

CO/CO₂, особенно в случае отсутствия контроля ее состава. Основную роль в редуционных процессах с участием углерода играют реакции внутри углекислородного шлака. Предпринятая проба анализа ионных реакций в процессах рафинирования сплавов меди является очередным шагом в выяснении активной роли карбидов в окружении жидкого шлака и азота по сравнению с их весьма слабым действием непосредственно на границе жидкого металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adamski C. Rafinacja brązów aluminiowych// Przegląd Mechaniczny. – 1950. – № 7, 8.– С. 244.
2. Bydałek A. The rotative method of calcium carbide//Chem. Process. – 1971. – № 10. S. – 27.
3. Elliot J.F., Gleiser M: Thermochemistry for Steelmaking. London, 1960.
4. Kubaschewski O., Evans E.L., Alcock C.B. Metallurgical Thermochemistry. Oxford, 1967.
5. Staronka A., Holtzer M. Podstawy fizykochemii procesów metalurgicznych i odlewniczych. Kraków: Wyd. AGH, 1991.
6. Krupkowski A. Podstawowe zagadnienia teorii procesów metalurgicznych. Warszawa-Kraków: PWN, 1974.
7. Krasicka-Cydzik E. Copper deoxidation with calcium carbide melts// Journal of Applied Electrochemistry. – 2001. – № 31. – P. 1155.
8. Bydałek A.W. Rola atmosfery w procesach topienia miedzi i jej stopów. Poznań: Ośrodek Wydawniczy PAN w Poznaniu, 2004.
9. Bydałek A.W. Gas-slag refining of CuSn10Pb bronze melts// Gisserei Forschung. – 2001. – V. 53, – № 2. – P. 74.

УДК 539

Якубовский А.Ч., Якубовский Ч.А.

ОБЩИЙ МЕТОД РАСЧЕТА СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ СИСТЕМ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

В практике машиностроения и строительства часто встречаются конструкции, представляющие собой так называемые *статически неопределимые системы* (СНС). Это станины станков и машин, каркасы зданий и сооружений, подвесные и опорные конструкции и др. Статически неопределимыми могут становиться конструкции также от теплового воздействия, в результате смещения опор, вследствие неточности изготовления или сборки. Определение опорных реакций и внутренних усилий в СНС не может быть выполнено при помощи только уравнений статического равновесия и метода сечений.

Характерной особенностью СНС (в отличие от статически определимых)

является то обстоятельство, что на распределение усилий в конструктивных элементах системы влияют не только внешние силы, но и соотношения между поперечными размерами отдельных элементов, а также свойства их материала.

Другой особенностью СНС является возникновение дополнительных усилий в стержнях при смещении опор, температурном воздействии, неточностях изготовления и сборки конструкции, что не имеет места в статически определимых системах.

СНС содержит так называемые лишние связи. Количество лишних связей, равное разности между числом неизвестных усилий и числом уравнений статического равновесия называется, как известно, *степенью статической неопределимости*.

Остановимся более подробно на методах расчета СНС, применяемых в настоящее время.

1. СНС, работающие на растяжение-сжатие.

Это стержневые системы различных видов, конструкции типа кронштейнов и пр. В подавляющем большинстве учебной литературы [1–4], в том числе и новейшей [5–7], такие системы решаются *методом сравнения перемещений*. Сущность метода заключается в том, что к уравнениям статического равновесия добавляются так называемые *уравнения совместности перемещений*, которые отражают особенности геометрических связей, наложенных на деформируемую систему. Для этого система изображается в деформированном состоянии, и рассматриваются геометрические соотношения между деформациями стержней и перемещениями шарниров, которые записываются в виде уравнений совместности перемещений. При этом накладываются определенные требования на систему. Например, узлы, в которых соединяются несколько стержней, в деформированном состоянии должны быть общими для этих стержней; элементы системы, подвергающиеся изгибу, условно принимаются абсолютно жесткими во избежание появления в них деформации изгиба и т.д. Решая эти уравнения совместно с уравнениями статического равновесия, находят усилия в стержнях системы.

Такой метод расчета стержневых СНС является трудоемким и неэффективным. Изображение системы в деформированном состоянии вызывает у студентов значительные трудности, связанные с необходимостью соблюдения условия неразрывности деформаций и правильности выбора вида деформации стержней (растяжение или сжатие).

В качестве примера рассмотрим систему из трех стержней, нагруженную силой F (рис 1). Для определения усилий в стержнях к уравнениям статическо-

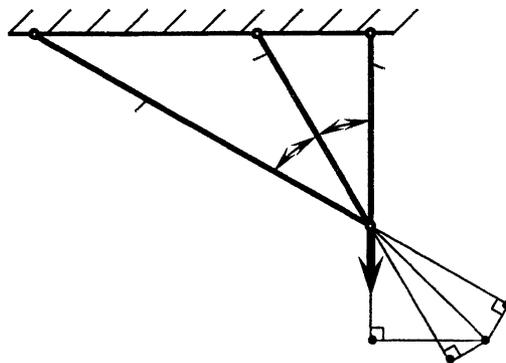


Рис. 1

го равновесия узла A добавляем уравнение совместности перемещений. Для этого необходимо изобразить конструкцию в деформированном состоянии. Даем узлу A произвольное перемещение AA_0 и опускаем из точки A_0 перпендикуляры на направления стержней. Отсеченные отрезки представляют собой удлинения стержней:

$$AA_1 = \Delta l_1; AA_2 = \Delta l_2; AA_3 = \Delta l_3.$$

После непростых геометрических преобразований, которые здесь опускаются, получим следующее уравнение совместности перемещений:

$$\Delta l_3 = \frac{-\Delta l_1 \cdot \sin \beta + \Delta l_2 \cdot \sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha}.$$

Как видно из примера, изображение системы в деформированном состоянии и составление требуемых геометрических соотношений является непростой задачей и требует значительного объема вычислений.

2. СНС, работающие на изгиб.

2.1. Рамные конструкции.

Рамой называется система, состоящая из стержней, жестко или шарнирно соединенных между собой в узлах. В учебной литературе такие системы рассчитываются в большинстве своем *методом сил* — наиболее распространенным универсальным методом решения СНС рамной конструкции.

Сущность метода заключается в том, что заданная СНС освобождается от дополнительных связей (внешних и внутренних). Полученная таким образом система называется основной системой. Действия отброшенных связей заменяются реактивными силами, либо внутренними силовыми факторами. Величина этих сил подбирается в дальнейшем так, чтобы деформации и усилия в стержнях были бы такими же, как и в заданной СНС, т.е. обе эти системы становятся эквивалентными. Следовательно, при указанном способе решения неизвестными являются силы (реакции опор, либо внутренние силовые факторы). Отсюда и произошло название метода — *метод сил*.

2.2. Балочные конструкции.

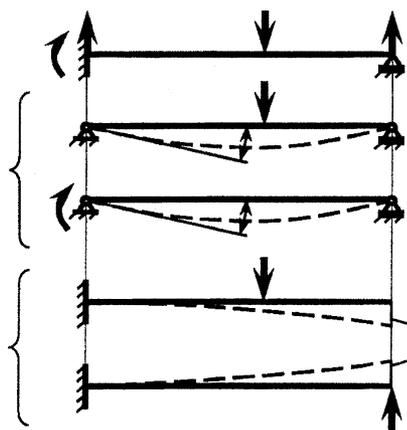


Рис. 2

Балкой называется стержень, работающий на изгиб. В учебной литературе предлагаются различные методы решения статически неопределимых балочных конструкций.

1.2.1. Один раз статически неопределимые балки.

Применяемый в литературе метод их решения основан на *принципе суперпозиции* [8].

Пользуясь этим принципом, любую один раз статически неопределимую балку

можно рассматривать как две простые балки, первая из которых является статически определимой с заданной внешней нагрузкой, но без лишнего неизвестного. Вторая представляет собой ту же балку без внешней нагрузки, но нагруженную лишним неизвестным усилием.

На рис. 2 представлены два варианта выбора лишнего неизвестного (основной системы). В варианте (а) в качестве лишнего неизвестного выбран опорный изгибающий момент M_A . Дополнительным в этом варианте будет следующее уравнение:

$$\varphi_A = \varphi_{AF} + \varphi_{AM} = 0.$$

В варианте (б) в качестве лишнего неизвестного принята правая опорная реакция R_B . Дополнительным в этом варианте будет уравнение:

$$y_B = y_{BF} + y_{BR} = 0.$$

2.2.2. Два раза статически неопределимые балки (и более).

Такие балки, перекрывающие два и более пролетов и не имеющие промежуточных шарниров, называются *неразрезными балками*. Степень статической неопределимости неразрезной балки равна числу промежуточных опор плюс число жестких защемлений.

В настоящее время в технических ВУЗах республики используют учебную и методическую литературу [1, 2, 9–11], в которой для расчета неразрезных балок предлагается исключительно метод, основанный на использовании так называемых *уравнений трех моментов*. При этом за лишние неизвестные принимаются изгибающие моменты над промежуточными опорами. Таким образом, основную систему получают путем установки («врезания») шарниров над всеми промежуточными опорами. Такой выбор основной системы является наиболее рациональным, т.к. действие заданной нагрузки распространяется только на пролет, где она расположена, влияние ее на другие пролеты выражается опорными изгибающими моментами. Однако метод расчета неразрезных балок с применением уравнений трех моментов является, на наш взгляд, устаревшим и неэффективным, поскольку требует трудоемких вычислений и выполнения дополнительных условий, а именно:

1) если в балке имеется жесткое защемление, то его необходимо заменить дополнительным пролетом бесконечно малой длины (ввести нулевой пролет, который не нагружен и длина его равна нулю), в противном случае уравнение трех моментов составить не удастся;

2) если балка имеет консоли, то они отбрасываются, а внешняя нагрузка, приложенная к консолям, приводится к ближайшей опоре.

Указанные требования вызывают определенные затруднения у студентов при расчете неразрезных балок. Кроме того, применение уравнения трех моментов, помимо указанных выше недостатков, не дает никаких преимуществ по сравнению с универсальным методом сил и является искусственным преобразованием этого метода.

Анализируя вышеизложенное, можно заключить, что в настоящее время в

Если элементы СНС работают только на кручение (валы), то коэффициенты и свободные члены уравнений (3) вычисляются следующим образом:

$$\delta_{ii} = \sum \frac{\bar{T}_i^2}{GJ_p} \cdot l; \delta_{ik} = \sum \frac{\bar{T}_i \cdot \bar{T}_k}{GJ_p} \cdot l; \Delta_{iF} = \sum \frac{T_F \cdot \bar{T}_i}{GJ_p} \cdot l \quad (5)$$

Таким образом, методом сил можно производить расчет любых СНС, а именно:

- 1) работающих на растяжение-сжатие (стержневые системы);
- 2) работающих в основном на изгиб (рамные, балочные конструкции);
- 3) испытывающих деформацию кручения (валы);
- 4) пространственных и плоско-пространственных систем.

При этом расчет всех перечисленных СНС может производиться методом сил при различных видах воздействия на систему:

- а) силовом воздействии (внешняя нагрузка);
- б) тепловом воздействии (равномерный или неравномерный нагрев волокон стержней);
- в) кинематическом воздействии (смещение опор или узлов системы вследствие неточности изготовления или монтажа элементов конструкций).

В результате получаем стройную систему расчета любых СНС единым методом — методом сил. Это значительно упрощает изложение учебного материала и облегчает усвоение студентами этого важного раздела курса сопротивления материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов.— М.: Наука, 1986.— 512 с.
2. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов.— М.: Высшая школа, 1989.— 624 с.
3. Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 1962.— 456 с.
4. Степин П.А. Сопротивление материалов.— М.: Высшая школа, 1987.— 367 с.
5. Механика материалов: Учебное пособие / Н.С. Траймак, Л.Е. Реут, Н.Б. Кардович и др.— Мн.: Технопринт, 2002.— 194 с.
6. Горшков Н.Г., Трошин В.Н., Шалашилин В.И. Сопротивление материалов: Учебное пособие.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.— 544 с.
7. Старовойтов Э.И. Сопротивление материалов.— Гомель: БелГУТ, 2004.— 376 с.
8. Никифоров С.Н. Сопротивление материалов.— М.: Высшая школа, 1966.— 584 с.
9. Сопротивление материалов / Писаренко Г.С., Агарев В.А., Квитка А.Л. и др.— Киев: Вища школа, 1986.— 775 с.
10. Методические указания по расчету статически неопределимых неразрезных балок / В.П. Лаптев, Ч.А. Якубовский, И.В. Яркина — Мн.: БПИ, 1985.— 16 с.
11. Сопротивление материалов. Методические указания к выполнению и оформлению расчетно-графических работ / Е.Н. Руденок, И.Ф. Куровский, А.Ф. Мостовая и др.— Мн.: БПИ, 1986.— 124 с.
12. Сапунов В.Т. Классический курс сопротивления материалов в решениях задач: Учебное пособие.— М.: Эдиториал УРСС, 2002.— 160 с.
13. Долинский Ф.В.,

Михайлов М.Н. Краткий курс сопротивления материалов: Учебное пособие для вузов. — М.: Высшая школа, 1988. — 432 с.

UDK 621.793.

L. Hrubá, Š. Valčuha

DEVELOPMENT OF TITANIUM DIBORIDE COATINGS DEPOSITED BY DC MAGNETRON SPUTTERING

*Department of Manufacturing Systems, Faculty of Mechanical Engineering,
Slovak University of Technology
Bratislava, Slovakia*

1. Introduction

The proper appliance of protective coatings on cutting and forming tools, seals, gears, bearings and other tribological components can extend component lifetimes. Protective coatings with high hardness provide better wear resistance of coated steel tools and hard carbide against abrasion at high contact pressures. The thin hard coatings and their favourable properties are well known for several decades, but still are coming new inventions of layers and their combinations. Although it appears, that improvement possibilities of the coatings properties have been depleted is not true. The latest research focuses on the perspective usage the coated materials of the types TiB_2 , $TiAl-TiB$, $TiB-Ti$, which fulfil the special requirements on the modern progressive cutting tools and on the tribological applications [4].

Titanium diboride (TiB_2) is ceramic compound with hexagonal structure in which boron atoms form a covalently bonded network within metallic Ti matrix. TiB_2 is well known for its high hardness (reported hardness values of up to 6700 HV), high chemical stability at higher temperature, wear and corrosion resistance and good electric conductivity. Deposition of TiB_2 based coatings is usually carried out by PVD or CVD techniques. Magnetron sputtering appears to be the most suitable, because deposition temperature can be reached with relatively high deposition speed. However, application of TiB_2 coatings is complicated because of poor coatings adhesion caused by high residual stress level. This problem can be solved with substrate heating and

2. Experimental works

As substrate materials were used Si (001) samples and mirror polished stainless steel. Before deposition, the substrates were cleaned in an ultrasonically cleaning bath. The coatings were deposited by usage of DC magnetron sputtering. Used TiB_2 target has diameter of 40 mm and thickness 6 mm. The substrates are positioned stationary 5 cm from target. As a process gas was used an argon with purity of