов. Автор 30 научных работ.

Alla I. LOGHACHIOVA, was born in the Vladimir Region. She is the Head of a Department at the «Composite» Public Corporation. Her research interests are in development of high-temperature granulated and intermetallic alloys. She has published 30 technical papers.

В работе обсуждаются основные направления развития металлургии гранул жаропрочных никелевых сплавов, обеспечивающие повышение качества и стабильности эксплуатационных характеристик получаемых материалов на этапах производства гранул; их засыпки, уплотнения и герметизации в капсулах; сепарации, рассева, газостатического уплотнения капсул и деформации, проводимой с использованием новых штамповых материалов на основе хрома.

Жаропрочные никелевые сплавы, созданные в 40-х годах прошлого века, и сегодня остаются основными материалами для производства наиболее ответственных деталей газотурбинных и ракетных двигателей, а также установок для газоперекачки, энергетики и др.

Постоянное повышение жаропрочности и связанное с этим усложнение состава сплавов привело к тому, что получение из них заготовок дисков, валов и других деталей оказалось весьма проблематичным.

Гранульная металлургия явилась той технологией, которая обеспечила надежное изготовление заготовок из деформируемых никелевых жаропрочных сплавов с уровнем кратковременной прочности $\sigma_B^{20} \geq 1400$ МПа.

Детали, полученные гранульной металлургией, успешно работают в газотурбинных двигателях 4-го поколения, и в настоящее время они активно применяются в силовых установках самолетов и ракет,

газоперекачивающих установках и других высоконагруженных машинах.

Технология гранульной металлургии обеспечила:

- минимальную дендритную и зональную ликвацию, что в свою очередь позволило реализовать высокий уровень равномерности механических характеристик во всех объемах деталей;
- существенное улучшение деформируемости материалов (при этом в ряде технологических процессов деформировать материал не требуется, поскольку возможным становится получение деталей окончательных размеров — изготовление нетто-деталей весьма сложной конфигурации);
- лучшую обрабатываемость механическим инструментом, что существенно снизило трудозатраты, связанные с производством двигателей;
- возможность получать целиком сложные узлы, ранее изготавливавшиеся из отдельных деталей, которые затем соединяли сваркой или другими спо-

собами. При этом различные элементы указанных узлов могут быть выполнены из разных, наиболее отвечающих их функциональному назначению, материалов.

Успехи гранульной металлургии оказались столь впечатляющими, что в настоящее время создание новых газотурбинных двигателей, установок и других изделий в значительной мере связано с применением этой эффективной технологии. Вместе с тем ее успешное использование требует решения ряда проблем, влияющих на уровень получаемых эксплуатационных характеристик.

Основными элементами технологии гранульной металлургии являются следующие:

- распыление жидкого сплава (металла) или его диспергирование;
- рассев гранул;
- сепарация и очистка гранул от металлических и неметаллических включений;
- дегазация гранул, засыпка и их герметизация в капсулах;
- компактирование, штамповка и прессование.

Цель настоящей работы — поэтапный анализ каждого из этих элементов и выявление технологических возможностей повышения качества изготавливаемого продукта.

1. Получение гранул

В настоящее время в практике используются два способа получения гранул (рис. 1 и 2):

- газоструйное распыление жидкого металла;
- центробежное плазменное распыление быстровращающегося электрода.

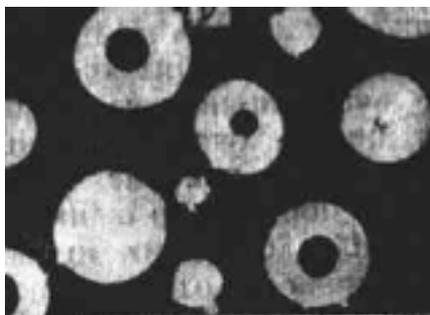


Рис. 1. Гранулы газоструйного распыления

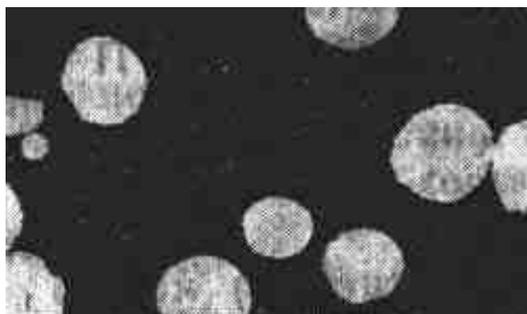


Рис. 2. Гранулы центробежного распыления

Как известно, при газоструйном распылении жидкий металл получают путем расплавления в керамическом тигле индукционной печи. И хотя сегодня существуют эффективные методы фильтрации жидкого металла, позволяющие заметно снизить в нем содержание неметаллических включений, все-таки их содержание в получаемых гранулах оказывается выше, чем в случае плазменного распыления вращающегося электрода, при производстве которого используют двойной вакуумный переплав (ВИ + ВДП, ВИ + ЭШП, ВИ + ЭЛП), табл. 1 [1].

Таблица 1

Количество неметаллических включений в гранулах при различных технологиях выплавки

Технология выплавки	ВИ	ВИ + ВДП	ВИ + ЭШП	ВИ + ЭЛП
Количество неметаллических включений, шт/кг	153-328	84-136	60-81	32-38

Кроме того, при распылении жидкого металла в аргоне он захватывается образующимися гранулами в результате захлопывания разлетающихся капель, что приводит к образованию внутригранульной пористости, отрицательно влияющей на механические характеристики скомпактированного материала. Поэтому при такой схеме особенно важным является использование мелких гранул, которые имеют существенно меньшую пористость. Однако использование более мелких гранул приводит к снижению выхода годного материала и к удорожанию процесса.

Для получения гранул используется технология центробежного распыления плазмой быстровращающегося электрода на установках УЦР (рис. 3).



Рис. 3. Установка центробежного распыления УЦР- 4

Установка обеспечивает вращение электрода со скоростями до $18 \cdot 10^3$ об/мин. Для достижения таких скоростей необходимо предварительно подготавливать поверхности электродов. Такие скорости позволяют получать не менее 50 % гранул размером не более 105 мкм, что в целом соответствует мировым показателям. Получаемые гранулы (рис. 4) имеют сферическую поверхность. На некоторых гранулах (рис. 5) видны выходящие на поверхность керамические частицы, не превышающие по размеру 10 мкм. Проведенный анализ показал, что реальное количество керамических частиц в гранулах не превышает 4—6 шт./кг.

Как известно, основными вредными компонентами в гранульных материалах являются неметаллические включения и кислород.

Для снижения концентрации кислорода в ОАО «Композит» разработаны и реализованы следующие технологические приемы:

- так же, как и в ВИЛСе, в ОАО КБХА осуществляется прогрев в процессе вакуумирования стенок камеры, предварительно очищенной от возгонов горячей водой, имеющей температуру 80—90°C, что позволило заметно снизить уровень влаги в атмосфере распыления камеры УЦР и уменьшить остаточную концентрацию кислорода на 20—30%. При этом отличием от уже существующих систем является использование стандартных водонагревателей, которые не только имеют высокие показатели по скорости и температуре нагрева, но и позволяют автоматизировать данный процесс;

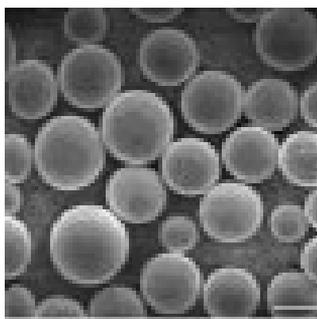


Рис. 4. Гранулы сплава ЭП741НП

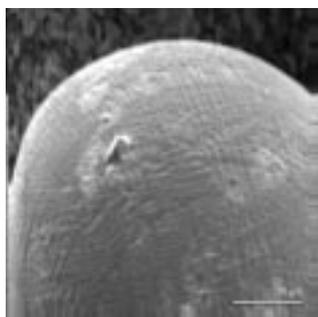


Рис. 5. Гранула с внутренней керамической частицей

- дополнительная очистка остаточной атмосферы в камере от примесей кислорода и влаги путем распыления при сравнительно небольших оборотах первого электрода. При этом окисленные в результате взаимодействия с остатком кислорода и влаги первые фракции гранул выводятся из установки.

Остаточное содержание кислорода в полученных заготовках составляет 0,001—0,004 %, что существенно меньше 0,007%, установленных техническими условиями.

Этому способствуют, кроме перечисленных выше, следующие мероприятия:

- реализация двойного вакуумного переплава при производстве слитков-электродов;
- доработка вакуумной системы установки центробежного распыления;
- снижение концентрации адсорбированного поверхностями гранул кислорода путем их термической дегазации в вакууме перед засыпкой в капсуле.

Изготовление электродов по схеме (ВИ+ВДП) обеспечивает значительное повышение их качества — содержание азота снижается в 1,2 раза, а кислорода — в 2,3 раза. Поэтому такая схема выплавки слитков-электродов в настоящее время принята в ОАО «Композит» в качестве основной.

В установке УЦР используется плазматрон коаксиального типа мощностью 100 кВт марки ПСМ-100. Источником питания плазматрона служат управляемые тиристорные выпрямители ВДУ-1203У3. Опыт эксплуатации плазматрона показал, что в наиболее тяжелых условиях работает медное сопло плазматрона, так как на нем выделяется 30—35% потребляемой мощности. Удельные тепловые потоки на канале сопла плазматрона, имеющего ограниченные размеры, могут быть настолько велики, что их не может отвести самое интенсивное охлаждение. Это приводит к эрозии сопла, выносу частиц меди и её паров в рабочую камеру и их попаданию в распыляемые гранулы. Медь является вредной примесью для большинства никелевых сплавов. Наибольший износ, сопровождающийся выбросом частиц меди, происходит при неустойчивом горении дуги и скачках тока, что наблюдается в процессе пуска плазматрона или при неблагоприятном составе смеси аргона с гелием.

Для исключения попадания меди в распыляемые гранулы проведена модернизация конструкции сопла плазматрона на основе опыта эксплуатации плазменных пушек, применяемых в технологических процессах производства ЖРД малой тяги (нанесение тугоплавких покрытий на стенки камер сгорания ЖРД).

Для этого в сопло плазмотрона были установлены тугоплавкие вкладыши. Применение молибденовых и вольфрамовых вкладышей обеспечивает:

- существенное уменьшение эрозии, поскольку температура плавления этих металлов превышает температуру плавления меди в 2,5—3 раза;

- практическое отсутствие вредного влияния эродировавших частиц молибдена и вольфрама при попадании их в гранулы, поскольку эти элементы входят в состав распыляемого сплава.

Внутренняя поверхность молибденового вкладыша повторяет профиль медного сопла. Внутренняя поверхность вольфрамового вкладыша выполнена в виде конических поверхностей, сопряженных в узком сечении с цилиндрической поверхностью. Эта конструкция улучшила аэродинамику плазмообразующих газов в сопле (в значительной степени позволила исключить турбулентность) и как следствие стабилизировала процесс образования плазмы.

Установка вкладышей позволила повысить выход мелкой фракции гранул вследствие увеличения температуры плазменного потока при том же энергопотреблении, как и у медного сопла. Рост температуры плазмы уменьшает вязкость расплавляемого материала (в частности сплава ЭП741НП), при этом также повышается производительность — быстрее происходит расплавление электрода (заготовки).

Было изготовлено несколько партий медных сопел с вкладышами из молибдена и вольфрама (рис. 6). Испытания показали, что сопла с молибденовой вставкой наиболее целесообразно применять при получении гранул из жаропрочных сплавов на никелевой основе, а вставки из вольфрама эффектив-



Рис. 6. Общий вид сопла плазмотрона с вставкой из тугоплавкого металла

ны при распылении интерметаллидов и титановых сплавов.

Для повышения стабильности поддержания температуры плазмы в пристеночном слое сопла предусмотрено устройство для обеспечения постоянного расхода воды в системе проточного охлаждения сопла с вкладышем.

2. Сепарация и рассев гранул

Способ центробежного распыления быстровращающегося электрода позволяет получать гранулы с широким разбросом фракционного состава. Для основной области применения гранул в качестве исходного материала для компактных заготовок-деталей важно обеспечить прогнозируемую плотность засыпки. Это позволяет получать детали сложной формы с гарантированной геометрией и уровнем механических свойств. Очень важно также правильно проводить рассев гранул.

Указанная операция является ответственной частью всей технологической цепочки производства гранульных заготовок и одним из наиболее эффективных этапов, обеспечивающих резкое снижение содержания керамических и металлических включений. Она осуществляется на установках рассева и магнитной сепарации (УРиМС) и электростатической сепарации (СЭС). В установке УРиМС производится рассев гранул и их классификация, а также сразу проводится магнитная сепарация. Для проведения магнитной сепарации были разработаны специальные магнитные системы с учетом проведения этой операции с гранулами менее 40 мкм. Работы проводились в ОАО «Композит» совместно с ООО «Магниты и магнитные системы».

Металлические магнитные включения привносятся в гранулы в результате износа быстровращающихся стальных барабанов при контакте с электродом в процессе распыления в УЦР и представляют собой мелкую стальную пыль. Отделение рабочей фракции гранул требуемого размера обеспечивает установка отсева. Группой специалистов ОАО «Композит» разработана установка отсева гранул со встроенными в выходные патрубки магнитными сепараторами (рис. 7). Такая конструкция позволяет совместить в одном рабочем цикле процесс отсева гранул и их магнитную сепарацию, что позволяет повысить производительность процесса и снизить технологические потери гранул.

Достоинством новой установки УРиМС является магнитная сепарация всех фракций гранул (менее 50 мкм, 50—160 мкм, 160—200 мкм). Совмещение отсева и магнитной сепарации снижает безвозвратные потери на 10—15%, что обеспечивает снижение стоимости этих технологических операций.

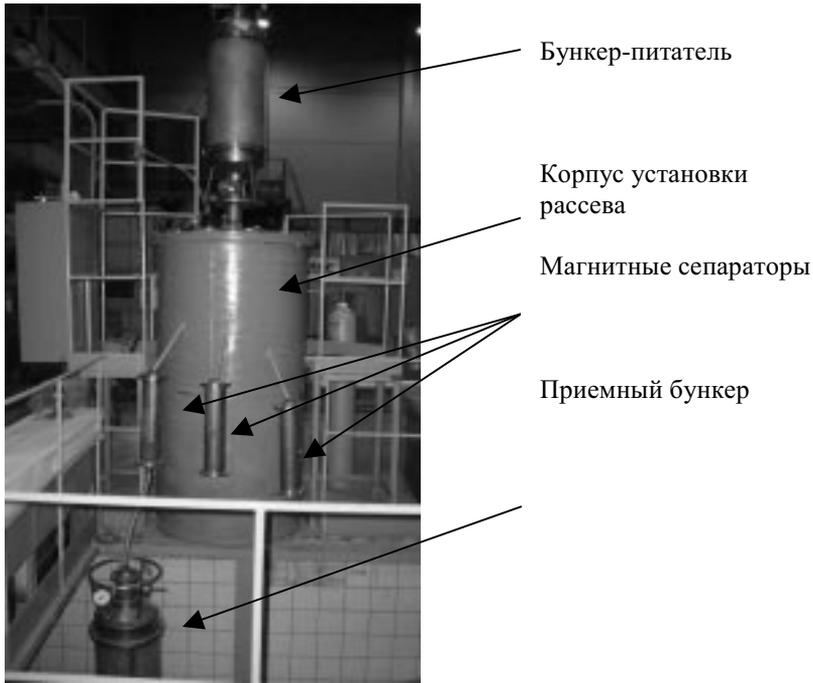


Рис. 7. Внешний вид установки рессева ОАО «Композит»

Установка позволила обеспечить полное отсутствие магнитных частиц в отсепарированных гранулах, что соответствует наилучшим мировым показателям.

Годные гранулы подвергаются электростатической сепарации на установке СЭС, обеспечивающей извлечение до 95 % неметаллических включений. Контроль за проведением данной операции проводится с помощью установки «АСКП», разработанной совместно с институтом прикладной математики им. М.В. Келдыша (рис. 8). В настоящее время в России работают две такие установки.

Таким образом, осуществленные изменения процесса рессева и сепарации гранул позволили су-

щественно улучшить качество получаемых полуфабрикатов, равномерность и стабильность их эксплуатационных характеристик.

3. Засыпка гранул в капсулы и их герметизация

Важное значение с точки зрения получения высокого качества гранульных заготовок и обеспечения наиболее благоприятных условий для их диффузионного сращивания в процессе ГИП имеет термическая дегазация гранул, т. е. удаление адсорбированного на поверхности гранул кислорода путем нагрева их в высоком вакууме ($\sim 10^{-5}$ тор) перед засыпкой в капсулы. Эта операция осуществляется на установке засыпки и герметизации капсул (УЗГК) (рис. 9). В вакуумной установке УЗГК предусмотрено приемное устройство вакуумного

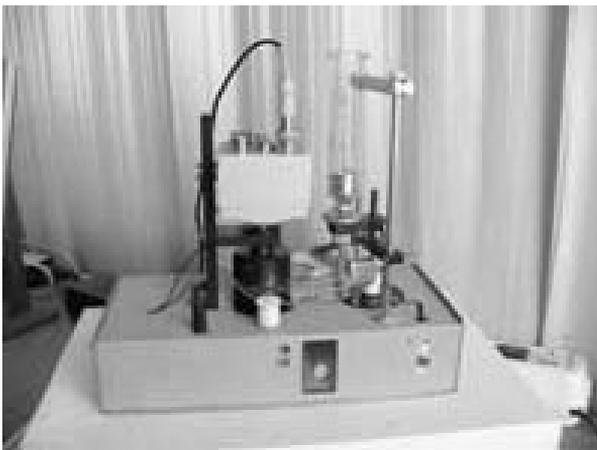


Рис. 8. Установка «АСКП» для определения степени чистоты гранул от инородных включений и вычисления их фракционного состава



Рис. 9. Установка для дегазации гранул, засыпки их в капсулы и заварки

контейнера с гранулами, которые через шлюз по специальному лотку, находящемуся в подогреваемом до 500 °С пространстве, попадают в капсулу. В установке имеется специальное устройство, позволяющее регулировать скорость потока гранул. С целью обеспечения наиболее высокой плотности засыпки гранул предусмотрено специальное механическое виброуплотнение массы гранул в капсуле. Герметизация капсулы осуществляется путем электроннолучевой заварки ее приемного отверстия.

Термическая дегазация гранул, движущихся в потоке в условиях вакуума, обеспечивает заметное снижение содержания в заготовках не только кислорода, но и окиси углерода, азота и других элементов.

4. Газостатическая обработка и деформация в изотермических условиях

Одной из важнейших задач, связанных с производством гранульных заготовок, является проблема создания технологии, обеспечивающей отсутствие образования «наследственных» границ гранул — карбидной, оксикарбидной, оксикарбонитридной сеток, располагающихся на поверхности гранул и в дальнейшем являющихся причиной разрушения заготовок даже в том случае, когда в результате термической обработки образовались новые границы зерен. В указанной ситуации разрушение при испытаниях на кратковременную и длительную прочность происходит не по границам зерен, а по границам прежних гранул, находящихся внутри

— используется двухэтапный процесс газостатического уплотнения капсул и их высокотемпературного прессования в условиях изотермической штамповки.

Имеющееся в ОАО «Композит» оборудование для газостатической обработки позволяет получать высококачественные гранульные заготовки диаметром до 700 мм [2].

Однако еще более ценный комплекс свойств реализуется при использовании технологии (ГИП+ изотермическая деформация). Для реализации процесса изотермической деформации гранульных заготовок необходима разработка новых штамповых материалов с рабочей температурой выше 1200 °С. В ОАО «Композит» при финансовой помощи РФФИ по проекту № 02-03-33036а был получен штамповый материал на основе хрома, работоспособный при температуре выше 1200 °С на воздухе с высокой стойкостью к окислению. Штамп из этого сплава также изготавливают по порошковой технологии, которая позволяет изготовить штамповую оснастку близкую к конечной форме, что существенно снижает трудоемкость его изготовления.

Комплексная технология (ГИП+ изотермическая деформация) обеспечивает не только повышение прочностных показателей, но и, что наиболее важно, характеристик надежности. В частности, ударная вязкость материала при использовании указанной технологии вместо ГИП возрастает на 50%, а малоцикловая усталость с 1000 МПа до 1100 МПа, что видно из табл. 2 [3].

Таблица 2

Механические свойства деформированных дисков из сплава ЭП741 НП (ГИП+ИЗШ)

σ_B^{20} , МПа	$\sigma_{0,2}^{20}$, МПа	$\delta, \%$	$\psi, \%$	KCV, МДж/м ²	Длительная прочность при 650° С		Малоцикловая усталость при 650° С	
					$\sigma_{ГЛ}^{100}$, МПа	$\sigma_{Н}^{100}$, МПа	σ_{-1} , МПа	N, циклов
1500-1530	1100-1130	18-21	17-18	0,6-0,7	1050	1020	1100	>10000
Диски ГИП по ТУ								
≥1450	≥1000	≥15	≥17	≥0,4	≥1020	≥1020	≥1000	≥5000

зерен. Для решения этой проблемы применяются следующие технологические приемы:

- осуществляется строгая регламентация содержания углерода в заготовках для получения гранулированных сплавов на уровне 0,02—0,08 % ;
- создаются условия для предотвращения проникновения в камеру УЦР углеводородов, образующихся в результате крекинга масла в парамасляных вакуумных насосах;

Выводы

Перечисленные мероприятия по комплексному совершенствованию технологии гранульной металлургии и модернизации оборудования для получения и переработки гранул обеспечивают существенное повышение качества заготовок

Следует подчеркнуть, что гранульная металлургия является одной из наиболее эффективных технологий, позволяющих активно использовать в кон-

струкциях современной техники новое поколение деформируемых никелевых жаропрочных сплавов.

Summary

Main development directions are discussed for granular metallurgy of high-temperature nickel alloys. The development provides refinement of produced materials as well as stability increasing for their operational properties. These enhancements are related to various stages of the production cycle including manufacturing of granules; filling, compaction and sealing of granules in capsules; separations, dissemination, gas-static compaction of capsules and deformation by means of new chrome-based stamp materials.

Библиографический список

1. *Гарибов Г.С.* и др. Перспективы производства авиационно-космических материалов и процессы их обработки в начале XXI века // *Технология легких сплавов.* 2002. №4. С.106.
2. *Мусиенко В.Т.* Некоторые итоги разработки технологии производства гранул жаропрочных никелевых сплавов для изготовления изделий авиакос-

мической техники // *Технология легких сплавов.* 2000. №6. С.72.

3. *Фаткуллин О.Х.* и др. Разработка перспективных технологий для жаропрочных никелевых сплавов // *Технология легких сплавов.* 1999. №3. С.53

4. *Гарибов Г.С.* Современный уровень развития порошковой металлургии жаропрочных никелевых сплавов // *Технология легких сплавов.* 2000. №6. С.58.

5. *Голованов В.И., Логачева А.И., Логунов А.В., Разумовский И.М.* Повышение качества жаропрочных сплавов, получаемых методом металлургии гранул: анализ технологических мероприятий // *Труды 4-й международной конференции / МГУ.* М.: Знание, 2005. С. 356-359.

6. *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.

ОАО «Композит»

Статья поступила в редакцию 12.04.2008