

평면연삭의 가공특성감시와 이상상태 진단

정인근* · 임영호 권동호 최만용, 임순제
(충선대학교원) (충선대학교) (명지전문대) (한국표준과학연구원)

1. 서론

연삭가공은 숫돌의 입자가 마멸, 파쇄, 탈락, 생성의 과정을 반복하면서 가공하는 것으로 연삭과정(grinding process)은 사용하는 연삭숫돌의 종류, 드레싱조건, 연삭조건 등의 인자에 영향을 받는다. 더욱이 연삭숫돌의 연삭성능은 연삭가공시간의 경과에 따라 변화한다. 이때 요구되는 가공능률과 가공정밀도를 일정하게 유지하기 위해서는 연삭과정을 자동감시하고 이상상태를 진단하는 기술⁽¹⁾의 확립이 필수적이다. 가공중(In-process)의 연삭숫돌과 공작물의 접촉상태가 정상적으로 유지되고 있는가를 감시하고 이상이 있으면 그 신호를 받아 온라인(on-line)상태에서 피드백(feedback)하여 공작기계를 정지시킨다거나 가공조건을 적절히 변화시켜 정상적인 상태에서 가공을 진행시키기 위한 조치를 취할 필요가 있다⁽²⁾.

연삭가공상태를 지배하는 연삭숫돌의 특성, 드레싱조건, 연삭조건 등이 연삭시간이 경과함에 따라 연삭성능에 큰 영향을 미치며, 특히 숫돌 입자의 분포상태 및 입자날끝의 마멸(glazing)이나 칩(chip)의 부착 등으로 인한 로우딩(loading)이 연삭성능을 좌우하는 요인이 된다. 또한 연삭가공에서 대표적인 이상상태라고 할 수 있는 것이 연삭버어닝(burning) 및 연삭균열(grinding crack)이다.

연삭버어닝은 연삭표면으로부터 공작물 내부쪽으로 Fe₂O₃, Fe₃O₄, FeO 등이 각 층상을 이루고 있지만, 주성분은 Fe₃O₄이다. 연삭버어닝의 색조변화는 Fe₃O₄의 두께에 좌우되며 이 두께는 연삭열에 의한 가공중의 온도상승에 의존하는 것이 알려져 있다⁽³⁾.

또한 연삭버어닝은 연삭균열의 원인이 되며 연삭균열은 연삭열 뿐만아니라 기계적 응력 및

연삭조건에 따라 생성된다고 할 수 있다⁽⁴⁾.

그러나 연삭가공에 있어서 가공상태를 감시하고 이상상태를 진단하는 방법은 아직 확립되어 있지 않다.

현재 사용되고 있는 이상상태의 감시기술로는

- (1) 전동기 부하전류의 변화를 이용하는 방법
- (2) 압전소자를 사용한 질삭저항의 변화를 이용하는 방법
- (3) 음압의 주파수분석을 이용하는 방법
- (4) 압전형 가속도 pick-up을 이용하는 방법
- (5) 열기전력과 접촉진기저항을 이용하는 방법
- (6) 가공정밀도의 변화를 이용하는 방법

등이 있으며⁽⁵⁾, 최근에는 공작물의 소성변형이나 연삭과정중에 발생하는 공구-공작물사이의 AE(Acoustic Emission, 음향방출)을 이용한 온라인감시기술에 관한 연구가 진행되고 있다⁽⁶⁾.

연삭과정중에 발생하는 음향방출량을 이용하여 In-process중의 온라인감시 및 가공상태의 이상을 파악할 수 있다.

본 연구에서는 AE를 이용하여 평면연삭에 있어서 연삭숫돌의 종류별(WA계 비트리파이드 및 레지노이드결합제연삭숫돌 36종류) 및 연삭조건을 변화시켰을 때의 연삭저항 및 AE신호의 변화 등을 In-process검출하여 연삭가공상태의 자동감시 및 자동이상진단시스템을 위한 AE의 적용가능성을 검토하였다.

2. 연삭과정에서의 AE파생성

Mallen은 연속진위론의 이론으로 응력파의 크기 $\sigma(r,t)$ 를 해석적으로 구하였다⁽⁶⁾⁽⁷⁾.

$$\sigma(r,t) \propto (-\varepsilon \cdot V/\gamma) \cdot \exp(-\omega^2 \cdot \Delta t^2) \dots \dots (1)$$

여기서

ϵ : 변형역에 생기는 소성변형률

V : 소성변형의 체적

Δt : 변형이 발생하는 시간간격

식(1)은 AE파의 발생에 있어서 변형이 크거나 변형이 발생하는 시간 Δt 가 짧을수록 진폭이 큰 AE파가 발생한다는 것을 의미한다. 그러므로 연삭과정에서 변형체적이 클수록 AE파의 진폭과 주파수가 증대함을 알 수 있다. 한편 단위체적의 재료에 대하여 소성변형에 의한 에너지중분 dW_1 은

$$dW_1 = \sigma'_i \cdot d\epsilon_i$$

$$= \sigma'_1 \cdot d\epsilon_1 + \sigma'_2 \cdot d\epsilon_2 + \sigma'_3 \cdot d\epsilon_3 \dots (2)$$

여기서

σ'_i : 주변차 응력

$d\epsilon_i$: 주변형률 증분

에너지 변화율은

$$\dot{W} = \sigma' \cdot \dot{\epsilon} \cdot V \dots (3)$$

로 주어지므로 AE에너지변화율 dE/dt 는 변형률 $\dot{\epsilon}$ 와 부하응력 σ 및 변형된 재료의 체적 V 에 의존함을 알 수 있다.

그리고 소성변형일 중 AE발생에 소비되는 부분의 비율이 항상 일정하다고 가정하면

$$dE/dt \propto [AE_{rms}]^2 = C \cdot \sigma' \cdot \dot{\epsilon} \cdot V \dots (4)$$

로 된다. 식(4)로부터 연삭숫돌과 공작물이 접촉하면 변형률 $\dot{\epsilon}$, 부하응력 σ , 소성변형체적 V 가 연삭 진행과 더불어 증대하므로 AE파의 진폭은 크게 되는 것을 알 수 있다.

연삭과정에서 AE파 발생인을 생각하면 Fig.1에 나타낸 바와같이

(1)제 1 변형영역 : 전단영역(일의 변화율 W_s)

(2)제 2 변형영역 : 숫돌입자의 미끄럼면과 칩(chip)의 접촉영역(W_r)

(3)제 3 변형영역 : 숫돌입자의 여유면과 공작물의 접촉영역(W_f)

의 3가지 영역으로 분류할 수 있으며, 본 실험에서 얻어진 신호를 위의 (1), (2), (3)항의 소성 변형영역에서 발생한 AE파라고 생각하면

$$AE_{rms} = \dot{W}_s + \dot{W}_r + \dot{W}_f \dots (5)$$

로 되고, AE에너지변화율 dE/dt 는 식(4) 및 식(5)로부터

$$dE/dt \propto C \cdot \sigma' \cdot \dot{\epsilon} \cdot V$$

$$= \dot{W}_s + \dot{W}_r + \dot{W}_f$$

$$= f(\dot{W}_s, \dot{W}_r, \dot{W}_f) \dots (6)$$

을 얻는다.

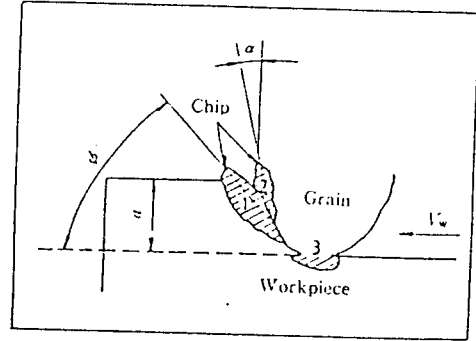


Fig.1 Zones of AE generation in the grinding process

3. 실험

3.1 연삭숫돌 및 시험편재료

(1) 연삭숫돌

본 실험에 사용된 연삭숫돌은 WA계 비트리피드 및 레지노이드결합제연삭숫돌로서 그 종류는 Table 1 과 같다.

Table 1 Kinds of grinding wheels

Material grain	Grade	Grade					Structure	Bond	Max. dia. of abrasive grain	Min. dia. of abrasive grain	Grits per inch
		1	2	3	4	5					
WA	40	1	2	3	4	5	.	V	1000 μ	150 μ	30, 75 μ
	120	2	3	4	5	.					
	220	3	4	5	.						
	40	1	2	3		4	.	.			
	120	2	3	4		.					
	220	3	4	5							

(2) 시험편

본 실험에 사용된 시험편재료는 냉간금형용강재 SKD11과 열간금형용강재 SKD61을 선정하였고 시험편의 화학성분은 Table 2와 같으며, Fig.2는 시험편의 형상을 나타낸 것이다.

Table 2. Chemical composition and hardness of specimen

Testing	Chemical composition wt %								Tensile strength MPa	Impact hardness J/C
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni		
SKD11	1.47	0.33	0.54	0.0076	0.015	11.74	0.0516	0.01	17.5	92
SKD61	0.91	0.18	0.43	0.0176	0.017	6.82	0.16	0.01	16.5	73

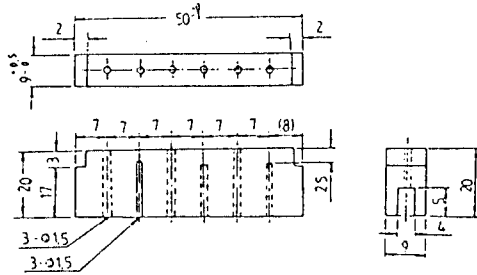


Fig.2 Dimensions of specimens

3.2 실험장치 및 실험방법

Fig.3은 본실험에 사용한 실험장치를 나타낸 것이며 Fig.4는 AE측측시스템을 이용한 평면연삭실험장치의 계통도이다.

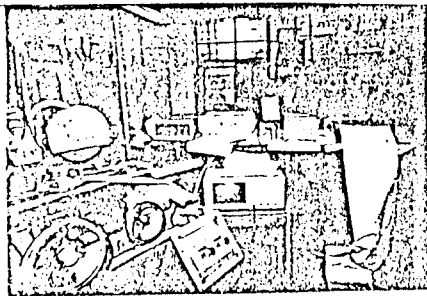


Fig.3 Experimental apparatus of grinding process by Acoustic Emission.

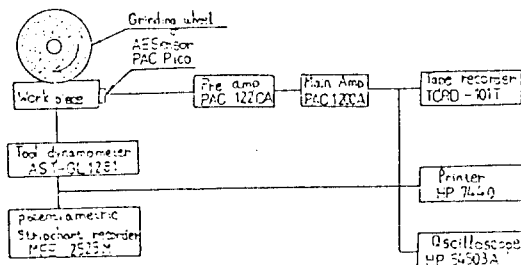


Fig.4 Block diagram of experimental apparatus.

평면연삭실험에 앞서 시험편의 가공부위를 별도의 연삭숫돌에 의하여 예비연삭한후, Table 1과 같은 연삭숫돌을 사용하여 테이블의 이송속도를 0.1m/sec, 연삭깊이를 10, 20, 30, 40, 50 μ m로 변화시켜 건식상향연삭실험을 하였다. 연삭숫돌의 원주속도는 1800m/min로 일정하게 하였다.

본 실험에서는 AE신호의 감도를 고려하여 시험편의 우측면 중앙에 부착하였다.

Fig.4에 나타낸 바와같이 연삭가공시 나타나는 연삭저항은 공구동력계(AST-GL1281)를 거쳐 Tape recorder(TCRD-101T) 및 potentiometric stripchart recorder(MFE 2525M)에 기록하였다.

AE측정은 고감도소형(ϕ 5mm)센서(PAC. pico)로부터 출력된 것을 pre-amp.(PAC1220A)와 main-amp.(PAC.1200A)를 거쳐 잡음제거 및 신호증폭을 위하여 AE_{rms} 와 AE_{wave} 를 Tape recorder(TCRD-101T)에 수록하고 Oscilloscope(HP 54503A)를 통하여 관찰되도록 하였다.

AE발생신호가 크기 때문에 단일신호 검출에는 큰 문제가 없으나 공작물의 온도상승등으로 센서의 접촉에 주의를 필요로 하였다. AE센서의 접촉은 electronic wax를 사용하였고 신호의 선택은 threshold level 스위치를 사용하였다. main-amp. 부분의 증폭도가 크므로 이에 맞춘 신호구별도 주의를 요하는 부분에 해당되었다. 또한 예비연삭실험중 연삭숫돌의 글레이징(glazing)에 의한 영향이나 숫돌입자의 탈락등에 의한 영향이 AE신호로 검출가능하였다.

4. 실험결과 및 고찰.

4.1 연삭깊이 별 연삭저항 및 AE_{rms}

Fig.5 부터 Fig.10은 입도 #46,결합도 J, 그리고 Fig.11부터 Fig.16은 입도 #220, 결합도 J, 0인 비트리파이드 및 레지노이드결합제연삭숫돌을 사용하여 SKD11, SKD61의 어니일링재와 경화재에 대하여 연삭깊이를 10,20,30,40,50 μ m로 하여 연삭가공했을때 연삭저항 F_n (Normal force) 및 AE_{rms} 를 나타내는 것이다. 연삭깊이가 증가함에 따라 F_n 및 AE_{rms} 는 증가하며 SKD11어니일링재가 SKD11경화재보다, SKD11재가 SKD61재보다 그리고 비트리파이드결합제연삭숫돌이 레지노이드결합제연삭숫돌보다 F_n 및 AE_{rms} 가 큰 값으로 나타났다.

.그리고 동일한 조건의 경우라도 입도 #220의 연삭숫돌이 입도 #46의 연삭숫돌보다, 결합도 0의 연삭숫돌이 결합도 J의 연삭숫돌보다 AE_{rms} 가 큰 값으로 나타났다.

이는 연삭깊이가 증가함에 따라 AE파 생성모델의 전단역 W_s , 숫돌입자와 칩의 접촉영역 W_r 및 숫돌입자와 공작물과의 접촉영역 W_f 가 커져 소성변형 체적이 커져 큰 AE신호가 발생된 것으로 생각된다.

또한 레지노이드결합제연삭숫돌이 비트리파이드결합제연삭숫돌보다 숫돌입자의 자생작용이 원활하게 진행되므로 연삭저항 및 AE_{rms} 값이 작게 나타나며 SKD11 및 SKD61어니얼링재가 SKD11 및 SKD61 경화제보다 인성이 높으므로 SKD11 및 SKD61재가 SKD11 및 SKD61열처리된 경화제보다 연삭잔여량이 많아져 연삭저항 및 AE파 발생이 크게 나타난 것을 알 수 있으며, 입도가 크고 결합도가 높은 연삭숫돌일수록 bond bridge의 결합력이 강화되어 숫돌입자의 자생작용이 원활하지 못하게 되므로 연삭저항 및 AE_{rms} 의 값이 크게 나타난 것으로 생각된다.

Fig.10 및 Fig.12에서 연삭깊이 30 μ m 이후에 나타나는 급격한 AE_{rms} 의 증분치로부터 연삭과정에서의 비어닝 및 로우딩의 이상상태를 감지할 수 있다.

이는 연삭저항의 변화로는 알 수 없지만 고감도의 센싱기능을 갖는 AE계측을 이용하므로써 온라인(on-line)상태에서의 감시 및 이상상태를 판정할 수 있음을 나타낸 것이라고 할 수 있다.

4.2 AE에 의한 연삭 상태이상 진단

연삭상태는 연삭숫돌-공작물의 접촉상태라고 할 수 있으므로 가공시간의 경과에 따른 AE신호의 변동량으로부터 연삭가공특성을 파악하여 검토하였다.

Fig.17은 입도 #220 결합도 0인 레지노이드결합제연삭숫돌을 이용하여 SKD11어니얼링재를 연삭깊이를 10, 20, 30, 40, 50 μ m로 하여 연삭가공했을 때 연삭시간의 경과에 따른 연삭저항 및 AE_{rms} 를 나타낸 것이다.

Fig.18은 AE의 발생경향으로 연삭상태를 나타낸 것으로 AE에너지가 어느 임계치에 도달하기 전까지, 즉 연삭숫돌과 공작물이 접촉하기 전까지 (0~a구간)는 AE의 발생을 거의 볼 수 없고 연삭숫돌과 공작물의 접촉개시점(b점)에서

는 AE신호가 급격히 큰 값으로 나타났으며 b~c구간에서는 연삭숫돌-공작물의 정상적인 접촉상태를 나타낸 것이며, b~c구간에서 검출되는 AE_{rms} 의 불규칙적인 미약한 변동량은 연삭가공중의 보다많은 숫돌입자의 탈락과 미소균열의 전파에 수반되는 AE신호로 생각된다.

또한 c~d구간의 급격히 큰 AE신호는 연삭숫돌을 벗어날때 나타낸 것으로 이때의 AE_{rms} 값은 연삭저항값과 잘 대응하고 있다.

Fig.17(c)에서는 과도한 연삭숫돌-공작물의 접촉으로 인하여 큰 연삭열이 발생하여 버어닝 및 연삭균열이 생겨 AE파 발생의 지속시간이 길어지고 AE신호의 급격한 변동량이 발생한 것을 알 수 있다.

따라서 AE신호로부터 연삭숫돌-공작물의 접촉시점, 연삭가공상태의 이상유무를 감지할 수 있으며 연삭숫돌-공작물의 접촉시간 및 AE신호 발생의 지속시간 및 AE신호 크기를 파악함으로써 연삭가공의 이상상태를 감지할 수 있을 것으로 생각된다.

4.3 연삭버어닝과 AE신호 특성

연삭이 진행됨에 따라서 나타나는 연삭버어닝은 연삭저항의 2분력 F_n , F_t 및 AE_{rms} 의 변동량으로부터 알 수 있다.

연삭버어닝은 공작물의 색조변화를 수반한다. 연삭버어닝의 색은 무색→담황색→담갈색→갈색→흑갈색→자색→청자색→청색→흑청색→흑색으로 변화한다⁽³⁾.

그러나 연삭과정이 대단히 복잡한 조건으로 이루어져 있어 버어닝을 명확히 파악하는 데는 어려움이 있으므로 열적으로 가혹한 연삭조건 하에서의 AE신호의 진폭과 연삭버어닝의 시간적변화를 관찰하였다.

Fig.19는 연삭시간경과에 따른 AE신호를 오실로스코우프로 관찰한 것이다.

Fig.19에서 AE신호의 불규칙적인 변동을 볼 수 있으며, A점에서 급격한 AE신호의 진폭이 나타난다. 이는 Fig.18의 AE_{rms} 의 변동량이 나타나는 시기와 일치하며 AE신호도 연삭저항의 변화와 마찬가지로 급증함을 알 수 있다.

Fig.20에서는 백색의 알루미늄숫돌입자가 용융된 것과 같은 모양을 나타내고 있다. 숫돌입자가 초기에는 적절한 숫돌입자의 분포와 에리한 절삭날을 갖지만, 연삭이 진행 됨에 따라서 연삭작업면의 눈매움, 숫돌입자 어유면마멸이 점증하고 연삭 후기에 있어서는 흑갈색에서 자색

으로 변화하며, 산화가 진행됨에 따라 열균열이 활발하게 발생됨으로 이때 AE신호의 급격한 진폭분포가 불규칙하게 나타난 것으로 생각된다.

그러므로 AE신호의 관찰로부터 연삭가공상태의 이상을 파악할 수 있다고 판단된다.

또한 Fig.19의 A, B, C 점은 연삭비어닝으로 인한 균열점인 것으로 보인다.

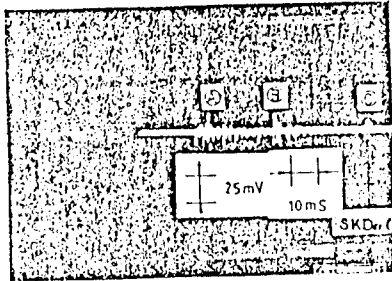


Fig.19 AE signal of the grinding crack

5. 결론

연삭가공상태의 특성과 가공상태의 감시 및 이상진단에 대한 AE의 적용가능성을 구명하기 위하여 SKD11, SKD61어니일링제 및 SKD11, SKD61경화재를 WA계 비트리파이드 및 레이노이드 결합제연삭숫돌을 사용하여 평면연삭시험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 탄성이 낮고 기공율이 높은 연삭숫돌일수록 연삭저항 및 AE_{rms} 값이 크게 나타났다.
- (2) 동일한 연삭조건의 경우 입도가 높고 결합도가 높은 연삭숫돌일수록 AE_{rms} 신호가 큰 값으로 나타났으며, 경도가 낮은 재료일수록 AE_{rms} 가 크게 검출되었다.
- (3) 연삭저항의 변화로는 판단이 어려운 연삭숫돌의 로우딩, 글레이징이나 숫돌입자의 탈락 등에 의한 영향이 AE로 검출 가능하였다.
- (4) AE발생패턴으로부터 연삭숫돌-공작물의 접촉시작점, 가공상태 및 연삭숫돌-공작물의 이탈점 등을 정확히 파악할 수 있으며 연삭숫돌-공작물의 이탈점에서의 AE_{rms} 와 연삭저항(F_n, F_t)과는 잘 대응하였다.
- (5) AE파형관찰 및 연삭비어닝된 공작물의 현미경촬영결과로부터 연삭비어닝현상에 대하여 AE를 이용한 In-process계측 가능성을 기대할 수 있다.

- (6) 연삭조건에 따른 threshold값을 설정함으로써 이상상태의 감시 및 연삭기의 자동제어 등이 가능할 것으로 기대된다.

- 참고 문헌 -

- (1) 江田 弘, 貴志 浩三, 1977, "研削き裂起源に對するマルテンサイト品の衝突き裂とひすみの存在意義 - マルテンサイト鋼の研削き裂の生成機構 (第1報) -", 精密機械, 第43卷, 第12號, pp.30-36
- (2) 江田 弘, 貴志浩三, 中島正幸, 桓野義昭, 藤原彰彦, 1983, "AEを用いた研削き裂のインプロセス検出" 精密機械, 第50卷, 第8號, pp.82-87
- (3) 江田 弘, 貴志浩三, 臼井信行, 桓野義昭, 藤原彰彦, 1983, "アコースティックエミッションを用いた研削焼けのインプロセス検出" 精密機械, 第49卷, 第9號, pp.103-108
- (4) Elijah Kannatey-Asilbu, Jr. and D.A. Dornfeld, 1981, "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting", Trans. ASME, Ser. B, 103, 3, 330
- (5) 日本機械學會編, 1986, "機械加工計測技術", 朝倉書店, pp.33-39
- (6) 中島利勝, 1994, "研削の研究と手法", 精密工學會誌, 第60卷, 第1號, pp.9-12.
- (7) 江田 弘, 桓野義昭, 貴志浩三, 1984, "切削・研削き裂の進展とAEによるき裂検出", 精密機械, 第50卷, 第10號, pp.51-58
- (8) 江田 弘, 貴志浩三, 桓野義昭, 藤原彰彦, 山田卓郎, 1983, "AEを用いた砥石-工作物のタッチセンサ", センサ技術, 第3卷, 第11號, pp.54-60

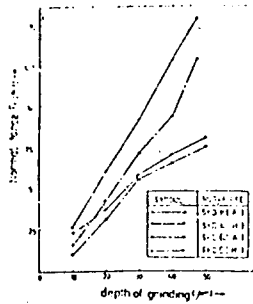


Fig. 5. Normal forces versus depth of grinding for annealed, hardened SKD11 and SKD61 by vitrified bond grinding wheel (VA 4678V)

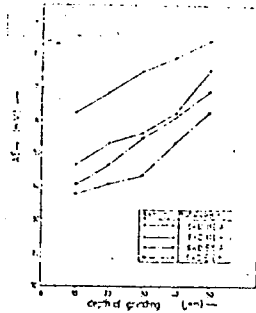


Fig. 6. Release point AEm versus depth of grinding for annealed, hardened SKD11 and SKD61 by vitrified bond grinding wheel (VA 4678V)

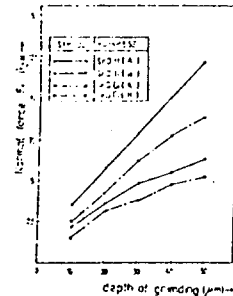


Fig. 7. Normal forces versus depth of grinding for unannealed, hardened SKD11 and SKD61 by resinoid bond grinding wheel (VA 4513B)

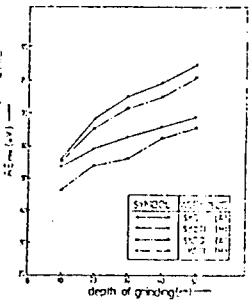


Fig. 8. Release point AEm versus depth of grinding for annealed, hardened SKD11 and SKD61 by resinoid bond grinding wheel (VA 4618D)

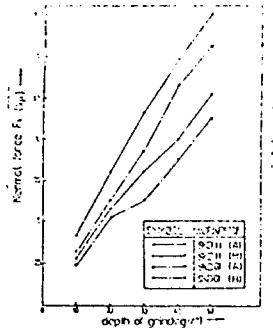


Fig. 9. Normal forces versus depth of grinding for annealed, hardened SKD11 and SKD61 by resinoid bond grinding wheel (VA 4608B)

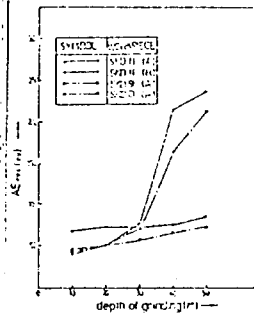


Fig. 10. Release point AEm versus depth of grinding for annealed, hardened SKD11 and SKD61 by resinoid bond grinding wheel (VA 4608B)

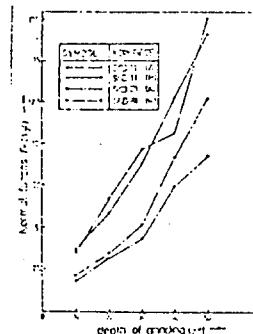


Fig. 11. Normal forces versus depth of grinding for annealed, hardened SKD11 and SKD61 by vitrified bond grinding wheel (VA 2207EV)

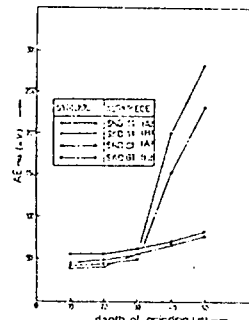


Fig. 12. Normal forces versus depth of grinding for annealed, hardened SKD11 and SKD61 by vitrified bond grinding wheel (VA 2207EV)

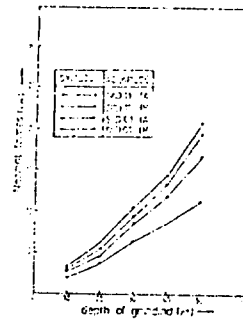


Fig. 13. Normal forces versus depth of grinding for annealed, hardened SKD11 and SKD61 by resinoid bond grinding wheel (VA 22078B)

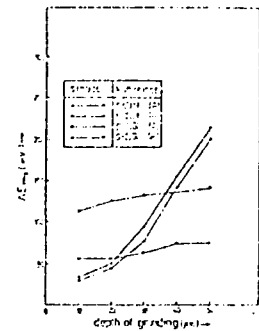


Fig. 14. Release point AEm versus depth of grinding for annealed, hardened SKD11 and SKD61 by resinoid bond grinding wheel (VA 22078B)

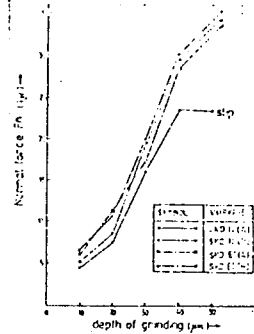


Fig. 15. Normal force versus depth of grinding for annealed, hardened SKD11 and SKD61 by resinoid bond grinding wheel (VA 22078B)

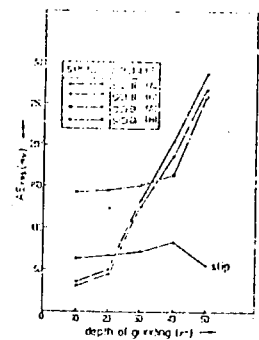


Fig. 16. Release point AEm versus depth of grinding for annealed, hardened SKD11 and SKD61 by resinoid bond grinding wheel (VA 22078B)

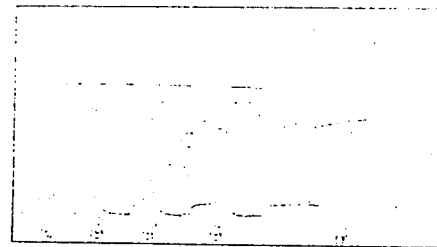


Fig. 17. Normal force versus depth of grinding for annealed, hardened SKD11 and SKD61 by resinoid bond grinding wheel (VA 22078B)

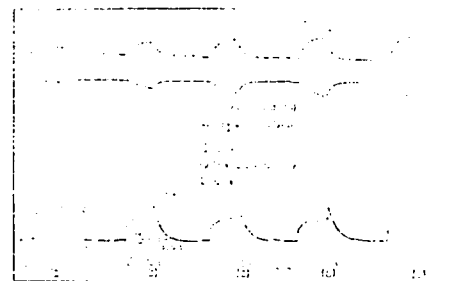


Fig. 18. Release point AEm versus depth of grinding for annealed, hardened SKD11 and SKD61 by resinoid bond grinding wheel (VA 22078B)