

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ, ПОВЕРХНОСТНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ СПЛАВАМИ С ТЕРМОУПРУГИМИ ФАЗОВЫМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ, С УЧЕТОМ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ

Бледнова Ж.М., Русинов П.О.

*Кубанский государственный технологический университет,
Краснодар, Россия, blednova@mail.ru; ruspiter5@mail.ru*

Тенденции развития современного машиностроения характеризуются повышенными требованиями к функциональной надежности и живучести элементов конструкций при длительной безаварийной эксплуатации. Учитывая решающую роль поверхностного слоя в накоплении повреждений и разрушении задачу повышения надежности все чаще решают различными способами поверхностного модифицирования. Широкие возможности повышения функциональной и прочностной надежности открываются при использовании материалов с термоупругими фазовыми превращениями (ТУФП) для формирования поверхностных слоев и композиций. Современные многокомпонентные поверхностные композиции, включающие слои из материалов с ТУФП, представляют собой адаптивный иерархический материал, состоящий из слоев различного химического состава. Это сложная неравновесная система, в которой протекают нелинейные процессы с образованием диссипативных структур с фазовыми переходами [1], что способствует формированию наноструктур с уникальными функциональными свойствами сверхэластичности или памяти формы. Поэтому оценку долговечности материалов, поверхностно-модифицированных сплавами с ТУФП, следует производить с учетом структурно-фазового состояния.

Для оценки циклической долговечности в механике разработаны и широко используются силовые, деформационные и энергетические критерии разрушения. Перспективным для решения проблемы оценки долговечности и повреждаемости поверхностно-модифицированных материалов является наиболее универсальный энергетический подход. Поскольку в настоящей работе исследование проводится на сталях с модифицированным поверхностным слоем (или композицией) из материалов с ТУФП, прочностные характеристики которых определяются не только химическим, но и фазовым составом, то для оценки долговечности целесообразно использовать термодинамический подход, основанный на аналогии деформирования, разрушения и плавления, развитый рядом ученых [2-5]. Выбор энергетического критерия, основанного на аналогии деформирования, разрушения и плавления, объясняется следующим: энергоемкость является аддитивной величиной и может быть определена для многокомпонентных материалов с учетом химического состава поверхностного слоя по термодинамическим характеристикам и диаграммам состояния систем; энергоемкость может быть определена с учетом технологических операций поверхностного модифицирования с учетом структурно-фазового состояния по результатам рентгеноструктурного анализа и количественных металлографических исследований.

В настоящей работе используется вариант энергетической модели накопления повреждений и разрушения поверхностного слоя [5,6], согласно которой на накопление повреждений расходуется не вся, а лишь некоторая доля необратимой работы деформирования. Для установления этой доли, зависящей от условий теплообмена, степени деформации и т.д. необходимо обращаться к физическому или механическому эксперименту. В работе [2] показано, что механические свойства металлов и сплавов имеют связь с термодинамическими функциями состояния (энтропией, энтальпией, внутренней и свободной энергией). Ранее нами для оценки и прогнозирования циклической долговечности сталей с поверхностно-модифицированным слоем из материалов с ЭПФ использовался энергетический критерий [6,7], в плавную часть которого входит величина энергоемкости, определяемая на основании термодинамических характеристик и диаграммы состояния систем и характеризующая прочность межатомной связи. В сплавах с ТУФП величина энергоемкости не является единственным критерием прочности сплавов, структурный фактор (α) превалирует над прочностью межатомной связи (Q) и его

величина учитывается с помощью коэффициента термомеханической активности. В работах [6] было предложено уравнение:

$$W \cdot N^p = \alpha \cdot Q, \quad (1)$$

где W – энергия, затраченная на постепенное образование микроповерхности разрушения за один цикл и определяемая по петле механического гистерезиса, Дж/м³; N – число циклов, необходимое для разрушения локального объема металла и элементарного скачка трещины в направлении её развития; p – эмпирический коэффициент; α – коэффициент термомеханической активности; Q – энергоёмкость металла, Дж/м³. Алгоритм расчета энергоёмкости и теоретической прочности приведен на рис. 1, а результаты расчета для трехкомпонентного сплава с ТУФП Ni-30%at.Ti-20%at.Hf в табл. 1.

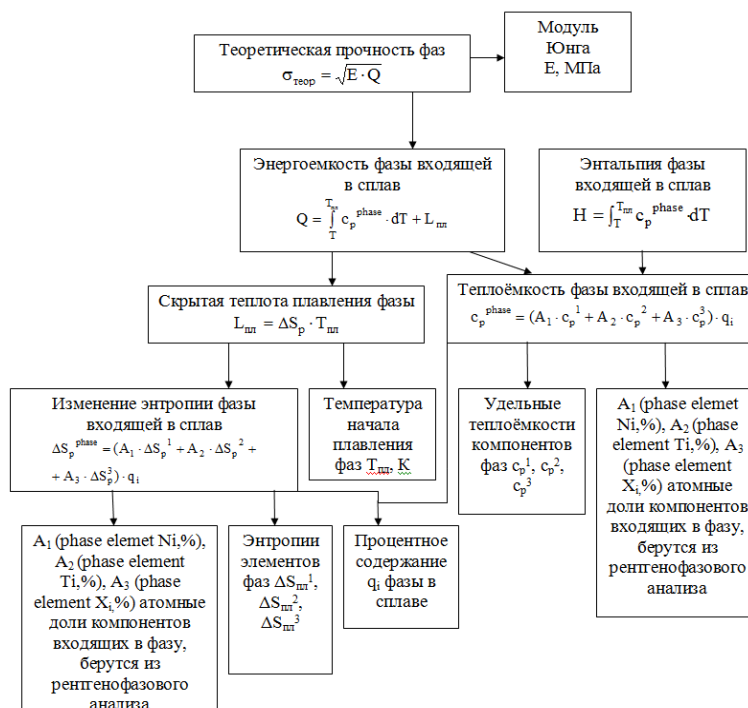


Рисунок 1 - Блок схема расчета энергоёмкости многокомпонентных систем

Таблица 1 - Энергоёмкость и теоретической прочностью Ni-30%at.Ti-20%at.Hf

Название	Q, кДж/моль	$\sigma_{теор}$, ГПа	H, кДж/моль	ΔS , Дж/мольК
TiNiHf (B19)	18,85	40,50	7,84	6,95
TiNiHf (B2)	39,34	58,50	16,37	14,51
Ni ₃ Hf	10,01	29,56	3,96	3,99
NiHf	7,891	26,20	3,00	2,57
Ti ₂ Ni	3,05	15,41	1,22	1,46
Hf ₁₂ Ni ₅₀ Ti ₃₈	4,67	19,09	1,95	1,34
TiO	1,17	9,54	0,56	0,35

Для материалов с поверхностно-модифицированным слоем, сформированным высокоскоростным газопламенным напылением (ВГН) с последующей ТМО, повреждаемость, определенная на основе предложенного энергетического критерия (2) [6,7], приведена на рис.2, а экспериментальная и расчетная циклическая долговечность в табл. 2.

$$\omega = \frac{\beta \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot N^p}{\alpha \cdot Q} \quad (2)$$

где β – коэффициент, зависящий от формы петли гистерезиса; α – структурный фактор сплава, принимался равным фрактальной размерности.

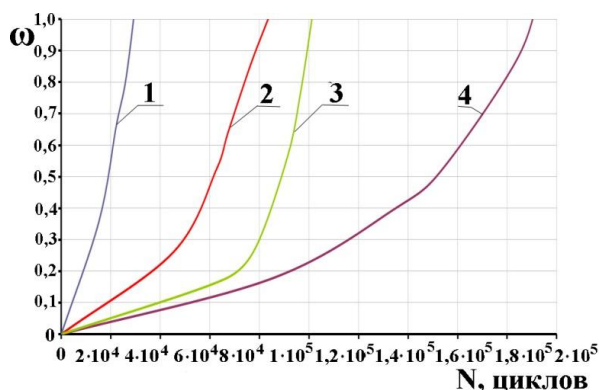


Рисунок 2 - Зависимость повреждаемости от числа циклов стали 45 с поверхностным слоем сплава с ТУФП толщиной 1мм, после ВГН+ТМО при симметричном цикле, $\sigma_a = 500$ МПа: Ni-46%at.Ti-4%at.Ta – 1); Ti48,7%at.Ni-1,3%at.Co – 2); Ni-33%at.Ti-18%at.Zr – 3); Ni-30%at.Ti-20%at.Hf – 4)

Таблица 2 - Экспериментальные и расчетные значения долговечности стали 45 с поверхностным слоем из двух- и трехкомпонентных сплавов с ТУФП

Материал	σ_a , МПа	Q, МДж/м ³	ρ	α	N _{экс.}	N _{расч.}
Сталь 45 + TiNiCo	500	9590,05	0,253	1,73	83750	83406
Сталь 45 + TiNiHf	500	9633,64	0,253	1,89	193715	188251
Сталь 45 + TiNiZr	500	9625,4	0,253	1,8	102537	100883
Сталь 45 + TiNiTa	500	10218,34	0,253	1,87	29896	29169
Сталь 45 + TiNi	500	9627,72	0,253	1,78	89657	88577
Сталь 45 + TiNi	450	9627,72	0,253	1,78	796324	780894

Таким образом, показана целесообразность использования предложенного энергетического критерия для прогнозирования циклической долговечности и повреждаемости материалов, поверхностно модифицированных сплавами с ТУФП. Важной отличительной особенностью критерия является возможность учета структурно-фазового состояния материалов с ТУФП структурным параметром, определяемым на основе фрактально-синергетического подхода по результатам мультифрактальной параметризации структуры и учитывающим влияние фрактальной размерности, однородности, периодичности и адаптивности структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Соглашение № 15-19-00202)

Список литературы:

1. Blednova Zh.M., Rusinov P.O., Balaev E.Y. Quantification of hereditary regularities of the formation and transformation of the surface layer of multicomponent materials with shape memory in a high-energy impact. *Materials Today Proceedings*. V. 4, I. 3, Part B, p. 4652-4657, 2017.
2. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. – Ташкент: ФАН, 1979. – 169 с.
3. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости материалов. М.: Металлургия, 1975.456с.
4. Щипачев А.М. Термодинамическая теория прочности: прогнозирование многоциклового усталости металлов. УТИС. Уфа, 1998. 107 с.
5. Бледнова Ж.М. Прогнозирование циклической долговечности бинарных сплавов и материалов с покрытиями // Заводск. лаборатория. – 1988. – № 7. – С. 76-81.
6. Бледнова Ж.М., Будревич Д.Г. Механические особенности усталостного поведения материалов с обратимой фазовой структурой. В кн. Научные основы повышения малоциклового прочности. Под ред. Н.А. Махутова. М.: Наука, 2006. С. 268-298.
7. Rusinov P.O., Blednova Zh.M. Evaluation of Cyclic Durability in Surface modified Layers with TiNiZr Thermoelastic Phase Transformations. *Matec Web of Conferences* 142, 03005 (2018).