

마그네틱 척의 열변형이 연삭 가공정밀도에 미치는 영향

이 찬 홍 *, 한 진 욱

한국기계연구원 · 공작기계실

Effect of Thermal Deformation in Electromagnetic Chuck on the Grinding Accuracy

Chan-Hong Lee *, Jin-Uk Han

KIMM · Machine Tools Lab.

Abstract

This paper describes the effect of thermal deformation in electromagnetic chuck on the grinding accuracy. Grinding process is the last machining process and decisive in saving past other machining cost. The thermal deformation of grinding machine is unavoidable and affect seriously grinding accuracy.

The thermal deformation of electromagnetic chuck is one of important thermal problems. Heat generation of magnetic chuck is analyzed and measured. The temperature distribution in chuck is elliptical form with high temperature in center of chuck. The thermal deformation form of chuck is changed with time to mountain form. The grinding experiment shows that the thermal deformation of magnetic chuck influence strongly machining accuracy as much as the headstock

Key Word : Electromagnetic Chuck(전자석 척), Temperature Distribution(온도분포), Thermal Deformation(열변형), Grinding Accuracy(연삭 정밀도)

1. 서론

연삭가공 공정은 소재제조로부터 시작되는 일련의 부품가공 과정의 마지막 단계로서, 전처리 공정에 투입된 공작기계의 효율성을 결정짓고, 소요된 에너지와 가공비용에 가치를 부여할 수 있는 중요한 공정이다. 그래서 이 공정에 사용되는 연삭기의 성능과 가공조건은 공작물의 기하학적 품질을 향상시킬 수 있도록 잘 선정되어야 한다^[1]. 그러나 연삭가공에서는 요구 가공정도가 높고, 공작물의 경도 또한 높아서 타공정에 비해 공작기계의 정적·동적·열적 특성을 많이 받는다^[2]. 특히 열변형의 영향을 많이 받아 공작물의 형상정도와 치수정도가 손상을 받아 재가공을 해야 하는 경우가 빈번히 생긴다.

연삭기에서의 열변형은 연삭숫돌과 공작물 또는 연삭숫돌과 드레싱 잘지간의 3차원 상태변위로 나타나는데, 주요 원인으로서는 주축 베어링의 발열, 유압 구동장치의 발열, 내장형 모터의 발열, 냉각유의 온도변화 등이 알려져 있다^[3]. 그리고 현대식 연삭기의 경우 주축 동력이 급격히 증가하고 있는 추세에 있어 핵심 부품의 열변형 문제는 비례적으로 더욱 커지고 있다^[4].

본 연구에서는 지금까지 다루어지지 않은 전자 마그네틱 척의 열변형이 연삭가공 정밀도에 어떤 영향을 미치는지를 해석적 검토와 실험적 측정, 연삭가공을 통해 관련성을 나타내었고, 마그네틱 척의 열변형이 무시 못할 정도로 커서 연삭가공에 큰 영향을 미침을 밝혔다.

2. 마그네틱 척의 발열

마그네틱 척의 형태는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째 형태는 영구자석을 이용한 척으로 자력을 위한 에너지가 필요 없고 영구적으로 자력조건을 유지할 수 있다. 그러나 가공 시스템의 자동화를 위해서는 공작물의 착탈이 전기적 신호에 의해 이루어져야 하므로 두 번째 형태인 전자석 척을 근래에 많이 사용하고 있다. 전자석 척의 사용범위는 중절삭을 위한 밀링머머신으로부터 고속 공작기계 및 고정밀 연삭기에 이르기까지 많은 종류의 공작기계에 사용되고 있다. 전자석 척(이후 마그네틱 척으로 표기)의 구조는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 4면에

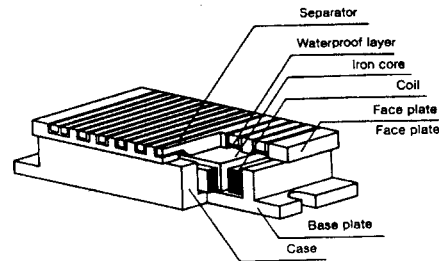


Fig. 1 Construction of electromagnetic chuck

부착되어 있는 코일에 의해 자력을 발생시키고 구리판에 의해 칩 상단을 여러 개의 조각으로 나누어 자력을 균등하게 분배하는 구조로 되어 있다. 여기서 코일은 전기가 흐를 때 따라 발열을 시작하고 마그네틱 칩의 상단에 점차 열전달되어 열변형이 진전된다. 코일에 흐르는 전기는 일반적으로 DC 90V에 칩의 크기에 따라 0.01A에서 6A정도까지 흐른다. 본 연구에서는 칩의 크기가 450×150mm(ℓ×b)이고 사용된 전기는 DC 90V, 0.77A인 연삭기용 마그네틱 칩을 사용하였다. 마그네틱 칩에 사용된 전력은 70W로서 칩의 크기에 비해서 큰 에너지는 아니지만 칩의 온도상승에는 적지 않게 기여를 하고 있다. Fig. 2에는 칩의 중앙위치에서 시간에 따른 온도변화를 냉각유를 뿌렸을 때와 냉각유를 뿌리지 않았을 때로 나누어 나타내었다. 여기서 냉각방법은 마그네틱 칩을 좌우로 이동시키면서 냉각유를 공급하였다. 냉각유가 있을 때와 없을 때를 비교해보면 1시간 후에 2.5℃정도 표면온도가 차이 나는 것을 알 수 있고 시간이 경과할수록 온도차는 커지게 된다. 칩을 냉각하지 않은 경우에 90분간은 온도상승이 급해서 약 6℃정도 증가하고, 그 이후 90분간은 3.5℃정도 상승해서 칩의 열변형이 매우 커질 것이 예상된다. 또한 칩을 냉각한 경우에도 3시간 동안 5℃정도 상승해서 칩의 열변형이 적지 않음을 예상할 수 있다.

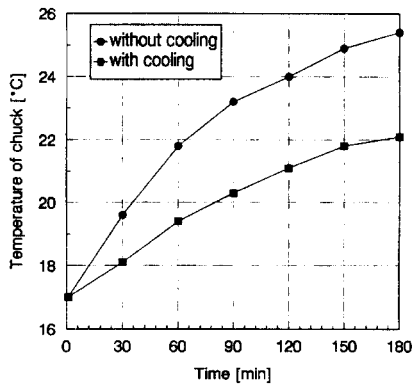


Fig. 2 Temperature rise of chuck with cooling and without cooling

그리고 마그네틱 칩의 작동시간과 작동방법에 따라 칩에 공급되는 전기에너지가 증감되므로 온도상승곡선이 변화한다. Fig. 3에 칩을 3시간 동안 지속적으로 작동시켰을 때 온도상승곡선과 10분씩 on-off를 주기적으로 실행했을 때, 즉 작업자가 10분마다 연삭작업을 했을 경우, 온도상승곡선을 나타내었다. 그림에서와 같이 10분 주기의 연삭작업을 실행한 경우에는 온도상승곡선이 냉각유를 공급했을 때와 비슷한 형태를 나타내고 있다. 결국 작업자가 연삭작업을 비주기적으로 하는 경우에는 정도의 차이는 있지만 마그네틱 칩의 온도상승은 불가피하고, 10분간의 짧은 연삭작업이라 해도 냉각상태에서 1℃ 정도의 온도상승은 일반적인 현상으로 나타나고 있다.

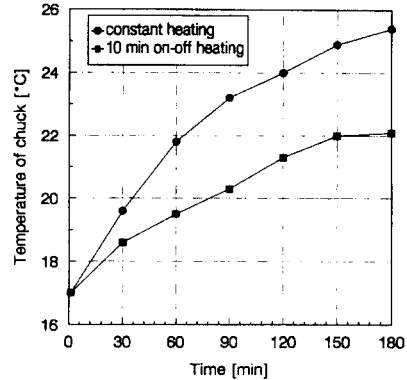


Fig. 3 Temperature rise with heat generation type

마그네틱 칩 전체의 온도분포는 열상장치에 의해 측정된 결과 Fig. 4와 같이 중앙에서 온도가 가장 높고 주변으로 갈수록 공기냉각이 커져서 온도가 낮아진다. 시간에 따른 온도분포 기울기는 거의 일정하게 유지되고 있고 온도분포는 전반적으로 타원 형태를 나타내서 열변형 또한 유사한 형태로 나타날 것으로 예상된다.



Fig. 4 Temperature distribution of magnetic chucks (after 1 hour)

3. 마그네틱 칩의 열변형

마그네틱 칩은 가공에 있어 두 가지 중요한 역할을 한다. 첫 번째는 공작물에 가공기준면을 제공하고, 두 번째는 공작물이 가공 중에 이동하지 않도록 고정을 시킨다. 전자의 역할에서는 마그네틱 칩의 표면이 평탄하고 장시간 기하학적으로 안정된 상태를 유지하는 것을 전제로 하고 있으나, 실제로는 칩 자체의 초기 형상오차와 열변형으로 인해서 안정된 상태를 유지하지 못하고 있다. 칩의 열변형은 시간적으로 기준면의 위치가 변하는 문제 외에 3차원적으로 형상이 변화하는데 더 큰 문제가 있다. 축방향의 열변형은 어느정도 보상이 가능한 반면 기준면의 3차원 형상이 변화하는 것은 특수한 경우에만 보상이 가능하기 때문이다. 그래서 정밀한 가공을 위해서 마그네틱 칩의 열적 거동을 충분히 검토하여 공작물의 최적 고정위치를 결정하고 가공 시간을 고려한 칩의 열변형 보상이 이루어져야 한다. 후자의 역할을 수행하는 데 있어서는 공작물을 고정되고 응력을 과도하게 받지 않도록 공작물의 두께에 따라 자력을 최적으로 설정하는 것이 필요하다. 그러나 작업자가 자력을 적절히 결정하는 것은 거의 불가능하여 대부분의 경우 공작물에 과도한 자력이 가

해져서 공작물의 기준면이 기하학적 오차를 내포하는 칩의 기준면에 밀착되어 칩의 형상오차가 공작물의 가공오차에 직접 나타나게 된다.

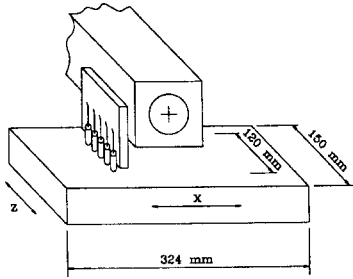


Fig. 5 Measurement set up for thermal deformation

Fig. 5에는 Y방향의 열변위를 측정하기 위한 장치를 나타내었다. Gap Sensor는 분해능 0.1 μm 의 Capacity type sensor를 5개 사용하였고, 센서고정대를 주축대에 부착하여 칩의 발열에 무관하도록 하였다. 센서고정대는 열변형이 되어서는 않되므로 열변위를 감시하기 위해 열전대를 부착하여 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 이내의 온도차를 유지시켰다. 마그네틱 칩의 이송은 X방향으로 324mm만큼 자동이송시켜 Y방향의 열변위를 측정하였고 Z방향은 120mm 폭에 대해서만 측정하였다.

마그네틱 칩이 냉각, 비냉각시에는 어느정도 Y방향으로 열변위를 하는지 알기 위해서 우선 칩의 중앙점을 측정하였다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 비냉각시에는 발열초기에 급격히 열변위를 하다가 90분후 최대 열변위 20 μm 에 다다랐고 그 이후에는 열변위의 증감이 약간 있을 뿐이다. 냉각시에는 비냉각시보다 열변위의 크기는 많이 감소하였지만 발열 3시간 이후에도 계속 열변위가 지속되어 안정화는 되지 않고 있다. 여기서 알 수 있는 것은 칩의 열변위가 타 핵심부품의 열변위에 비해 적지 않음을 나타내고 있다.

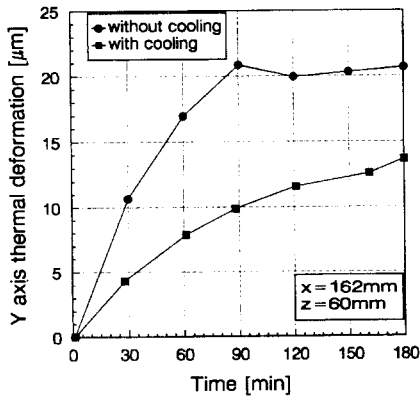


Fig. 6 Y axis thermal deformation of chuck center with time

예를 들어 주축대의 Y방향 열변위를 측정해 보면 작동 90분 후에 9 μm 정도의 변위가 생기는데, 냉각시 칩의 열변위 또한 8 μm 는 되서 무시할 정도가 아님을 보이고 있다(Fig. 7).

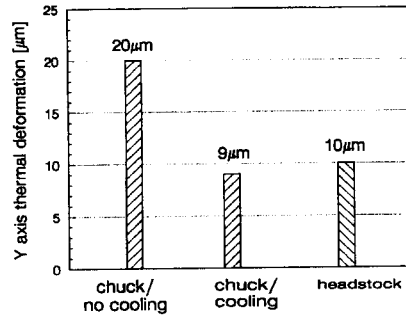
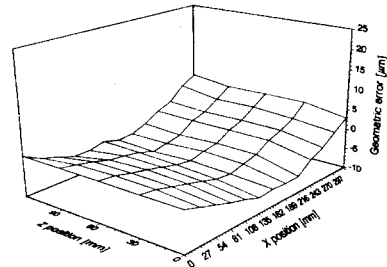
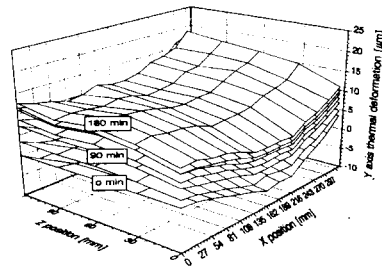


Fig. 7 Comparison of thermal deformation between magnetic chuck and headstock

마그네틱 칩의 냉각시 열변위를 3차원적으로 관찰하기 위해서 Fig. 8과 같이 시간적으로 나타내었다. 초기에 마그네틱 칩은 형상오차를 가지고 있으므로 $x=0\text{mm}$ 인 선상에 5개의 측정점을 모두 기준변위 0 μm 로 정의하고 X방향으로 이송시키면서 형상을 측정하였고, 시간에 따른 열변위도 같은 방법으로 측정하였다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 초기 칩의 형상은 X방향으로 전후부의 높이가 높고 중간 부위가 낮은 형태로 되어 있어 평균적인 높이의 차이가 10 μm 정도 되고, Z방향으로는 굴곡이 거의 없고 다만 약간의 경사만 존재해서 앞뒤간에 약 2 μm 의 차이가 있다.

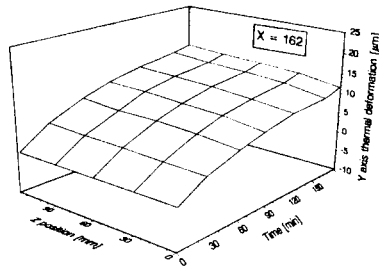


a) Initial geometric error

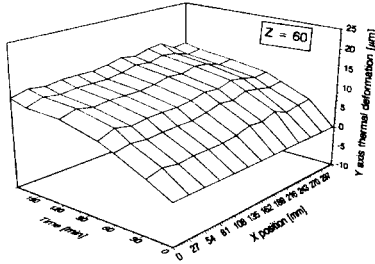


b) Thermal deformation

Fig. 8 3D-thermal deformation of magnetic chuck



a) Thermal deformation at the line x=162mm



b) Thermal deformation at the line z=60mm

Fig. 9 Thermal deformation at the line x=162mm and z=60mm with time

Fig. 8-(b)에는 열변형에 의한 척의 형상변화를 시간별로 중첩시켜 나타내었는데 전반적인 형태변화는 척이 발열을 시작하면서 가운데 부분의 온도가 높아져 열변위가 다른 부분보다 급속히 이루어지므로 척의 전체적인 형태는 평탄해지고 있다. 3시간 후의 X방향 굴곡높이 차이는 평균적으로 6 μ m이다. 다만 Z방향으로 시간이 지남에 따라 앞뒤 경사가 급해져서 평균적인 높이 차이가 4 μ m가 된다. 여기서 가공중에 변밀히 검토되어야 할 사항은 가공물의 설치위치이다. 척의 형상이 변화하면 가공물의 형상오차가 커지므로 되도록 축방향의 변위만이 존재하는 부위로 가공물을 설치하는 것이 좋다. 예를 들면 척의 중앙부위에 가공물을 설치하는 것이다. 만약 가공물이 척의 경사면 일부에 걸쳐있는 경우에는 높아진 해당 부위가 필요이상의 연삭가공이 진행될 것이다.

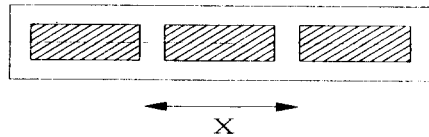
Fig. 9-(a)와 (b)는 Fig. 8-(b)에서 x=162mm와 z=60mm인 곳의 열변위를 시간에 따라서 각각 나타낸 것이다. 그림 (a)에 나타나듯이 Z방향의 경사가 시간이 지남에 따라 급해짐을 알 수 있고, 그림 (b)에는 시간에 따라 X방향 굴곡이 점차 평탄화되어 가고 있다. 그러나 이 측정결과는 냉각조건과 공작물의 설치위치에 따라 많은 차이를 나타낸다. 또한 공작물의 무게가 큰 경우에는 열용량이 커서 발열로 인한 척의 형상변화는 미소하게 생기기 때문에 초기 척의 형상오차가 연삭가공정밀도에 큰 영향을 준다. 경우에 따라서는 가공물을 연삭하기 전에 Self Grinding

을 실시하여 가공정밀도를 높이는 방법도 있을 수 있으나, 길과 시간에 따른 열변형은 불가피하므로 단시간 동안의 효과만 있을 뿐이다.

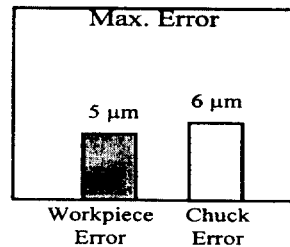
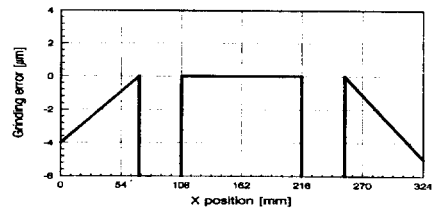
4. 열변형에 의한 가공정밀도 오차

마그네틱 척의 열변형은 가공기준면을 손상시키는 효과를 갖기 때문에 실제 가공정밀도에는 어느 정도 영향을 미치는지 알아볼 필요가 있다.

첫번째로 공작물의 크기가 큰 것을 대상으로 (h60 \times 1115 \times b60) Fig.10-(a)와 같이 3개의 공작물을 척 위에 배치해서 가공을 하였다. 가공시간은 10분 정도 소요되었고 황삭과 정삭을 연속해서 실시하였으며 가공시키는 연삭기는 예열없이 직접 작동시켜 연삭하였다. 또한 주축은 회전으로 인한 열변위를 최소화시키기 위해 필요시에만 회전토록 하였다.



a) Position of the three workpieces



b) Grinding error

Fig. 10 Grinding error of thick workpiece

연삭가공후 가공물의 표면높이를 측정 한 결과를 Fig. 10-(b)에 나타내었다. 그림에 보이듯이 좌우의 공작물은 많이 가공되었음을 알 수 있는데 이 형상은 마그네틱 척의 초기 형상오차에 기인함을 알 수 있다. 척의 경사부위 형상오차는 6 μ m 정도로

나타났고 공작물에서의 가공오차는 $5\mu\text{m}$ 로서 거의 일치함을 알 수 있다. 두 번째 실험으로는 얇고 긴 공작물을 대상으로 ($t5 \times \ell 280 \times b 30$) Fig. 11-(a)와 같이 배치하고 위와 같이 실험을 하였다. 이 실험에서는 공작물의 열용량이 작아서 척의 열을 빼앗아 가지 않아 열변형이 쉽게 이루어지고 공작물의 강성이 낮아 자력에 의해 자유자재로 굽힘이 생기는 특징이 있다.

Fig. 11-(b)에는 얇은 공작물이 두꺼운 공작물에 비해 척의 가공오차 영향을 많이 받는 것으로 나타나고 있다. 마그네틱 척의 발열이 시작될 때 가공된 공작물의 경우 최대 가공오차가 약 $10\mu\text{m}$ 정도 생겼는데 이때 해당 부위의 척의 형상오차는 약 $8\mu\text{m}$ 로 비슷하게 접근하는 것을 알 수 있다. 그리고 척의 발열 3시간 후 가공물의 가공오차는 약 $6\mu\text{m}$ 정도 생겼는데 척의 형상오차는 $5\mu\text{m}$ 로 가공오차가 척의 열변형을 비슷하게 추종하는 것을 나타내고 있다.

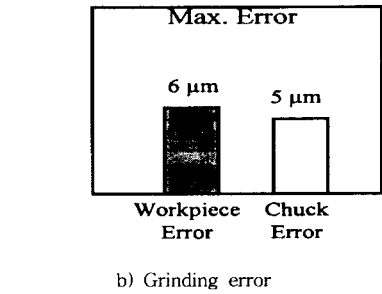
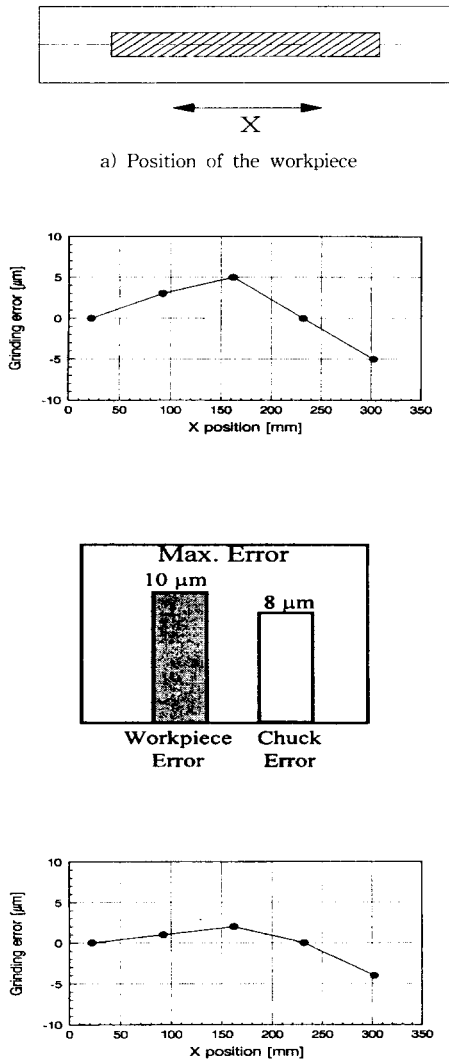


Fig. 11 Grinding error of thin workpiece

5. 결론

본 연구는 마그네틱 척의 열변형이 연삭가공정밀도에 어떤 영향을 미치는지에 대해 해석적 검토와 실험적 측정을 통해 관련성을 나타내었다.

- 1) 마그네틱 척의 온도분포는 중심부위가 가장 높고 외곽으로 갈수록 온도가 낮아지는 타원형태를 이루고 있다.
- 2) 일반적인 작업환경(외기온도 18°C)에서 냉각과 비냉각시 척의 온도분포 차이는 약 2.5°C 정도이다.
- 3) 척을 냉각하는 경우 $1\mu\text{m}/10\text{min}$ 정도로 열변위가 증가해서 주축대와 비슷한 정도의 열변위를 한다.
- 4) 척의 열변위 형태는 중앙부위의 열변위가 집중적으로 생기는 봉우리 형태를 나타낸다.
- 5) 두꺼운 공작물의 가공오차는 척의 초기 형상오차로부터 많은 영향을 받는다.
- 6) 얇은 공작물의 가공오차는 척의 초기 형상오차와 열변형의 영향을 동시에 받는다.

참 고 문 헌

1. Kyosuke Ai, Kenji Ohishi, Cutting and Grinding Techniques of Ceramics, Kaibundo Publishing Co. LTD, 1990
2. 精密工學會, 研削工學, オーム社, 1987
3. Michael Klyk, Hochgeschwindigkeitsschleifen mit CBN, Vulkan-Verlag, 1993
4. Manfred Weck, Werkzeugmaschinen Bd. 2, VDI-Verlag, 1991
5. 垣野 義昭, グラインディグセンタ, 日刊工業新聞社, 1993
6. Joachim Heise, Thermische Stabilisierung von Hauptspindeln in Werkzeugmaschinen, Carl Hanser Verlag, 1987
7. H. K. Tonshoff, Compensation of Thermal induced Displacement in Machine Tools, Proceeding of Manufacturing International 90., 1990
8. G. Spur, Thermal Behaviour Optimization of Machine Tools, Annals of the CIRP Vol. 37/1/1988