

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПОСЛОЙНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ НА КАЧЕСТВО СПЕЧЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЙ

*Н.А. Сапрыкина, к.т.н., доц., А.А. Сапрыкин, к.т.н., доц., Д.А. Архипова, студент  
Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского  
Томского политехнического университета  
652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26, тел. (38451) 6-27-92  
E-mail: saprikina@tpu.ru*

В настоящее время самым инновационным направлением развития современной промышленности являются аддитивные технологии, позволяющие изготавливать сложные функциональные изделия из порошковых материалов на основе 3D CAD-модели [1]. Отличием этих технологий является получение готовой детали не снятием слоя материала с заготовки, а послойным наращиванием материала с одновременным получением заданной формы и размеров изделия [2, 3]. Экономия сырья при использовании данных технологий может достигать 75 процентов. Среди основных проблем использования рассматриваемых технологий в России являются применение импортного оборудования и материалов [4, 5, 6]. Для создания изделий методом послойного лазерного спекания из отечественных порошковых материалов необходимо проведение экспериментов в этом направлении по определению режимов спекания и исследованию их влияния на качество спеченного поверхностного слоя.

В данной работе исследовано влияние технологических режимов спекания: скорости перемещения луча лазера  $V$ , мощности лазера  $P$ , шага сканирования  $S$  и температуры подогрева порошкового материала  $t$  на качество спеченного поверхностного слоя из отечественных порошковых материалов, имеющих разную температуру плавления. Эксперименты проводились на технологическом лазерном комплексе, состоящем из иттербиевого волоконного лазера ЛК-100-В, трехкоординатного стола, системы ЧПУ и оригинального программного обеспечения [7].

Для получения представления о характере поведения порошковых материалов при лазерном спекании в качестве обрабатываемых материалов были выбраны порошковые материалы, имеющие разную температуру плавления и размер.

1. Порошок алюминиевый ПА-4, изготовленный из первичного алюминия путем пульверизации. Доля активного алюминия - 98 %. Температура плавления порошка  $660\text{ C}^0$ . Насыпная плотность,  $0,96\text{ г/см}^3$ . Размер порошка -  $0,07\text{ мм}$ . В настоящее время алюминий и его сплавы применяют во многих областях промышленности и техники. Прежде всего, алюминий и его сплавы используют авиационная и автомобильная отрасли промышленности. Из алюминия и его сплавов изготавливают авиаконструкции, моторы, блоки, головки цилиндров, картеры, коробки передач, насосы и другие детали.

2. Порошок медный стабилизированный ПМС-1, с содержанием меди-99,5%. Интервал температуры плавления порошка  $1030-1070\text{ C}^0$ . Насыпная плотность,  $1,25-1,9\text{ г/см}^3$ . Размер порошка -  $0,07\text{ мм}$ . Порошок применяется в порошковой металлургии для изготовления спеченных изделий, а также в приборостроении [8].

3. Порошок кобальтхроммолибденовый DSK-F75, с содержанием кобальта-66,4%, хрома-28%, молибдена-3%. Интервал температуры плавления порошка  $1350-1450\text{ C}^0$ , насыпная плотность,  $8,4\text{ г/см}^3$ . Размер порошка -  $0,1\text{ мм}$ . Порошок применяется в машиностроении для создания изделий, функционирующих при высоких температурах.

Для обеспечения качества спеченного поверхностного слоя из порошковых материалов, имеющих разный диапазон температуры плавления, изучалось изменение уровня деформаций и толщины спекания в зависимости от режимов спекания [9].

В процессе эксперимента были получены образцы спеченного единичного слоя длиной  $20\text{ мм}$ , шириной  $5$  и  $10\text{ мм}$ . Области технологических режимов послойного лазерного спекания были определены в результате поисковых экспериментов. Для получения образца из порошка ПА-4, обладающего некоторой механической прочностью, рациональными режимами являются:  $P=(10-20)\text{ Вт}$ ,  $V=(1000-3000)\text{ мм/мин}$ ,  $S=(0,1-0,2)\text{ мм}$ ,  $t=(26-200)\text{ C}^0$ . Для медного порошка ПМС-1  $P=(14-30)\text{ Вт}$ ,  $V=(200-3000)\text{ мм/мин}$ ,  $S=(0,1-0,3)\text{ мм}$ ,  $t=(26-200)\text{ C}^0$ . Рациональными режимами для порошка DSK-F75 являются:  $P=(10-20)\text{ Вт}$ ,  $V=(100-300)\text{ мм/мин}$ ,  $S=(0,1-0,15)\text{ мм}$ ,  $t=(26-200)\text{ C}^0$ . Мощность лазерного излучения изменяется в зависимости от температуры плавления порошкового материала и коэффициента температуропроводности, а также формы и размера частиц. Для тугоплавкого порошкового материала DSK-F75, с размером порошка  $0,1\text{ мм}$  характерно увеличение мощности лазерного излучения и уменьшение скорости перемещения луча лазера. Анализ геометрического состояния спе-

ченной поверхности проводился по специально разработанной методике с применением инструментального цифрового микроскопа [10].

На рисунках 1-3 показано влияние мощности лазерного излучения на качество спеченного поверхностного слоя. Недостаток мощности при спекании образцов приводит к их рассыпанию, избыток, наоборот, приводит к деформированию, появлению продольных и поперечных трещин, возгоранию порошка.

На рисунке 1, показаны образцы из алюминиевого порошка ПА-4. Изменение мощности с 10 до 20 Вт, при постоянной скорости  $V=1000$  мм/мин, температуры спекания  $t=26$  °С и шага сканирования  $S=0,2$  мм приводит к увеличению толщины спеченного слоя с 0,765 до 1,55 мм. Образец, представленный на рисунке 1, а имеет низкую механическую прочность и рассыпается от прикосновения.

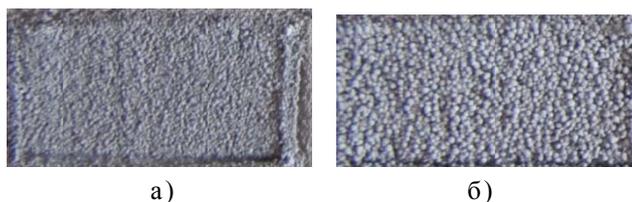


Рис. 1. Внешний вид спеченной поверхности ПА-4 (x2),  
режимы спекания  $V=1000$  мм/мин,  $t=26$  °С,  $S=0,2$  мм  
а)  $P=10$  Вт, б)  $P=20$  Вт

На рисунке 2 представлено влияние мощности на внешний вид спеченной поверхности из медного порошка ПМС-1. Изменение мощности с 15 до 30 Вт, при  $V=200$  мм/мин,  $t=200$  °С,  $S=0,3$  мм приводит к изменению  $Rz$  с 475 до 975 мкм. Образцы получились прочными, но с образованием продольных и поперечных трещин. При увеличении мощности, размер трещин увеличивается вследствие увеличения термических напряжений и высокой теплопроводности порошка ПМС-1.

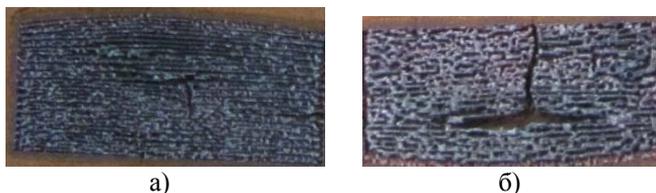


Рис. 2. Внешний вид спеченной поверхности ПМС-1 (x2),  
режимы спекания  $V=200$  мм/мин,  $t=200$  °С,  $S=0,3$  мм  
а)  $P=15$  Вт, б)  $P=30$ Вт

На рисунке 3 показано влияние мощности на внешний вид спеченной поверхности DSK-F75. При спекании данного порошка наблюдалось возникновение коагуляции. Коагуляцией называют объединение мелких частиц дисперсных систем в более крупные под влиянием сил сцепления. Изменение мощности с 10 до 20 Вт, при  $V=300$  мм/мин,  $t=26$  °С,  $S=0,1$  мм, приводит к увеличению шероховатости поверхностного слоя с 425 до 625 мкм, диаметру коагулированных частиц с 175 до 325 мкм и толщине спеченного слоя с 0,65 до 1,0 мм. Образец, представленный на рисунке 3, а обладает невысокой механической прочностью.



Рис. 3. Внешний вид спеченной поверхности DSK-F75 (x2),  
режимы спекания  $V=300$  мм/мин,  $t=26$  °С,  $S=0,1$  мм  
а)  $P=10$  Вт, б)  $P=20$  Вт

На рисунках 4-8 представлены фотографии внешнего вида исследуемых порошковых материалов в зависимости от скорости перемещения луча лазера. На рисунке 4 представлены фотографии

изменения внешнего вида спеченной поверхности порошка ПА-4 в зависимости от скорости перемещения луча лазера. Увеличение скорости перемещения луча лазера с 1000 до 3000 мм/мин, при  $P=20$  Вт,  $t=26$  °С,  $S=0,2$  мм привело к уменьшению толщины спеченного слоя с 1,55 до 1,33 мм.

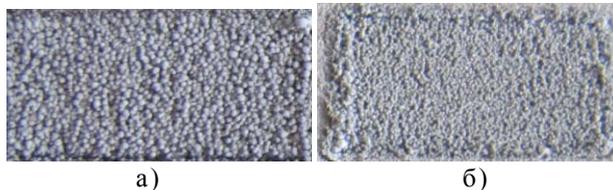


Рис. 4. Внешний вид спеченной поверхности ПА-4 (x2), режимы спекания  $P=20$  Вт,  $t=26$  °С,  $S=0,2$  мм  
а)  $V=1000$  мм/мин, б)  $V=3000$  мм/мин

На рисунке 5 показаны образцы из медного порошка ПМС-1, полученные при  $P=15$  Вт,  $t=200$  °С,  $S=0,3$  мм. Когда  $V=200$  мм/мин на образце появляются дефекты, расположенные вдоль и поперек формирования треков. При  $V=3000$  мм/мин порошок не успевает спекаться. При увеличении скорости толщина спеченного слоя уменьшается с 1,700 до 0,7 мм. Дефекты обусловлены высокой теплопроводностью порошкового материала, а также резким градиентом температур во время и после спекания. Образец, представленный на рисунке 5, б имеет низкую механическую прочность и рассыпается от прикосновения.

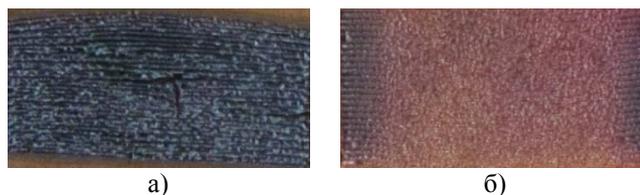


Рис. 5. Внешний вид спеченной поверхности ПМС-1 (x2), режимы спекания  $P=30$  Вт,  $t=200$  °С,  $S=0,3$  мм  
а)  $V=200$  мм/мин, б)  $V=3000$  мм/мин

Спекание при  $V=200$  мм/мин и  $P=15$  Вт,  $t=200$  °С,  $S=0,1$  мм приводит к горению порошкового материала, рисунок 6. На образце образуются дефекты, расположенные вдоль и поперек формирования треков. При скорости 3000 мм/мин образец получается прочным, без дефектов. Толщина спеченного слоя уменьшается с увеличением скорости с 1,0 до 0,7 мм, шероховатость 590 до 225 мкм.



Рис. 6. Внешний вид спеченной поверхности ПМС-1 (x2), режимы спекания  $V=200$  мм/мин и  $P=30$  Вт,  $t=200$  °С,  $S=0,1$  мм  
а)  $V=200$  мм/мин, б)  $V=3000$  мм/мин

Образцы, получены на режимах  $P=22$  Вт,  $t=114$  °С,  $S=0,2$  мм, при  $V=200$  мм/мин и 3000 мм/мин образуют прочную спеченную поверхность, рисунок 7. Увеличение скорости приводит к изменению толщины спеченного слоя с 0,9 до 0,41 мм,  $Rz$  с 930 до 550 мкм. Образец представленный на рисунке 7, а имеет структуру расплавленного металла и черный цвет из-за образования окиси меди.

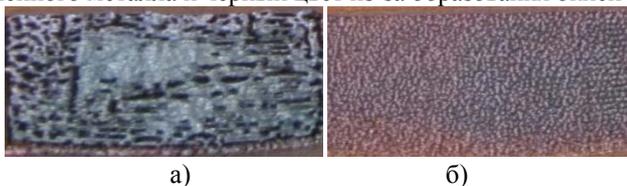


Рис. 7. Внешний вид спеченной поверхности ПМС-1 (x2), режимы спекания  $P=22$  Вт,  $t=114$  °С,  $S=0,2$  мм: а)  $V=200$  мм/мин, б)  $V=3000$  мм/мин

При увеличении скорости со 100 до 300 мм/мин, при  $P=10$  Вт,  $t=26$  °С,  $S=0,1$  мм, на рисунке 8 шероховатость поверхности уменьшается с 560 до 425 мкм, толщина спеченного слоя с 0,88 до 0,65 мм.



Рис. 8. Внешний вид спеченной поверхности DSK-F75 (x2), режимы спекания  $P=10$  Вт,  $t=26$  °С,  $S=0,1$  мм: а)  $V=100$  мм/мин, б)  $V=300$  мм/мин

Назначая скорость перемещения луча лазера необходимо учитывать его значительное влияние на качество поверхностного слоя. Увеличение скорости приводит к уменьшению толщины слоя и шероховатости, в некоторых случаях она велика для формирования спеченной поверхности. Снижение скорости иногда приводит к горению порошкового материала, возникновению дефектов вследствие перегрева материала выше температуры кипения.

На рисунках 9-11 представлено сравнение внешнего вида спеченной поверхности ПА-4 при изменении шага сканирования. Увеличении шага сканирования с 0,1 до 0,2 мм, при режимах спекания  $P=10$  Вт,  $t=26$  °С,  $V=1000$  мм/мин, на рисунке 9 приводит к увеличению толщины спеченного слоя с 0,74 до 0,765 мм.

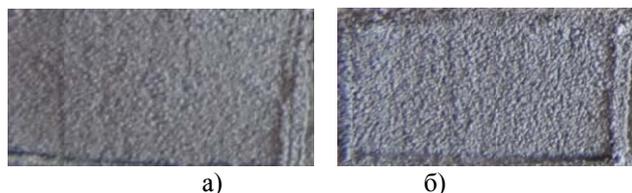


Рис. 9. Внешний вид спеченной поверхности ПА-4 (x2), режимы спекания  $P=10$  Вт,  $t=26$  °С,  $V=1000$  мм/мин: а)  $S=0,1$  мм, б)  $S=0,2$  мм

На рисунке 10, при шаге сканирования  $S=0,1$  мм и  $P=15$  Вт,  $t=200$  °С,  $V=3000$  мм/мин спеченная поверхность обладает некоторой прочностью. Увеличение  $S$  с 0,1 до 0,3 мм уменьшает толщину спеченного слоя с 0,7 до 0,66 мм, увеличивая  $Rz$  с 225 до 425 мкм.

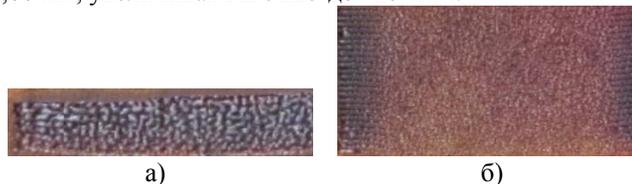


Рис. 10. Внешний вид спеченной поверхности ПМС-1 (x2), режимы спекания  $P=30$  Вт,  $t=200$  °С,  $V=3000$  мм/мин: а)  $S=0,1$  мм, б)  $S=0,15$  мм

При увеличении шага сканирования с 0,1 до 0,15 мм, при режимах спекания  $P=10$  Вт,  $t=26$  °С,  $V=300$  мм/мин, на рисунке 11 шероховатость поверхности уменьшается с 425 до 300 мкм, толщина спеченного слоя уменьшается с 0,65 до 0,4 мм, диаметр коагулированных частиц уменьшается со 175 до 150 мкм.



Рис. 11. Внешний вид спеченной поверхности DSK-F75 (x2), режимы спекания  $P=10$  Вт,  $t=26$  °С,  $V=300$  мм/мин: а)  $S=0,1$  мм, б)  $S=0,15$  мм

Шаг сканирования не так значительно влияет на качество поверхностного слоя. Наблюдается не одинаковое влияние на порошковые материалы. При спекании порошка ПА-4 увеличение шага

сканирования приводит к увеличению толщины спеченного слоя. При спекании кобальтхроммолибденовой композиции увеличение шага сканирования приводит к уменьшению толщины спеченного слоя, Rz и диаметру коагулированных частиц. При спекании медного порошка ПМС-1 уменьшается толщина спеченного слоя, увеличивается шероховатость.

На рисунках 12-13 представлено сравнение внешнего вида спеченной поверхности DSK-F75 по температуре подогрева порошкового материала. При увеличении температуры подогрева порошкового материала с 26 до 200 °С, при режимах спекания  $P=10$  Вт,  $S=0,15$  мм,  $V=300$  мм/мин, шероховатость поверхности уменьшается с 300 до 280 мкм, толщина спеченного слоя увеличивается с 0,4 до 0,65 мм, диаметр коагулированных частиц уменьшается со 150 до 115 мкм.



Рис. 12. Внешний вид спеченной поверхности DSK-F75 (x2), режимы спекания  $P=10$  Вт,  $S=0,15$  мм,  $V=300$  мм/мин: а)  $t=26$  °С, б)  $t=200$  °С

Сравнение внешнего вида спеченной поверхности ПМС-1 по температуре подогрева порошкового материала представлено на рисунке 13. Увеличение температуры подогрева порошкового материала с 26 до 200 °С, приводит к уменьшению размера дефектов, при следующих режимах спекания  $P=30$  Вт,  $S=0,3$  мм,  $V=200$  мм/мин. Толщина спеченного слоя увеличивается с 1,4 до 1,67 мм.



Рис. 13. Внешний вид спеченной поверхности ПМС-1 (x2), режимы спекания  $P=30$  Вт,  $S=0,3$  мм,  $V=200$  мм/мин: а)  $t=26$  °С, б)  $t=200$  °С

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о значительном влиянии мощности на качество спеченного поверхностного слоя. При неправильном назначении мощности образцы либо рассыпаются от прикосновения, либо деформируются, или происходит возгорание порошка и процесс выходит из-под контроля. Также значительным является влияние скорости перемещения луча лазера на качество поверхностного слоя. Увеличение скорости приводит к уменьшению толщины и шероховатости спеченного слоя, в некоторых случаях она недостаточна для формирования поверхности. Снижение скорости иногда приводит к горению порошкового материала и возникновению дефектов. Не так значительно влияет на качество спеченного поверхностного слоя шаг сканирования. При спекании кобальтхроммолибденовой композиции увеличение шага сканирования приводит к уменьшению толщины спеченного слоя, Rz и диаметру коагулированных частиц. Изменение температуры подогрева порошкового материала позволяет незначительно увеличить толщину спеченного слоя, уменьшить диаметр коагулированных частиц и шероховатость, улучшить прочностные характеристики. Данные исследования понадобятся при назначении режимов спекания для новых порошковых композиций.

#### Литература.

1. Отто А. Объединение лазерной обработки материалов с процессом формообразования // Фотоника. – 2007. – № 5. – С. 2 – 6.
2. Панченко В.Я. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок, монография. – М.: Физматлит, 2009. – 664 с.
3. A.V. Proskokov, S.I. Petrushin. Process clip formation with a single conditional shear surface // Applied Mechanics and Materials. vol. 682 (2014). pp. 304-312.
4. R. H Gubaidulina, S.I. Petrushin. A.A Galeeva. Selecting an Economical Variant of the Manufacturing Method of Engineering Product Fabrication under Current Conditions.// Applied Mechanics and Materials. vol. 682 (2014). pp. 613-616.

5. P.V.Arhipov, A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov. The effect of diamond tool performance capability on the quality of processed surface // Applied Mechanics and Materials. vol. 379 (2013). pp. 124-130.
6. Chinakhov D.A. Dependence of Silicon and Manganese Content in the Weld Metal on the Welding Current and Method of Gas Shielding. Applied Mechanics and Materials. Vol. 756 (2015) pp 92-96. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.756.92.
7. Saprykin A. A., Saprykina N. A. Improvement of surface layer formation technology for articles produced by layer-by-layer laser sintering // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 56 – 59.
8. Lychagin D.V., Tarasov S.Yu., Chumaevskii A.V., Alfeyorova E.A. Macrosegmentation and strain hardening stages in copper single crystals under compression // International Journal of Plasticity. – 2015. – №69. –P. 36-53.
9. Babakova E. V. , Gradoboev A. V. , Saprykin A. A. , Ibragimov E. A. , Yakovlev V. I. , Sobachkin A. V. Comparison of Activation Technologies Powder ECP-1 for the Synthesis of Products Using SLS // Applied Mechanics and Materials. - 2015 - Vol. 756. - p. 220-224
10. Сапрыкина Н. А., Сапрыкин А. А., Шигаев Д. А. Исследование факторов, влияющих на качество поверхности, полученной лазерным спеканием // Обработка металлов. – 2011. – № 4. – С. 78–82.
11. Saprykina N. A., Saprykin A.A., Matrunchik M.S. Formation of Surface Layer of Cobalt Chrome Molybdenum Powder Products with Differentiation of Laser Sintering Modes // Applied Mechanics and Materials. Vol. 682 (2014) pp. 294-298.

## **ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ВОССТАНОВЛЕННЫХ НАПЛАВКОЙ**

*В.В. Коноводов, А.В. Валентов\*, О.Ю. Ретюнский\**

*Новосибирский Государственный аграрный университет*

*630039, г. Новосибирск, ул. Никитина, 147, тел.: (383) 267-35-07*

*\*Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского*

*Томского политехнического университета*

*652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26, тел. (38451)-6-05-37*

*E-mail: valentov@mail.ru*

Задача любого ремонтного предприятия – обеспечение постоянной работоспособности техники, повышение качества ремонта и снижение затрат на его выполнение. В настоящее время в развитых странах особое внимание уделяют восстановлению систем и агрегатов, и это не случайно, ведь при использовании прогрессивных технологий стоимость ремонта может не только снизить затраты предприятия, но и повысить ресурс восстановленных деталей по сравнению с новыми в 2-2,5 раза. Кроме того, уменьшается время простоя сельскохозяйственной техники в ремонте, что в жестких агротехнических условиях некоторых регионов России крайне необходимо.

Наиболее характерна для ремонтного предприятия группа способов, при которых производится наращивание изношенных поверхностей наплавкой, доля которых составляет 75-80% валового объема и 90-95% по номенклатуре. Наплавка, в сравнении с другими способами восстановления, позволяет получить на поверхности деталей слой необходимой толщины и химического состава, высокой твердости и износостойкости при относительно невысокой стоимости наращивания [1].

Тяжелые условия обработки поверхностей, восстановленных наплавкой, вызывают разрушение режущей части инструмента (68-94%), интенсивный износ, в 2-4 раза превосходящий общемашиностроительные нормы, при этом наблюдается снижение скорости резания на 15-25% [1]. Низкая стойкость резцов и производительность при обработке восстановленной наплавкой деталей обусловлена недостаточной прочностью режущей части инструмента.

Как правило, при механической обработке восстановленных деталей проблемным вопросом становится обеспечение стойкости и ресурса режущих инструментов, особенно для черновых операций. Выбор исследования режущего инструмента на примере резца как системы, состоящей из взаимодействующих элементов – державка, твердосплавная пластина и припой – обосновывается актуальностью для ремонтно-технических предприятий АПК научно-практической задачей повышения ресурсных параметров лезвийных инструментов, применяемых для обработки наплавленных поверхностей деталей машин при заданном уровне производительности и качества восстановленных деталей. В основе исследований лежат теоретическое обоснование и экспериментальная отработка состава и режимов пайки твердосплавных инструментов железистоуглеродистым припоем [2].