

УДК 621.79.03

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКЕ ФЕРРИТОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ УЗЛОВ

Куц Л.Е., Жевалев О.Ю., Родионов И.В., Зоркин А.Я., Приходько М.А.
*ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
Саратов, e-mail: kuts70@yandex.ru*

Проведена оценка высокотемпературной прочности ферритовых материалов в условиях процесса диффузионной сварки (ДС). В процессе диффузионной сварки ферритовые детали подвергаются воздействию температуры 900–1000 °С и сжимающего усилия 0,1–0,5 МПа. В настоящее время отсутствуют надежные данные по высокотемпературной прочности промышленных марок большинства ферритовых материалов, что требует экспериментальных оценок значений прочности ферритовых материалов при выполнении процесса диффузионной сварки. В работе предложено использовать статистическую теорию прочности хрупких материалов на основе модели Вейбулла для оценки высокотемпературной прочности ферритовых материалов. Рассмотрены зависимости высокотемпературной прочности ферритовых материалов от «размерного фактора». Построены зависимости прочности на сжатие и прочности на сдвиг от объема пластин из феррита 30СЧ6 при температуре 1000 °С. Полученные данные позволяют прогнозировать высокотемпературную прочность промышленных марок ферритов при изготовлении ферритометаллических узлов на основе процесса диффузионной сварки (ДС).

Ключевые слова: ферритовые элементы, диффузионная сварка, высокотемпературная прочность, модель Вейбулла

ANALYSIS OF STRENGTH CHARACTERISTICS FERRITE MATERIALS IN DIFFUSION WELDING FERRITE METAL PARTS

Kuts L.E., Zhevalev O.Y., Rodionov I.V., Zorkin A.Y., Prikhodko M.A.
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, e-mail: kuts70@yandex.ru

The estimation of high-strength ferrite materials in the process diffusion bonding. During the diffusion bonding ferrite parts are exposed to temperatures 900–1000 °C and 0,1–0,5 MPa compressive stress. Currently, there are no reliable data on the high-strength industrial brands most ferrite materials that require experimental evaluations strength values ferrite materials when performing the diffusion welding process. The paper proposed to use statistical theory of strength of materials based on brittle Weibull model to evaluate the high temperature strength of the ferrite materials. The dependences high-strength ferrite materials from the «size factor». The dependences compressive strength and shear strength by volume of ferrite plates 30СЧ6 at 1000 °C. The data obtained allow to predict high-strength industrial brands in the manufacture of iron ferrite metal parts through a process of diffusion bonding.

Keywords: ferrite elements, diffusion welding, high strength, Weibull model

В радиотехнике находят широкое применение различные приборы на основе ферритовых элементов, которые необходимо крепить к металлическому корпусу. В большинстве случаев для такого крепления используются клеевые соединения. Однако при возрастании мощности ферритовых приборов и связанного с этим возрастания температурных интервалов работы ферритовых элементов используются паяные и сварные соединения. При этом находят применение так называемые ферритометаллические узлы (ФМУ), которые обеспечивают крепление ферритовых элементов на металлическом корпусе прибора. Сварные соединения целесообразно выполнять диффузионной сваркой (ДС). Процесс ДС предполагает существенные термомеханические воздействия на ферритовые элементы (температуры от 900 до 1000 °С, давления сжатия от $0,1 \cdot 10^7$ до $1,5 \cdot 10^7$ Па). В этой связи необ-

ходимы оценки высокотемпературной прочности ферритовых материалов, без которых невозможно проектирование технологического процесса ДС. В каждом конкретном случае оценка высокотемпературной прочности ферритовых материалов конкретных промышленных марок требует выполнения дополнительных экспериментов.

По характеру механических свойств ферриты относятся к хрупким материалам. При этом известны некоторые методики оценки данных свойств [1, 6], которые показывают, что для ферритов наиболее опасными являются деформации растяжения, изгиба и кручения, предел прочности при которых приблизительно в 10–20 раз ниже, чем при сжатии. В общем случае механическая прочность ферритовых элементов зависит от состояния поверхности изделий, их объема, длительности и скорости прикладываемой нагрузки, микроструктуры,

распределения по объему напряжений и дефектов, окружающей среды и температуры.

Техническая прочность ферритов обычно характеризуется значениями прочности, полученными при испытании на контрольных образцах. Однако для ферритов наблюдается большая зависимость прочности от распределения дефектов по объему, что требует учета «размерного фактора», влияние которого заключается в изменении величины прочности с увеличением или уменьшением площади поперечного сечения и объема образца. Указанную особенность объясняет статистическая теория прочности хрупких материалов, связывающая значение прочности с наличием статистически распределенных в изделии дефектов. В изделиях большего объема возрастает вероятность существования дефектов и их сосредоточения в нагруженном сечении, что приводит к уменьшению прочности изделий по сравнению с изделиями меньшего объема (рис. 1).

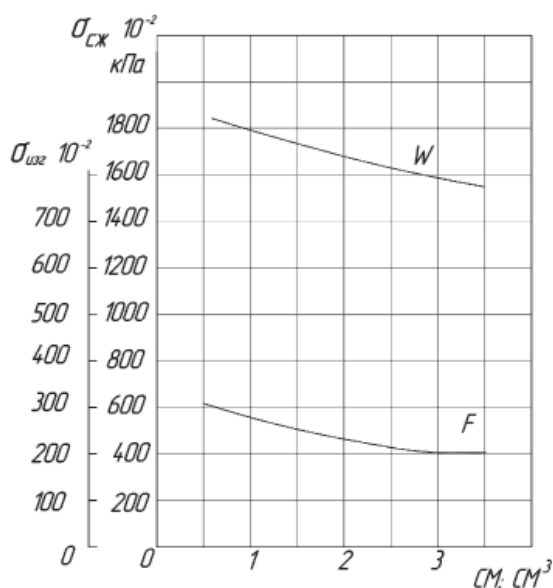


Рис. 1. Влияние объема W и площади поперечного сечения F образца феррита 50ВЧ2 при различных видах деформации

Из представленной зависимости прочностных характеристик феррита 50ВЧ2 видно, что прочность при всех видах испытаний снижается с увеличением объема и площади поперечного сечения образцов [1].

Для существующих технологий изготовления ферритов характерно наличие в изделиях неоднородностей, дефектов структуры и внутренних напряжений, неупорядоченно распределенных по объему образца. Поэтому при испытании ферритов на прочность наблюдается большая дисперсия величины

прочности. Даже в пределах одной партии образцов с одинаковыми значениями площади поперечного сечения и объема дисперсия в отдельных случаях достигает средней величины, находящейся в диапазоне 25–30%.

Для статистического анализа прочности хрупких материалов и оценки вероятности их разрушения предложено использовать модель Вейбулла (W. Weibull) [2, 4]. Эта модель, основанная на концепции «наиболее слабого звена», рассматривает структуру материала как цепь, прочность которой определяется ее наименее прочным звеном. Вероятность разрушения тела P задается выражением

$$P = 1 - \exp(-R), \quad (1)$$

где R – риск разрушения, определяемый для объема V как

$$R = \int_V \left[(y - y_u) / y_0 \right]^m dV \text{ для } y > y_u; \quad (2)$$

$$R = 0 \text{ для } y < y_u,$$

где y – нагрузка, приложенная к элементу dV ; y_u – предел прочности, т.е. минимальное напряжение, которое может вызвать разрушение; y_0 – нормировочный параметр, имеющий размерность «напряжение × объем^{1/м}», и m – модуль Вейбулла, также называемый параметром формы распределения.

Модуль Вейбулла характеризует распределение прочности по величине y_u . Когда этот модуль возрастает, кривая распределения прочности по величине сужается. В настоящее время отсутствуют данные по значениям m для ферритовых материалов. В работах по оценке зависимости прочности от размеров образцов стекол [5] значения модуля m изменяются от 4 до 15. Предел прочности y_u обычно принимается равным нулю для того, чтобы при нахождении R по уравнению (2) после интегрирования получить функцию только двух параметров, которую легко трансформировать в линейный вид без потери основных результатов анализа. Приравнивание y_u к нулю дает заниженные прочностные характеристики материала (переоценка вероятности разрушения), но без какого-либо существенного изменения в самом характере распределения вероятности разрушения.

В этом случае выражение для R может быть записано в простой форме:

$$R = y_i V_i (y_i / y_0)^m, \quad (3)$$

где y_i – коэффициент, зависящий от условий нагружения тела.

Основное допущение, которое принимается в рассматриваемом случае при использовании модели Вейбулла, состоит в том,

что материал является гомогенной средой с одним типом дефектов, присутствующих в большом количестве и беспорядочно распределенных по материалу.

Тогда можем предположить равенство величин R для разрушения образцов ферритовых элементов разных объемов:

$$R_1 = y_1 \cdot V_1 \cdot (y_1/y_0)^m;$$

$$R_2 = y_2 \cdot V_2 \cdot (y_2/y_0)^m.$$

Для $R_1 = R_2$ будем иметь

$$\lg y_1 + \lg V_1 + m \lg y_1 - m \lg y_0 =$$

$$= \lg y_2 + \lg V_2 + m \lg y_2 - m \lg y_0.$$

Предполагая равенство коэффициентов y_1 и y_2 , зависящих от условий нагружения в технологическом процессе ДС и объема образцов феррита, получим

$$\lg(V_1/V_2) = m \lg(y_2/y_1)$$

$$\text{или} \quad y_2/y_1 = (V_1/V_2)^{1/m}. \quad (4)$$

Это соотношение показывает, что образец с эффективным объемом V_2 характеризуется такой же вероятностью разрушения, как и образец с объемом V_1 , если напряжения изменяются от y_1 до y_2 .

Соотношение (4) может иметь существенное значение для практики. При серийном производстве одинаковых по форме, но имеющих различные геометрические размеры ФМУ возможно прогнозирование их прочности без выполнения экспериментальных испытаний.

Для определения значений модуля Вейбулла для ферритовых деталей и ФМУ, выполненных диффузионной сваркой, в качестве исходных данных использовалась зависимость прочности на сжатие иттриевых феррогранатов при температурах 900 и 1000°C в вакууме порядка $1,33 \cdot 10^{-2} \dots 6,66 \cdot 10^{-3}$ Па [3] (рис. 2).

На данном рисунке приведена зависимость $\sigma_{сж}$ от размеров ферритовых деталей в условиях процесса диффузионной сварки.

Используя значения прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ для ферритов с объемом 0,3; 0,5; 0,75 и 1,0 см³, а также выражение (4), определялось значение модуля Вейбулла (табл. 1).

Принимая значение модуля Вейбулла для $\sigma_{сж}$ равным 1,8, можно экстраполировать графическую зависимость до объема образцов феррита 2,5 см³.

Для построения зависимости прочности на сдвиг $\tau_{сдв}$ от размеров образцов ФМУ, вы-

полненных ДС, использовались значения, приведенные на рис. 2, а также экспериментальные данные для размеров ФМУ, составляющих 1,0 и 1,5 см³ (табл. 2).

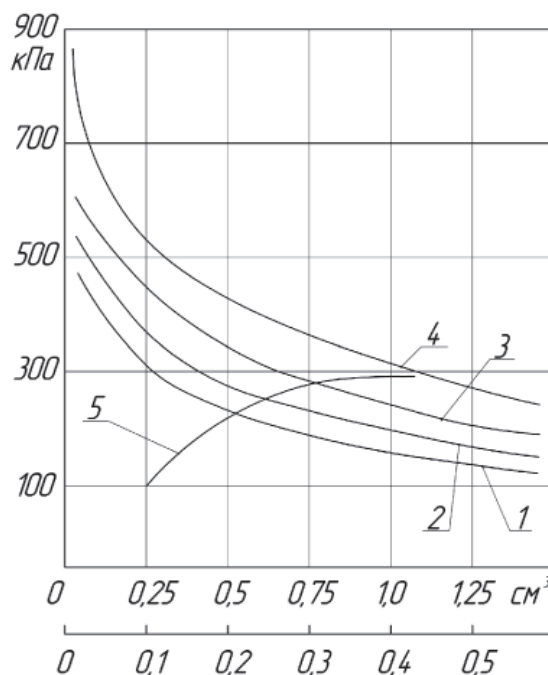


Рис. 2. Зависимость прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ ферритогранатов от объема (1–4) и толщины изделий (5) при $T = 900, 1000^\circ\text{C}$:
1, 5 – 30СЧ6 (1000°C); 2 – 30СЧ6 (900°C);
3 – 40СЧ4 (1000°C); 4 – 40СЧ4 (900°C)

Таблица 1
Зависимость $\sigma_{сж}$ от объема образцов феррита 2,5 см³

$\sigma_{сж}$				
m	$V_1, \text{см}^3$	$V_2, \text{см}^3$	$y_1, \text{кПа}$	$y_2, \text{кПа}$
1,85	0,3	0,5	220	290
1,82	0,5	0,75	176	220
1,8	0,75	1,0	150	176
1,82	1,0	1,25	132	150

Таблица 2
Зависимость $\tau_{сдв}$ от размеров образцов ФМУ

$\tau_{сдв}$				
$V, \text{см}^3$	$y_1, \text{кПа}$	$y_2, \text{кПа}$	$y_3, \text{кПа}$	$y_{ср}, \text{кПа}$
1,0	452	438	406	432
1,5	397	382	361	380

По выражению (4) определялось значение модуля Вейбулла (табл. 3).

Таблица 3
Значения модуля Вейбулла

m	$\tau_{сдв}$			
	$V_1, \text{см}^3$	$V_2, \text{см}^3$	$y_1, \text{кПа}$	$y_2, \text{кПа}$
2,95	0,3	1,0	432	650
3,16	1,0	1,5	380	432

Принимая значение модуля Вейбулла для $\tau_{сдв}$ равным 3,0, рассчитывались недостающие значения $\tau_{сдв}$ для объема ФМУ – 0,5; 2,0; 2,5 см^3 и строилась графическая зависимость $\tau_{сдв}$ для объемов от 0, до 2,5 см^3 (рис. 3).

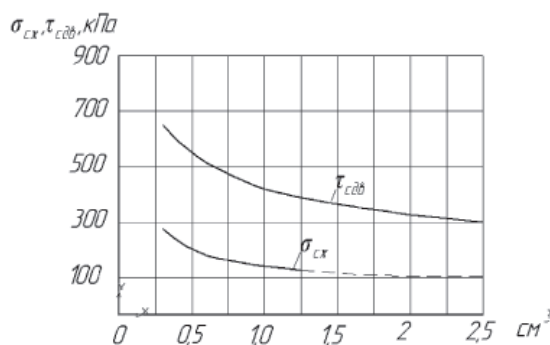


Рис. 3. Зависимость $\sigma_{сж}$ и $\tau_{сдв}$ от размеров ферритовых образцов

Полученные зависимости использовались для расчетов прочности $\tau_{сдв}$ ФМУ при проектировании технологических процессов диффузионной сварки.

Таким образом, в настоящей работе проведена оценка высокотемпературной прочности ферритовых материалов, для которых наиболее опасными являются деформации растяжения, изгиба и кручения, предел прочности при которых приблизительно в 10–20 раз ниже чем при сжатии. Используя статическую теорию прочности хрупких материалов, было установлено, что зависимость прочности ферритов от дефектов требует учета размерного фактора. Была предложена зависимость прочностных характеристик от размерного фактора, из которой видно, что прочность ферритов при всех видах испытаний снижается с увеличением объема и площади поперечного сечения образцов. Проведен статистический анализ прочности хрупких материалов и оценка вероятности их разрушения при использовании модели Вейбулла. На основании статистической модели Вейбулла построены зависимости $\sigma_{сж}$ феррита 30СЧ6 при температуре 1000 °С и $\tau_{сдв}$ для ФМУ на основе диффузионного соединения от объемов ферритовых образцов.

Выводы

1. Предложен метод прогнозирования высокотемпературной прочности деталей из ферритогранатов для процесса ДС на основе модели Вейбулла.

2. Полученные оценки справедливы для ферритовых элементов, имеющих форму пластин объемом от 0,3 до 2,5 см^3 .

Список литературы

1. Злобин В.А. Ферритовые материалы / В.А. Злобин, В.А. Андреев, Ю.С. Звороно. – Л.: Энергия, 1970. – 109 с.
2. Конюшков Г.В. Высокотемпературная прочность феррито-гранатов в условиях пайки и диффузионной сварки / Г.В. Конюшков, О.Ю. Жевалев, Л.Е. Куц, В.Г. Конюшков, Н.А. Вавилина // Антенны. – 2013. – № 7. – С. 21–23.
3. Конюшков, Г.В. Ферриты и их соединения с металлами и керамикой / Г.В. Конюшков, Б.М. Зотов, Э.И. Меркин – М.: Энергия, 1979. – 232 с.
4. Куц Л.Е. Повышение термических и механических характеристик ферритометаллических узлов электровакуумных приборов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – Саратов: СГТУ, 2012. – 117 с.
5. Никоноров Н.В. Оптическое материаловедение: основы в прочности оптического стекла: учебное пособие, курс лекций / Н.В. Никоноров, С.К. Евстропьев – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 102 с.
6. Стабильность свойств ферритов / Р.М. Биктяков и др. – М.: Советское радио, 1974. – 352 с.

References

1. Zlobin V.A. Ferritovye materialy / V.A. Zlobin, V.A. Andreev, Ju.S. Zvorono. L.: Jenergija, 1970. 109 p.
2. Konjushkov G.V. Vysokotemperaturnaja prochnost ferrito-granatov v uslovijah pajki i diffuzionnoj svarki / G.V. Konjushkov, O.Ju. Zhevaley, L.E. Kuc, V.G. Konjushkov, N.A. Vavilina // Antenny. 2013. no. 7. pp. 21–23.
3. Konjushkov, G.V. Ferrity i ih soedinenija s metallami i keramikoj / G.V. Konjushkov, B.M. Zotov, Je.I. Merkin M.: Jenergija, 1979. 232 p.
4. Kuc L.E. Povyshenie termicheskikh i mehanicheskikh harakteristik ferritometallicheskih uzlov jelektrovakuumnyh priborov: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk Saratov: SGTU, 2012. 117 p.
5. Nikonorov, N.V. Opticheskoe materialovedenie: osnovy v prochnosti opticheskogo stekla: uchebnoe posobie, kurs lekcij / N.V. Nikonorov, S.K. Evstropjev SPb: SPbGU ITMO, 2009. 102 p.
6. Stabilnost svojstv ferritov / R.M. Biktjakov i dr. M.: Sovetskoe radio, 1974. 352 p.

Рецензенты:

Бекренев Н.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов;

Игнатьев А.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация, управление, мехатроника», ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов.