

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：57501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420035

研究課題名(和文) 疲労最弱部に行う切削摩擦加工法でのナノ結晶粒層創生と局部残留応力制御

研究課題名(英文) Creation of nano-crystal-grains layer and Residual stress by the cutting and rubbing process in a notch of specimen

研究代表者

薬師寺 輝敏 (Terutoshi, Yakushiji)

大分工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：90210228

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：金属表面の疲労強度を大幅向上させる方法として、CNC旋盤を用いた表面強ひずみ加工である切削摩擦加工を提案した。実際の機械部品を強化するために、SCM435調質材のV溝切欠試験片($r=3.0$)を用いて、疲労破壊の起点となる応力集中部を強化する研究を行った結果、切欠き底の硬さは素材の2.7倍に向上し、2000MPaを超える圧縮残留応力を形成することができた。回転曲げ疲労限度は68%向上した。摩擦加工による強化は最表面から深さ方向に急激に弱まる傾向にあるが、切欠き材の応力分布も同様に最表面より急激に低下する。このことから、摩擦加工による強化の効果が平滑材よりも切欠き材に効率的であることが確認された。

研究成果の概要(英文)：In order to strengthen a actual machine part, research for strengthening a stress-concentration portion was carried out by using the circumferential V-notched specimen of heat treated SCM5435 steel. The cutting and rubbing processing produced the hard surface-layer with a fine microstructure at the helical-groove bottom. The layer had about 10 μm thickness and Vickers hardness value of 820 (2.7 times of non-processed surface). And the compressive residual stress is over 2000MPa. Rotating bending fatigue limit stress of the processed notched specimens was enhanced to 1.68 times of notched specimen which has not been processed. Although the specimen hardness was sharply dropped to HV of 400 at 0.1mm beneath the surface, the stress distribution of a helical-groove bottom declines rapidly from the maximum surface similarly. From this the effect of strengthening by cutting and rubbing processing is more efficient to a notched specimen than to a plain specimen.

研究分野：金属疲労

キーワード：摩擦加工 微細結晶粒 回転曲げ疲労強度 強ひずみ加工 残留応力 応力集中 V溝切欠き ナノ結晶

1. 研究開始当初の背景

機械部品や構造材の破壊事故の8割以上が疲労破壊であり、疲労破壊の大部分が表面を起点としていることから、表面に限定された強化でも製品の安全には大きく寄与することになる。そこで申請者は部品表層にナノ結晶粒を生成させることを利用した新しい表面改質技術がナノ結晶粒研究の実用化に最も近いと考え研究に着手した。旋削チップの逃げ面を工作物に押し当てながら摩擦することで表層部に極めて大きい塑性歪を与える摩擦加工を行った S45C 調質材で、表面に焼入れ時の硬さと同等以上の硬度を有するナノ結晶粒層を作り出すことに成功し、表面加工層が無い状態と比較して疲労強度が42%向上する結果を得た。ここで得られた疲労強度 900MPa(引張強度比 71%)は他の研究成果と比較しても優秀な値であるが、摩擦加工材の疲労寿命はばらつきが大きく、製品の安全を保障できるレベルにはなかった。その原因は摩擦加工時に出来る材料内部の空洞欠陥であった。そこで申請者は新たな形状の切削摩擦加工チップを考案し(平成 27 年特許登録)、このチップを用いて、宇宙・航空産業を中心に幅広い分野で使用されている Ti-6Al-4V 合金に切削摩擦加工を行った。この合金の疲労強度は表面性状に著しく影響され、通常のショットピーニングやガス窒化処理ではかえって低下することが報告されている。本研究では CNC 旋盤での試験片製作最終段階で自動ツールチェンジを行い、わずか 30 秒程度の切削摩擦加工を施した。その結果、表面層に微細結晶粒を生成し、疲労寿命が大幅に伸びた。この技術を福岡マリンメッセにおいて行われた「新技術マッチングフェア 2012」で広く一般に紹介した。その際、企業の技術者との面談により、軸表面での強化だけでなく、段付部等の応力集中部の強化が重要であり、この技術が確立されないと実際の部品加工への適応は難しいことを知った。

2. 研究の目的

研究の最終目的は、様々な製品の旋盤加工最終段階において切削摩擦加工を行い、形状を整えるのと同時に、耐摩耗性と疲労強度を格段に上げる技術を確立することである。この研究は金属材料ナノ結晶粒技術の実用化のさきがけとして、成果を報告してきた。しかし、実際の製品には応力集中部が存在し、疲労破壊はこの部分から始まるので、最終目的達成には、この最弱部分を集中的に強化する必要がある。本研究では応力集中部に微細結晶粒を生成させることに加え、この部分に特に高い圧縮残留応力を残す切削摩擦加工の方法を検討する。切削摩擦加工では、被加工物に曲げが加わるので、応力集中部は高い応力が生じた状態で摩擦加工を受けることとなる。これを利用してこの部分に高い圧縮残留応力を残すことを検討する。

3. 研究の方法

供試材として一般的に機械部品に使用される SCM435 調質材を用いた。熱処理により素材のピッカース硬さを 310HV 程度に仕上げた材料から回転曲げ疲労試験片を製作した。試験片形状は図 1 に示す環状 60 度 V 溝を持つ試験片で、切欠き底曲率半径は、応力集中係数が比較的大きいもの、 $r=3.0\text{mm}$ (試験片)、及び通常のチップで加工できる範囲で一番小さいもの、 $r=0.8\text{mm}$ (試験片)とした。応力集中係数 K_t は、それぞれ 1.38 と 2.07 である。比較の対象として平滑試験片の実験も行った。

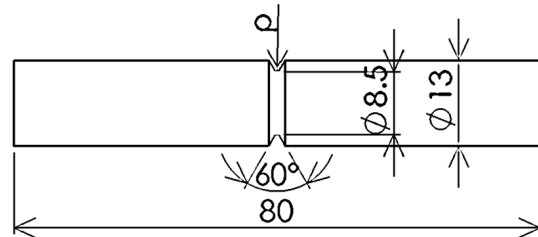


図 1 切欠き試験片形状

(1) 切削摩擦加工方法の検討

表面加工は、図 2 に示すような専用の治具に取り付けた切削摩擦加工用チップ(ノーズ半径 0.8mm)を通常の切れ刃位置が被加工材軸線よりも上になるようにしてチップの逃げ面にあたる部分を被加工材に一定の力で押し当てながら送りをかける。摩擦加工は、2 度行い、1 度目で表面に大きな塑性ひずみを与えて微細結晶粒や加工硬化層を創生し、2 度目で良好な表面性状に整える。周速度や送り速度、押し当て荷重について最適な条件を模索した。

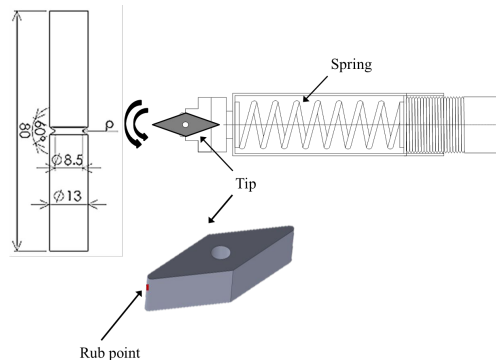


図 2 摩擦加工治具と摩擦加工

(2) 加工材の評価

試験片の表面状態は疲労強度に大きな影響を与えるため、切削摩擦加工材を評価する上で重要である。加工面の観察にはマイクロスコープを用いた。表面粗さは、算術平均粗さ(Ra)と最大高さ粗さ(Rz)を測定した。摩擦加工によって形成された微細組織を調査するため、摩擦加工後の試験片の表層の組織観察を行った。観察には日本電子社製の走

査型電子顕微鏡および光学顕微鏡を用いた。硬さの測定はマイクロピッカース固さ試験機を用いた。残留応力の測定は株式会社リガク製の全自動多目的水平型 X 線解析装置 SmartLab を用い、試験片軸方向に並傾法(一定法)で行った。X 線は Cr-K 線を用いて、光学系は集中ビーム法とした。本研究では、応力定数 $K=-415\text{MPa/deg}$ とした。疲労強度の評価は小野式小形回転曲げ疲労試験機を用いた。

4. 研究成果

チップノーズ半径 0.8mm 、1 回目押し当て荷重 600N 、2 回目を 200N 、周速 60m/min 、送り速度 0.02mm/rev とした条件で切削加工を行い、**表面のピッカース硬さ 820HV 、表面粗さ $Ra=3.78\mu\text{m}$ 、 $Rz=4.18\mu\text{m}$ の試験片が得られた。**

(1) 切削摩擦加工組織と硬さ分布

図3に $\rho=3.0\text{mm}$ 摩擦加工材の切欠き底表面から深さ方向へ光学顕微鏡で観察した加工層の拡大写真と、対応部の硬さ分布を示す。最表面層部から $10\mu\text{m}$ 程度の領域で腐食されにくい白層とみられる部分が観察され、この部分の硬さは 800HV を超えており、**ナノ結晶粒層が形成されたことを示している。**硬さは表面から急激に減少しおよそ $100\mu\text{m}$ の深さで 400HV 以下となっている。それ以降、深くなるにしたがって硬さは緩やかに減少し、およそ $300\mu\text{m}$ で素材の硬さである 310HV になっている。組織では最表面からおよそ $100\mu\text{m}$ 程度で旋盤回転方向とは逆方向の塑性流動と見られる領域が観察できる。またこの部分はそれより深い部分と比較して結晶粒が細かくなっている。これらのことから、最表面からおよそ $100\mu\text{m}$ 内部まで摩擦加工の影響を受けていることがわかる。一方、 $\rho=0.8\text{mm}$ 摩擦加工材の組織と硬さを図4に示す。 $\rho=3.0\text{mm}$ と同様に白層とみられる組織が観察されるものの、硬さと組織から判断して摩擦加工の影響で組織が変化しているのは最表面からおよそ $40\mu\text{m}$ 程度のごく浅い部分であることがわかる。この差が生まれたのはチップノーズ半径と切欠き底半径が同じ出るので、切欠き底で送りをかけられなかった結果、加工度が低くなったものと考えられる。

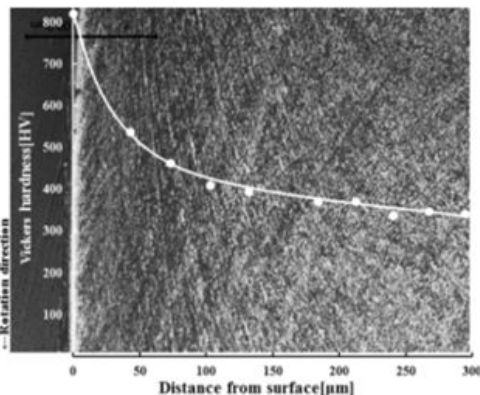


図3 横断面組織と表面からの硬さ分布 ($\rho=3.0\text{mm}$)

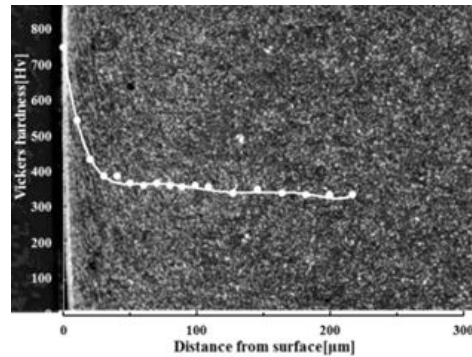


図4 横断面組織と表面からの硬さ分布 ($\rho=0.8\text{mm}$)

(2) 残留応力

V 溝試験片の切欠き底における残留応力は曲率半径 $\rho=3.0\text{mm}$ の試験片で測定した結果、 **-2000MPa を超える値**となり、目標を上回る結果となった。平滑試験片で疲労試験中の残留応力変化を調査した結果、回転曲げ疲労過程において、疲労のきわめて初期に減少し、その後ほぼ変化が見られなくなることがわかった。減少幅は応力振幅に対して 0.6 倍程度の値になる傾向が見られた。圧縮残留応力が想像以上に高くなったことから、逆に表面直下で引張応力が存在する可能性があり、これが原因でフィッシュアイ破壊を誘発する危険性も考えられることから、**これ以上残留応力を増加させることは望ましくないと判断した。**

(5) 疲労試験結果

図5に摩擦加工材及び未加工材の回転曲げ疲労実験より得られた S-N 曲線を示す。未加工材の疲労限度は $\rho=0.8\text{mm}$ と 3.0mm でそれぞれ 290MPa と 410MPa となった。これに対し摩擦加工した切欠き試験片の疲労限度は 440MPa と 690MPa となり摩擦加工していない試験片と比較して、 **$\rho=0.8\text{mm}$ は約 52% 、 $\rho=3.0\text{mm}$ は約 68% 向上した。**また、平滑材における摩擦加工材の疲労限度が 740MPa となり、約 51% 向上する結果と比較して、**摩擦加工は平滑材よりも切欠き材のほうが有効であることが明らかとなった。**

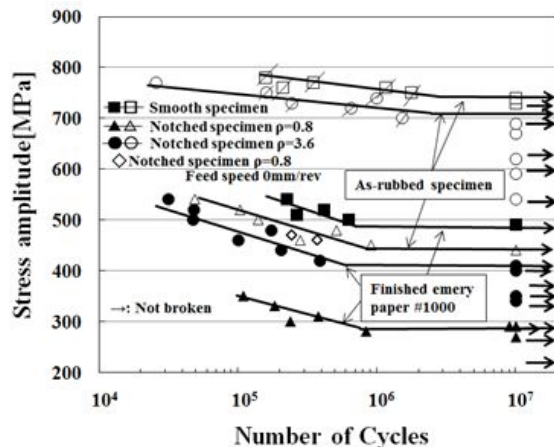


図5 環状 V 溝試験片の回転曲げ疲労強度

図6に切欠き試験片の破断面をマイクロスコブで観察した結果を示す。 $r=3.0\text{mm}$ の摩擦加工材では、 770MPa の繰返し応力を加えた試験片以外で破断したものすべてにフィッシュアイが観察された。これは摩擦加工によって表面の強度が大幅に上がった結果、切欠きによる最大応力が加わる最表面では破断せず、摩擦加工によって強化されていない深い位置でき裂が発生し、破断した結果である。



図6 疲労破面に現れたフィッシュアイ

摩擦加工による強化は最表面から深さ方向に急激に弱まる傾向にあるが、切欠き材の応力分布も同様に最表面より急激に低下する。したがって切欠き材に対する効果が平滑材に対する効果より大きいと考えられる。

$=0.8\text{mm}$ の試験片では全てにおいてフィッシュアイは見られず、表面近傍を起点とする破壊となっていた。この場合疲労強度を上げるためにはさらなる表面近傍の強化が必要である。しかし、最表面の硬さは焼入れ硬さとはほぼ同じ程度になっていることから、これ以上の硬さの上昇は望めず、**鋭い切り欠きに対する摩擦加工の効果は限界のところまで達成されていると考えられる。**

<引用文献>

Ti-6Al-4V合金に行う切削摩擦加工とその効果，薬師寺輝敏，渡部杏伍，後藤真宏，戸高義一，日本機械学会論文集 Vol. 80 (2014) No. 818
DOI:10.1299/trasjsme.2014smm0296

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3件)

T. Yakushiji, F. Nakagawa and M. Goto, Bending fatigue strength of annealed 0.45% carbon steel specimens finished by cutting and rubbing technique utilizing cemented carbide tip, International Journal of Fracture Fatigue & Wear, 査読あり, Vol.4(2016), pp.146-152 ISSN: 2294-7868

薬師寺輝敏，後藤真宏，鳥居幸代ワイヤ放電加工したS45C材の疲労強度，材料，Vol.64，No.11，(2015)，pp.

940-945

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jstms/64/11/64_940/_pdf

薬師寺輝敏，渡部杏伍，後藤真宏，戸高義一，Ti-6Al-4V合金に行う切削摩擦加工とその効果，日本機械学会論文集 Vol. 80, No. 818 (2014)

DOI:10.1299/trasjsme.2014smm0296

[学会発表](計 4件)

佐藤拓馬，薬師寺輝敏，摩擦加工したV溝切欠き材の回転曲げ疲労特性，日本材料学会九州支部第2回学術講演会講演論文集 A12，(2015) pp.25-26

安部佑一，原田努，薬師寺輝敏，引張圧縮疲労試験における摩擦加工材の疲労強度評価，日本材料学会九州支部第2回学術講演会講演論文集 A12，(2015) pp.23-24

佐藤拓馬，薬師寺輝敏，工藤加寿弘，摩擦加工したV溝切欠き材の回転曲げ疲労特性，日本機械学会九州支部大分講演会講演論文集 CD-ROM, A34 (2014)

中川文紀，薬師寺輝敏，表面を摩擦加工したS45C焼きなまし材の長寿命疲労特性，日本機械学会九州支部第67期総会講演会講演論文集 CD-ROM, OS4-414 (2014)

[その他]

ホームページ等

<http://www.oita-ct.ac.jp/kikai/staff.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

薬師寺輝敏 (YAKUSHIJI, Terutoshi)
大分工業高等専門学校・機械工学科・教授
研究者番号: 90210228

(2)研究分担者

(3)連携研究者

戸高義一 (TODAKA, Yoshikazu)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・機械工学系・教授
研究者番号: 50345956

(4)研究協力者

大山秀人 (OYAMA, Hideto)

高橋健一 (TAKAHASHI, Kenichi)

佐藤拓馬 (SATO, Takuma)