

超硬切断工具의 刃先缺損에 관한 研究

(切断工具 刃先의 應力分布解析)

金元鑑*, 南俊祐**

A Study on the Cutting Edge Chipping of Cemented Carbide Cut-off Tools (Analysis of Stress Distribution in Cutting Edge for Cut-off Tools)

W.I.Kim , J. W. Nam

ABSTRACT

This study applies dynamic deformation analysis to the rake face stress distribution of cemented carbide cut-off tools by turning, using a finite element method. The results are following:

1. The dynamic loaded state of a cut-off tool was very changeable for the first 0.6 seconds. Reaching the normal state, it became in active.
2. Chipping was influenced not only by the magnitude of stress but also by the abrupt change of tensile and compressive stresses.
3. The distribution chart of principal stress by dynamic load and the direction of resultant vector were almost constant regardless of load time.

1. 序 論

切削工具의 損傷은 加工의 自動化에 따라 대두된 主要한 問題의 하나이다. 이는 工具內에서 應力狀態가 工具材料의 어떤 特定한 破壞條件을 만족하였을 때 發生하는 것이고, 이와 같은 應力의 發生은 工具의 熱的, 機械的 負荷에 基因하는 것이라 하겠다.¹⁾

熱應力에 의한 刃先缺損(chipping)에 대해서는 그 基本的 現象에 關係 比較的 자세히 밝혀져

있으나,²⁾ 機械的 應力에 의한 問題는 아직도 理論的으로 간단한 解析밖에 이루어져 있지 않고,³⁾ 또한 有効한 實驗的手段으로 光彈性 工具를 利用하고 있지만,^{4,5)} chipping이 發生되는 工具刃先近傍의 微少한 領域內의 適用은 技術的으로 充分한 資料가 開發되지 않고 있는 實情이다. 特히 近來에 이르러 切削速度의 增加에 따라 새로이 登場한 耐熱 工具材料(예를 들면 ceramics)는 취성이 크기 때문에, 工具切刃 應力에 의한 破壞問題가 심각하여 이를 力學的으로 解析하려

* 慶南大學校 工大 機械工學科

** 國民大學校 工大 機械設計學科

는 研究가 활발히 展開되고 있다.⁶⁻¹¹⁾

따라서 본 研究에서는 被削材의 円周速度가 變化하고 切削面積 및 抵抗이 比較的 큰 切斷 切削에 있어서 工具의 刃先에 發生하는 微少한 粘性 破壞 現象인 칩핑을 究明키 위해 刃先近傍의 應力分布를 切削實驗에서 얻은 切削力을 바탕으로 現實的인 條件下에서 有限要素法으로 檢討하였다.

2. Chip 생성에 따른 工具傾斜面上的 應力分布

2.1 工具傾斜면에 作用하는 應力特性

工具刃先에 作用하는 應力分布를 解析하는데 있어서 그 妥當한 結果를 얻기 위해서는 工具 傾斜면에 作用하는 荷重은 될 수 있는 한 現實的인 값을 適用하여야 한다.

실제 E. Usui 와 H. Takeyama⁴⁾ 는 光彈性 工具를 利用하여 Fig.1 과 같은 刃先 應力分布曲線을 얻었으며, 이와 類似한 結果가 N.N. Zorev¹²⁾ 에 의해서도 研究되어 졌다.

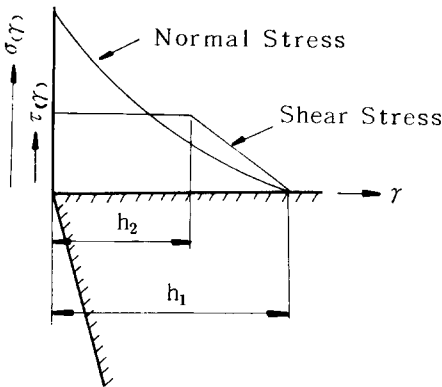


Fig. 1 Experimental Tool-Chip Interface Stresses
 (a) Usui, Takeyama; $h_2/h_1 = 2/3$
 (b) Zorev; $h_2/h_1 = 1/2$

이들에 의하면 chipping 이 일어나는 工具刃先 部位의 應力變化에는 差가 없으며 다만 chip 의 流出에 따른 chip 의 内部 剪斷應力領域에 變化가 있을 뿐이므로 그 應力分布方程式을 Zorev 의 模型에 의해 다음과 같이 設定하였다.

$$\begin{aligned} \sigma(r) &= -N(h_1 - r)^2 / h_1^2 \quad (0 \leq r \leq h_1) \\ \tau(r) &= K \quad (0 \leq r \leq h_1/2) \\ &= -2K \cdot r / h_1 + K \quad (h_1/2 \leq r \leq h_1) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots [1]$$

여기서 K는 被削材의 剪斷強度이고, N은 未知의 媒介變數이다. 이는 切削實驗에서 얻어지는 主分力(F_c)와 背分力(f_r)에 의해 구할 수 있다. 즉, 工具의 傾斜角을 α , chip과 工具의 接觸길이와 幅을 각각 h_1, b 라 하면 工具傾斜面上的 平均 垂直應力 σ_t 는 다음과 같은 關係가 成立된다.

$$\begin{aligned} \sigma_t h_1 b &= (F_c \cos \alpha - F_r \sin \alpha) \\ &= - \int_0^{h_1} \frac{N(h_1 - r)^2}{h_1^2} b dr \dots\dots [2] \end{aligned}$$

N의 값은

$$N = 3 \sigma_t \dots\dots\dots [3]$$

가 된다. 또한 工具傾斜面上的 平均 剪斷應力 τ_t 는

$$\begin{aligned} \tau_t h_1 b &= (F_c \sin \alpha + F_r \cos \alpha) \\ &= \left[\int_0^{h_1/2} K b dr + \int_{h_1/2}^{h_1} \frac{2Kr}{h_1} b dr \right] [4] \end{aligned}$$

이므로, 따라서 K의 값은 다음과 같이 된다.

$$K = \frac{h \tau_t h_1}{h_1 + h_2} \dots\dots\dots [5]$$

2.2 切削實驗

式(2)와 (4)를 利用하여 N와 K의 값을 얻기 위해 機械構造用炭素鋼 SM45C를 被削材로 하여 Fig.2 와 같은 切斷 切削實驗을 행하였으며 이때 使用한 工具의 諸元과 切削條件은 Table 1과 같다.

Table 2는 이 結果를 나타낸 것이다.

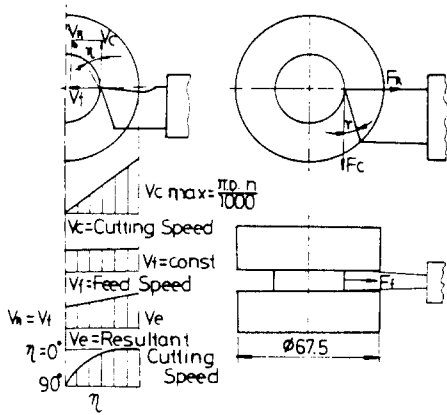


Fig. 2 Geometry forces and Speeds During Semi-Orthogonal Cut-off Operations

Table 1 Cutting Test Conditions

Work material	: SM 45 C
Tool	: 43-2 KTP20
	: Rake angle : $\alpha = 0^\circ$
	: Clearance angle : $\gamma = 9^\circ$
	: Cutting width : 3 mm
Mean Cutting Speed	: 100 m/min
Feed Rate	: 0.045, 0.048, 0.052 mm/rev
Cutting fluid	: none
Modulus of elasticity	: 5.34×10^4 (kg/mm ²)
Poisson's Ratio	: 0.22

Table 2 Cutting force and Value of parameter

Cutting Condition			Cutting Force(kgf)		Maximum normal stress(N)	Chip-tool contact length(h _t)
cutting speed	Feed Rate		Principal cutting force(F _c)	Radial cutting force(F _r)		
(100m/min)	0.045	53.25	19.16	110.02	0.484	
	0.048	65.09	22.99	124.22	0.524	
	0.052	68.05	26.82	127.91	0.616	

3. F.E.M.의 구성方程式

工具의先端에 荷重이 作用할때 工具斷面內의 變形量은 위치에 따라 달라진다. 즉 工具斷面內의 任意的 점 P(x, y)가 變形後 점 P(x+u, y+v)로 옮겨 왔을 때, 그 變形量 u, v는

$$U = U(x, y) \dots \dots \dots [6]$$

$$V = v(x, y)$$

가 된다.

여기 2變數 x, y의 函數 u, v를 구하려면 一般的인 方法으로는 不加能하므로 Fig.3과 같은 4 變形要素의 要素剛性 Matrix를 구하여 이것을 組合 처리하는 有限要素를 利用하였다. 이때 Model의 要素分割에 있어서 工具의 先端 刃先部位에 應力集中이 豫상되므로 이 附近에서 細分化하였으며, 要素와 節點의 數는 各各 308 個와 345 個로, 工具를 고정시키는 部位를 假定하여 그 變位를 0으로 하였다.

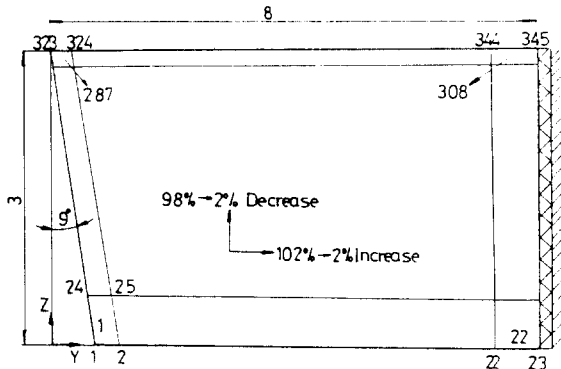


Fig. 3 Mesh used in finite element computation

지금 Fig. 3의 任意 4角形要素의 各 節點 P_i, P_j, P_k, P_m에서 作用하는 x, y 方向의 外力을 f_ig_i, f_jg_j, f_kg_k, f_mg_m,라 하고 그 變位의 量은 u_i v_i, u_j v_j, u_k v_k, u_m v_m라 할 때 이들 사이에는 다음과 같은 關係가 成立한다.

$$\left[\begin{matrix} \text{四角形要素의} \\ \text{要素剛性 Matrix} \end{matrix} \right] \{u_i v_i, u_j v_j, u_k v_k, u_m v_m\}^T = \{f_i g_i, f_j g_j, f_k g_k, f_m g_m\} \dots \dots \dots [7]$$

式(7)로 부터

- (i) 應力과 變形率과의 關係를 구하면

$$K[D]\{\epsilon\} = \{\sigma\} \dots\dots\dots [8]$$

가 되며, 또한

(ii) 各 要素內에서의 應力과 變形率의 관계에서 볼 때 4 節點의 變位는

$$\{\epsilon\} = [P]\{\alpha\} \dots\dots\dots [9]$$

가 된다.

따라서,

(iii) 各 節點의 變位에 따른 所要된 Energy 는

$$W = u_i f_i + v_i g_i + u_j f_j + v_j g_j + u_k f_k + v_k g_k + u_m f_m + v_m g_m = \{u\}^T \{f\} \dots\dots\dots [10]$$

가 되므로 Potential Energy π 는 内部에너지 U와 外部에너지 W의 差에 의해 表示할 수 있다.

즉

$$\begin{aligned} \pi &= U - W \\ &= \frac{1}{2} \{u\}^T [k] \{u\} - \{u\}^T \{f\} \dots [11] \end{aligned}$$

式(11)을 變分原理에 의해 最小化시키면 바라던 解가 구출된다. 이와같은 諸關係를 計算處理기 위해 大型Computer인 prime 750을 使用하였으며, Fig. 4는 그 處理의 流通圖이다.

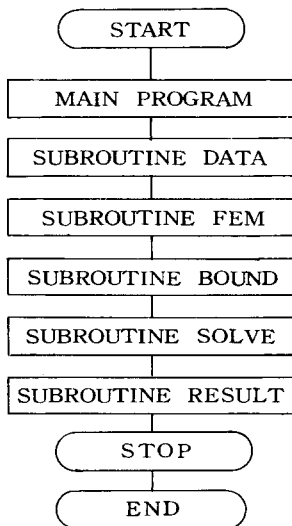


Fig. 4 Block Diagram

4. 計算結果 및 考察

切斷工具의 負荷狀態는 初期切入時 選移領域이 Fig. 5에서 보는 바와 같이 Zone I, II의 경우처럼 그 變化가 다른 기울기를 나타내고 工具를 빼낼 때에도 그 狀態가 Zone III처럼 다르게 나타남을 알 수 있다.

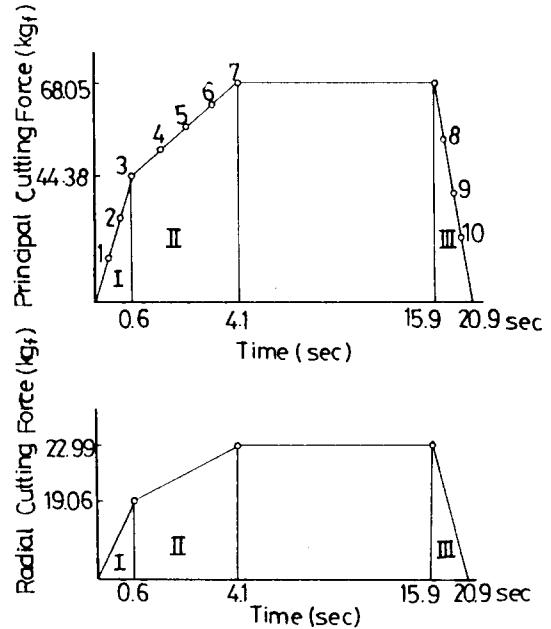


Fig. 5 Time vs. Principal Cutting Force and Radial Cutting Force in Cut-off Tools

Fig. 5를 適用한 F.E.M 計算結果를 나타낸 것이 Fig. 6~11이다.

Fig. 6은 準 2次元 應力狀態로서 平面應力의 平衡을 x方向의 垂直應力 σ_x 에 대하여 切刃으로부터 각각 0.075 mm, 0.375 mm, 0.688 mm 떨어진 곳에서 時間의 경과에 따른 應力의 變化狀態를 나타낸 것이다.

여기서 알 수 있는 바와 같이 最初 0.6秒 안에는 그 變化가 매우 심하며 正常狀態에 달하기 直前에는 그 기울기가 緩慢함을 알 수 있다. 특히 注目되는 것은 σ_x 의 크기가 刃先으로부터 조금 떨어진 곳에서 그 값이 매우 크고 오히려 刃先에서는 그렇게 값이 크지 않다는 點이다.

이 點으로 미루어 볼 때 σ_x 의 값이 工具刃先에 칩 평(chipping)의 影響을 주는 要素라면 칩 평이 切刃에서만 일어나지 않고 切刃에서 조금 떨어진 곳에서 거의 일어난다는 것을 實驗적으로 해석할 수 있다.

Fig. 7은 y 方向의 垂直應力 σ_y 에 대한 線圖로서 Fig.6의 경우와는 달리 切刃에서의 壓縮應力이 매우 크며 Zone I, II의 기울기를 생각할 때 그 變動幅이 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 剪斷應力 τ_{xy} 에 대한 結果線圖를 나타낸 것으로서 Fig. 7에서 σ_y 의 垂直應力の 경우와 같이 그 變化 傾向이 매우 비슷하게 나타

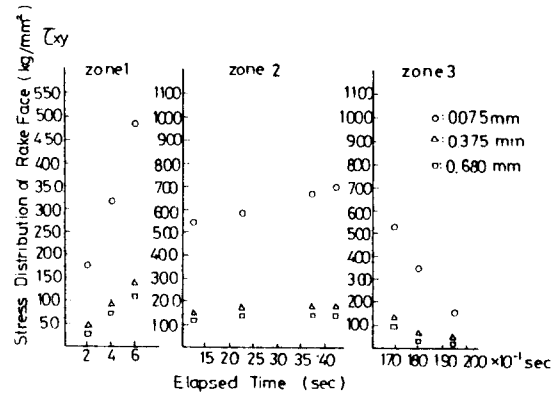


Fig. 8 Elapsed Time vs. Stress Distribution of Rake Face in Cut-off Tools

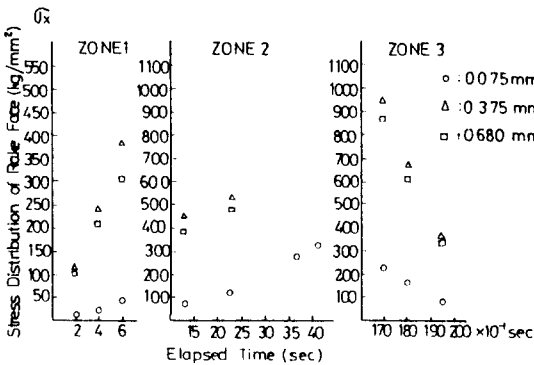


Fig.6 Elapsed Time vs. Stress Distribution of Rake Face in Cut-off Tools

남을 알 수 있다. 이 變動幅에 의해서 工具内部의 引張應力과 壓縮應力の 變化가 생기며, 이 要因 또한 工具損傷에 影響을 준다고 사료된다.

Fig. 9는 工具의 切削狀態가 正常일때의 切刃近傍의 最大 主應力線圖를 나타낸 것이다. 여기에서 보는 바와 같이 切刃으로부터 가장 먼 工具下傍에 약간의 壓縮應力만이 作用한다는 것을 알 수 있다.

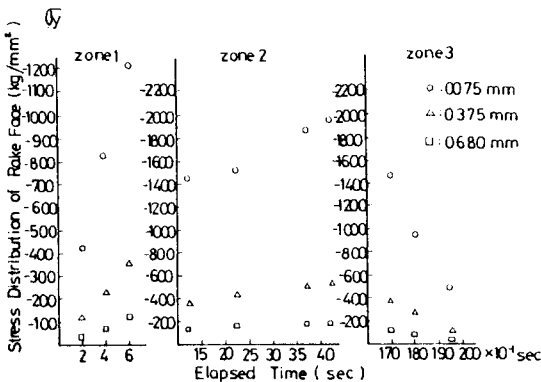


Fig.7 Elapsed Time vs. Stress Distribution of Rake Face in Cut-off Tools

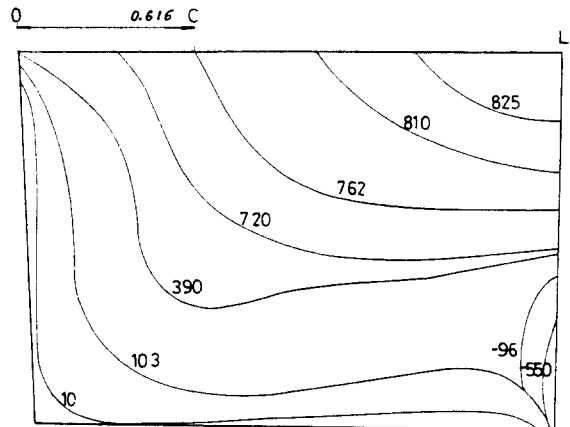


Fig. 9 Lines of maximum principal stress oc = chip-tool contact length (mm)

引張應力の 最大값은 工具와 칩의 接觸길이 보다 조금 떨어진 곳에서의 825 kg/mm^2 이고, 壓縮應力은 550 kg/mm^2 이다.

여기에서 工具 傾斜面上의 最大 主應力 값은 공구-칩 接觸길이의 약 3倍인 곳이고 이것은 J. Tlustý and Z. Masood⁶⁾의 論文에서 지적한 바와 같이 유사함을 볼 수 있다.

Fig. 10 은 切刃近傍에서의 最少 主應力 線圖를 나타낸 것인데 切刃近傍으로 갈 때 그 값은 커지고, 가장 가까운 곳에서 그 값은 620 kg/mm^2 가 된다.

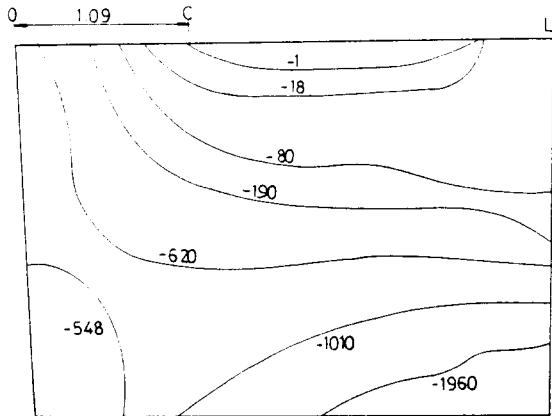


Fig. 10 Lines of minimum principal stress $oc = \text{chip-tool contact length (mm)}$

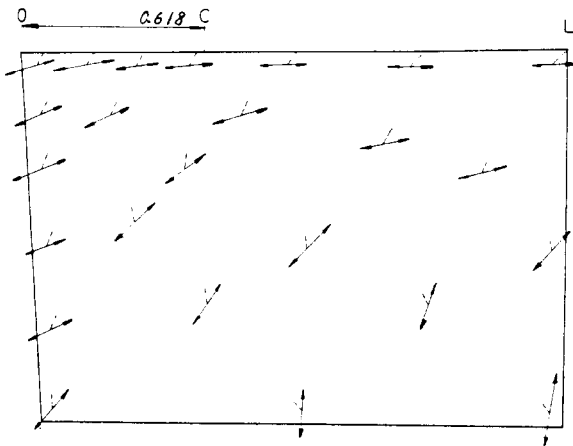


Fig. 11 Directions of maximum principal and shear stresses $oc = \text{chip-tool contact length (mm)}$

Fig. 11 은 切斷工具 칩의 最大 主應力과 最大 剪斷應力의 方向을 나타낸 것으로서 實線의 부분은 最大 主應力이고 점선의 부분은 最大 剪斷應力 方向이다.

여기에서 나타내지는 않았지만, 실제의 切入時와 切出時의 경우 Fig. 9~11의 等應力線 및 方向에 대하여 그 크기의 變化는 보였지만 方向 및 移送는 없었다.

5. 結 論

切斷工具와 같은 칩핑이 일어나기 쉬운 工具에 대해서 工具破壞의 基礎的 現象으로서 切刃內의 應力에 의한 破壞의 問題로서 力學的으로 그 發生을 豫測하기 위해 現實的인 境界條件下에서 工具刃先近傍의 應力分布에 대한 動剛性 解析을 한 結果 다음과 같은 結論을 얻을 수 있다.

1. 切斷工具의 動的 負荷狀態는 最初 0.6 秒 동안 그 變化가 심하고 正常狀態에 달할 때 緩慢하였다.
2. 칩핑은 應力의 크기 뿐만이 아니고 引張 및 壓縮應力의 급격한 變化에도 큰 影響을 받고 있다.
3. 動的負荷에 의한 主應力의 分布도와 合成 벡타의 方向은 負荷時間에 關係없이 거의 一定함을 알 수 있다.

[參 考 文 獻]

1. 井川直哉; 切削工具의 脆性損傷, 機械의 研究 第 30 卷, 第 2 號(1978) p. 279.
2. 奧島啓式, 星鐵太郎; 超硬正面 フライス에 かける 熱き裂, 日本機械學會 論文集, 第 28 卷, 第 193 號(1962) p. 1055.
3. 益田和昭; WC 系 超硬切刃의 壓壞強さ, 日本機械學會 論文集, 第 35 卷, 第 274 號(1969) p. 1338.
4. E. Usui and H. Takeyama; A Photoelastic Analysis of Machining Stress, Trans. ASME, Ser. B, Vol. 82, No. 4 (1960) p. 303.
5. 星光一, 齊藤勝政外 2 人; 有限要素法에 의한 工具刃先의 剛性解析, 精密機械, 第 39 卷第, 10 號(1973) pp. 1023-1029.
6. J. Tlustý and Z. Masood; Chipping and

- breakage of carbide Tools, Trans. ASME, Ser. B Vol. 100 (1978) p. 403.
7. A. J. Pekelharing ; The Exit Failure in Interrupted Cutting, CIRP, Ann. Vol. 27(1978) p.5.
 8. 柴坂敏郎, 橋本英文, 上田完汶, 巖田一明 ; 切削工具のぜい性損傷に關する破壊力學的 研究 (第2報), 精密機械, 第49卷, 第10號(1983) p.1435.
 9. 白井英治, 井原透, 白樫高洋, 金浪憲一 ; 斷續切削における 切れ刃缺損の 豫測に 關する 研究 (第7報), 第50卷, 第5號 (1984) p.866.
 10. W. S. Sanpath, Y. M. Lee, M. C. Shaw ; Tool Fracture Probability Under steady state Cutting Conditions, Trans. ASME, Vol. 106 No. 5 (1984) p. 161.
 11. A. K. Ghani and G. Barrow ; Tool Failure at Exit During Interrupted Cutting, CIRP, Ann. Vol. 34 No. 1 (1985) p. 71.
 12. N. N. Zorev ; Interrelationship between shear Processes Occurring along Tool Face and Shear plane in Metal Cutting Intermat. Res in Production Engineering, Arr. Soc. of Mech. Engers. New York (1963) p. 1912.