

ния зубьев целесообразно использовать метод копирования, а на отделочных операциях – метод обката.

Следование вышеуказанным рекомендациям позволит существенно увеличить производительность черновых операций, повысить точность отделочных операций и сократить потребное количество оборудования, снизив тем самым производственные затраты на зубообработку.

### Литература

1. Гинсбург Е.Г., Голованов Н.Ф.. Зубчатые передачи. Справочник. 2-е издание, переработанное и дополненное. Ленинград, «Машиностроение», 1980, 416 с.
2. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопrotивление материалов. Москва, «Высшая школа», 1969, 736 с.
3. Калашников С.Н., Калашников А.С. Приборы и контроль цилиндрических зубчатых колес в процессе их изготовления. «Технология автомобилестроения», № 1 1978, с. 18-25

### **Механические свойства порошковых материалов после проведения многокомпонентного диффузионного насыщения Cr, Ni и Mo**

д.т.н. проф. Еремеева Ж.В., доц. Ниткин Н.М., к.т.н. доц. Шарипзянова Г.Х.  
МГТУ «МАМИ»

8 (495) 223-05-23, eremeeva-shanna@yandex.ru, kolia-msk@yandex.ru, guzel@mtw.ru

д.т.н. проф. Латыпов Р.А., Слуковская К.А.

МГВМИ

8 (495) 361-14-80, latipov46@mail.ru, 8 (917) 568-90-94, slukovskayakn@moesk.ru

Скориков Р.А.

ЮРГУ

8 (926) 598-68-26, scor@xaker.ru

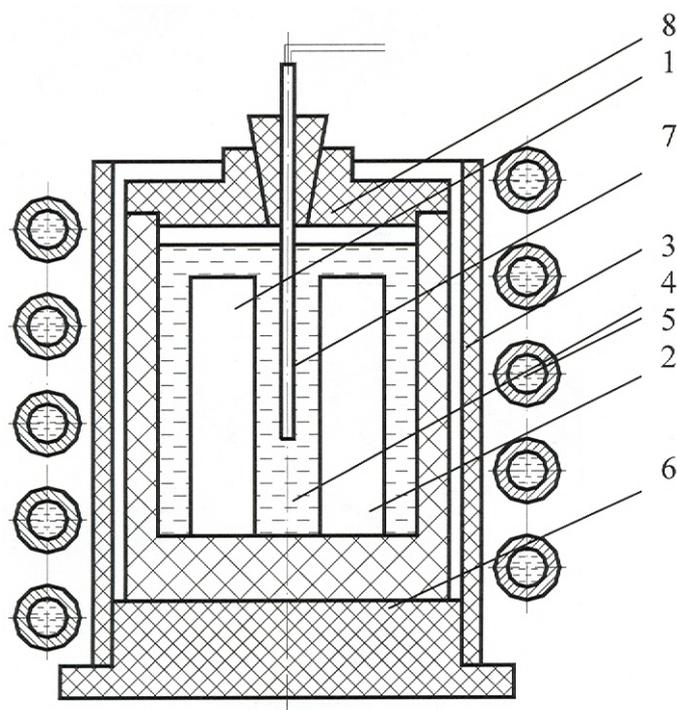
*Аннотация.* В статье рассмотрены механические свойства порошковых материалов после проведения многокомпонентного диффузионного насыщения Cr, Ni и Mo.

*Ключевые слова:* порошковые материалы, многокомпонентное диффузионное насыщение.

Детали машин должны обладать определенным сочетанием характеристик прочности и пластичности, обеспечивающим возможность их эксплуатации при воздействии динамических и усталостных нагрузок. Для исследования влияния способов многокомпонентного насыщения хромом, никелем и молибденом технологических схем и химического состава диффузионных слоев, полученных на порошковых материалах на основе железа, на их механические свойства проводились испытания на изгибную прочность, ударную вязкость и малоцикловую усталостную долговечность.

Диффузионное насыщение Cr, Ni и Mo порошковых материалов на основе железа производилось в расплаве солей, содержащих порошки феррохрома, ферроникеля и ферромolibдена. Нагрев образцов осуществлялся за счет ТВЧ. Для диффузионного насыщения с использованием ТВЧ использовалась стандартная заводская высокочастотная установка ЛЗ-67В мощностью 60 кВт с рабочей частотой  $66 \pm 6$  кГц. Многокомпонентное насыщение производилось в графитсодержащих тиглях марки ТГДМ, выпускаемых на предприятии ОАО «Лужский абразивный завод». Выбор указанного типа тигля обусловлен тем, что материал, из которого он изготовлен, не экранирует образцы, находящиеся в тигле с расплавом, от высокочастотного магнитного поля. При этом тигель нагревается под воздействием ТВЧ индуктора, расплавляя соли, но его нагрев происходит гораздо медленнее нагрева образцов ( $V_{нагр.т.} = 8 - 10$  °С/с). Более низкая теплопроводность и магнитная проницаемость тигля позволяют

производить ХТО образцов без перегрева тигля, так как образцы нагреваются 10 – 30 раз быстрее. Также тигель стоек к воздействию агрессивных сред. Максимальная температура его эксплуатации составляет  $1500^{\circ}\text{C}$ , что позволяет использовать его при температурах диффузионного насыщения  $1000 - 1200^{\circ}\text{C}$ .



**Рисунок 1 – Схема установки для многокомпонентного насыщения Cr, Ni и Mo в расплаве солей с нагревом ТВЧ: 1 – образец, 2 – тигель, 3 – асбестовый кожух, 4 – расплав солей, 5 – индуктор, 6 – подставка, 7 – термопара, 8 – крышка.**

Состав расплава солей, используемого для насыщения, был выбран при сопоставлении характеристик качества образующихся диффузионных зон и себестоимости входящих в состав среды компонентов. Если по качеству покрытий опробованные составы отличались мало, то по себестоимости отличие было разительным.  $50\% \text{BaCl}_2 + 20\% \text{NaCl} + 30\% (\text{ФХ010А} + \text{ФМо60} + \text{ФНОу})$ , обработанного соляной кислотой (HCl). В составе эта соль получалась в процессе реакции при воздействии соляной кислоты на смесь порошков и сразу же поступала в расплав.

Соли-стабилизаторы  $\text{BaCl}_2$  и  $\text{NaCl}$  используются в составе расплава для уменьшения его активности (испарения). При температуре  $1050 - 1250^{\circ}\text{C}$  ванна может работать в течение  $1,5 - 2,0$  часов. Для продления работы ванны без добавки солей и создания над поверхностью расплава водородной атмосферы тигель можно закрывать графитовой крышкой.

Расплав солей для насыщения приготавливался следующим образом:

1. загрузка и плавление хлористых солей  $\text{BaCl}_2$  и  $\text{NaCl}$ , нагрев до  $t = 650^{\circ}\text{C}$ ;
2. нагрев до  $t = 850^{\circ}\text{C}$ ;
3. введение в ванну смеси из порошков феррохрома, ферромolibдена и ферроникеля, обработанной HCl;
4. нагрев до рабочей температуры ( $1050 - 1250^{\circ}\text{C}$ );
5. загрузка заготовок и их насыщение;
6. выгрузка заготовок: закалка в масло или воду (появляются закалочные микротрещины), охлаждение на воздухе или в песке до  $500^{\circ}\text{C}$  для предотвращения окисления.

Следует отметить, что при диффузионном насыщении контроль температуры представляет особую сложность, что является недостатком метода. Для получения более точных данных о температуре поверхности и сердцевины образца, а также расплава измерения проводи-

лись с помощью трех хромель-алюмелевых термопар. Сначала в течение нескольких секунд производился нагрев поверхности образцов до заданной температуры – термопара 1. Затем индуктор отключался на несколько десятков секунд. В это время температура расплава повышалась за счет теплоотвода от поверхности образцов к расплаву – термопара 3. При повышении температуры расплава до 1020 °С и выше происходило его кипение с активным перемешиванием. В то же время происходил теплоотвод от поверхности заготовки в глубину, что повышало температуру сердцевины – термопара 2. При охлаждении поверхности образцов на 10 - 25 °С индуктор снова включался и температура доводилась до заданной. Таким образом, нагрев осуществлялся прерывисто. Индуктированные токи наводились в поверхностных слоях образцов. Глубина проникновения токов при данной частоте ( $66 \pm 6$  кГц), параметрах индуктора и деталей составляла 2,5 мм. Табличное значение глубины проникновения тока для компактной стали при нагреве 1000 – 1300 °С составляет 2,15 мм при частоте переменного тока 70 кГц. Постепенно температура сердцевины образца приближается к температуре поверхностных слоев, что способствует спеканию порошковых горячештампованных образцов одновременно с многокомпонентным насыщением.

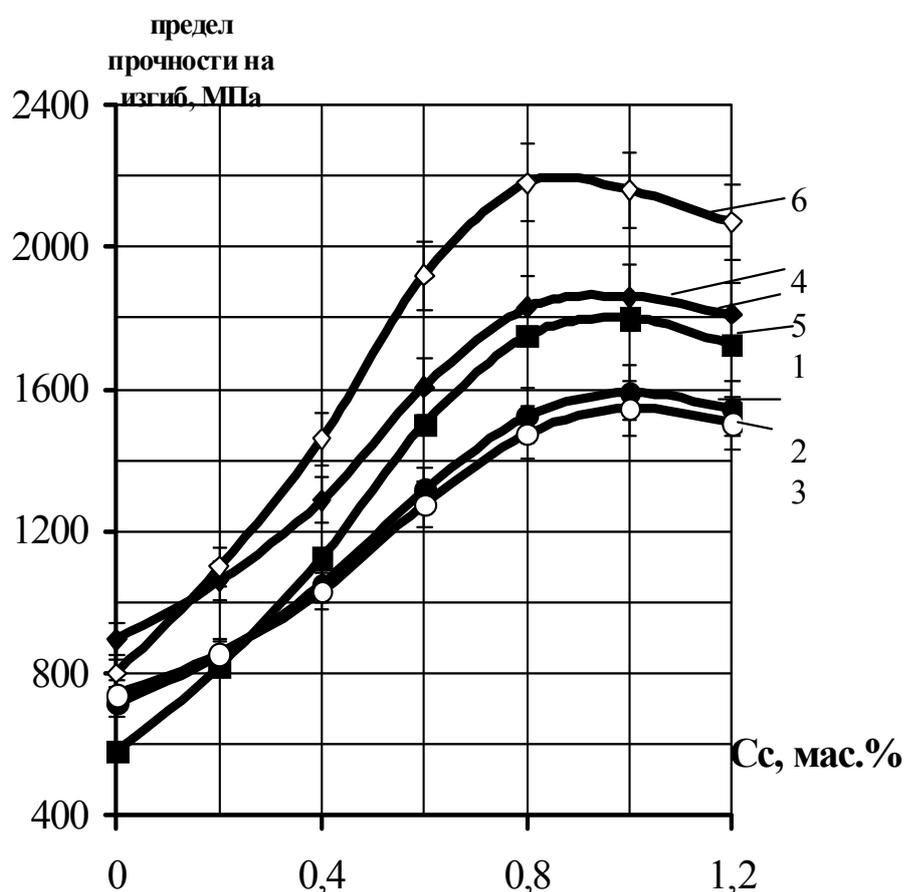
Для повышения механических свойств порошковых материалов проводилась их термическая обработка (ТО). Без- и низкоуглеродистые материалы подвергались нормализации при 950 °С, а средне- и высокоуглеродистые – улучшению (закалка в воду с 800...900 °С и отпуск при 550 °С в течение 1,5 ч). Выбор этих видов ТО объясняется следующим. ХТО должна обеспечивать сочетание стойкого слоя с вязкой и прочной сердцевиной. Поскольку диффузионный слой в процессе ТО не претерпевает полиморфных превращений, то процесс ТО влияет только на сердцевину. Из всех видов ТО только улучшение и нормализация одновременно повышают и вязкость, и прочность материала. Кроме того, они позволяют снизить остаточные напряжения растяжения, возникающие после насыщения. Закалка с низким отпуском подвергнутых насыщению материалов представляется нецелесообразной, так как, несмотря на существенное повышение прочности, она снижает вязкость материала. Кроме того, известно, что улучшение способствует повышению выносливости диффузионно-насыщенных порошковых сталей, а закалка с низким отпуском – ее снижению.

Зависимости микротвердости  $H_{\mu}(C_C)$  для материалов, подвергнутых насыщению, полученных по схеме «Диффузионное насыщение – последующая горячая штамповка» имеют аналогичный вид. Анализ представленных зависимостей показывает, что наличие углерода в материале практически не влияет на твердость диффузионного слоя. При этом твердость сердцевины повышается более существенно – с 1250 МПа на порошковом железе до 3000 МПа на стали 120п.

Анализ экспериментальных зависимостей показывает, что механические свойства материалов, подвергнутых многокомпонентному насыщению зависят от способа насыщения, состава насыщаемого материала и технологической схемы его получения.

Изгибная прочность порошковых материалов с повышением содержания в них углерода до 0,8...1,2 мас. % сначала увеличивается, а затем несколько снижается. Диффузионное насыщение приводит к изменению  $\sigma_{и}$ . Причем изменение прочности зависит от химического состава насыщаемого материала. При  $C_C \leq 0,2$  мас. % многокомпонентное насыщение Cr, Ni и Mo способствует повышению  $\sigma_{и}$  на 1-28 %, прочность сталей других исследованных составов снижается на 1...16 %. Такое влияние диффузионного насыщения Cr, Ni и Mo объясняется тем, что прочность материала диффузионного слоя отличается от прочности материала сердцевины. Она больше, чем у железа и низкоуглеродистой стали, но меньше, чем у средне- и высокоуглеродистых сталей. Влияние многокомпонентного насыщения Cr, Ni и Mo на прочность сказывается тем сильнее, чем больше глубина сложного диффузионного слоя. Многокомпонентное насыщение Cr, Ni и Mo в расплаве солей с нагревом ТВЧ, приводящее к образованию тонких слоев твердого раствора хрома в  $\alpha$ -железе и  $\alpha$ -фазы (80...170 мкм),

практически не влияет на изменение прочности. Многокомпонентное насыщение Cr, Ni и Mo в порошковой засыпке оказывает большее влияние на прочность ПМ вследствие того, что оно обуславливает формирование более глубоких слоев (390...1050 мкм)  $\alpha_1$ -фазы. При этом падение  $\sigma_n$  у образцов, полученных по схеме «многокомпонентное диффузионное насыщение Cr, Ni и Mo – последующая горячая штамповка» больше, чем у полученных по схеме «горячая штамповка с последующими многокомпонентным диффузионным насыщением Cr, Ni и Mo».



**Рисунок 2 – Зависимость предела прочности при изгибе от содержания углерода для порошковых материалов, подвергнутых многокомпонентному насыщению Cr, Ni и Mo:**

**1 – из порошковой засыпки; 2, 3, 4 – из расплава солей при печном нагреве; 5, 6 – из расплава солей с нагревом ТВЧ. Схема получения: 1, 2- ГШ + диффузионное насыщение; 4 – (электроконтактное спекание) + диффузионное насыщение; 3 – диффузионное насыщение + ГШ ( $\Pi = 25\%$ ). Основа материала: 1, 2, 3, 5 – ПЖР 2.200.28; 4, 6 – ПРН2М. порошковых материалов.**

Ударная вязкость ГДПМ, как диффузионно-насыщенных, так и не подвергнутых насыщению, с повышением в них содержания углерода от 0 до 1,2 мас. % весьма существенно снижается (в 2,5...3,7 раз). Многокомпонентное насыщение Cr, Ni и Mo во всех случаях также приводит к снижению КС на 3...36 % по сравнению с образцами-свидетелями, которые испытывались в состоянии после горячей штамповки и отжига (950°C, 1 ч). Причем, как и в случае с прочностью, влияние диффузионного насыщения Cr, Ni и Mo на ударную вязкость тем сильнее, чем больше глубина образующихся диффузионных слоев. В случае использования в качестве основы порошкового материала низколегированного порошка ПРН2М были получены более высокие показатели прочности и вязкости диффузионно-насыщенных материалов, которые находились на уровне ненасыщенных материалов на основе ПЖР 2.200.28.

### Выводы

Механические свойства порошковых материалов, подвергнутых многокомпонентному насыщению Cr, Ni и Mo определяются глубиной диффузионного слоя и химическим составом насыщаемого материала, поэтому механические свойства ПМ, подвергнутых МДН из расплава солей, выше, чем подвергнутых МДН из порошковой засыпки. Наибольшей прочностью после МДН из расплава солей обладает сталь 60п –  $\sigma_{и} = 1755$  МПа, ударной вязкостью – порошковое железо – КС = 1265 кДж/м<sup>2</sup>.

### Литература

1. Мельник П.И. Диффузионное насыщение железа и твердофазные превращения в сплавах. -М.: Металлургия, 1993. -128 с.
2. Заболоцкий В.К., Дьяченко Ю.Г. Износостойкие покрытия на поверхности углеродистой стали при насыщении В, Cr, Al.// Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сб.науч. трудов. – Краматорск – Киев: ДГМА, вып. №16,-2004.-С.66-70.
3. Похмурский В.И., Далисов В. Б., Голубец В. М. Повышение долговечности деталей машин с помощью диффузионных покрытий. – Киев: Наукова думка, 1980. – 188 с.

### **Метод определения параметрической надежности шпиндельных узлов**

к.т.н. доц. Иванников С.Н., Шандов М.М.  
МГТУ «МАМИ»

(495)223-05-23 доб. 1451, [ivannikov.51@mail.ru](mailto:ivannikov.51@mail.ru), [dmt@mami.ru](mailto:dmt@mami.ru)

*Аннотация.* В статье изложен метод определения параметрической надежности шпиндельных узлов, основанный на вероятностном подходе к исследованию выходных параметров, изменяющихся в процессе эксплуатации в широких пределах под воздействием множества различных факторов.

*Ключевые слова:* шпиндельный узел, параметрическая надежность, метод вероятностной оценки.

Непрерывный рост требований, предъявляемых к качеству изготавливаемых деталей в условиях современного высокоавтоматизированного производства и реализуемых малолюдных и безлюдных технологий, выдвигает на первый план параметрическую надежность технологического оборудования (ТО), т.е. способность ТО сохранять в заданных пределах и во времени значения выходных параметров, определяющих качество изготавливаемых деталей.

При этом важнейшими формообразующими узлами, оказывающими доминирующее влияние на параметрическую надежность ТО, являются шпиндельные узлы (ШУ), любые погрешности которых непосредственно переносятся на изготавливаемые детали.

Результатами многочисленных экспериментальных исследований, в том числе выполненных в МГТУ «МАМИ» [1], доказано, что в качестве основных выходных параметров ШУ целесообразно выбирать параметры траекторий движения оси шпинделя, которые, во-первых, имеют тесную количественную связь с показателями качества изготавливаемых деталей и, во-вторых, наиболее полно отражают реакцию ТО на весь спектр эксплуатационных нагрузок и действующих факторов, включая режимы резания.

Параметрическая надежность ШУ с вероятностных позиций оценивается методом сравнения области состояний выходных параметров  $X_i$  с областью их работоспособности. Область состояний образуется всей совокупностью значений, которые принимают выходные параметры  $X_i$  под воздействием множества различных факторов, имеющих случайную природу [2]. Для построения области состояний, которая характеризуется размахом распределения значений параметров  $R = X_{i\max} - X_{i\min}$ , статистическими характеристиками и законом распределения, применяется метод статистического моделирования [3] или проводятся экс-