

니켈도금된 연속주조 몰드의 열해석

원종진(국민대학교), 이종선(대진대학교), 이현곤*(국민대학교 대학원)

Thermal Analysis of Continuous Casting Nickel-Coated Mold

Chong-Jin Won(Kookmin Univ.), Jong-Sun Lee(Daejin Univ.),
Hyun-Gon Lee*(Kookmin Univ.)

Abstract

This study is object to thermal analysis of continuous casting nickel-coated mold. A two-dimensional transient finite element model was developed to compute the temperature distribution and stress behavior for continuous casting nickel-coated mold. For thermal analysis using analysis result from FEM code. In other to thermal analysis of continuous casting nickel-coated mold, many variables such as casting speed, cooling condition, film coefficient, convection and load condition are considered.

Keywords : Continuous Casting Mold(연속주조 몰드), Nickel Coating(니켈도금), Thermal Analysis(열해석), Convection(대류열복사), Film Coefficient(막 열전도계수), Broad Face(장편), Narrow Face(단편)

1. 서 론

금속의 용해성을 이용하여 고온에서 용해된 금속을 준비된 형틀에 주입하여 형상을 만드는 주조는 역사적으로 오랜동안 이용된 광범위한 제조공정이다. 주물에 사용되는 재료들은 주조가 쉽고 충분한 강도와 경제적인 재질로서 주철, 주강, 구리합금, 알루미늄합금, 아연합금 등이 있다. 특히 주철은 가장 경제적이고 주조성이 우수하며 강도면에서 자동차, 각종 기계의 몸체, 공작기계, 농업용 기계 등에 널리 사용되고 있다. 주물은 결함이 없고 설계된 기능을 충분히 발휘해야 하며 강도 및 경도 등과 같은 기계적인 성질이 요구범위에 있어야 한다.

본 논문에서 고려한 연속주조는 특수주조에 속하며 연속적으로 위에서 공급되는 용탕이 장편(broad face)과 단편(narrow face)으로 조립된 몰드에서 동일한 조건으로 냉각되는 균질한 잉곳(ingot)을 제품의 크기에 구애받지 않고 생산할 수 있으며 가공비용이 저렴하다. 또한 잉곳 중에 편석이 적고 수축공이 없는 미세조직을 얻을 수 있는 생산성 높은 제조방식이다. 연속주조는 높은 온도의 용탕에 직접 접촉되어 고온으로 가열되는 몰드를 내부에서 순환하는 냉각수

에 의해 냉각시킨다. 몰드 표면에 용탕과 몰드의 마찰을 고려하여 니켈도금을 하였을 때 내부의 열변형 및 열응력 계산을 위하여 접촉면의 온도분포, 시간에 따른 잉곳의 이동량과 온도분포를 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS로 해석하고 각 임계점들의 온도분포를 구해 연속주조 몰드의 설계에 응용하고자 한다.

2. 열해석 이론

2.1 열해석 이론

본 해석을 위해서는 먼저 각 요소의 행렬을 구하여 평형방정식을 구성한 후 연립방정식의 해를 구한다. 이에 사용된 기본식은 다음과 같다.

$$[C]\{\dot{T}\} + [K](T) = \{Q_a\} \quad (1)$$

여기서 [C]는 비열 matrix, [K]는 계수 matrix, (T)는 절점에서의 온도, (T)는 자유도 값의 시간을, (Q_a)는 작용하는 열의 흐름을 나타낸다.

이 관계식을 해석에 적용하기 위해서 시간의 증감을 고려하여 일반화하면 다음과 같다.

$$\{T_{n+1}\} = \{T_n\} + (1-\theta)\Delta t\{\dot{T}_n\} + \theta\Delta t\{\ddot{T}_{n+1}\} \quad (2)$$

여기서 과도적분 변수 θ 는 Crank-Nicolson의 방법에 따라 보통 $\frac{1}{2}$ 값을 취한다.

그리고 식 (1)은 시간 t_{n+1} 에서 다음과 같다.

$$[C]\{\dot{T}_{n+1}\} + [K]\{T_{n+1}\} = \{Q_a\} \quad (3)$$

식 (3)의 $\{\dot{T}_{n+1}\}$ 를 식 (2)에 대입하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{1}{\theta\Delta t}[C] + [K]\right)\{T_{n+1}\} = \{Q_a\} + [C]\left(\frac{1}{\theta\Delta t}\{T_n\} + \frac{1-\theta}{\theta}\{\dot{T}_n\}\right) \quad (4)$$

온도에 의존하는 물성치는 요소별로 상승한다. 이때의 온도는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$T_c = \{N_o\}^T \{T\} \quad (5)$$

여기서 T_c 는 물성치 값의 증가가 끝난 상태의 온도, $\{N_o\}$ 는 요소의 좌표에서 증가된 형상계수, $\{T\}$ 는 절점의 온도이다.

3. 몰드설계 및 해석

해석시 사용되는 몰드는 해석의 간소화를 위하여 몰드 윗부분에서 100mm 떨어진 곳의 $\frac{1}{2}$ 단면을 취하였으며 연속주조시 용고된 용탕과 몰드표면의 마찰을 고려하여 접촉부에 두께 0.5mm의 니켈도금층을 고려하

여 모델링하였다.

몰드 내부에는 40℃(313K)의 냉각수가 총 44개의 냉각수관에 흐르고 있으며 실제 현장에서 이용되고 있는 작업환경을 고려하여 주조속도는 0.8m/min, 용탕의 온도는 1555℃(1828K)를 택하였다.

3.1 몰드의 모델링

Fig. 1은 유한요소 해석을 위한 모델의 실제 치수를 나타내고 해석을 위하여 Thermal Solid Quad 8Node (Plane55), 4586개의 요소와 4844개의 절점을 사용하였다. 그리고 이 절점들 가운데 해석결과로 사용될 몰드 표면의 절점을 1~28까지 표시하였다.

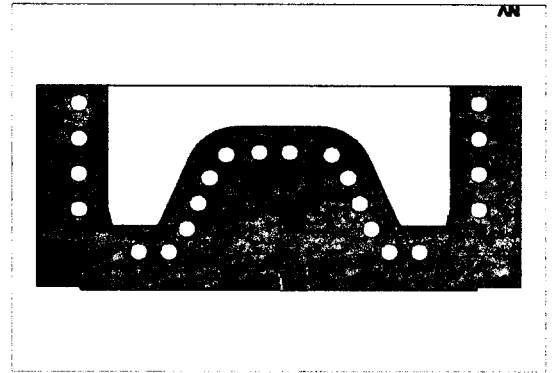


Fig. 2 Section area of molten steel and mold

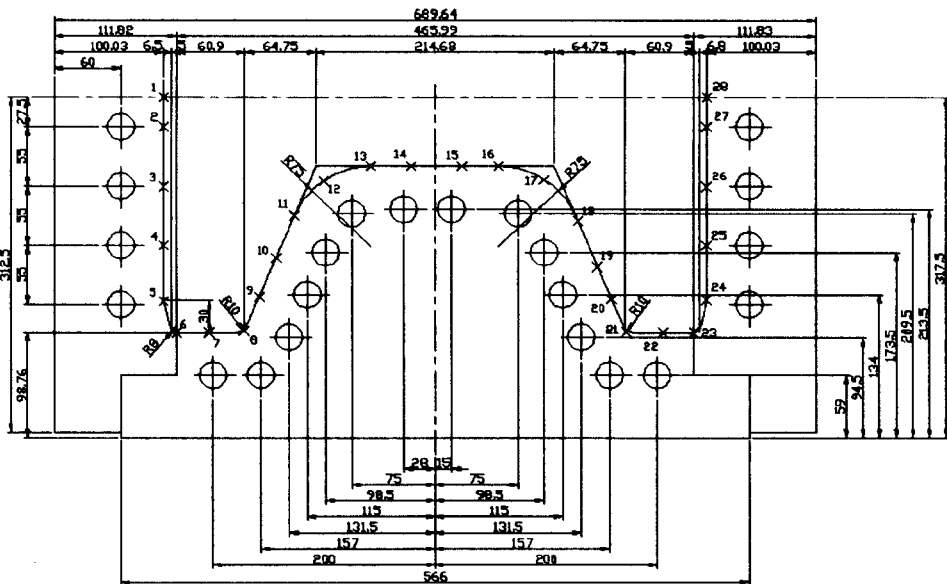


Fig. 1 Simple model for thermal analysis of continuous casting mold

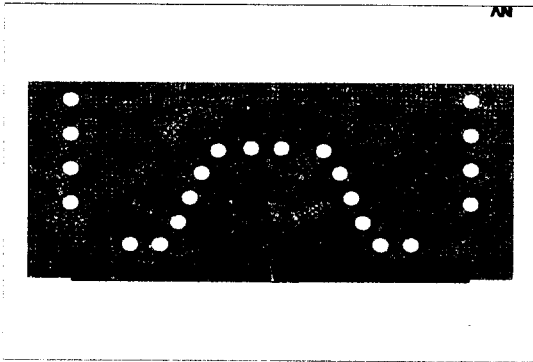


Fig. 3 Element of molten steel and mold by mesh generation

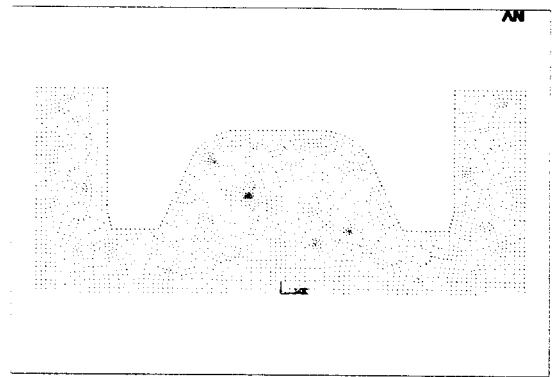


Fig. 6 Node point of nickel-coated mold section

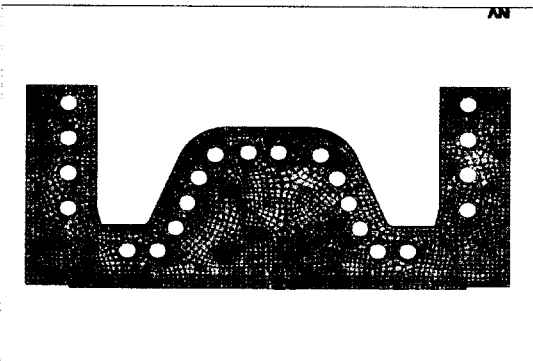


Fig. 4 Element of nickel-coated mold section by mesh generation

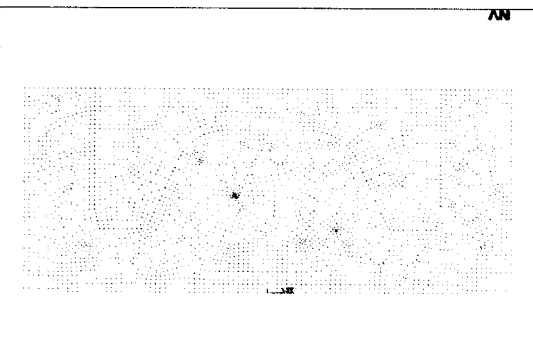


Fig. 5 Node point of molten steel and mold

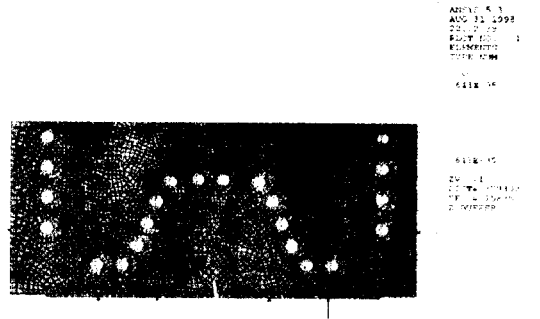


Fig. 7 Load condition of thermal analysis

Fig. 2~Fig. 6은 해석의 기본이 되는 면적, 요소, 절점의 생성을 나타낸 것이고, Fig. 7과 같은 실제와 유사한 하중조건을 입력한다. 냉각수 관에는 40℃의 냉각수가 항상 일정한 온도를 유지하면서 순환한다고 생각하여 일반 온도하중조건을 적용시켜 하중조건이 표시된 것이고, 대류 열복사(convection)하중조건으로 일반 대기온도인 25℃와 막 열전도계수(film coefficient) 0.014를 적용시킨다.

그리고 몰드부분과 초기 용탕의 온도를 절점에 각각 25℃와 1555℃를 작용시켜 용탕이 주입되어 초기 냉각되는 해석을 위해 주조속도인 0.8m/min을 시간으로 분석하는 몰드 윗부분을 0초로 하고 최종 몰드 밑부분까지 도달하는 52.5초까지를 각각 7.5초로 나누어 해석하였다.

3.2 재료의 물성치

과도해석을 수행하기 위한 기본적인 물성치로는 Table 1과 같이 밀도, 비열이 고려되었으며 열전도계수는 Fig. 8의 온도변화와 같이 온도에 따른 편차가 심하여 Table 2의 정확한 값을 입력하였다.

Table 1 Material properties of Cu, Fe & Ni

구분	단위	물성치
Cu	밀도 ρ	kg/m ³ , 8933
	비열 C_p	J/kg·K, 385
	포아송비 ν	0.34
	탄성계수 E	N/m ² , 122.583125×e6
	팽창계수 α	1/K, 16.5×e-6
Fe	밀도 ρ	kg/m ³ , 7870
	비열 C_p	J/kg·K, 447
	포아송비 ν	0.28
	탄성계수 E	N/m ² , 212.804305×e6
	팽창계수 α	1/K, 10×e-6
Ni	밀도 ρ	kg/m ³ , 8900
	비열 C_p	J/kg·K, 439.614
	포아송비 ν	0.31
	탄성계수 E	N/m ² , 201.036325×e6
	팽창계수 α	1/K, 12.7×e-6

Table 2 Thermal coefficient of Cu, Fe & Ni

Material	Temp (K)	W/m·K	Temp (K)	W/m·K
Cu	273 K	401	300 K	398
	400 K	392	500 K	388
	600 K	383	700 K	377
	800 K	371	900 K	364
	1000 K	357	1200 K	342
Fe	273 K	83.5	300 K	80.3
	400 K	69.4	500 K	61.3
	600 K	54.7	700 K	48.7
	800 K	43.3	900 K	38.0
	1000 K	32.6	1200 K	28.2
Ni	273 K	94.0	300 K	65.3
	400 K	90.5	500 K	67.4
	600 K	80.1	700 K	69.6
	800 K	72.1	900 K	71.8
	1000 K	65.5	1200 K	76.1

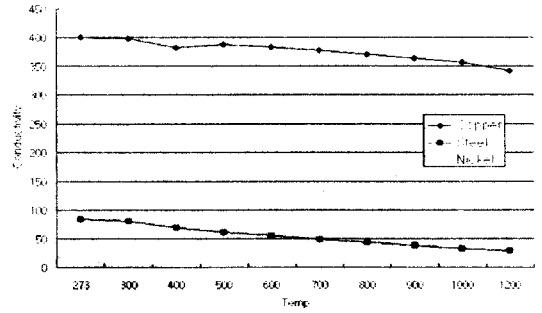


Fig. 8 Thermal coefficient change by temperature

4. 결과 및 고찰

본 논문에서 시간에 의한 몰드와 용탕의 접촉부분의 온도분포를 보면 Fig. 9~Fig. 15와 같다.

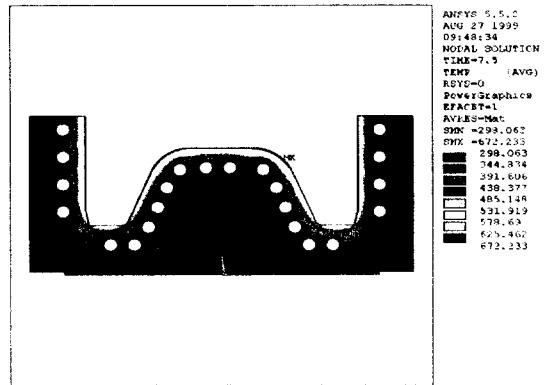


Fig. 9 Temperature distribution at 7.5 sec.

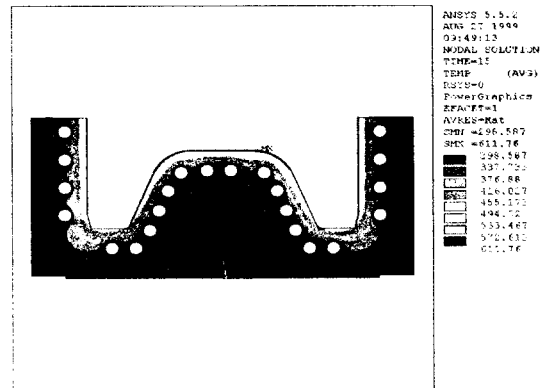


Fig. 10 Temperature distribution at 15 sec.

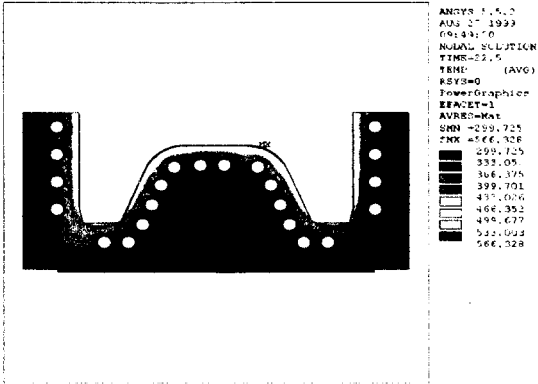


Fig. 11 Temperature distribution at 22.5 sec.

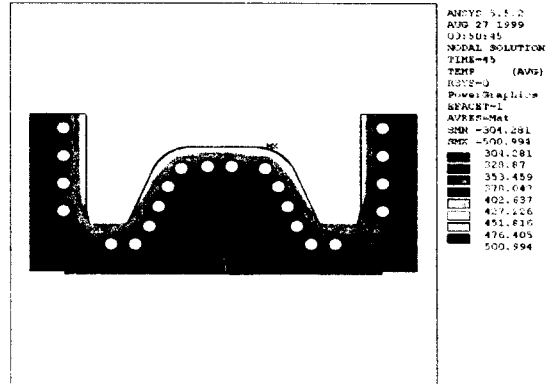


Fig. 14 Temperature distribution at 45 sec.

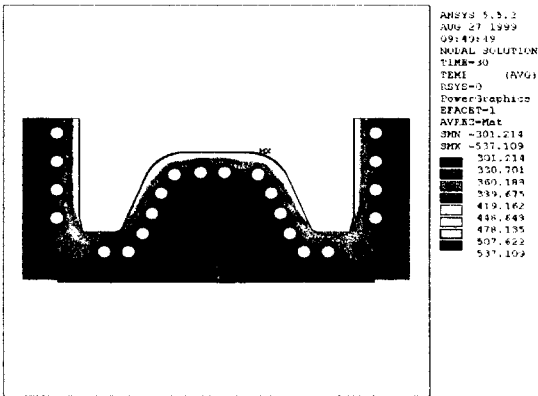


Fig. 12 Temperature distribution at 30 sec.

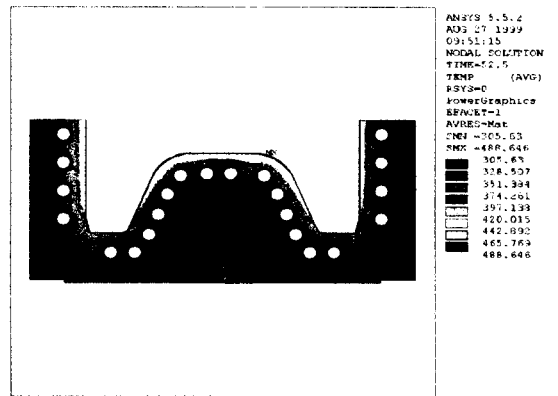


Fig. 15 Temperature distribution at 52.5 sec.

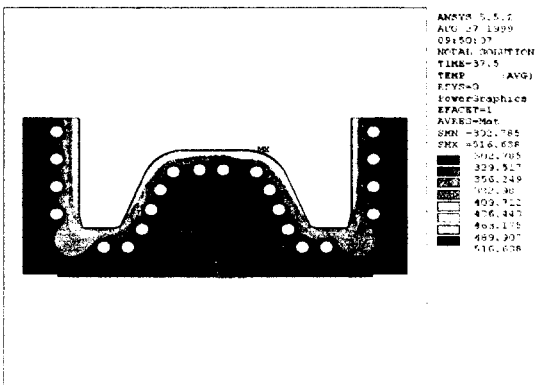


Fig. 13 Temperature distribution at 37.5 sec.

Fig. 9~Fig. 15까지 그림 왼쪽의 가장 높은 온도 분포가 시간에 따라 점차적으로 줄어드는 것을 볼 수 있으며 선택된 해석절점, 1~6까지는 왼쪽 단편, 7~22까지는 장편 그리고 23~28까지는 오른쪽 단편의 온도변화를 나타내면 Fig. 16과 같다.

또한 몰드 윗부분에서 100mm떨어진 부분, 즉 7.5초 표면온도는 Table 3과 같으며 Fig. 16에서 가장 윗부분의 온도분포를 나타낸다.

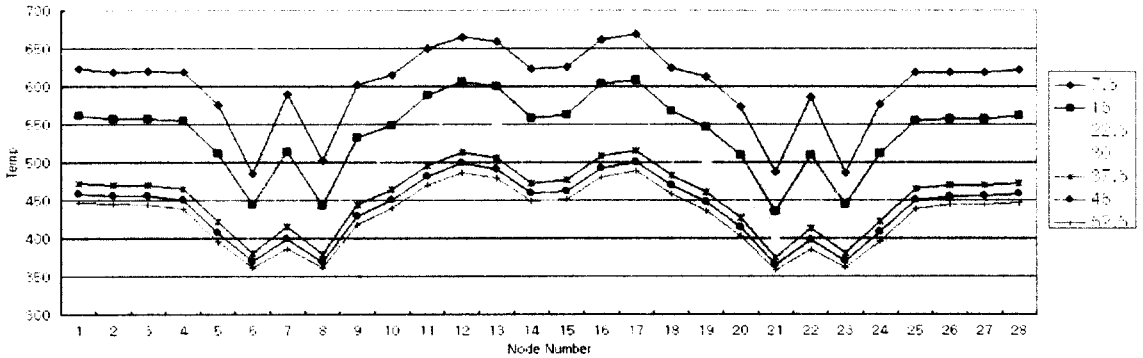


Fig. 16 Temperature distribution of mold surface

Table 3 Temperature distribution of mold surface

1	2	3	4	5	6	7
623.163	618.734	619.418	618.074	575.621	485.280	588.982
8	9	10	11	12	13	14
502.534	602.440	614.752	649.446	664.926	658.785	622.906
15	16	17	18	19	20	21
625.247	662.150	668.727	624.555	612.385	573.327	487.609
22	23	24	25	26	27	28
586.301	485.516	576.709	618.075	618.817	619.001	622.616

5. 결 론

니켈도금된 연속주조 몰드에 대하여 유한요소해석 방법을 이용하여 열해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 몰드 표면의 온도분포는 좌우 대칭의 온도가 분포함을 알 수 있다.
- 2) 용탕의 초기 최대온도가 작용하는 몰드의 윗부분에 접촉을 시작하여 밑부분까지 이동, 몰드로부터 이탈하는 52.5초 동안 비선형적 온도감소가 일어나는 것을 알 수 있다.
- 3) 온도분포에서 6번 절점과 12번 절점의 최대 온도차이를 고려할 때 균일한 온도분포를 위해서 냉각수

관의 위치를 재검토하여 설계를 한다면 몰드의 수명 연장과 원활한 작업을 수행할 수 있다.

- 4) 도금층을 고려하지 않았을 때의 해석결과와 비교하면 몰드 표면의 온도분포가 약 20도 정도 높으며 이는 니켈의 열전도도가 구리의 열전도도보다 낮아 발생하는 현상으로 생각된다.
- 5) 상기 결과를 온도분포하중으로 작용시켜 몰드 각 부분에 작용하는 응력과 변형률을 구하는 구조해석의 기본 자료로 활용된다.

참고문헌

- 1) 김동원, 기계공학법, 청문각, 1997.
- 2) J. P. Holman, Heat Transfer, McGraw-Hill, 1990.
- 3) T. R. Chandrupatla and A. D. Belegundu, Introduction to Finite Elements in Engineering, Prentice Hall, 1991.
- 4) ANSYS User's Manual Revision 5.3, Swanson Analysis System, Inc., 1996.
- 5) ANSYS Thermal Analysis Guide Revision 5.3, Swanson Analysis System, Inc., 1994.
- 6) James Shackelford and William Alexander, Material Science & Engineering Hand Book, CRC Press, 1994.