CO2レーザによる鋼の表面改質層の被削性とその改善

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 田中, 隆太郎, 上田, 隆司, 細川, 晃, 林, 勇伝, 山田, 啓司 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/37004

CO_2 レーザによる鋼の表面改質層の被削性とその改善*

田中 隆太郎*1, 上 田 隆 司*1, 細 川　晃*1
林　勇　伝*2, 山 田 啓 司*3

Machinability of Steels After Heat Treatment with CO_2 Laser and Its Improvement

Ryutaro TANAKA*4, Takashi UEDA, Akira HOSOKAWA,
Yongchuan LIN and Keiji YAMADA

*4 Graduate School of Natural Science Technology, Kanazawa University,
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-1192 Japan

This study deals with the machinability of steels after heat treatment with CO_2 laser using h-BN powder and blast furnace slug as absorbent. h-BN is well known as solid lubricant. As for blast furnace slug, its composition is similar to that of inclusions in calcium dioxide steel that shows good machinability. The absorbance of slug and h-BN were more than 80%, so it is said that these powders can be used as absorbent for CO_2 laser. Only in the case of h-BN, absorbent was melted into substrate and its depth was about 200 μm. When turning the steels after laser heat treatment using h-BN power and blast furnace slug as absorbent, carbide tool showed smaller tool wear than the case of carbon type absorbent. In the profile of the machined surface, there was a wave of about 5 μm in amplitude and its wavelength was equal to the feed rate of laser in heat treatment. This is because the workpiece surface after laser heat treatment has a periodic distribution in hardness. The hardness in the surface layer of workpiece was higher than that of the substrate.

Key Words: CO_2 Laser, Absorbent, h-BN, Cutting, Tool Wear

1. は　じ　め　に

切削加工の自動化，高速化への要求のいっそうの高まりに伴い，工作機械の高速化，工具の耐摩耗性向上だけでなく材料に対してもその被削性の向上が求められている．さまざまな製品の生産現場において無人自動化が進んでおり，工具の摩耗，損傷等により一旦その生産ラインが停止すると大きな損害が生じる．これらの問題点を少しでも改善するために現在では機械加工される多くの部品に，快削化添加物を添加し材料の被削性を高めた各種快削鋼が使用されている．このような快削鋼を用いることで，工具のコスト低減，生産性の向上と設備投資の削減，加工の無人自動化などの効果が期待できる．特に強度が要求される金型材料については機械的な強度の低下が見られないカルシウム処理による快削化についての研究など[(1)(2)]が行われている．また表面近傍に耐摩耗性が要求される部品については加工後表面の熱処理により硬度が高められ，高い精度が要求される場合には熱処理後さらに仕上げ加工が必要で高価な CBN 工具を用いる必要がある．

切削中の工具と被削材の間に工具摩耗を延長する目的で物質を供給する方法として快削鋼のように快削性添加物を材料中に分散させる方法では切削されない部分にまで添加物が存在するため，介在物の種類によっては材料の機械的強度を低下させる．また，正面フライスにおいてエンゲージ面への固体潤滑剤の塗布，工具への軟質金属の溶射などにより工具寿命に延長が見られたとされる報告が断続切削についていくつか見られる[(3)]が，この方法は断続切削に限定される．また改質層の切削加工に関する研究は溶射皮膜の CBN 工具を用いた旋削加工に関するもの[(4)(5)]があるが，表面処理を行う際に工具摩耗を抑制する添加物を供給する点に注目した研究はこれまでのところ報告されていない．

そこで本研究では，表面処理として CO_2 レーザを用いた熱処理に注目し，鋼表面に熱処理を行う際に必要とされるレーザ吸収剤の違いが，熱処理後の仕上げ切削における工具摩耗へ及ぼす影響について検討を行っ

* 原稿受付　2006年5月12日.
*1 正員，金沢大学大学院自然科学研究科(〒920-1192 金沢市角間町).
*2 金沢大学大学院自然科学研究科.
*3 正員，広島大学大学院工学研究科(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1).
E-mail: r-tanaka@t.kanazawa-u.ac.jp

Table 1 Chemical compositions of blast furnace slug used for experiment

Compositions	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Mn	S
mass%	0.51	35.60	13.50	42.80	5.40	0.39	0.68

た．吸収剤が熱処理後に表層に付着しているため，吸収剤の違いが工具との摩擦状態へ影響を及ぼすことが考えられる．実験では市販のカーボン系吸収剤の他に固体潤滑材として用いられる h-BN，優れた被削性を示すカルシウム脱酸鋼中の介在物と近い組成を持つ高炉スラグを吸収剤として使用した．

2. 実験装置および方法

実験で使用したレーザ加工機は連続，パルス発振が共に可能なレーザ発振器を有しており，連続発振において最大定格 1.8kW の出力が可能である．ビームモードはシングルモードの TEM00 である．実験では市販のカーボン系吸収剤，h-BN 粉末および鉄鋼スラグを吸収剤として CO_2 レーザを用い炭素鋼 S45C の表面に熱処理を行った．h-BN は高温でも化学的に安定であることから固体潤滑剤としても用いられ，切削中の高温化においても潤滑性が期待できる．またスラグはカルシウム脱酸鋼切削時に工具表面に形成され工具摩耗を抑制する保護膜と近い組成を持つ高炉スラグを用いた．表 1 に実験で用いた高炉スラグの組成を示す．高炉スラグは，アルミナ，マグネシアと少量の硫黄などを含有している．h-BN 粉末および鉄鋼スラグはエタノールに溶解し，被削材に塗布した後，エタノールを蒸発させ表面に固定した．

2·1 吸収率測定 実験で使用する試料が吸収剤として使用可能か確認するために，図 1 に示す装置を用いてレーザ吸収率を測定した．このときのレーザ照射条件を表 2 に示す．積分球の上方より積分球内部に入射したレーザ光は，積分球底面に 45° の角度をつけて設置された試料に照射される．積分球本体は CO_2 レーザに対し反射率が 98%と高い無酸素銅で製作し，さらに内部をバフ研磨で仕上げた．これにより積分球内部におけるレーザの吸収はごく僅かであると考えられる．試料表面で反射したレーザ光は積分球内部で反射を繰り返し，反射光が積分球側面の穴からパワーメータ (OPHIR 社製, F150A) に入射し電圧に変換され，インジケータで読み取る．試料は 5mm 四方程度，厚さ 2mm の S45C で，各吸収剤を表面に塗布した．比較の基準として同程度の大きさの無酸素銅 (反射率 98%) の試料を用いた．なお，レーザ出力は無酸素銅へ照射時にパワーメータ出力が 2.5W をなるように設定した．測定方法は，まず基準となる無酸素銅板の反射した出力を測定し，次に吸収剤をそれぞれ塗布した試料で反射した出力を測定後，無酸素銅板により反射された出力の値と比較し塗布された試料の反射率を算出した．

Table 2 Experimental conditions for measuring absorptions of specimens

Mode	Gate Pulse
Frequency Hz	50
Duty %	10
Pulse width ms	2
Beam diameter mm	2

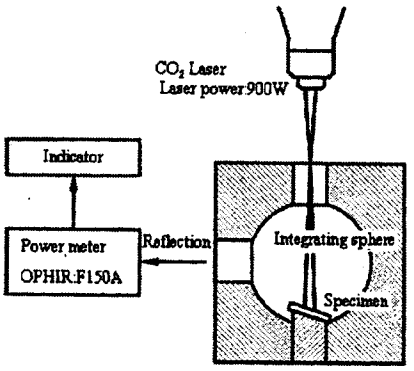


Fig. 1 Set up for measuring absorptions of specimens

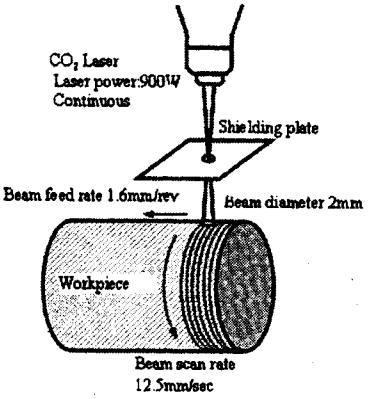


Fig. 2 Process for laser heat treatment with CO_2 laser

2·2 被削材および切削条件 S45C 丸棒の外周部分を熱処理するために試料塗布後，図 2 に示す方法で回転運動と長手方向への送りを与えながらレーザを

Table 3　Cutting conditions

Tool	Carbide tool P30(SNMN120408)
Cutting speed	60m/min
Depth of cut	0.5mm
Feed rate	f=0.1mm/rev
Coolant	dry

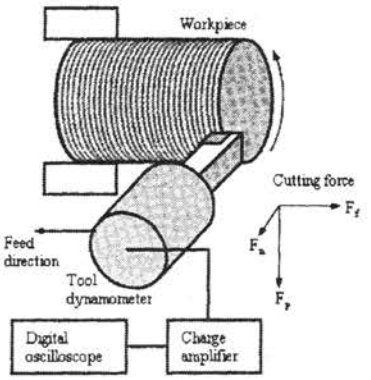


Fig. 3　Experimental set up for cutting test

連続照射することでらせん状に熱処理を行った．また比較材として既存のカーボン系吸収剤および高炉スラグを用いての熱処理も行った．作成した3種の被削材の被削性を比較するために，図3のようにNC旋盤を用いて，乾式で旋削加工を行った．工具は超硬工具P30(工具形状SNMN120408)を用いた．切削条件を表3に示す．切削抵抗の測定はAST式切削工具動力計（佐藤マシナリー　AST-TTM）によって行い，オシロスコープ（横河電機(株)，DL780E）に出力を記録した．工具摩耗は任意の時間毎に工具ホルダーから取り外し，すくい面摩耗は触針あらさ測定機(東京精密(株)製，surfcom470A)で，逃げ面摩耗は工具顕微鏡(ミツトヨ(株)製，TM-505)を用いて計測した．仕上げ加工では切込みを小さく設定し，焼入層ができるだけ厚い形で残るよう配慮される．しかし本研究では切削抵抗や工具摩耗への影響をより顕著に捉えるため切込みを大きく設定しているが焼入層の範囲を超えて母材にまで到達しないよう配慮して実験を行った．

3. 実験結果および考察

3·1　吸収率　吸収率の測定結果を表4に示す．3種とも80%以上の吸収率を示し，h-BN，スラグともに吸収剤として使用可能であることが分かった．

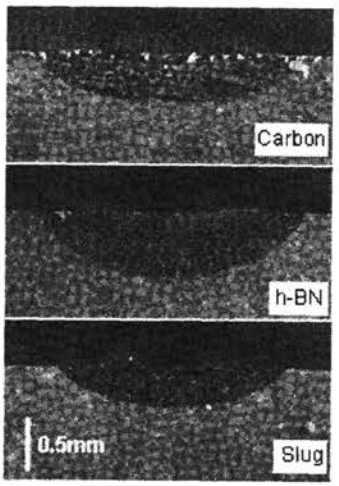
3·2　被削材の硬さおよび組織観察　被削材と同じ材質の試料について，レーザ走査方向と垂直に切断

Table 4　Absuptions of specimens used as absobent

	Reflected laser[W]	Reflectance[%]	Absorption[%]
Cu	2.50	98.00	2.00
Carbon	0.30	11.76	88.24
h-BN	0.45	17.64	82.36
Slug	0.30	11.76	88.24

しナイタル溶液でエッチングし熱処理された部分の組織観察を行った．図4に断面の顕微鏡写真を示す．いずれの試料についても半円状に熱処理の影響を受けた組織が観察できる．またh-BNを吸収剤とした場合のみ表層に近い部分に異なる組織が形成されていることが分かる．そこでBNを吸収剤として熱処理された領域についてEPMAを用い元素分布を調べた．分析はFe，B，Nについて行った．その結果を図5に示す．分析位置は最表層0.5mmの範囲である．このBおよびNの分布を見ると，断面の組織写真で認められた表面に近い変質層とほぼ一致している．このことよりh-BNを吸収剤として熱処理を行った場合B，Nが層状に深さ200 μ mの範囲に分布することが分かった．さらにB，Nが層状に分布している部分の四角形で示した部分について詳細に分析を行った．Bについてみると所々に集中して分布していることがわかる．Nは検出が難しく認識しづらいがBが密集しているところにやや集中しているように思われる．このことからBとNは10 μ m程度のh-BN介在物として存在していると考えられる．またカーボン系吸収剤，高炉スラグについてはこのような表面近傍の母材中に吸収剤の成分を含有する層は認められなかった．

図6に熱処理後の試料の硬さを示す．レーザ照射によって熱処理された試料内部の硬さの分布を調べるために，レーザ照射を行った試料について断面の硬さをビッカース硬さ測定機(アカシ(株)製，NM-101)を用いて測定した．母材のマイクロビッカース硬さは約210Hv程度であるが，CO_2レーザによって熱処理が行われた部分では700Hv程度まで硬度が高くなっている．ビッカース硬さが400Hv以上となる深さを比較すると，カーボン系レーザ吸収剤では0.5mm，BNでは0.65mm，スラグでは0.4mmとなっている．このことから同一条件でレーザ照射を行った場合，h-BNを吸収剤とし熱処理をした試料が最も深くまで硬度の変化が起きたことが分かる．この原因について詳細は明らかに出来ていないが，レーザ照射開始後，表面の温度が上昇し母材が溶融し，h-BNが溶け込むことにより吸収率および熱伝導率が上昇しより深くまで組織に影響を及ぼしたと推察される．

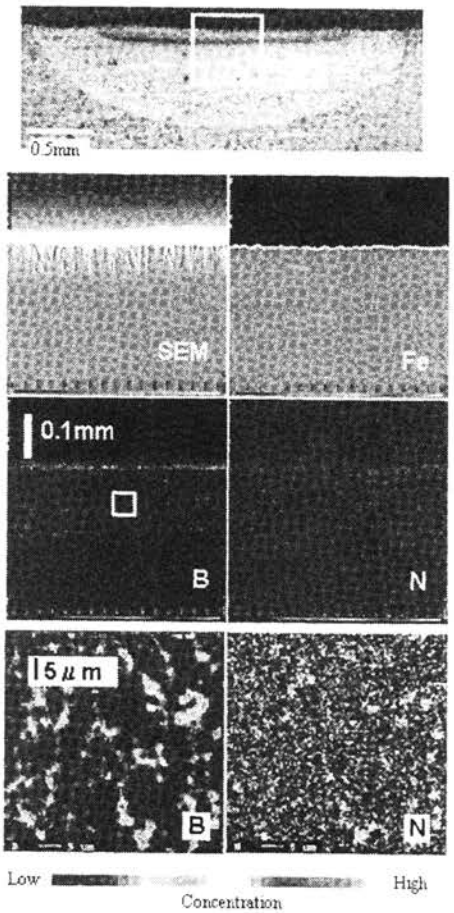


Laser conditions
Laser power: 1100w, Spot diameter: 2mm, Scan rate: 5mm/sec

Fig. 4 Cross section of S45C after laser heat treatment

被削材は材料表面の広範囲にわたり熱処理を行うため，被削材を回転すると同時にレーザを横方向に走査している．そこでレーザ照射が重なっている部分とその周辺部についてビッカース硬さを測定した．測定位置の写真および硬度を図7に示す．このレーザ照射部近傍において，レーザが一度照射された部分から送り分だけ違う位置でのレーザ照射の影響により組織に変化が起きている．図中の点線で囲まれた部分，表面からの深さ0.7mmおよび0.9mmの硬度に注目するとAは一度の照射のみ，Bは照射後に送りの長さ分異なる位置でのレーザ照射の影響を受けている．この熱処理履歴が違う2点では硬度が異なり，Aと比べBにおける硬度が低いことが分かる．これはレーザ光が直接照射されていない照射部近傍では，送りだけ位置がずれた状態において照射が行われた際にA_1変態点まで温度が上がらず，一度目の照射によってマルテンサイト化した組織が焼き戻され硬度が低下したと考えられる．

3·3 切削試験 図8に各被削材切削時の工具摩耗進行線図を，図9に60sec切削後における超硬工具の工具摩耗形態を示す．図を見ると，いずれの工具も横逃げ面の境界部分の摩耗が進行しており，その中でもカーボン系レーザ吸収剤を用いて熱処理を行った被削材を切削した場合の摩耗が他の吸収剤を使用した場合より大きい．h-BNとスラグの差はほとんどないが今回用いた試料の中ではスラグを用いて熱処理を行った被削材を切削した場合の摩耗が最も小さい摩耗を示

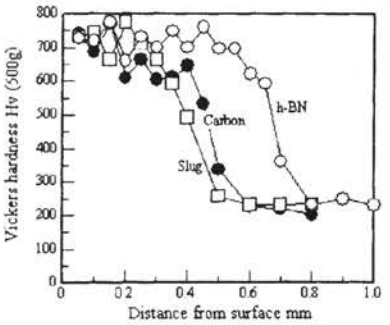


Laser conditions
Laser power: 1100w, Spot diameter: 2mm, Scan rate: 5mm/sec

Fig. 5 Element distributions of specimen after heat treatment with CO_2 laser using h-BN powder as absorbent

した．横逃げ面の境界部の摩耗は，加工硬化層の生成や，酸化現象によるものなど被削材の表面の状態に起因する．このため，レーザにより表面に熱処理が施されている被削材の場合，表面に付着した吸収剤の影響が大きいと考えられる．

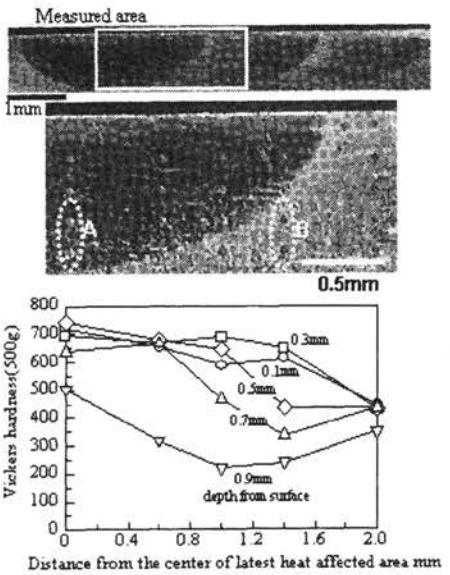
図10に開始後60secにおける切削抵抗を示す．熱処理の影響により被削材の硬度が均一でないため切削抵抗に周期的な変動が見られた．切削初期において抵抗値に大きな差は見られなかったが，切削の進行に伴い工具摩耗量に差が生じ抵抗値に差が現れている．焼ならし状態の母材切削時と異なり，いずれの被削材切



Laser conditions

Laser power: 1100w, Spot diameter: 2mm, Scan rate: 5mm/sec

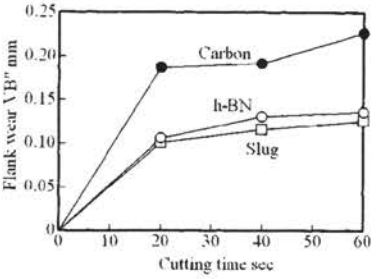
Fig. 6 Hardness of specimens after heat treatment



Laser conditions

Laser power: 1100w, Spot diameter: 2mm, Scan rate: 5mm/sec, Feed rate: 1.6mm/rev, Absorbent: h-BN powder

Fig. 7 Distribution of vickers hardness of specimens



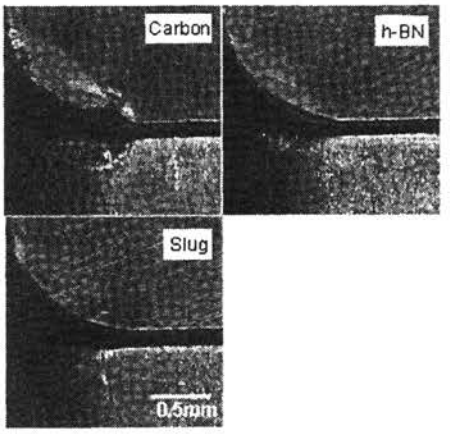
Laser conditions

Laser power: 900w, Spot diameter: 2mm, Scan rate: 12.5mm/sec, Feed rate: 1.6mm/rev

Cutting conditions

V=60m/min, d=0.5mm, f=0.1mm/rev, dry

Fig. 8 Wear progress curve of carbide tool P30 when turning of S45C after laser heat treatment



Cutting conditions

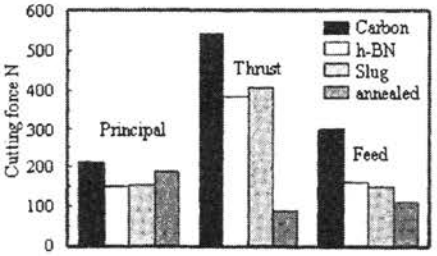
V=60m/min, d=0.5mm, f=0.1mm/rev, t=60sec, dry

Fig. 9 Wear patterns of carbide tool P30 when turning of S45C after laser heat treatment

削時も背分力が他の分力と比べ大きいが，これは高硬度材切削時の特徴である．カーボン系吸収剤と比較し工具摩耗の小さいスラグ，h-BN で小さい抵抗を示すことが分かる．

図 11 に切削時の工具と被削材の接触状態を示す．図中にはそれぞれの吸収剤を使用した場合の最大熱影響深さと h-BN を使用時の B, N 層の幅を示した．使用した吸収剤により工具摩耗に違いが生じた原因として，h-BN については固体潤滑材としての働き，高炉スラグについては最表面層のアブレッシブ作用の低減およびカルシウム脱酸鋼切削時に見られるような高温下における複合酸化物の潤滑効果などの影響により高温下における摩擦特性が改善されたためと考えられる．

図 12 に切削後の断面形状と硬度分布を示す．切削後



Cutting conditions
V=60m/min, d=0.5mm, f=0.1mm/rev, dry

Fig. 10 Cutting force when turning steels after laser heat treatment and standard steel

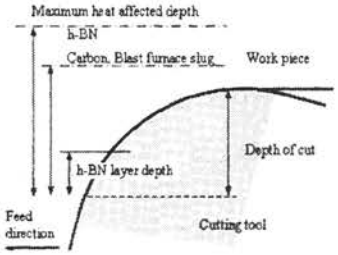


Fig. 11 Illustration of contact of cutting tool and work piece after heat treatment with CO_2 laser

の表面には約 10 μ m の段差が生じており，そのピッチはレーザ熱処理をらせん状に行う際における被削材の 1 回転あたりの送り量と一致している．これは切削系の剛性の影響や材料の硬度差によると考えられ，より剛性が高い工作機械を用いることで小さく抑えることが可能である．切削加工後の表面硬度について見ると，切削後の表面は凸状の A 部では Hv485，凹状の B 部では Hv341 であり，硬度が高い部分とやや低下した部分が交互に見られるが，いずれも母材よりも高い硬度を示した．

お わ り に

本研究では，鋼に CO_2 レーザを用いた熱処理を行う際に、一般的なカーボン系吸収剤，h-BN 粉末および高炉スラグをレーザ吸収剤として使用し，熱処理後の改質層の切削加工を行った結果，以下の結論が得られた．

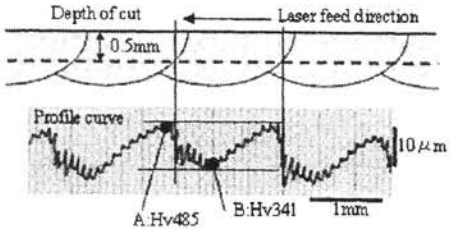
(1) 鋼表面に塗布された h-BN 粉末，高炉スラグの CO_2 レーザに対する吸収率は 80%以上であり，いずれも吸収剤として使用することが可能である．

(2) h-BN 粉末を吸収剤として使用した場合，表面近傍に B，N が層状に分布しており，レーザ出力 1300W，スポット径 2mm，走査速度 5mm/sec の条件においてその厚さは約 200 μ m であった．

(3) 一般的なカーボン系レーザ吸収剤を使用した場合と比べ，h-BN を吸収剤としてレーザ熱処理を行った鋼の切削時の工具摩耗が小さく抑えられることが分かった．中でも高炉スラグを吸収剤としてレーザ熱処理した鋼の切削時の工具摩耗が最も小さかった．

(4) h-BN 粉末，高炉スラグを吸収剤としてレーザ熱処理を行った鋼の切削時における，切削抵抗は，一般的なカーボン系レーザ吸収剤を使用して熱処理を行った鋼の切削時の場合と比べ抑制されることが分かった．

(5) 切削後の被削材表面はレーザ熱処理による高度差に起因する凹凸が生じたが，表面の位置によらず母材より高い硬度を示した．



Cutting conditions
Tool: P30, v=60m/sec, d=0.5mm, f=0.1mm/rev, dry

Fig. 12 Profile of finished surface and hardness of specimen after heat treatment with CO_2 laser using h-BN powder as absorbent

文 献

(1) Shozo A., Some Properties of Ca-bearing Free Machining Carbon Tool Steel, *DENKI-SEIKO,* Vol.42, No.1, (1971), pp.55–60

(2) Tetsuro Ito. et al., Effect of Mn and Ca on Some Properties of a Hot-Forging Die Steels, *DENKI-SEIKO*, Vol.48, No.1, (1977), pp.15–24

(3) N. H. Cook. et al., Metal Cutting Lubrication Through Continuous Electroplating, *Journal of the American Society of Lubrication Engineering*, 11, (1966), pp.447–452

(4) Yasuyuki INUI. et al., Study on the Machining of Thermal-sprayed Coatings(1st report)-On the Cutting of a Ni-Cr Self-fluxing Alloy by CBN Tools-, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.56, No.7, (1990), pp.1229–1234

(5) Yasuyuki INUI. et al., Study on the Machining of Thermal-sprayed Coatings(2nd report) -On the Cutting of a Ni-Cr Self-fluxing Alloy by CBN Tools-, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.56, No.9, (1990), pp.1686–1691