

Вторым важным направлением является нанесение твёрдых износостойких покрытий. Широкое распространение получили покрытия на основе нитридов титана (TiN), титана-алюминия (TiAlN), хрома (CrN), а также многослойные композиционные покрытия. Они наносятся методами физического и химического осаждения из паровой фазы (PVD и CVD). Такие покрытия обладают низким коэффициентом трения, высокой твердостью (до 2500 HV) и термостойкостью до 900–1000 °С. Например, TiAlN образует при нагревании оксидную пленку Al₂O₃, которая служит тепловым барьером и защищает режущую кромку от перегрева и окисления.

Третьим перспективным методом является криообработка — выдержка инструмента при сверхнизких температурах (до –196 °С). Этот процесс способствует преобразованию остаточного аустенита в мартенсит, а также стимулирует образование мелкодисперсных карбидов, что увеличивает твердость и снижает внутренние напряжения. Инструменты, подвергнутые криообработке, демонстрируют более стабильные размерные характеристики и повышенную стойкость при механической обработке твёрдых и жаропрочных материалов.

На практике наилучшие результаты достигаются при комбинировании методов. Так, последовательная криообработка и последующее нанесение многослойного покрытия TiAlN позволяют достичь увеличения стойкости концевых фрез до 2,5–3 раз по сравнению с необработанным инструментом. Это позволяет не только повысить производительность, но и существенно снизить затраты на замену и обслуживание инструмента.

Также перспективным направлением является лазерная микротекстуризация поверхности перед нанесением покрытия. Формируемые микрорельефы улучшают механическое сцепление покрытия с подложкой, а также способствуют снижению контактных напряжений в зоне резания. Несмотря на технологическую сложность, применение этой технологии может стать стандартом при производстве инструмента премиум-класса.

Практические испытания, проведенные на предприятиях машиностроительной отрасли, показали, что фрезы, обработанные по комбинированной технологии «криообработка + TiAlN-покрытие», сохраняют режущие свойства до 180 минут непрерывной работы при обработке нержавеющей стали AISI 304, в то время как стандартные фрезы начинают терять эффективность уже после 70–80 минут. Это доказывает высокую технологическую значимость упрочняющих процессов для интенсивных режимов резания.

В сравнении между покрытиями, полученными методами PVD и CVD, первые обеспечивают более низкую температуру нанесения (200–500 °С), что делает их предпочтительными для инструментов из быстрорежущей стали, так как предотвращается отпуск и потеря твердости. Однако CVD-покрытия характеризуются лучшей равномерностью и адгезией, особенно на сложных профилях фрез. Для комбинированных инструментов с переменным сечением режущей части возможно использование гибридных технологий, сочетающих оба метода.

Особое внимание следует уделить выбору параметров ионно-плазменной обработки. Исследования показывают, что оптимальными являются температуры в пределах 500–550 °С и длительность процесса около 2–4 часов. При этих условиях обеспечивается формирование диффузионного слоя глубиной до 100 мкм, который существенно повышает устойчивость режущей кромки к абразивному износу. Важно также учитывать состав атмосферы, где введение небольшого количества водорода способствует очищению поверхности и улучшению адгезии образующегося слоя.

Заключение. Таким образом, применение современных методов упрочнения, таких как ионно-плазменная нитроцементация, нанесение твёрдых покрытий и криообработка, позволяет значительно улучшить эксплуатационные характеристики фрез из быстрорежущей стали P6M5. Выбор конкретного метода или их комбинации зависит от условий эксплуатации, типа обрабатываемого материала и требуемой точности. Опыт промышленного применения подтверждает высокую эффективность данных технологий и их перспективность в рамках современных требований к производительности и надёжности режущего инструмента.

Список цитируемых источников

1. Титов, В. Н. Повышение износостойкости режущего инструмента / В. Н. Титов. — Москва : Машиностроение, 2017. — 256 с.
2. Кузнецов, С. А. Нанесение износостойких покрытий: теория и практика / С. А. Кузнецов. — Санкт-Петербург : Профессия, 2020. — 312 с.
3. Левин, И. Е. Криообработка инструментов из быстрорежущих сталей / И. Е. Левин // Технология металлов. — 2021. — № 7. — С. 43–47.
4. Романенко, И. В. Повышение надёжности инструмента путём применения PVD-покрытий / И. В. Романенко // Инструментальный мир. — 2019. — № 4. — С. 15–18.

УДК 621.315.322.4

И. В. Дубень, Д. В. Гордич, А. Б. Пахольчик

*Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,
Барановичи, Республика Беларусь*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КАРБОНОВОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ПРОВОДА

Введение. Распределенный электронагреватели представляют собой устройства, предназначенные для контактного нагрева достаточно больших или протяженных объектов. Кроме широко известных электрообогреваемых полов такими объектами являются трубопроводы в местах их возможного промерзания, водостоки,

наружные поверхности технологических емкостей и т. д. В подавляющем большинстве случаев используется резистивные нагревательные устройства, состоящее из одного или более проводников из электропроводящего материала с определенным удельным сопротивлением, электрически изолированные и защищенные от воздействия окружающей среды [1]. В настоящее время широко применяются различные распределенные нагревательные устройства, которые можно разделить на следующие типы.

Резистивные нагревательные кабели и провода используются для отопления помещений, защиты труб от замерзания, обогрева резервуаров, грунта и других целей. Конструктивно они представляют собой медный или стальной нагревательный элемент с электрической изоляцией, покрытый оболочкой для защиты от механических повреждений и коррозии, а также снижения электромагнитных помех. К их преимуществам можно отнести прочность и долговечность, устойчивость к перегреву и внешним факторам. Недостатками нагревательных кабелей с медными жилами являются высокая стоимость, а также большая погонная длина секций. Традиционно используемые металлические резистивные материалы имеют малое удельное сопротивление (медь — $0,0172...0,0182 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$, сталь — $0,125...0,146 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$), поэтому удельная мощность нагревательных секций даже с минимальным сечением жилы составляет до $30 \text{ Вт} / \text{м}$ [2]. Так, одножильный экранированный нагревательный кабель *TXLP DRUM* с наружным диаметром $6,5 \text{ мм}$ и медным проводником имеет удельное сопротивление от $0,02$ до $12,7 \text{ Ом} / \text{м}$ [3]. При подключении к сетевому напряжению 230 В при удельной мощности $30 \text{ Вт} / \text{м}$ длина секции составляет не менее 140 м . Из-за большой длины нагревательного кабеля возможна неравномерность нагрева, поэтому рекомендуется установка нескольких датчиков температуры с терморегулятором. Удельная мощность снижается при увеличении погонной длины кабеля, поэтому минимальная длина секции подбирается в зависимости от сечения жилы провода и температуры нагрева.

Все большее применение для обогрева трубопроводов, водосточков, защиты от замерзания и поддержание температуры промышленных трубопроводов, резервуаров и оборудования находят саморегулирующиеся нагревательные кабели. Самое важное их преимущество — автоматическое регулирование тепловыделения без использования терморегуляторов благодаря особой конструкции — две медные токопроводящие жилы по всей длине соединены в поперечном сечении резистивным материалом или элементами, которые имеют большой положительный коэффициент сопротивления. Например, при повышении температуры в интервале $20...60 \text{ }^\circ\text{C}$ удельная мощность кабеля марки *ATMI* снижается в $2...8$ раз, чем и обусловлен эффект саморегулирования. Удельная мощность не зависит от длины, максимальная длина секций ограничена номинальной мощностью устройства электропитания. Недостатком саморегулирующихся нагревательных кабелей является их высокая стоимость — свыше 10 руб. за один погонный метр из-за сложности производства и использования дорогостоящих материалов.

Инновационным решением для распределенных систем обогрева является нагревательный провод из углеродного (карбонового) волокна, которое обладает высокой теплопроводностью и устойчивостью к механическим повреждениям, т. к. не содержит металлических элементов. В качестве изолятора используется силикон или тефлон, который более устойчив к высокой температуре [4]. Наружный диаметр провода может составлять от $1,8$ до 5 мм , удельное сопротивление — от 17 до $133 \text{ Ом} / \text{м}$, удельная мощность — от 70 до $284 \text{ Вт} / \text{м}$ (чем более длинный нагревательный провод, тем меньше мощность нагрева). Например, минимальная длина нагревательного провода из углеродного волокна *12K* составляет 10 м [5].

К преимуществам карбонового нагревательного провода можно отнести долговечность, т. к. углеродное волокно устойчиво к коррозии и механическим повреждениям, а также гибкость применения — он подходит для обогрева полов, трубопроводов и других объектов. По стоимости обходится в $5...8$ раз дешевле, чем аналогичный по характеристикам медный нагревательный кабель, и в $10...15$ раз по сравнению с саморегулирующимся кабелем. Секции имеют длину не более $10...15 \text{ м}$ и соединяются параллельно, что в целом повышает надежность электрообогревательного устройства. При монтаже требуется точное соблюдение норм электробезопасности, так как отсутствие механической защитной оболочки повышает чувствительность к условиям установки и эксплуатации. Стоимость его в настоящее время составляет около $1,2 \text{ руб.}$ в расчете на 1 м длины.

Однако детальные характеристики карбоновых нагревательных проводов в открытых литературных источниках на момент проведения исследований нами не обнаружены. В наших исследованиях преследовалась цель установить зависимость сопротивления карбонового нагревательного провода от температуры, что необходимо для определения его удельной мощности, допустимого тока и других параметров.

Т а б л и ц а 1 — Характеристики карбонового нагревательного провода фирмы *MINCO HEAT* [4]

Марка	Наружный диаметр, мм	Номинальное удельное сопротивление, Ом / м	Длина кабеля, м	Максимальная удельная мощность, Вт / м
6K (CF-6-R)	2,5	66	10	7,3
			15	3,3
12K (CF-12-F)	3,0	33	10	14,7
			15	6,5
			25	2,35
25K (CF-12-F)	3,5	17	10	28,5

Основная часть. Объектом исследования служил карбоновый нагревательный провод типа 12K (CF-12F) производства *MINCO HEAT* [5] длиной 10 м. Крепление питающих медных проводников осуществляется с помощью обжимных гильз диаметром 4 мм. Заявленное производителем удельное сопротивление — 33 Ом / м, изоляция — из силиконовой резины, наружный диаметр — 3 мм.

Средствами измерений служили мультиметр *MASTECH MY64* для контроля напряжения, мультиметр *DT838* с термоэлектрическим преобразователем в качестве датчика температуры и амперметр типа Э8025 электромагнитной системы с пределом измерений 1 А для измерения силы тока. В процессе измерений карбоновый провод подключали к источнику регулируемого синусоидального напряжения $U = 220$ В и регистрировали значения силы тока I (А) при достижении определенной температуры нагрева T (°C).

Полученные опытные данные (таблица 2) показывают, что при повышении температуры от 20...100 °C потребляемый нагревателем ток I (А) увеличивается с 0,715 до 0,742 А, сопротивление исследуемого образца снизилось с 329 до 317 Ом, что говорит об отрицательном температурном коэффициенте карбонового волокна.

Т а б л и ц а 2 — Результаты исследования зависимости сопротивления карбонового нагревательного провода от температуры нагрева

Температура T , °C	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Сила тока I , А	0,715	0,718	0,721	0,725	0,728	0,732	0,735	0,739	0,742
Сопротивление R , Ом	329	327	326	324	323	321	320	318	317

Обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью электронных таблиц *MS Excel*, для установления зависимости удельного сопротивления $R_{уд} = f(T)$ использовали надстройку «Поиск решения». В результате получена линейная зависимость удельного сопротивления карбонового нагревательного провода в исследованном интервале температуры:

$$R_{уд} = 33,2 - 0,0157 T.$$

Коэффициент корреляции экспериментальных и опытных данных составил 0,991, максимальное расхождение между опытными и расчетными значениями удельного сопротивления не превышает 0,1 Ом / м, что говорит о пригодности формулы (1) для практических расчетов.

Формула (1) позволяет определить удельную мощность нагревательного провода $P_{уд}$ (Вт / м) в зависимости от напряжения питания U (В) и температуры t (°C):

$$P_{уд} = \frac{U^2}{R_{уд} L^2},$$

где L — длина провода, м.

Как видно из рисунка 1, если при температуре 20°C удельная мощность составляет 31,6 Вт / м, то при нагреве до 80°C увеличивается до 32,7 Вт / м. Температурный коэффициент сопротивления для исследованного образца карбонового провода составил $-0,0157$ Ом / (м · °C).

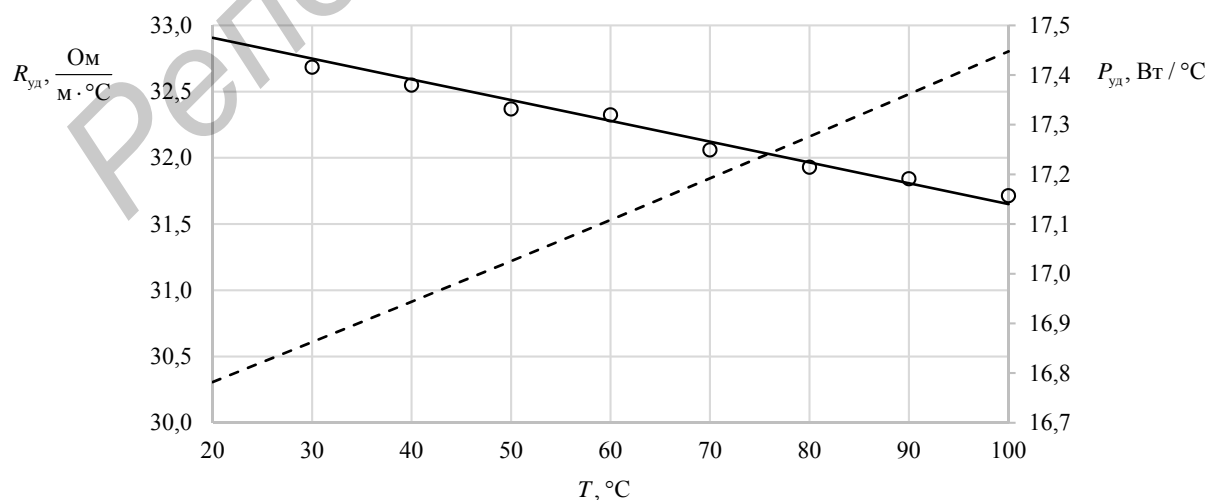


Рисунок 1 — Зависимость удельного сопротивления карбонового провода (маркеры — опытные данные, сплошная линия — расчетные значения) и расчетной удельной мощности $P_{уд}$ (штриховая линия) от температуры t (°C)

Заключение. На основании открытых литературных источников выполнен анализ известных типов распределенных нагревательных систем, выделены их преимущества и недостатки с учетом сферы применения. Установлено, что наиболее экономичным вариантом является применение карбоновых (углеродных) нагревательных проводов. На основе проведенных экспериментов определена зависимость его удельного сопротивления от температуры: температурный коэффициент сопротивления провода типа 12K с номинальным удельным сопротивлением 33 Ом / м в интервале температур 20...100°C имеет отрицательное значение и составляет $-0,0157 \text{ Ом} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Таким образом, при использовании карбонового провода для распределенных нагревательных устройств обязательным элементом является терморегулятор, так как при нагреве кабеля количество выделяемого тепла еще больше увеличивается из-за отрицательного температурного коэффициента углеродного волокна.

Список цитируемых источников

1. Minco Heat 12k: нагревательный кабель из углеродного волокна [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: <https://aliexpress.ru/item/4000972288188.html> (дата обращения: 24.04.2025).
2. Одножильный нагревательный кабель TXLP DRUM [Электронный ресурс]. — Могилев, 2010—2025. — URL: https://housemaster.by/index.php?route=product/product&path=103_150_151&product_id=7311 (дата обращения: 21.04.2025).
3. Электрические элементные нагреватели : пособие / А. Е. Заяц [и др.] ; под ред. Е. М. Зайца. — Минск : БГАТУ, 2011. — 180 с.
4. Теплый пол (нагревательные кабели) Devi DEVIflex™ 792 Вт/44 м [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: <https://220shop.by/p147593019-teplyj-pol-nagrevatelnye.html?yclid=16659021573912002559> (дата обращения: 25.04.2025).
5. Углеродный (карбоновый) кабель [Электронный ресурс]. — Минск, 2025. — URL: <https://electro-nagrev.ru/catalog/gibkie-nagrevateli/uglerodnyy-karbonovyy-kabel/> (дата обращения: 25.04.2025).

УДК 621.762

О. Н. Журавский, Е. В. Петровский, И. А. Богданович

*Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,
Барановичи, Республика Беларусь*

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОРОШКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Введение. Металлические порошки, разработанные специально для аддитивного производства, представляют собой основу для создания легких, прочных и высокоэффективных изделий методом 3D-печати. Эти материалы, обладающие уникальными характеристиками, такими как размер частиц, сыпучесть и состав, позволяют реализовывать сложные конструкции с внутренними каналами, что особенно выгодно для дорогих материалов, используемых в аэрокосмической и других отраслях. Ключевым фактором успеха является оптимальное распределение частиц по размерам, что обеспечивает высокое качество и стабильность каждой партии.

Целью исследования является анализ существующих металлических порошкообразных веществ, используемых в аддитивном производстве и методов их получения.

Основная часть. Порошки для 3D-печати представляют собой мелкие частицы металлических материалов, специально разработанные для аддитивного производства. Эти порошки обладают уникальными характеристиками, такими как размер частиц, сыпучесть и состав, что делает их подходящими для различных методов 3D-печати [1—2].

Методы получения металлических порошков делятся на два типа: механические и физико-химические [1—4]. Механические методы являются более распространёнными. Для их осуществления используют специальные приборы, с помощью которых будет выполняться дробление металла. Особенно выгодно использовать данный метод при изготовлении порошков из бериллия, сурьмы или хрома.

Метод распыления относится к самым эффективным методам производства металлических порошков. С помощью специальных приспособлений производится распыление расплавленного металла. При этом металл взаимодействует со сжатым воздухом и направляется в воду. В процессе распыления частицы порошка отличаются высокой скоростью остывания, благодаря чему изготовленные детали будут отличаться прочностью.

Метод восстановления — распространённый физико-химический способ изготовления порошков. С помощью газов и твёрдых веществ можно провести восстановление порошка из железа, титана и других металлов.

Существует несколько типов распространённых металлических порошков, используемых в 3D-печати:

1. Титановый порошок. Обладает высокой прочностью, отличной коррозионной стойкостью и малым весом, что делает его идеальным для аэрокосмической, медицинской и автомобильной промышленности, где требуются легкие и прочные компоненты.

2. Алюминиевый порошок. Легкий и экономичный, с хорошей тепло- и электропроводностью, используется в аэрокосмической отрасли, автомобилестроении и бытовой электронике для создания деталей, требующих высокой прочности и низкого веса.