研究論文

DED 方式金属堆積造形により製作した金型の高靭性化に関する研究

平石　誠*　須藤　貴裕*

Improving Toughness of DED Additive Manufactured Die

HIRAISHI Makoto* and SUTOH Takahiro*

抄　　録

DED（Directed Energy Deposition）方式金属堆積造形により製作される金型の靭性向上を目的に，造形時のレーザ加熱条件が堆積層の組織や硬さ，曲げ強度に及ぼす影響について調べた。堆積材料には高速度工具鋼粉末を使用し，堆積層が凝固するときの冷却速度を変化させるため，層間温度や次層を堆積するまでの時間間隔を変えた。冷却速度は2色放射温度計を用いて測定した。また，堆積層の靭性を3点曲げ試験により評価した。冷却速度が大きくなるほど堆積層の曲げ強さは高くなる傾向が認められた。堆積層は柱状デンドライト組織を呈しており，デンドライトアーム間には共晶炭化物が形成されていた。冷却速度が大きい条件では，共晶炭化物は細い線状となり，炭化物間の距離は小さくなった。このために炭化物の破壊が生じにくくなり，曲げ強さが向上したことが推察された。

1.　緒　　言

材料技術や加工技術が日々高度化する中，工業製品の製造を支える金型の使用状況はますます厳しくなり，高い耐久性が必要となっている。一方，金型の製作においては，消費者ニーズの多様化や製品サイクルの短期化に伴って，製品の設計変更に柔軟かつ短納期に対応しコストアップを抑えた加工技術が求められている。

DED（Directed Energy Deposition）方式金属堆積造形は，レーザ光等の局所熱源を照射した箇所に金属材料を投入し，これを溶融・凝固させながら堆積して立体造形するものである。既存部品にニアネットで形状を付加できることや，基材とは異なる材料を部分的に付加できることから，上述のような金型製作におけるニーズに対応する技術として期待されている。

一方，高速度工具鋼は高硬度で耐摩耗性が高いため，これを用いた金型の堆積造形については多くの報告[1), 2), 3)]があるが，造形の際に溶融・凝固過程を経ることから堆積層にはネットワーク状に連なった共晶炭化物が生じ，このために靭性が低いとされている[2), 4)]。

本研究では，金属堆積造形による高速度工具鋼金型の靭性向上を目的に，堆積造形時のレーザ加熱条件が堆積層の炭化物分布や組織，硬さ，曲げ強度に及ぼす影響について調べた。

2.　実験方法

2.1　堆積造形装置

堆積造形にはパウダ DED 方式堆積造形装置 LAMDA200（ニデックマシンツール(株)製）を使用した。実験装置の模式図を図 1 に示す。レーザヘッドの先端からは波長 1.07μm のレーザ光が照射され，基材表面に溶融池を形成する。また堆積材料である粉末は，レーザ光の光軸周りに配置されたノズルから吐出された後，溶融池にて堆積層を形成する。造形時の高温部を大気から遮蔽するためのシールドガスおよび粉末のキャリアガスには Ar を用いた。

* 研究開発センター

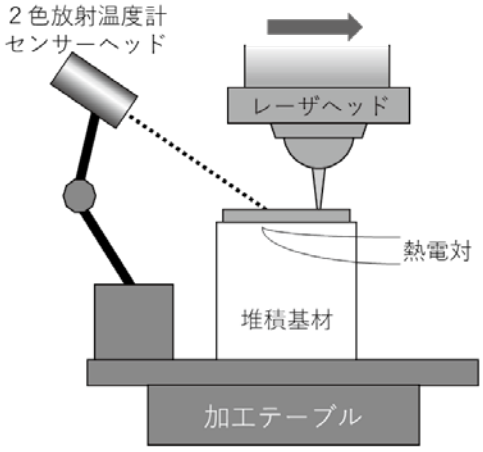


図１　実験装置

表１　堆積材料の化学組成 (mass%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Co
1.27	0.15	0.34	4.26	4.56	6.53	3.15	8.15

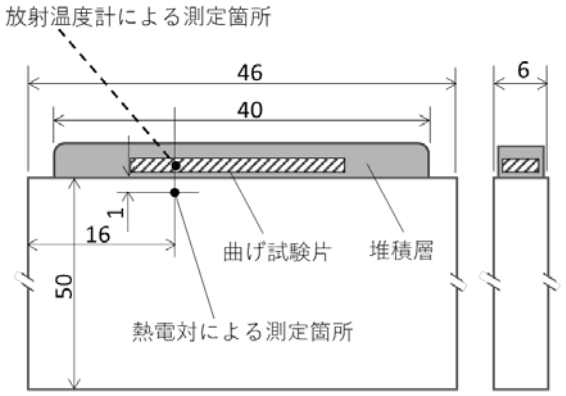


図２　基材サイズと曲げ試験片の切り出し位置

2.2　供試材

堆積材料となる粉末には高速度工具鋼（SKH40 相当）を使用した。組成を表 1 に示す。粒径分布は 45～150μm である。

基材には幅 6mm，長さ 46mm，高さ 50 mm の SS400 製の板を用いた（図 2）。基材の 6×46mm の面を造形面とし，長さ 40mm のビードを幅方向に 3 列引き，これを 1 層として高さ方向に 8 層積層して高さ 3.3mm の堆積層を造形した。ビードを引く方向は一方向とした。

2.3　温度測定

造形中の堆積層および基材の温度変化を測定した。測定器の配置，測定位置を図 1，2 に示す。

堆積層の温度測定には 2 色放射温度計 Metis M322（Sensortherm 製）を用いた。測定可能範囲は 350～1300℃，測定スポット径はφ1mm である。測定位置は基材の幅の中点位置で，造形開始側から 16mm 付近（斜めに入射しているため堆積高さの増加とともに 2mm 程前後する）の位置とした。

また，基材の温度は素線径φ0.2mm の K 熱電対により測定した。熱電対は，基材の側面上で造形開始側から 16mm，堆積面から 1mm 離れた位置に溶接した。

2.4　堆積造形条件

堆積層が凝固するときの冷却速度を変化させるため，基材温度あるいは時間間隔を変えて造形した。前者では，ある層を堆積した後，熱電対で測定した基材温度が 100℃，150℃，200℃に低下するのを待って次の層を堆積した（以下，各条件を「○○℃維持」と記載）。なお，100℃維持条件では堆積層に割れが生ずる場合があった。後者では，1 層ごとに 0s または 5s 停止させて次の層を堆積した（以下，それぞれ「連続」，「5s 間隔」と記載）。なお，レーザパワー，レーザヘッドの送り速度，粉末供給量等の条件は，予備実験にて内部欠陥が最も少なくなる条件で一定とした。

2.5　堆積層の評価

造形された堆積層に焼戻し熱処理を施した後，曲げ試験および硬さ試験に供した。熱処理条件は，加熱温度 560℃，保持時間 1 時間を 3 回繰り返した。

曲げ試験片は基材による希釈がない位置（基材表面から 0.6～2.1mm）から切り出した（図 2）。試験片の大きさは長さ 24mm，幅 4mm，厚さ 1.5mm とし，上下面を研磨により 0.2μm Ra 以下に仕上げた。試験は 3 点曲げ（支点間距離 20mm, 支点ロール直径は 4mm）とし，各条件について 4 本の試験片の破断荷重から平均値を求

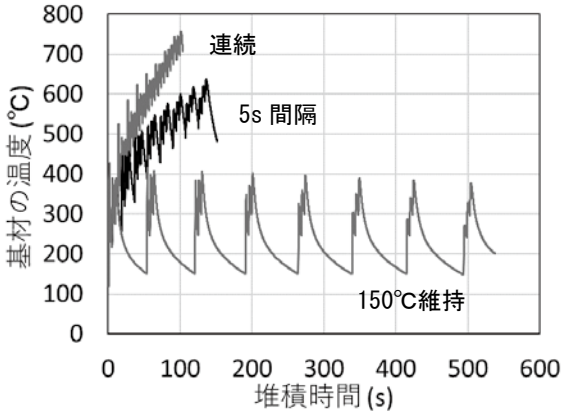


図 3　基材の温度変化

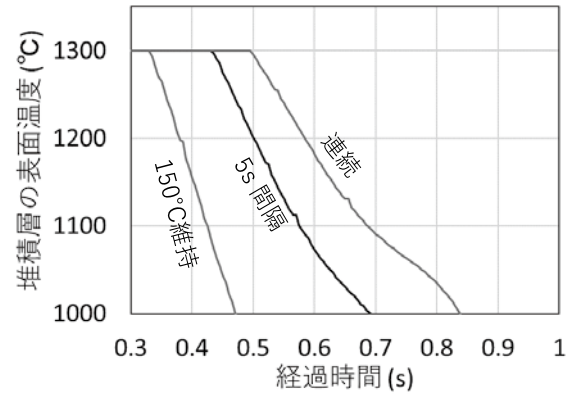


図 4　堆積造形中(5 層目)の温度変化

表 2　各堆積造形条件での冷却速度
(1250→1150℃冷却時)

(℃/s)

100℃維持	150℃維持	200℃維持	5s間隔	連続
2323	2186	1959	1438	1182

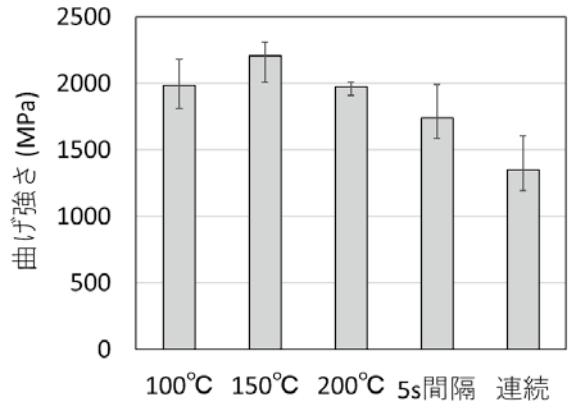


図 5　各堆積造形条件での曲げ強さ

め，曲げ強さとした。

硬さはビッカース硬さ試験により評価した。

3.　実験結果

3.1　冷却速度

造形中の基材温度の変化を測定した例を図 3 に示す。のこぎり刃状に連なる山の一つ一つが，各層を造形したときの昇温に対応している。連続条件では急速に昇温し，最終層の造形時は 730℃に達した。

曲げ試験片の上面切り出し位置に相当する 5 層目を造形しているときの堆積層の温度を測定した例を図 4 に示す。横軸は，レーザ光が測定点に接近し 1300℃に達した時を 0s とし，その後の経過時間を示している。150℃維持条件に比べて 5s 間隔や連続条件では温度低下が緩やかであることがわかる。各堆積造形条件にて 5 層目を造形したときに測定された 1250～1150℃の間の冷却速度は表 2 のとおりであった。

3.2　曲げ試験

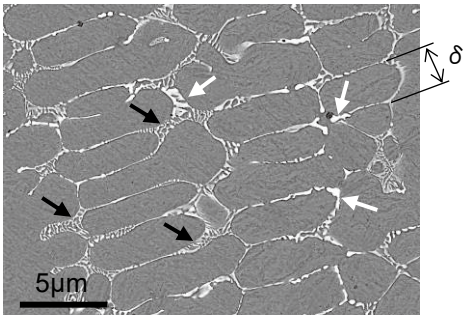
各堆積造形条件で得られた堆積層の曲げ試験結果を図 5 に示す。150℃維持条件で最も高い曲げ強さが得られた。また，表 2 の冷却速度との関係では，冷却速度が大きくなるほど高い曲げ強さが得られる傾向が認められた。

4.　考察

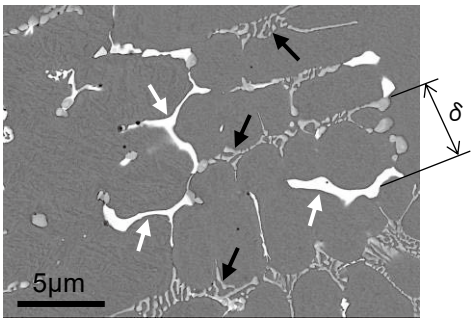
4.1　冷却速度が低い条件での強度低下

5s 間隔条件と連続条件での堆積層の断面を観察した。観察面はビードと平行し，中央のビードの中心を通る面とし，基材表面から 2mm 離れた位置とした。

反射電子像を図 6(a)，(b)に示す。いずれの条件でも柱状デンドライト組織を呈しており，右斜め上方に成長している 2 次アームの間には，図中に矢印で示したように共晶炭化物が形成されていた。成分分析の結果から，白い組織（白矢印）は Mo，W の炭化物，明るいグレーの組織（黒矢印）は V 炭化物であると考えられる。

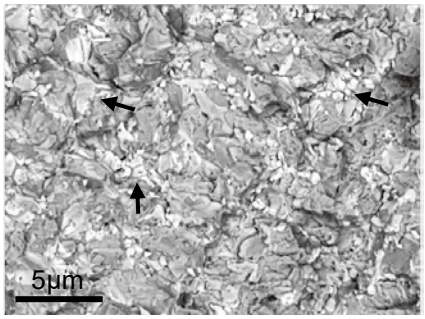


(a) 5s 間隔条件

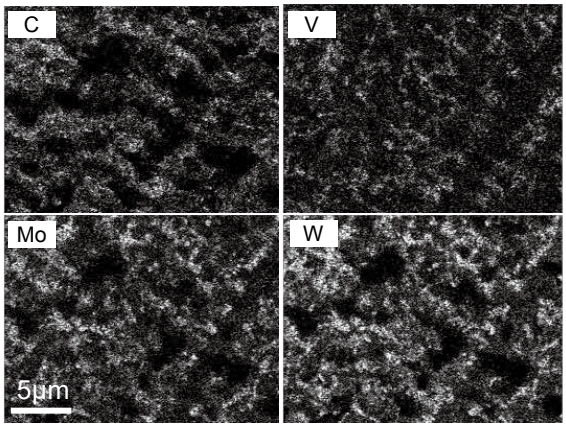


(b) 連続条件

図 6　堆積層の断面（反射電子像）

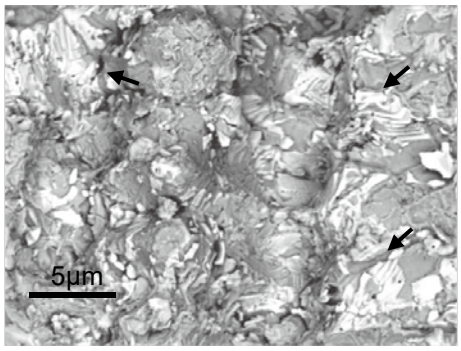


(a) 反射電子像

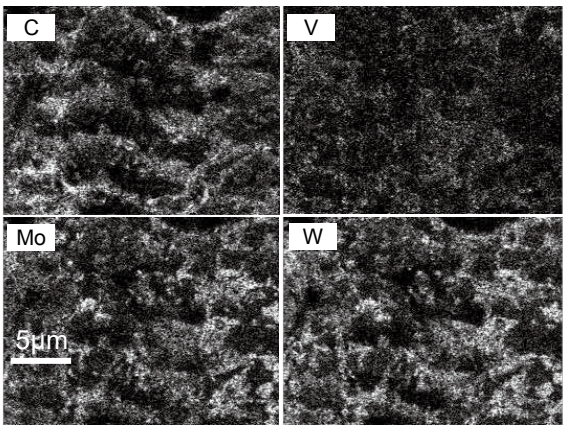


(b) 元素マッピング像

図 7　5s 間隔条件の曲げ試験片破面



(a) 反射電子像



(b) 元素マッピング像

図 8　連続条件の曲げ試験片破面

連続条件では，5s 間隔条件に比べてデンドライトアーム間隔が大きく，炭化物間の距離 δ も大きい。また，5s 間隔条件では共晶炭化物のほとんどが層状であるのに対し，連続条件では厚いフィルム状の炭化物が多く観察された。

5s 間隔条件と連続条件について，曲げ試験片の破面の反射電子像および同視野の元素マッピング像をそれぞれ図 7，8 に示す。観察位置は曲げ試験片の表側（曲げ試験で中央のロールが当たった面の反対面）の表面近傍である。

いずれの条件でも破面にはデンドライトに対応した凹凸が観察された。

5s 間隔条件の破面（図 7(a)）には，矢印で示した明るいトーンの粒や層が多く認められる。これらは元素分析の結果から V，Mo，W の炭化物であると判断され，図 6(a)に観察された層状組織の断面と考えられる。

一方，連続条件の破面（図 8(a)）にも Mo，W

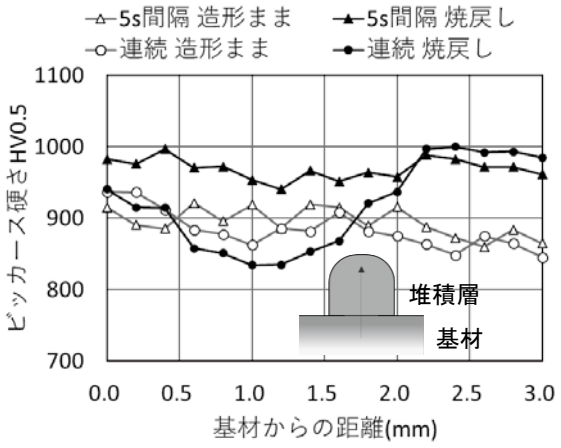


図 9　堆積層の硬さ分布

を含み，明るいトーンで観察される炭化物が存在するが，5s 間隔条件と比べるとその面積は広く，面状に分布している。これは，断面（図 6(b)）に観察された厚いフィルム状の炭化物がクラックの伝播経路となり，破面に露出したものと考えられる。

連続条件において曲げ強さが低下した原因として，高速度工具鋼に応力が加わったとき，大きな炭化物ほど高い応力集中が生じること [5] や，炭化物間の距離が比較的大きいために炭化物周辺のマトリックスに多くの転位が集積し [6]，炭化物にクラックが発生しやすくなったことが推察される。

図 6(b)に見られる炭化物がどのように形成されたのかを検討するため，硬さ試験を行った。

図 9 に堆積層の硬さ分布を示す。造形後に焼戻しを施した状態と造形のままの状態を併記している。グラフの横軸は基材表面からの距離である。

5s 間隔条件では，造形のままの状態での硬さは概ね 900 HV であり，焼戻しにより 2 次硬化し 950～1000 になった。一方，連続条件では，造形のままの状態では 5s 間隔条件と同等かわずかに低下する程度であるが，焼戻しをしても基材表面から 2mm の範囲では 2 次硬化が認められず，むしろ硬さが低下する領域も認められた。

高速度工具鋼の 2 次硬化には，遷移金属 M の炭化物 M_2C（Mo_2C や W_2C）の析出と残留オーステナイトのマルテンサイト化が寄与する [4] が，M_2C はその析出温度範囲である 540～580℃を超えると粗大な M_6C や $M_{23}C_6$ に変化し [7]，凝集するため，硬さや曲げ強さが低下するとされている [4]。

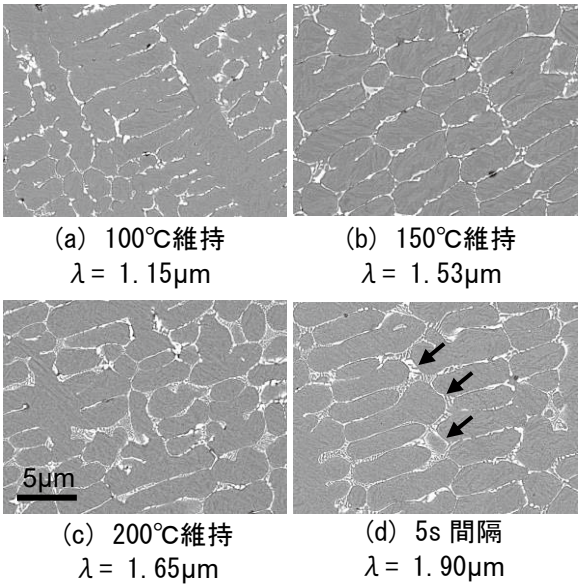


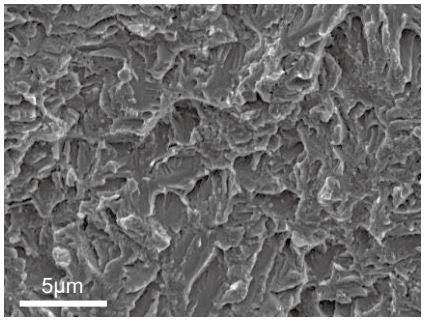
図 10　堆積層の断面組織

図 3 に示した造形中の基材温度の変化を見ると，連続条件では 6 層目の堆積（堆積時間 65s）以降，基材の温度が 600℃を超えており，既に造形されていた堆積層はそれ以上の温度に加熱されたことは明らかである。以上のことから，図 6(b)の厚いフィルム状炭化物は，遅くとも 6 層目以降の堆積造形に伴う熱影響により M_6C 等が凝集したものと考えられる。

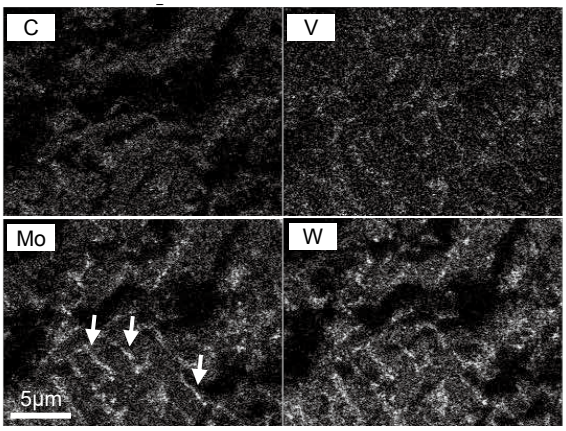
4.2　冷却速度の増加に伴う強度向上

図 10(a)～(d)に 100℃～200℃の各温度で維持した条件および 5s 間隔条件での堆積層の断面の反射電子像を示す。各図の下に記載した λ 値はデンドライトの 2 次アーム間隔である（50×50μm 視野の光学顕微鏡像から切断法にて測定した）。

5s 間隔条件，200℃，150℃，100℃維持条件の順に冷却速度は大きくなり（表 2），それとともに λ 値は小さくなった。併せて，5s 間隔条件においてデンドライトの間隙に観察される層



(a) 2 次電子像



(b) 元素マッピング像

図 11　150℃維持条件の曲げ試験片破面

状の共晶炭化物（矢印で示す）もその面積を減じ，100℃維持条件や 150℃維持条件では細く，一部不連続な線状に変化した。

図 11(a)，(b)は 150℃維持条件での曲げ試験片の破面を観察した 2 次電子像と同視野の元素マップである。曲げ試験片の表側近傍にはリバーパターンを呈した擬へき開割れが認められた。また，元素マップから炭化物が細い線状に分布していることがわかる。

これらのことは，割れが共晶炭化物を横断しマトリックス内で生じたことを示しており，デンドライトアーム間の共晶炭化物で割れた 5s 間隔条件や連続条件とは対照的である。

この原因は連続条件における強度低下と逆の説明で理解される。すなわち，炭化物のサイズや炭化物間の距離（λ に相当）が小さいために炭化物の破壊が生じにくくなり，結果として大きな応力を要するマトリックス内での破壊に至ったと考えられる。

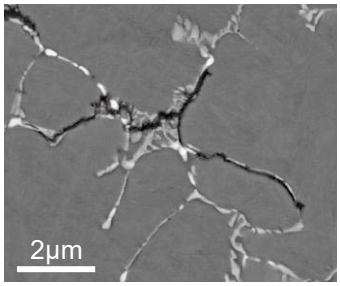


図 12　100℃維持条件の堆積層に生じたクラック

以上のように，造形時の冷却速度の増加は堆積層の曲げ強さを向上させるが，一方で 100℃維持条件では低下した。2.4節で述べたように同条件では堆積直後に割れが生ずる場合があった。目視では割れが認められなかったものの，改めて堆積層の断面を観察すると図 12 のような微小なクラックが生じており，これが予備亀裂となって曲げ強さを低下させたと考えられる。

5.　結　　言

金属堆積造形による高速度工具鋼金型の靭性向上を目的に，堆積造形時の凝固過程における冷却速度が堆積層の炭化物分布や曲げ強度に及ぼす影響について調べた結果，以下の結論を得た。

(1) 冷却速度が大きくなるほど堆積層の曲げ強さは高くなる傾向が認められた。ただし，冷却速度が過剰に大きい条件では堆積層に割れが生じた。

(2) いずれの条件でも柱状デンドライト組織を呈しており，デンドライトアーム間には共晶炭化物が形成されていた。

(3) 冷却速度が小さい条件では，後続層の熱影響により共晶炭化物が厚いフィルム状に凝集し，曲げ試験におけるクラックの伝播経路になった。

(4) 冷却速度が大きい条件では，共晶炭化物は細い線状となり，炭化物間の距離は小さくなった。このために炭化物の破壊が生じにくくなり，曲げ強さが向上したことが推察された。

謝　辞

本研究は，（公財）天田財団の一般研究開発助成によるものであり，ここに付記して深く感謝の意を表します。

参考文献

1) 京極秀樹, 生田明彦, 上森武, 柿迫健, 他 2 名, “工具鋼粉末のレーザ積層造形”, 近畿大学次世代基盤技術研究報告書, vol.3, 2012, pp.55-60.
2) 薩田寿隆, 石川毅, 高橋和仁, 横田知宏, 他 3 名, “粉体レーザ肉盛により形成した高速度工具鋼肉盛層の特性”, 熱処理, vol.59, no.2, 2019, pp.53-60.
3) 山本隆久, 澤田俊之, “レーザークラッド及び PTA で作製した粉末ハイス層の特性”, 溶接学会全国大会講演概要, vol.104, 2019, pp.40-41.
4) 佐藤忠雄, 相沢力, “プレス型材料と熱処理”, 日刊工業新聞社, 1972, p.24, p.95.
5) 三谷狀士, 沙魚川智之, 渡邊千尋, 門前亮一, “高速度工具鋼の疲労挙動への窒素の効果”, 日本金属学会誌, vol.72, no.2, 2008, pp.105-110.
6) 高木節雄, “多結晶フェライト鋼における降伏・変形挙動”, 日本金属学会誌, vol.83, no.4, 2019, pp.107-118.
7) 仁平宣弘, “高速度工具鋼（ハイス）の焼入れ焼戻し”, 工業加熱, vol.60, no.2, 2023, pp.19-24.