

加工表層部の転動疲労寿命におよぼす加熱切削の影響

谷口 正紀*

Effect of Hot Machining on Rolling Fatigue Life of Machined Surface

Masaki TANIGUCHI

Abstract

In the wake of the rapid development of the hot machining in recent years, the electric resistance heating, among other methods, has been proved to be very useful in improving the machinability, not only in turning, but in drilling and milling as well.

On the other hand, the development of ceramic tools which excell in heat resistance, in concert with the development of machine tools, has brought about the higher and higher cutting speed, and there have been experiments performed at such a high speed as 2000m/min.

In the present study, the hot machining of S35C, S45C and S55C carbon steel was conducted by the use of a carbide tool under local electric resistance heating, and my report is mainly on rolling fatigue life and work hardening.

1. 緒 言

切削加工の最終目標は、要求される形状、寸法および表面性状の製品を経済的かつ確実に得ることである。仕上面の性状については粗さなどの幾何学的品位と加工変質層やクラックなどの材質的品位が問題となる。しかし、工業材料の進歩にともない、高張力・高耐熱性を有する材料が増加し、通常の切削法では切削そのものが困難な場合も多い。なお最近では炭素繊維強化プラスチック(CFRP)¹⁾およびガラス繊維強化プラスチック(GFRP)²⁾などの新材料についても種々の検討が行われている。これらの被削性を改善するために開発された高温切削法については各方面での研究^{3)~6)}が行われ、切削抵抗の減少や工具寿命が延長し仕上面粗さが改善されることなど、その効果が明らかにされているが、加工表層部の材質的品位におよぼす影響については明らかにされていない。

そこで、本研究では3種類の鋼材に焼入れ、焼もどしを行ったものについて加熱切削を行い、加工表層部におよぼす加熱切削の影響を調べる一手段として転がり摩耗試験を行い、転動疲労寿命におよぼす加熱切削の影響を調べ、さらに転がり摩耗試験前後の試料表層部の硬さを測定して種々検討を行った。

2. 実験装置および実験方法

2.1 工作機械、工具、被削材および加熱方法

使用工作機械は三菱製 HL300G 型高速旋盤である。切削工具は刃先形状 -5° , -7° , 5° , 7° , 15° , 15° , 0.8mm のクランプ型バイトで、チップ材種は超合金M10である。被削材は構造用炭素鋼 S35C, S45C, および S55C の3種で、残留応力の除去および組織の標準化を目的として4時間で 850°C に昇温し、その温度に2時間保持したのち炉中冷却した。その化学成分および焼鈍硬さを Table 1 に示す。被削材寸法は外径 30.8mm 、内径 16mm 、幅 8mm で後述する転がり摩耗試験片としては両側に 2mm の面取りを行い幅を 4mm とした。

Table.1 Chemical composition and hardness of workmaterials %

work material	C	Si	Mn	p	S	Hv
S35C	0.34	0.29	0.60	0.002	0.012	175
S45C	0.46	0.29	0.65	0.003	0.0013	200
S55C	0.54	0.27	0.53	0.020	0.005	210

*工業短期大学部機械工学科

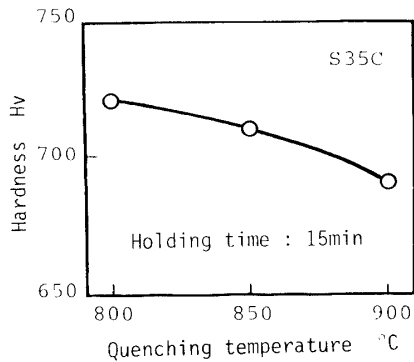


Fig. 1 Relationship between quenching temperature and hardness

さらに、これらの試験片に対して水焼入れを行った。Fig. 1 は一例として S35C の場合の焼入れ温度と硬さとの関係を示したもので、硬さは焼入れ温度によって多少異なり、しかも材種によってもその傾向が異なるが、3種の材料に共通してほぼ最高硬さを示す800°Cを焼入れ温度とした。続いて、ソルトバス中で各温度に2時間保持した後空冷して焼もどしを行った。その焼もどし温度と硬さを Table. 2 に示す。

Table. 2 Tempering temperature and hardness

work material	tempering A		tempering B	
	temperature	hardness	temperature	hardness
S35C	400°C	410	500°C	340
S45C	300°C	385	450°C	305
S55C	415°C	410	550°C	340

本実験に使用した加熱法は、局部電気抵抗加熱法⁴⁾で電極としては工作物のチャック側に編組銅線を巻きつけ、他方の電極は工具側の工作物表面に直径3.2mmのタングステン棒を接触させ、切削に先行して被削材表層部を通電加熱した。

2.2 切削条件

切削条件は、とくに断わらない限り、切込み0.4 mm、送り0.045mm/rev、切削速度112mm/minで、加熱電流は0, 250, 350, 450Aである。

2.3 転動疲労寿命および硬さの測定

上記の条件で加熱切削した後、西原式金属摩耗試験機を用いて転がり摩耗試験を行った。その条件としては、回転数800rpm、相対すべり速度9%、摩擦速度1.26 m/secで、潤滑油には軽油を用い、上部試験片の上からポンプ循環式で給油した。その給油量は40ml/min

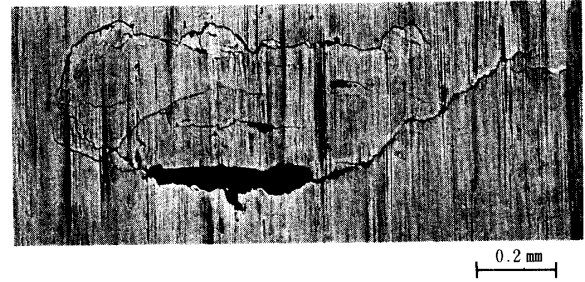


Fig. 2 Photograph of cracks on the surface of workmaterial

Workmaterial: S35C, Depth of cut: 0.4mm Feed rate: 0.045mm/rev, Cutting speed: 112m/min

である。接触応力はヘルツの弾性接触論によりポアソン数10/3、試験片のヤング率を21,000kgf/mm²として求めた。なお、Fig. 2 に示すような表面クラックを生じた時または0.1mm以上のピットを生じた時の接触繰返し数をもって疲労寿命とし、試験を中止した。さらに、加熱切削後一部および転動疲労試験終了後の試験片を軸に直角に切断し、微小硬度計を用いて試料表層部の硬さを測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 仕上面粗さと転動疲労寿命との関係

加熱切削後の仕上面粗さは加熱電流の増加にともなって減少の傾向を示すが、切りくずが巻きついたり、電極の接触状態が悪くスパークを発生するような場合にはむしろ仕上面が悪化する。本研究は加工表層部の材質的品位についての検討を主目的とするもので幾何学的形状の影響を最小限にとどめることが望ましい。

仕上面粗さの大小が転動疲労寿命におよぼす影響については、高荷重では表面層が塑性変形するので粗さの影響が少ないが、低荷重では粗さが原因となる衝撃荷重を生じ、有効荷重が増加するので仕上面粗さが大きくなるほど疲労寿命が低下するものと考えられる⁷⁾。

したがって、本被削材に対しても転動疲労寿命におよぼす仕上面粗さの影響度をあらかじめ検討すべきである。Fig. 3 は仕上面粗さの異なる切削面と研削面とを比較したもので、仕上面粗さが2~6 μmの範囲内では転動疲労寿命におよぼす影響が極めて少ないように思われる。上記のスパーク発生時には仕上面粗さが10 μm程度にもなるが、本実験では6 μm以上のものを除外しているため、以下の実験結果には仕上面粗さの影響は極めて少なく、ほとんど仕上面の材質的品位が転動疲労寿命に大きく影響しているものと考えられる。

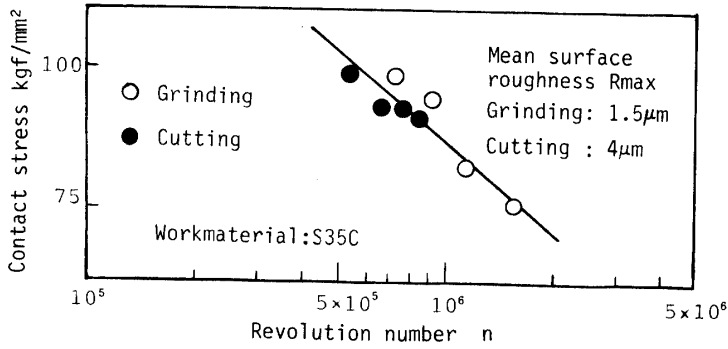


Fig. 3 Effect of surface roughness on the rolling fatigue life
(a) Hardness Hv340

Grinding condition: depth of cut: $2.5\mu\text{m}$
grinding speed: 1900m/min
work surface speed: 15m/min
feed rate: 500mm/min
grinding wheel: WA-60-M

Cutting condition: electric current: 0A
depth of cut: 0.4mm
feed rate: 0.045mm/rev
cutting speed: 112m/min
tool material: cemented carbide M10

3.2 加熱電流と転動疲労寿命との関係

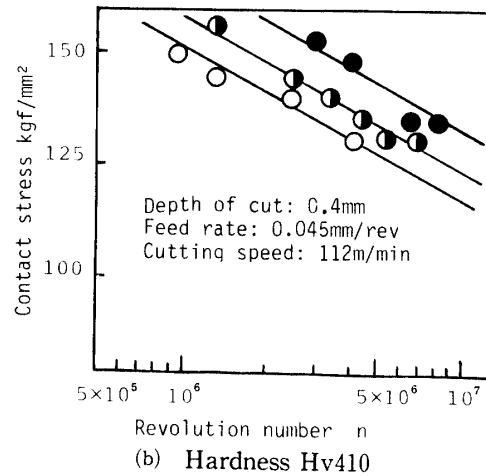
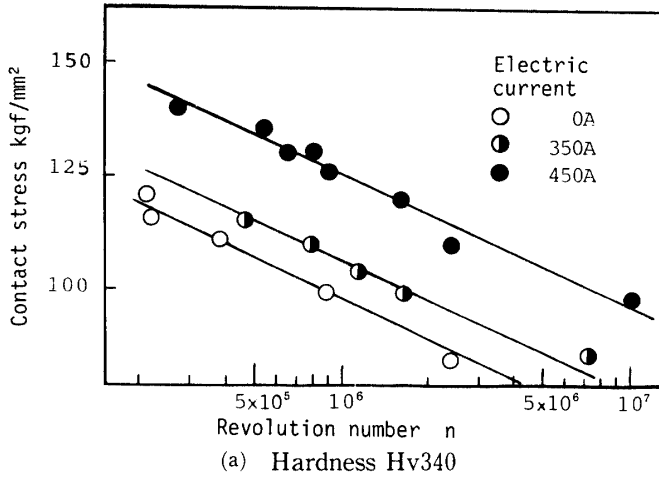


Fig. 4 Relationship between the heating electric current and the rolling fatigue life of S35C
(a) Hardness Hv340
(b) Hardness Hv410

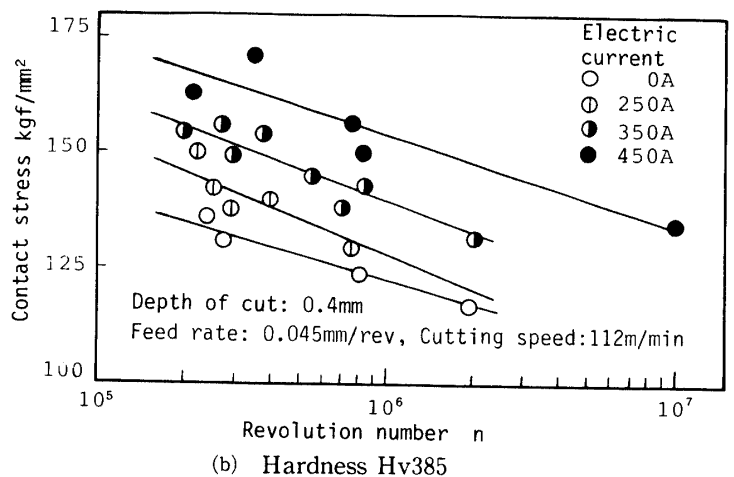
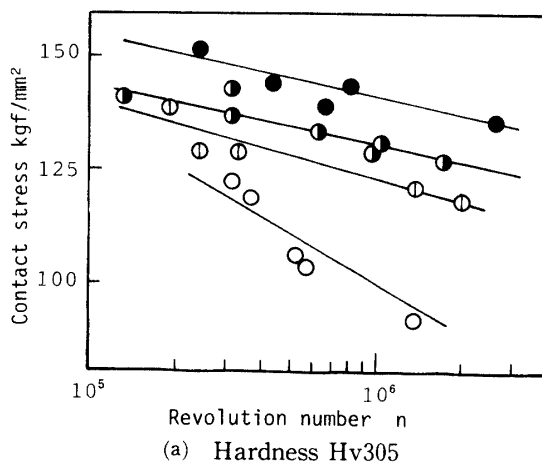


Fig. 5 Relationship between the heating electric current and rolling fatigue life of S45C
(a) Hardness Hv305
(b) Hardness Hv385

Fig. 4~6はそれぞれ S35C, S45C および S55C に対して加熱切削を行い、転がり摩耗試験を行った場合の加熱電流と転動疲労寿命との関係を示したものである。Fig. 4は S35C 材の硬さ Hv340 (a) および Hv410 (b) の場合の転がり摩耗試験結果で、いずれの切削の場合も S-N 曲線の傾斜は等しくなっている。転動疲労寿命に対する加熱電流の影響については (a), (b) いずれの場合も加熱電流が大きいほど疲労寿命が増大し、常温切削と比較した場合の増加率は素材硬さが低い Hv340 (a) の方が大きく、硬さが大きい Hv410 (b) の方が小さい。また、素材硬さの影響については素材硬さが高い Hv410 (b) の方が低い Hv340 の場合より全体として転動疲労耐久限度が上昇している。

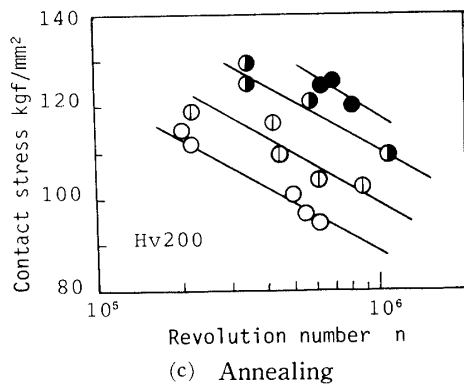
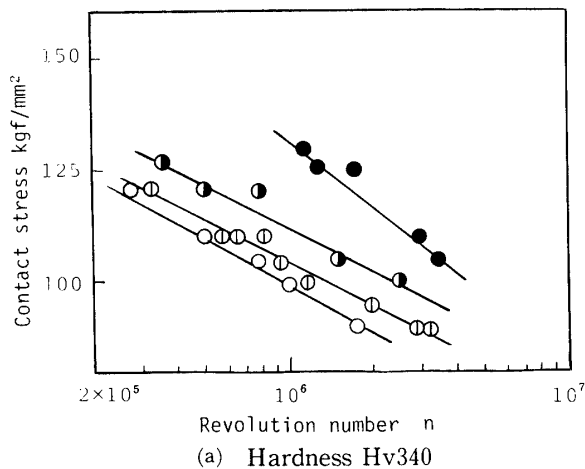


Fig. 5はS45C材の硬さ Hv305(a), Hv385(b)および焼なまし材(c)の場合で、いずれも加熱電流が増加するほど転動疲労寿命が増大し、その増加率は Hv305(a)の場合の方が他の2者(b), (c)に比較してやや大きい。S35Cの場合に比べるとその差は少なくわずかである。素材硬さの影響についても、硬質の Hv385(b)の方が軟質の他の2者の場合より全体として転動疲労耐久限度が上昇しているが、S35Cの場合に比較すると(a), (b)間の差が比較的少ない。

Fig. 6はS55C材の硬さ Hv340(a)および Hv410(b)



の場合で、Fig. 4のS35Cの場合とほぼ同様の傾向を示している。すなわち、(a), (b)いずれも加熱電流が増加するにつれて転動疲労寿命が増大している。

以上の結果から、加工表層部の機械的性質(本実験の場合転動疲労寿命)におよぼす加熱切削の影響について、被削材の化学成分や熱処理法が異なったいずれの素材においても転動疲労寿命は加熱電流の上昇にともなって増加し、その加熱効果は同一化学成分の被削材内においては熱処理後の硬さが低いほど大きいことが判明した。また、被削材の硬さをほぼ一定になるような熱処理を行った場合、被削材の化学成分が異なっても、転動疲労寿命に対する加熱切削の効果にはほとんど差がないように思われる。

3.3 加熱切削後の加工面表層部の硬さ

前述のように加熱切削後の仕上面は転動疲労に対する耐久限度が増大するが、その加熱効果について検討するため、切削後の加工面表層部の硬さの測定を行った。なお、切削後の加工面表層部の硬さを測定する場合、試料を軸と直角に切断するので、その試験片を転がり摩耗試験に供することはできない。したがって、切削後の硬さの測定は一部の素材について行った。

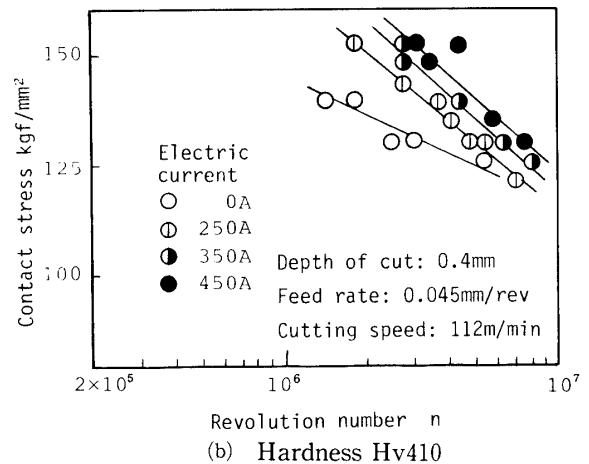


Fig. 6 Relationship between the heating electric current and the rolling fatigue life of S55C

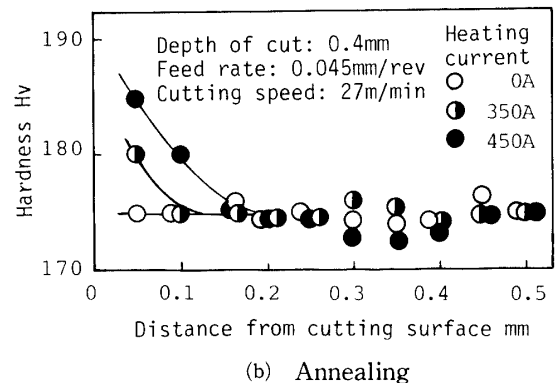
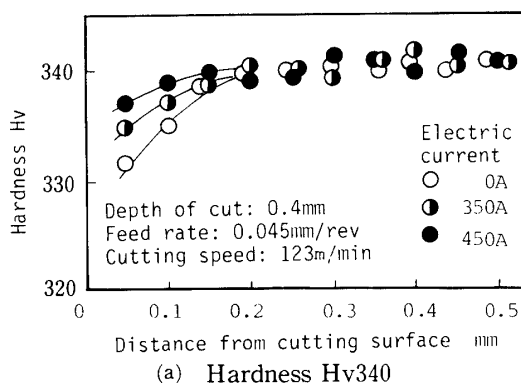


Fig. 7 Vickers hardness distribution of hot machining surface of S35C

Fig. 7はS35Cにおける加熱切削後の加工面表層部の硬さを示したもので、同図(a)の基地硬さ Hv340 に焼入れ焼戻しを施した素材を加熱切削した場合の硬さは表面から0.15~0.2mm程度まで硬さが低下しているが、加熱電流が大きくなるほどその硬さ低下が少ない。これは一般に切削時の刃先はかなりの温度上昇を示し、被削材自身も加熱されて軟化するが、加熱電流が大きいほど刃先温度が高く、空冷により再焼入れが行われるために、加熱電流が大きくなるほど硬さ低下が少ないものとする。

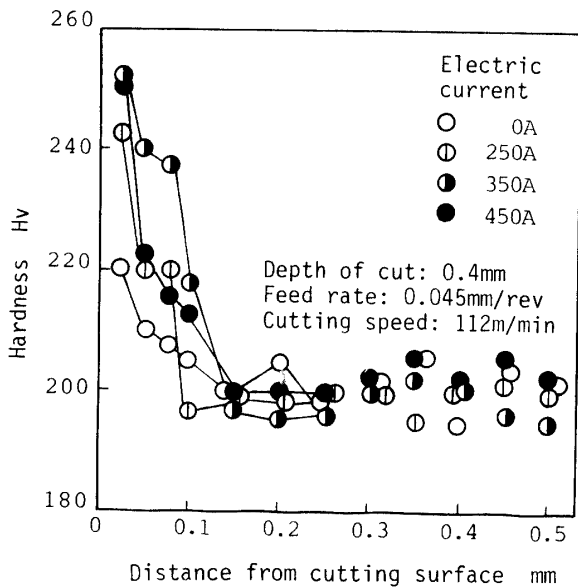


Fig. 8 Vickers hardness distribution of hot machining surface of S45C (Annealing)

同図(b)は焼なまし材を加熱切削した場合、上記の(a)の場合とは逆に表面から0.15mm附近まで硬化し、切削時の加熱電流が大きいほど硬化の程度が大きい。また、Fig. 8はS45Cの焼なまし材を加熱切削した場合の加工表層部の硬さを示したもので、測定値に多少のばらつきはみられるがFig. 7(b)のS35C焼なまし材の場合とほぼ同様の傾向を示している。すなわち、切削後の仕上面は基地硬さより0.15mm程度まで硬化し、常温切削の場合より加熱切削の方が硬化度が大きいように思われる。これは、一種の熱処理効果によるもので、加熱電流が大きくなるほど刃先温度が上昇し、空冷による急冷硬化が大きく、したがって硬さが大きいものとする。

これらの結果の前節における転動疲労試験結果とを対比して考えた場合、切削時の加熱電流が大きくなるほど転動疲労寿命が増大するのは、切削後の加工面硬さが加工電流が大きくなるほど上昇することと関係が深いように思われる。

3.4 転動疲労後の表層硬さと転がり耐久限度および疲労寿命との関係

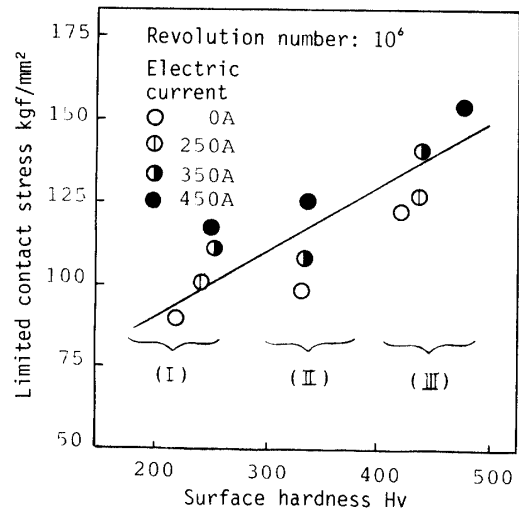


Fig. 9 Relationship between maximum hardness on the machining surface and the rolling endurance limit

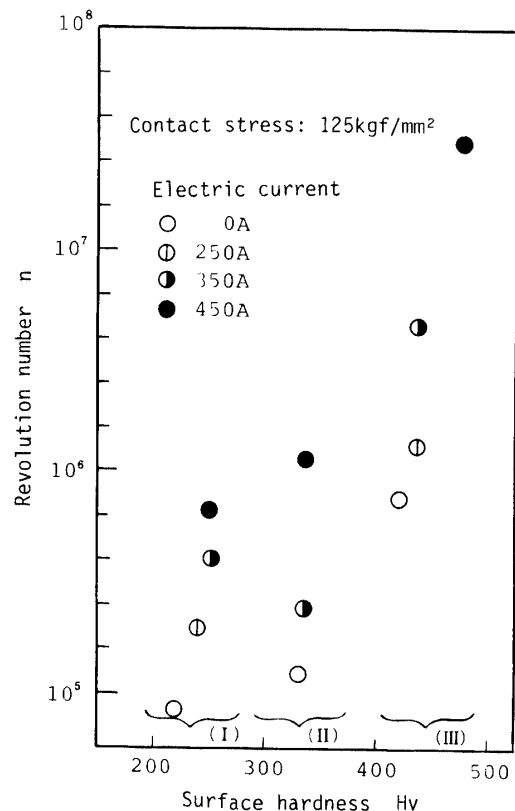


Fig. 10 Maximum hardness on the cutting surface and the fatigue life

Fig. 9 は回転数が10°回の場合の各加熱電流における加工表層部の最高硬さと転がり耐久限度との関係を示す。図中の(I)は S45C 焼なまし材 Hv200, (II)は, S35C 焼入れ材 Hv340, (III)は S45C 焼入れ材 Hv385 の場合である。(I), (II)および(III)のそれぞれの場合において加熱電流の増加と共に転がり耐久限度は増大している。なお(I)および(III)の場合においては加熱電流の増大と共に表層硬さが増加している。これは加熱により最も疲労破損が起りやすい表層の強度が改善されるためであることが推測される。

次に Fig. 10 は接触応力を125kgf/mm²としたとき、加工表層部の最高硬さと疲労寿命との関係を示す。なお(I), (II)および(III)の条件は Fig. 9 の場合と同じである。(I)の場合においては加熱電流の増加と共に、その寿命は増大しており、この傾向は(II)の場合においても同様である。特に(III)の場合においては(I), (II)と比べて飛躍的に増大している。

4. 結 言

焼なまし材、焼入れ材に加熱切削を行い、加工表層部におよぼす加熱切削の影響を調べるため転がり耐久試験と表層部の硬さを推定し、転がり耐久限度と表層部の最高硬さとの関連について検討し次の諸点を明らかにした。

(1)加熱切削後の加工表層部の硬さは熱処理方法で傾

向が異なる場合があるが表面から0.15mm 附近まで加熱の影響を受けている。

(2)加工表層部の最高硬さの位置は相対すべり速度が9%であることもあって表面から0.05~0.1mm の間にある。

(3)疲労寿命は加熱電流の上昇にともなって増大している。

(4)素材硬さの影響については硬質の方が軟質より全体として転動疲労耐久限度が上昇している。

参 考 文 献

- 1) 佐久間敬三, 瀬戸雅文, 谷口正紀, 横尾嘉道: 日本機械学会論文集 **51**, 463 (1985) 656
- 2) 長谷川嘉雄, 花崎伸作, 錦美誠: 精密機械 **50**, 11(1984) 1747
- 3) 大越諄, 上原邦雄: 精密機械 **26**, 7 (1960) 389
- 4) 一宮亮一: 精密機械 **31**, 2 (1965) 147
- 5) J. ELLIS and G. BARROW: C. I. R. P., **19** 4 (1971) 775
- 6) 谷口正紀, 瀬戸雅文: 精密機械 **32**, 4 (1966) 275
- 7) 佐藤健児: 金属の摩耗とその対策 養賢堂 (1973) 24

(昭和60年9月28日 受理)