磨量とよく一致する。
等である。

VII. 結 言

以上の結果から次の様に結論する。

1. 電解研磨に於ける品物各部の研磨比及び形状の変化は、等電位面を書くことにより推察することが出来る。
2. 歯車のチップリリーフ、及びクラウニング工作は電解研磨によつて容易に行なわれる。
3. 電解槽効果を充分考慮して歯車又は軸を電解研磨しないと槽円又は偏心状に研磨されてしまう。
4. 寸法調整は可成りの程度に出来る。余り大きくす

ると歯形曲線が変化するのでせいぜい0.05mm 位迄であり、0.1mm 迄は望めない。 $D \cdot t$ の値を実用上必要な範囲に定めておけばその内では寸法調整が出来る。

5. ホルダーは支持部を除き、槽内の部分を出来るだけ品物から離しておけば余り影響がない。

6. 陽極面積効果について従来一般的に知られていることは歯車の場合にも当て嵌る。

終りにこの研究に対し種々御指導を賜つた東京大学倉藤尚雄先生、山梨大学工学部機械工学科諸先生、及び試験片其他の点で援助して下さいた中央精機株式会社社長大西宗関氏に厚く御礼申上げる。

(1955, 1月11日受付)

高温切削の基礎的研究* (その1)

正会員 中 山 一 雄**

Fundamental Study on Hot Machining

Kazuo NAKAYAMA

In this report, the effects of workpiece temperature on the cutting force, shear angle, tool-chip friction, shearing stress on the shear plane, shape of chips, surface roughness, etc. were investigated. The experiments were performed by orthogonal cutting of steels heated by a small electric furnace on the lathe. The main results were as follows:

1. The decrease of the cutting force by heating the workpiece is due not merely to the decrease of yield shearing stress but also to the increase of the shear angle.
2. In cutting the non-heat-resisting metals as carbon steels at a very low speed, cutting forces begin to increase by heating over 500°C.
3. Continuity of the chips is closely related with brittleness of the work materials at the cutting temperature.
4. Even by using the tool with -10° rake angle at the very low cutting speed of 1.77m/min, a very smooth surface (about 1μ roughness) was obtained at the higher temperatures than about 600°C. This is due to disappearance of built-up edge at that high temperatures.
5. The heating temperature needed to get rid of built-up edge can be lowered by increasing cutting speeds. This is due to the temperature rise by the cutting heat.
6. The size effect on cutting forces decreases by increasing the workpiece temperature.

1. 緒 言

被削材を加熱軟化して削り易い状態で切削するいわゆる高温切削は、耐熱性のすぐれた超硬合金工具の出現によつて実現が可能になったもので、1940年頃クルツ社に於て実用化されたのが最初とされている。その目的と

するところは、比較的削りにくい材料をこれによつて能率よく削つたり、常温では非常に硬くて脆い為に殆ど正常な切削が不可能なような材料を切削可能にする点にあり、最近の高温タービン類の発達にともない、それらに使用する耐熱合金の加工の為に急速に注目されるようになり、各国で盛んに研究されている。

一方、普通の切削に於ても切削動力の大部分は刃先附近で熱に変わり、それが工具や被削材の温度上昇をもたら

* 昭和28年4月及び同29年4月精機学会講演会にて発表

** 横浜国立大学工学部

し、切削機構や工具寿命に重大な影響を及ぼすことは明らかで、従来比較的遅れていたこの切削熱に関する研究もこの数年来急に発展し始めた。

本研究は加熱した被削材をなるべく単純な条件下で切削して、切削機構に及ぼす熱の影響を調べ、高温切削の基礎的資料とすると同時に、普通の切削における切削熱の影響を知る為の手がかりにしようとするものである。

2. 実験方法

実験は結果の解析の便宜上二次元切削で行った。即ち6尺旋盤(富士製作所製, 5HP 電動機直結)にくわえた円筒形被削材を平バイトを用いて端面削りして、その時の切削抵抗の主分力 F_c 及び背分力 F_t を前に報告した¹⁾円筒の撓みを利用した二成分切削工具動力計を用いて測定した。(但し低速切削実験の一部は自動記録を行わずに、測定片の偏位をダイヤルゲージで直接読取った。)写真。切削液は全然使用しない。

被削材には物理的機械的諸性質のよく知られたものとして主として中炭素鋼(抗張力 65kg/mm²)を、一部には比較的耐熱性のあるものとしてクロムモリブデン鋼を何れも完全焼鈍して用いた。その成分の分析結果は表1に示す。その形状は外径48mm, 肉厚2.0mmの円筒とした。

表1 被削材の成分

種 類	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
中炭素鋼 (SAE1040)	0.40	0.94	0.26	0.033	0.034	—	—
クロムモリブデン 鋼 (SAE 4140)	0.39	0.76	0.31	0.037	0.017	1.13	0.17

バイトはタンガロイ S-1 のチップを鍍付した平バイトを用い、前すくい角を -10° , 0° , 10° , 20° , 30° の5種類、前逃げ角は何れも 5° とした。その仕上はGC 120H砥石で研磨した後 $\phi 220$ ダイヤモンドハンドストーンで手仕上した。

被削材の加熱には電弧や火焰を用いる局所的加熱法は避けて、写真に示すように旋盤の横送り台上に固定した小型電気炉で被削材を囲み、充分時間をかけて内部迄一定温度になるように加熱し、加熱を続け乍ら端面にあげた小窓からバイトを入れて切削を行なった。加熱温度は、 $0.14\text{mm}\phi$ のコンスタンタン線と $0.12\text{mm}\phi$ のニクロム線とを熔接して作った小さい熱電対を、切削の直前直後に切削面に押付けて測定し、その2回の測定値の差が小さいことを確認し、その平均値を以て被削材温度とした。熱電対は細いので之を押付けた為の測定部分の温度低下は殆ど無視できる。

剪断角 ϕ の測定は $20\sim 40\text{mm}$ の長さに切取った切屑の長さ^{註1)}と重量とを測定し、之等と比重及び切屑の幅(一般には切削幅と等しい)とから切削の厚さ t_2 を算出し、次式から計算して求めた。

$$\tan \phi = \frac{(t_1/t_2) \cos \alpha}{1 - (t_1/t_2) \sin \alpha}$$

但し α はバイトのすくい角、 t_1 は切込即ち1回転当りの送り。この方法による測定誤差は精々数%であるが、切削現象が変動する剪断型に近い切屑の場合には剪断角自体のバラツキが10%以上にも達するので、同一条件で削った切屑からとった3~5個の試料について測定し、その平均値をとった。

すくい面における工具と切屑の摩擦係数 μ は主分力 F_c 、背分力 F_t 及びすくい角 α から一般に用いられている式

$$\mu = \frac{F_t + F_c \tan \alpha}{F_c - F_t \tan \alpha}$$

を用いて算出し、被削材の剪断面における剪断応力 τ_s は切削幅を b として

$$\tau_s = \frac{(F_c \cos \phi - F_t \sin \phi) \sin \phi}{t_1 b}$$

なる式から計算した。

3. 切削抵抗

A. 炭素鋼の低速切削

切削熱の影響をなるべく少くする為に 1.77m/min という低速で^{註2)}送りを 0.1mm/rev. として中炭素鋼を切削した場合の切削抵抗の二分力と被削材温度との関係を各すくい角に対して求めた結果は図1の如くであった。但し非常に低速切削である為に比較的低温ですくい角の小

註1) 切屑が小さく捲いている場合には、重量測定後に焼鈍して伸ばして長さを測る。

註2) このような低速で削つても切削熱による温度上昇は避けられず、計算^{註3)}によれば剪断面温度は大体 $70\sim 120^\circ\text{C}$ 位上昇する。

・さいバイトを用いた場合には後記する如く剪断型切屑を生じ、切削抵抗も著しく変動するので、その時は最大値と最小値を読んで平均をとった。この結果から次の事が分る。

1. 何れのすくい角についても、500°C 附近迄は温度上昇と共に切削抵抗は減少する。
2. その減少の割合はすくい角の小さい工具程著しく、 -10° では常温の約50%に迄低下するが、 30° では変化はきわめて少ない。

図1 被削材の温度による切削抵抗の変化
被削材: 0.4%炭素鋼
切削速度: 1.77m/min
切込: 0.1mm
切削巾: 2mm

3. 500°C 以上になると切削抵抗は再び増大し始め、その増大の割合もすくい角の小さい場合程著しい。

この場合の剪断面に於ける剪断応力 τ_s 、すくい面上の摩擦係数 μ 及び剪断角 ϕ を求めた結果をすくい角 10° 註3) の場合について求めた結果は図2の如くである。即ち剪断応力は温度の上昇によつて單調に減少する。摩

図2 被削材の温度による剪断面の剪断応力摩擦係数及び剪断角の変化(炭素鋼の低速切削—図1と同じ)

擦係数は500°C 位迄は明瞭な変化は認められず略々一定と見做されるが、500°C 以上では増大する。剪断角は500°C 位迄は温度と共に増大するがそれ以上では急に減少する。

之等の事から、まず500°C 位迄の切削抵抗の減少について考察するに、剪断応力の減少が切削抵抗の減少の第1の原因である事は明らかで之は既に M. E. Merchant 等²⁾ も指摘した事であり、常識からも容易に想像される事である。然しこの他に、温度上昇に伴つて剪断角が増大するという事実も、切屑の剪断歪の減少によつて切削抵抗の減少に役立っている事が分る。一方、摩擦係数には500°C 迄は変化が認められないから、切削抵抗の減少には摩擦係数は関係しないと云うことができよう。註4) この摩擦係数の物理的意義に関しては問題があるが、少く共 K. J. Trigger 等が切削温度と切削現象の関係を論じた際に⁴⁾、切削温度が上昇すると摩擦係数が減少するとしている点は、純粹に温度の影響だけを調べた本実験の結果と矛盾する。

次に500°C 以上に加熱すると再び切削抵抗が増大する事については、被削材の軟化即ち剪断降伏応力の減少に拘らず、剪断角が減少し、摩擦係数も増大する事から説明がつく。何故剪断角が減少し摩擦係数が増大するかは理論的に興味のある問題であるが、その解明は今後の研究にまたねばならない。一方、このような場合の切削面を見ると、被削材は軟化した為に押しつぶされて、すくい角 -10° の場合には2mmの肉厚が3mmにもなることがある。この事実は、切屑の生成以外に被削材のかゝる変形にも多くの動力が費され、且つ切削幅も増大している事を示し、之も切削抵抗増大の一原因と考えられる。

次にこの実験結果からバイトのすくい面に加わる垂直力及び摩擦力をすくい角 10° の場合について計算した結果は図3に示す如くで、切削抵抗の場合と同様に500°C 位迄は温度上昇によつて両者共低下する。この事は被削材の温度が上昇すればすくい面上での摩擦仕事量が減少し註5)、その点では工具の磨耗が減少する事を意味する。又、摩擦仕事量の減少は切屑と工具との摩擦による発熱

註3) 之等は何れのすくい角についても同様な傾向を示し、すくい角の小さい場合の方が傾向が顕著であるが、すくい角が小さいと剪断型切屑を生ずる領域が増して剪断角が不正確になるので、こゝには 10° の場合を例示した。

註4) 前記 Merchant 等の実験では、Timken 16—25—6 合金では摩擦係数は略々一定であるが、AISI 3145 鋼では温度上昇によつて低下している。

の減少をも意味し前記の剪断降伏応力の減少及び剪断角の増大による剪断面での発熱の減少^{註6)}と相俟つて切削によって発生する所謂切削熱が減少することを示す。

図3 被削材の温度によるすくい面に加わる力の変化(炭素鋼の低速切削—図1の $\alpha = 10^\circ$ の場合)

B. クロモリブデン鋼の低速切削

炭素鋼より耐熱性のあるクロモリブデン鋼を前と同様の条件ですくい角 10° のバイトで切削した場合の切削抵抗の二成分は図

図4 被削材の温度による切削抵抗の変化
被削材: Cr-Mo 鋼
切削速度: 1.77m/min
すくい角: 10°
切込: 0.1mm
切削巾: 2mm

4の如くであった。之を見ると

1. 二分力共に温度上昇に伴つて 600°C 以上迄単調に減少し、炭素鋼の場合のように高温で再び増大することはない。

2. 温度上昇に伴う切削抵抗の減少率は炭素鋼に比べて少い。即ち主

分力は常温では炭素鋼と余り変わらないが高温ではかなり高い値を示す。背分力は全般的に炭素鋼より高い。之は

註5) 温度が上昇すると剪断角が増大するから切削の摩擦速度が増大し、その点では摩擦仕事量が増すが、その影響は摩擦力のそれに較べて小さく、すくなくとも、本実験の範囲内では温度が上昇すると摩擦仕事量が減少する。

註6) 剪断面に於ける単位切削体積当りの発熱量は、切削速度を V 、切削面積を A_0 、他は前の記号を用いると

$$\begin{aligned} & \frac{(\text{剪断力}) \times (\text{剪断速度})}{J \times (\text{切削面積}) \times (\text{切削速度})} \\ &= \frac{(\tau_s A_0 / \sin \phi) \times \{V \cos \alpha / \cos(\phi - \alpha)\}}{J \times A_0 \times V} \\ &= \frac{\tau_s \cos \alpha}{J \sin \phi \cos(\phi - \alpha)} = \frac{2 \tau_s \cos \alpha}{\sin(2\phi - \alpha) + \sin \alpha} \end{aligned}$$

($2\phi - \alpha$)は一般に 90° より小さい正の値をとる。従つて τ_s の減少及び ϕ の増加によつて剪断面での発熱量は減少する。

クロモリブデン鋼の高い耐熱性によるものと考えられる。

図5 被削材の温度による剪断面の剪断応力、摩擦係数及び剪断角の変化(Cr-Mo 鋼低速切削—図4と同じ)

この場合の剪断面における剪断応力、すくい面上の摩擦係数及び剪断角を求めた結果は図5に示す。

之を先の炭素鋼に較べると、剪断応力には明確な差は認められないが摩擦係数は傾向は変らないがより高い値を示している。剪断角は剪断型切屑を生ずる低温の二点を除けば温度と共に増大し高温でも低下することなく、又全般に炭素鋼より低い値を示す。

従つて温度上昇に伴つて切削抵抗が減少するのは前と同様に剪断応力と剪断角から説明できる。又、上記のような炭素鋼との切削力の差は主として摩擦係数と剪断角によるものと考えられる。

500°C 以上になつても切削抵抗が増大しないのは、その温度になつても炭素鋼のように剪断角が減少しない事から説明がつくが、高温でも被削材が押しつぶされて切削幅が増大することがないのも一原因と考えられる。何れにしても 500°C 以上における切削抵抗の増大はクロモリブデン鋼のような耐熱性の大きい材料では起らないと云えよう。

C. 炭素鋼の中速切削

前記の中炭素鋼を普通の切削速度(31.5, 51.6及び69.0m/min)ですくい角 0° のバイトを用いて前と同様の方法で切削した場合の被削材の温度と切削抵抗との関係は図6に示す如くであつた。

即ち切削抵抗は 600°C 以上迄単調に減少し、低速切削の場合のように高温で再び増大することはない。この場合にもクロモリブデン鋼の時と同様に、高温で剪断角が減少することもなく、又被削材が押しつぶされて切削幅が増大することもない。結局、 500°C 以上で切削

図 6 被削材の温度による切削抵抗の変化

被削材：0.4% 炭素鋼

すくい角：0° 切込：1 mm

切削巾：2 mm

前の低速切削に較べて低い切削抵抗を示すが、300°C 以上では消滅して低速の場合と略々一致する。この高温に於ける構成刃先の消滅は高温切削の一大特長と見做されるが、従来構成刃先はある速度範囲 (10~100m/min) で発生するとされていたのに対し、本実験の結果は構成刃

抵抗が増大するのは炭素鋼の如き耐熱性のない被削材をきわめて低速で削る場合にのみ起る現象で、普通の切削条件では殆んど問題にならない。

尚、この場合 300°C 位迄は構成刃先を生ずる為に

先の生成消滅を直接支配するのはむしろ刃先温度であつて、切削速度は刃先温度を支配する一要素にすぎない事を示唆する。(続) (1955, 3月8日受付)

参考文献

- 1) 中山一雄：試作した2成分工具動力計に就いて。精密機械，Vol.21，No. 2
- 2) 簡単のため，下記文献の方法によつた。
K.J.Trigger & B.T.Chao：An Analytical Evaluation of Metal-Cutting Temperatures. Trans. ASME, Jan. 1951.
- 3) E.J.Krabacher & M.E.Merchant：Basic Factors in Hot-Machining of Metals. Trans. ASME, Aug. 1951.
- 4) B.T.Chao & K.J. Trigger：Cutting Temperatures and Metal-Cutting Phenomena. Trans. ASME, Aug. 1951.

時計ひげぜんまいの非直線性について (第1報)

正会員 大島 康次郎*

On the Non-linearity of Watch Hairsprings (Part I)

Yasujiro OSHIMA

Strictly speaking, the torque of hairsprings is not linearly proportional to the angle of rotation of the balance wheel.

This arises from the fact that turning over the hairspring, the small reaction force results at the outer fixed point besides the moment. In consequence of this non-linearity, the period of vibrations depends upon the amplitude of the balance wheel.

The author could measure this effect by using the optical experimental method which makes possible the extremely large magnification of time.

In this report, the results of preliminary experiments and a part of main experiments are described.

These are as follows:

- i) The frictional resistance of the balance-staff does not affect the measurement of the non-linearity of hairsprings.
- ii) A little difference of the form of the outer terminal curve, which is deformed from Archimedes spiral in order to fix by the stud and curb-pins, does hardly affect the non-linearity.
- iii) The effect of the strain, which is given to the hairspring in the radial direction at the curb-pins, is proportional to its amount.
- iv) The effect of the direction of hairspring eccentricity, which is measured from the center of rotation to the geometrical center of spiral, is remarkable.

This effect was measured in 4 cases of the spiral angle, that is, 8 coils plus 270, 180, 90, 0 degrees from the pinning point to the curb-pins.