

## СТРУКТУРНАЯ СХЕМА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ НАПЛАВКИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

И.К. СЕНЧЕНКОВ<sup>1</sup>, И.А. РЯБЦЕВ<sup>2</sup>, Е. ТУРЫК<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ин-т механики им. С.П. Тимошенко НАНУ. 03057, г. Киев, ул. Нестерова, 3. E-mail: ang@inmex.kiev.ua

<sup>2</sup> ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>3</sup> Институт сварки. 44100, г. Гливице, Польша, ул. Б. Чеслава, 16-18. E-mail: eugeniusz.turyk@glivice.pl

Представлена структурная схема расчетной методики оценки напряженно-деформированного и микроструктурного состояния деталей в процессе наплавки и последующей эксплуатации. В основе методики лежат следующие математические модели: начального состояния, в том числе, напряженно-деформированного и структурного состояния в процессе изготовительной наплавки; эволюции служебных и структурных параметров в процессе эксплуатации; накопления повреждаемости и снижения усталостной долговечности; восстановительной наплавки. По сравнению с экспериментальными методами, математическое моделирование позволяет с меньшими затратами и более эффективно оценивать напряженно-деформированное и структурное состояние деталей в процессе наплавки и последующей эксплуатации. Библиогр. 20, рис. 3.

*Ключевые слова:* наплавка; напряженно-деформированное состояние; микроструктурное состояние; математическое моделирование; методика расчета

Разработка методик расчета напряженно-деформированного и микроструктурного состояния (НДМСС) деталей в процессе наплавки и эксплуатации требует учета многих факторов. В настоящее время в результате развития математического аппарата и компьютерной техники снимаются многие ограничения на использование в методиках расчета таких характеристик сложного поведения материалов как пластичность, ползучесть, изотропное и направленное упрочнение, зависимость предела текучести материала от скорости деформации, структурные превращения и т.д. Это в значительной мере повышает надежность и достоверность расчетов. В результате экспериментальные методы исследования процессов изготовления и эксплуатации различных деталей машин и механизмов уступают место более эффективным и менее затратным методам математического моделирования.

Методики расчета НДМСС деталей должны обеспечивать достоверное описание поведения материала в области упругого и неупругого деформирования, зависящего от времени или скорости деформации. Современные экспериментальные и теоретические исследования показывают, что модели вязкопластического поведения материалов, использующие концепцию переменных состояний, являются наиболее подходящими для такого описания. Кроме того, эти модели являются удобными для применения в компьютерных

программах [1]. Как следствие, более глубокий анализ НДМСС деталей на основе более реалистичных математических моделей дает более достоверную оценку надежности деталей и безопасности их эксплуатации [2, 3].

**Моделирование технологических процессов.** Унифицированные вязкопластические модели технологических процессов более предпочтительны по сравнению с моделями, основанными на раздельном использовании теории пластичности и ползучести, поскольку в единой системе уравнений описывают пластичность, ползучесть и релаксацию в широком интервале температур в зависимости от вида и скорости внешней нагрузки. Это качество является важным при моделировании технологических процессов изготовления деталей и их последующей эксплуатации. Полученная модель поведения материала должна быть пригодной для использования в компьютерных, в частности, конечно-элементных программах.

В отличие от частных моделей вязкопластичности, современные модели, использующие переменные состояния, описывают все основные явления, такие как ползучесть, изотропное и направленное упрочнение, зависимость предела текучести материала от скорости деформации, релаксация и т.д.

Именно поэтому такие подходы широко используются в настоящее время для моделирования напряженно-деформированного состояния

детали при сварке, наплавке и других технологических процессах, а также для моделирования процессов в наплавленных деталях при их последующей эксплуатации. В частности, к таким моделям относится унифицированная модель Боднера–Партома.

**Моделирование термомеханических процессов.** В термомеханических процессах материал детали при изготовлении и эксплуатации может иметь различные температурные истории. На стадии достаточно высокого нагрева исходные структурные составляющие материала, в частности стали, превращаются в аустенит, который на стадии охлаждения может распасться на перлит, бейнит и мартенсит. Эти превращения сопровождаются изменениями физико-механических характеристик, скрытыми теплотами, изменениями объема, появлением термофазовых деформаций и т.д. Модель взаимосвязи (взаимовлияния) термомеханических процессов при изготовлении и эксплуатации детали показана на рис. 1.

На рис. 2 представлена блок-схема мониторинга состояния детали на всех этапах ее существования. Эта схема может быть положена в основу разработки математических моделей и методик расчета напряженно-деформированного и структурного состояния детали в процессе наплавки и последующей эксплуатации при различных видах изнашивания и нагрузок. В блок-схеме представлены следующие модели.

**Модель начального состояния детали.** Блок «Начальное состояние» включает исходные характеристики наплавленной детали, с которыми она поступает в эксплуатацию. Эти характеристики можно разделить на две части. К первой относятся фактические размеры детали и отдельных ее слоев  $\{h_k\}$ , их механические и теплофизические характеристики:  $E$  — модуль упругости;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $k, c$  — коэффициенты теплопроводности и теплоемкости и т.п. Вторую часть составляют параметры, с которыми деталь входит в эксплуатацию. Значения этих параметров определяются технологией изготовления детали и конкретизируются экспериментально либо путем математического моделирования. Для наплавленной детали начальное состояние определяется набором следующих параметров:

$$P^0 = \{\epsilon_{ij}^0, \sigma_{ij}^0, c_{\xi}^0, K^0, \beta_{ij}^0, w^0, h_k^0\}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_{ij}^0$  и  $\sigma_{ij}^0$  — остаточные деформации и напряжения;  $c_{\xi}^0$  — объемная концентрация фаз:  $\xi = a$  — аустенита;  $\xi = p$  — перлита;  $\xi = b$  — бейнита;  $\xi = m$  — мартенсита и т. д.;  $K^0, \beta_{ij}^0$  — параметры изотропного и кинематического упрочнения;  $w^0$  — параметр повреждаемости;  $h_k^0, k = 1, 2, 3$  — начальные размеры детали.

### Модель напряженно-деформированного и структурного состояния детали при наплавке.

При расчете моделируются термомеханические процессы при наплавке деталей с использованием элементов теории растущих термовязкопластических тел [4–7] в сочетании с численным методом конечных элементов (МКЭ). Для расчета фаз используются термокинетические диаграммы распада аустенита соответствующих сталей [8, 9]. Термомеханическое поведение материала описывается с помощью модифицированной модели течения Боднера–Партома [10–13].

**Модель эволюции служебных параметров.** Здесь можно выделить два аспекта — геометрический и прочностной. Геометрический параметр, как служебный фактор, связан с износом детали. Прочностной аспект связан с накоплением повреждаемости в местах концентрации напряжений и может привести к исчерпанию функций детали вследствие разрушения. В предлагаемой модели в качестве служебных параметров принимаются либо набор критических размеров детали  $h_k, k = 1, 2, 3$  либо параметр повреждаемости  $w$  или долговечности  $N_f$ . В суммарном виде они обозначаются символом  $\Omega = \{h_k, w, \dots\}$ .

**Модель, описывающая структурные превращения.** Точное описание структурных превращений играет важную роль при анализе термоупругопластического напряженно-деформированного состояния детали при наплавке (сварке) и эксплуатации [14]. Получаемые при этом результаты влияют также на оценку способности деталей сопротивляться изнашиванию и циклическим нагрузкам. В настоящее время используются два метода для исследования структурных превращений. В первом используют информацию, содержащуюся в диаграммах изотермического превращения аустенита, а также в

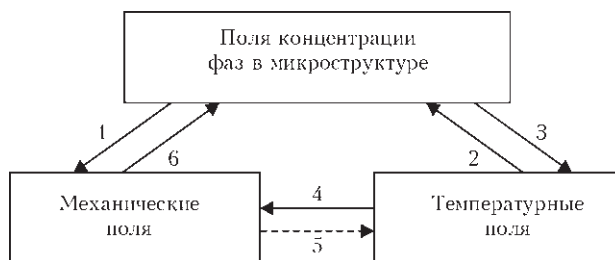


Рис. 1. Взаимосвязь между температурой, механическим состоянием и эволюцией микроструктуры в процессе изготовления и эксплуатации детали: 1 — зависимость механических свойств от концентрации фаз; объемные изменения вследствие фазовых превращений; пластичность, обусловленная фазовыми превращениями; 2 — микроструктурная эволюция, основанная на температурной истории; 3 — микроструктурная эволюция, влияющая на температурное поле через скрытые теплоты и свойства материалов, зависящие от микроструктуры; 4 — взаимосвязь через тепловое расширение и свойства материалов, зависящие от температуры; 5 — механический разогрев; 6 — влияние напряжений на микроструктурные превращения

диаграммах Шеффлера–Делонга [15]. Во втором используют термокинетические диаграммы (ТКД), называемые также ССТ-диаграммы (Continuations Cooling Transformation) [16, 17]. Они описывают распад аустенита в режиме непрерывного охлаждения.

В последнее время получили распространение синтетические модели, в которых объединяются преимущества и наработки обоих подходов. Типичной в этом смысле является модель, развитая в работе [18].

**Модель изнашивания деталей.** Изнашивание это процесс постоянного изменения размеров детали, происходящий при трении, а износ есть результат и количественная мера изнашивания.

Следствием изнашивания является утрата функциональных свойств изделия, а также его долговечности вследствие изменения размеров детали, образования концентраторов напряжений в местах выработок, усталостных микротрещин и т. п.

Для характеристики процесса часто используют интенсивность изнашивания:

$$I_h = \Delta h / \Delta s = \dot{h} / v, \quad (2)$$

где  $\dot{h}$  — скорость изменения линейного размера детали;  $v$  — скорость скольжения.

**Модель накопления повреждаемости.** Концепция повреждаемости, введенная Качановым [19], моделирует ускорение ползучести в металлах, которое ведет к разрушению материала. В более общем подходе повреждаемость отражает дефекты в материале, такие как микропоры и микротрещины. Когда эти микродефекты распределены однородно и случайно ориентированы, тогда повреждаемость может трактоваться как скалярная величина. Если ориентация дефектов повреждаемости важна, то последняя трактуется как тензорный параметр [20].

**Модель восстановительной наплавки.** При моделировании временного процесса эксплуатации детали контролируется изменение служебного параметра  $\Omega$  (см. рис. 2). На каждом временном шаге оно сравнивается с неким «ремонтным» значением, при достижении которого деталь из этапа эксплуатации переводится в этап восстановительной наплавки (ремонта). С точки зрения математического моделирования ремонт есть преобразо-

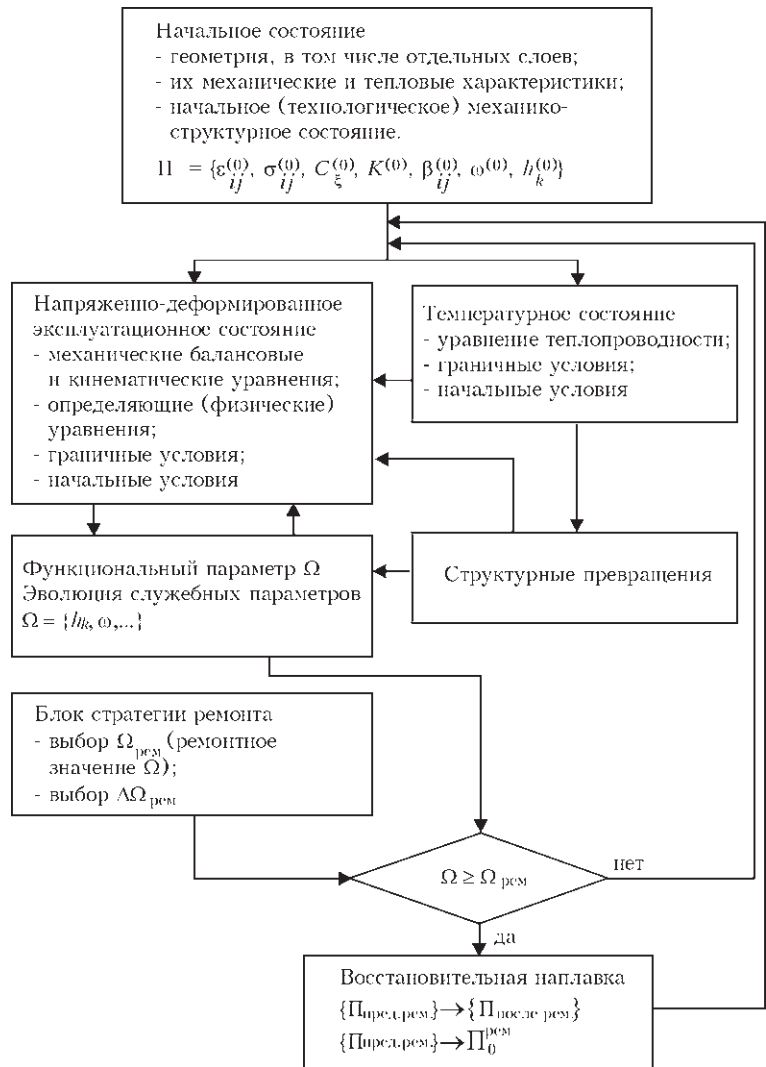


Рис. 2. Схема мониторинга состояния детали в процессе ее изготовления, эксплуатации и восстановительной наплавки

вание набора предремонтных параметров  $\Pi_{\text{пред.рем}}$  в набор послеремонтных параметров:

$$\Pi_{\text{пред.рем}}^n \rightarrow \Pi_{\text{после рем.}}^n \quad (3)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$  — номер ремонта.

Графическая интерпретация восстановительной наплавки дается кривыми изменения во времени параметра  $\Omega$  (рис. 3).

Первая стадия эксплуатации детали заканчивается достижением параметра  $\Omega$  значения  $\Omega_{\text{рем}}$  в момент времени  $t = t_{\text{рем.1}}$ . Этапу восстановления отвечает скачкообразное изменение параметра  $\Omega$  на величину  $\Delta\Omega_p$ . С точки зрения качества может быть три типа восстановительной наплавки:

- *идентичная по качеству*, при которой  $\Omega$  опускается до исходного значения  $\Omega_{01} = \Omega_0$  и после наплавки  $\Omega$  растет с той же скоростью, что и до нее;
- *низкая по качеству*, при которой  $\Omega$  опускается до значения  $\Omega_{02} > \Omega_0$ , и в дальнейшем растет быстрее, чем на начальной стадии;
- *высокая по качеству*, в результате которой достигается значение  $\Omega_{03}$ , более низкое, чем

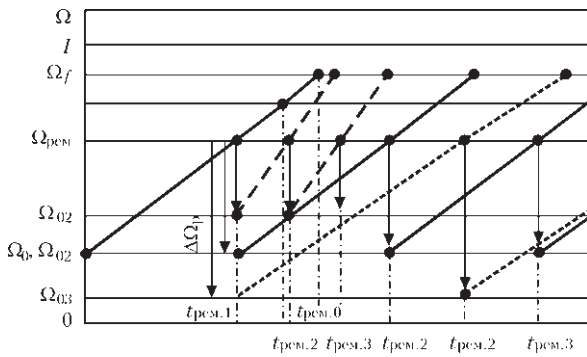


Рис. 3. Изменение служебного параметра (СП)  $\Omega$  в процессе эксплуатации и восстановления по различным схемам:  $\Omega_f$  — значение СП при разрушении детали;  $\Omega_{рем}$  — «ремонтное» значение СП, достижение которого определяет необходимость наплавки детали;  $\Omega_0$  — значение СП перед началом эксплуатации;  $\Omega_{0,n}$  — значение СП после  $n$ -ой наплавки;  $\Delta\Omega_p$  — изменение СП в результате наплавки;  $t_{рем,0}$  — время, в течение которого деталь работает до разрушения;  $t_{рем,1}$  — время работы детали до первой восстановительной наплавки;  $t_{рем,n}$  — время до  $n$ -й наплавки

$\Omega_{0,1}$ , и в после наплавочной эксплуатации растет медленнее.

Последнему случаю отвечает наплавка более износостойкого материала или дополнительное упрочнение наплавленного металла.

## Вывод

Разработана методика расчета напряженно-деформированного и микроструктурного состояния деталей в процессе наплавки и последующей эксплуатации. В основе методики лежат следующие математические модели: начального состояния, в том числе, напряженно-деформированного и структурного состояния в процессе изготовительной наплавки; эволюции служебных и структурных параметров в процессе эксплуатации; накопления повреждаемости и снижения усталостной долговечности; восстановительной наплавки. По сравнению с экспериментальными методами, математическое моделирование позволяет с меньшими затратами и более эффективно оценивать напряженно-деформированное и структурное состояние деталей в процессе наплавки и последующей эксплуатации.

1. *Krempf E.* Viscoplastic models for high temperature applications // International journal of Solids and Structures. — 2000. — 37. — P. 279–291.
2. *Nix W.D., Gibeling J.C., Hughes D.A.* Time-dependent behavior of metals // Met. Trans. A. — 1985. — 16A. — P. 2216–2226.

3. *Махненко В.И.* Ресурс безопасности эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 618 с.
4. *Моделирование неизоэргического наращивания физически нелинейных тел и технологические приложения* / И.К.Сенченков, Е.Турык, И.А.Рябцев, Г.А.Табиева // Теор. и прикл. механика. — 2003. — Вып. 38. — С. 109–114.
5. *Численное моделирование остаточных напряжений и деформаций при многослойной наплавке цилиндрических деталей* / И.К. Сенченков, Г.А. Табиева, И.А. Рябцев, Е. Турык // Сб. трудов II Межд. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»; под ред. В.И. Махненко, 13–17 сент. 2004 г., пос. Кацивели. — Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2004. — С. 237–242.
6. *Сенченков И.К.* Термомеханическая модель растущих цилиндрических тел из физически нелинейных материалов // Прикл. механика. — 2005. — 41, № 9. — С. 118–126.
7. *Исследование термомеханического состояния цилиндрических деталей, наплавленных слоями аустенитной и мартенситной сталей* / И.К. Сенченков, О.П. Червинко, Е. Турык, И.А. Рябцев // Свароч. пр-во. — 2007. — № 8. — С. 6–13.
8. *Попов А.А., Попова Л.Е.* Справочник термиста. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. — Москва-Свердловск: ГНТИ Машиностр. лит., 1961. — 430 с.
9. *Leblond J.B., Mottet G., Devaux J.C.* A theoretical and numerical approach to the plastic behavior of steel during phase transformation. — I. Derivation of general relations // J. Mech. Phys. Solids. — 1986. — 34, № 4. — P. 395–409.
10. *Bodner S.R.* Evolution equations for anisotropic hardening and damage of elastic-viscoplastic materials. Plasticity Today: Modelling methods and applications. Elsevier Applied Science. — Barking, 1984. — P. 471–482.
11. *Bodner S.R.* Unified plasticity — an engineering approach (Final report) / Faculty of mechanical engineering, Technion—Israel inst. of techn. — Haifa 32000, Israel, 2000. — 10 p.
12. *Bodner S.R.* Plasticity over a wide range of strain rates and temperatures // Archives of Mechanics. — 2005. — 57, № 2-3. — P. 73–80.
13. *Сенченков И.К., Табиева Г.Ф.* Определение параметров модели Боднера-Партома термовязкопластического деформирования материалов // Прикладная механика. — 1996. — 32, № 2. — С. 64–72.
14. *Шорищоров М.Х., Белов В.В.* Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке. Атлас. — М.: Наука, 1972. — 220 с.
15. *Henwood C., Bibby M., Goldak J., Watt D.* Coupled transient heat transfer — microstructure weld computations. (Part B) // Acta metall. — 1988. — 36, № 11. — P. 3037–3046.
16. *Численное исследование термомеханических процессов при наплавке валов судовых механизмов и устройств* / В.И. Махненко, Е.А. Великоиваненко, Т.Г. Кравцов, В.В. Севрюков // Автомат. сварка. — 2001. — № 1. — С. 3–10.
17. *Sheng I.C., Chen Y.* Modelling welding by surface heating // J. of Engineering Materials and Technology. — 1992. — 114. — P. 439–449.
18. *Ueda Y., Murakawa H., Luo Y.* A Computational model of phase transformation for welding processes // Trans. JWRI. — 1995. — 24, № 1. — P. 95–100.
19. *Kachanov L.M.* On the time of failure under creep conditions // Izv. Acad. Nauk SSSR. — 1958. — 8. — P. 26–31.
20. *Krajinovic D.* Damage mechanics. — Amsterdam: Elsevier Publishing, 1996. — 234 p.

Поступила в редакцию 20.04.2015