クラッド歯車成形についての基礎的研究*

加藤 浩三^{*1}, 近藤 一義^{*2}, 加藤 貴裕^{*3}

Deformation Process of Clad Spur Gear

Kohzoh KATOH, Kazuyoshi KONDO and Takahiro KATOH

The purpose of this research is to develop a new plastic deformation process to fabricate a clad spur gear made of steel for inner and stainless steel for outer. The feasibility of the new plastic deformation process was confirmed through an experimental simulation with alternative material; aluminum. The new process is composed of deep drawing, ironing, and final die forging in which both gear profile formation and joining of two parts are simultaneously accomplished. As a result of the experiment the formed gear had enough filling in the die cavity and the force level during the die forging was lower in the case of the new clad type than in the case of the single material type. The formability was discussed from the view point of the metal flow in the radial direction during the die forging.

Key Words: Plastic Forming, Forging, Deep Drawing, Formability, Gear, Clad

1. 緒 言

近年、積層複合材料の適用技術が発達してきており、圧延によるクラッド板材の成形⁽¹⁾、およびこれを用いたプレス成形が研究され^{(2)~(6)}、あるいは実用化されてきている。これらの積層複合材料は、異種材料を積層することにより、単体の材料では得られない新たな機能を得ること、あるいは高価な原材料の利用割合の低減により製造コストを削減することを目的としている。このような積層複合材料の適用例としては、耐錆を目的とした海水淡水化装置、滅菌層に浸される医療機器、あるいは化学プラントなどがある。これらの製品の一部はクラッド圧延板材を用いたプレス成形により製造することが可能である。けれども、歯車やスプラインなど、元来、板素材ではなくバルク素材を利用する機械要素のプレス成形では、これらのクラッド圧延材を適用することができないため、積層複合材料製品の適用例は見られない。

本研究では以上を踏まえて、外殻には板素材を用い内層にはバルク材を用いて、これらを接合する新たなタイプの歯車(以下、クラッド歯車)の成形方法についての基礎的な検討を実施した。本研究の開発目標製品はステンレスを外殻とし炭素鋼を内層材としたクラッド歯車であるが、検討に際しては、基本的な塑性成形特性を検証するため、外殻材、内層材ともに工業用純アルミニウムを用いた実験的シミュレーションを実施した。

2. クラッド歯車成形方法

図1は提案するクラッド歯車成形方法の概要を示したものである。まず、外殻用の板素材に深絞り加工としごき加工を施して波形状を有するカップを成形する。次にこのカップの耳部と底部をトリミングし円筒波形状プリフォーム(中間素材)を成形する。最後にこの円筒波形状プリフォームの内部に厚肉の中空内層材を挿入して冷間型鍛造を行う。この最後の工程では、外殻部に歯車形状を成形すると同時に両素材の接合を実現する。

3. 実験方法

3・1 深絞りによる波形状プリフォームの成形

* 原稿受付 1997年11月19日。

^{*1} 正員、岐阜工業高等専門学校(〒501-0495 岐阜県本巣郡真正町)。^{*2} 正員、名古屋大学工学部(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。^{*3} 三菱重工(株)高砂製作所(元:岐阜工業高等専門学校学生)。

Fig. 1 Schematic view of new process for clad gear deformation

Fig. 2 Schematic view of deformation of wavy preform

図2に波形状プリフォームを成形するための深絞り工程の概要を示した。この工程は二つの深絞り工程により構成される。まず、ストレート形状のパンチを用いた第1絞り工程(a)により、板素材をカップ形状にする。次に波形状を有するパンチとダイを用いた再絞り工程(b)により、波形状を有するカップを成形する。表1に深絞り工程の加工条件を示した。第1絞り工程には直径19.0 mmのストレートパンチと孔径25.0 mmのダイを用いた。再絞りには基準円直径16.78 mmの波形状を有するパンチと基準円直径18.78 mmの波形状を有するダイを用いてクリアランスを1.0 mmとした。これにより、プリフォームの肉厚は1.0

Table 1 Experimental conditions of deep drawing for wavy preform deformation

		Material	Feature	Size
Punch	First deep drawing	SKD11	Misumi corp.	$\phi 19.0 \times 85 \text{ mm}$ $r_p: 9.0$
	Redrawing	SKD11	Misumi corp.	Base circle diameter $\phi 16.78 \text{ mm}$ Sine curve Amplitude 0.08 mm Height 100 mm Number of waves 16 $r_p: 6.0$
Die	First deep drawing	SKD11	Misumi corp.	Height 40 mm Outer diameter $\phi 45 \text{ mm}$ Inner diameter $\phi 25 \text{ mm}$ $r_d: 5 \text{ mm}$ $\alpha: 20^\circ$
	Redrawing	SKD11	Quenching 820°C (Water cooling) Tempering 150°C (Furnace cooling)	Height 40 mm Outer diameter $\phi 45 \text{ mm}$ Base circle diameter $\phi 18.78 \text{ mm}$ Sine curve Amplitude 0.08 times of base circle radius Number of waves 16
Blank		A1050	Annealing 420°C (Air cooling)	$\phi 43.0 \times 1.0 \text{ mm}$
Lubricant		Beef tallow	First deep drawing → Die side only Redrawing → Die side only	

mmになる。両工程とも潤滑剤に牛脂を用い、素材の片面(ダイ側)のみに塗布した。

なお、最適なプリフォーム形状を選択することは、本加工方法実現のための主要な構成要素である。けれども、この最適化は後の課題とし、本検討では、先見的に定めたプリフォーム形状を用いている。

3・2 冷間型鍛造 冷間鍛造に用いた実験装置の概要を図3に示した。本装置の能力250 kNの油圧プレスに設置して加工を実施した。ここでは便宜的に下部のパンチは固定し、上部のパンチのみで加工を行う片打ち機構を用いた。上下2個のパンチ②の間にプリフォーム⑦と内層材とを挿入し、上部のパンチを圧下

Fig. 3 Experimental apparatus for die forging

することにより、両材料をダイ③の型孔内に充填させる。この際、両素材の接合と外殻材の歯車成形とを同時に実現する。本装置ではロードセル①により加工力を測定し、変位計⑥によりパンチストロークを測定する。

冷間型鍛造の加工条件を表2に示した。製品となる歯車の諸元を基準ピッチ円直径24 mm、モジュール1.5、歯数16枚とした。パンチおよびダイの孔形状の諸元は製品歯車の諸元と同じである。高さ15 mmの波形状プリフォームの内側に外径 $\phi 15.5$ mm、内径 $\phi 7.5$ mm、高さ15 mmの中空円筒形のアルミニウム素材を挿入し内層材として用いた。なお、内層材を中空とした理由は、冷間鍛造時に材料の半径方向の分流を促し、加工力の低減と材料の型孔内の充填を図るためである。潤滑剤には牛脂を用い、波形状プリフォームの外周側に塗布した。

4. 結果と考察

4・1 クラッド歯車成形 図4に示した写真は、クラッド歯車の成形例である。外殻部に歯車形状が成形されており、提案する方法によりクラッド歯車の成形が可能であることが確認された。両材料の界面は波形状となっており、歯車使用時に負荷される円周方向のせん断力に対して有利であることが期待される。また、図5はクラッド歯車の軸方向断面の写真である。界面輪郭を明確にするためスケッチを併せて示した。界面は軸に平行ではなく、厚み方向の中心部が半径方向外側へ膨らんだ形状になっている。以上の図4と5の結果から、両材料の接合界面は三次元的に入り組んだ形状となっていることが確認された。

一般に、塑性加工にかかわる接合機構は、(1)金属同士の直接接触に基づく金属接合(圧接)と、(2)かし

Table 2 Experimental conditions for cold die forging

	Material	Feature	Size
Punch	SKD11	Kohara gear industry corp. SSG1.5-16	Height 30 mm Pitch circle diameter $\phi 24$ mm Module 1.5 Number of teeth 16
Die	SKD11	Misumi corp. FMSD45-40.0-P12.50-S3-G13.0	Height 40 mm Outer diameter $\phi 45$ mm Pitch circle diameter $\phi 24$ mm Module 1.5 Number of teeth 16
Wavy preform	A1050	Annealing 420°C (Air cooling)	Base circle diameter (Outer) $\phi 18.78$ mm (Inner) $\phi 16.78$ mm Sine curve Amplitude 0.08 times of base circle radius Number of waves 16 Height 15 mm
Cylindric bulk	A1050	Annealing 420°C (Air cooling)	Diameter (Outer) $\phi 15.5$ mm (Inner) $\phi 7.5$ mm Height 15 mm
Product (Gear)	A1050		Pitch circle diameter $\phi 24$ mm Module 1.5 Number of teeth 16

Fig. 4 Deformed clad gear. Joint face has wavy profile.

Fig. 5 Cross section of deformed clad gear cut in axial direction. Boundary has convex contour.

めに代表される構造締結とに大別される。本加工工程における接合機構は、接合界面の形状が入り組んだものであることから、後者の構造締結に類するものであると考えられる。したがって、異種金属材料の接合の場合

において、実質的な金属接合が実現され難い場合であっても締結一体部材としての接合強度を維持しうることが期待される。この利点は、外殻材として波形状プリフォームを用いたことに基づいている。図6には、深絞り加工後の波形状プリフォーム、冷間鍛造前のプリフォームおよび、冷間鍛造後の歯車の外観写真を併せて示した。

4・2 加工力の検討 提案する加工法では、最終の冷間鍛造工程において接合が行われ、これにより、クラッド歯車の成形が実現される。この工程における加工力のレベルを、従来の単一素材による歯車鍛造の加工力と比較することは、金型工具寿命の観点およびプレス能力の観点から重要である。比較に用いた単一素材の高さおよび内径は、クラッド材用の波形状プリフォームと同一の15 mm および $\phi 7.5$ mm とした。また、体積をクラッド材の全体積と同一にするため外径を $\phi 17.5$ mm とした。単一素材から成形したテストピースの外観写真を図7に示した。両条件の加工力を比較するため、加工力とストロークの関係を図8に示し

Fig. 6 Drawn wavy preform, parts before forging, and forged gear.

Fig. 7 Deformed gear from single material. Filling of teeth is not sufficient. Center hole diameter is smaller.

た。クラッド歯車の場合の最大加工力は130 kNであり、単一素材から加工した場合の最大加工力150 kNと比較すると、約20 kN低い。今回の実験では、ロードセルの能力の制約のため単一素材の加工を150 kNで終了したが、クラッド歯車の場合と同程度の材料充填を得るためには、より大きい加工力が必要である。この場合にはクラッド歯車における加工力の低減代は20 kNよりさらに大きいものと考えられる。

次に、加工力の差異の理由を明らかにするため材料の型孔内への充填について考察する。図4の外観写真より明らかなようにクラッド歯車では、単一素材から成形したものと比較して、歯先までの材料充填が著しい。一方、図7の単一素材から成形した場合は歯先に十分に材料が充填しておらず、特に、図7中の下端面側では未充填が顕著である。また、半径方向の内向きの材料流動による内孔の直径減少が著しく、充填した歯末の部分(円筒の上端面部)からはバリが生じている。内孔直径についてのクラッド歯車との差異の理由は、単一素材の場合は半径方向外向きの材料流動の抵抗が大きく、内向き流動が顕著になったためである。クラッド歯車の場合には、外向きの材料流動に対する抵抗が少ないために、材料の歯形孔内への充填が顕著であり、また内孔直径の減少もわずかであると考え

る。一般に型鍛造の行程終期において材料が型孔内に充填され密閉状態に近づくと、材料の逃げ場がなくなり加工力が急増する。したがって、これを回避するためには、材料表面のうち、工具との接触の無い表面(以降「自由表面」と称す)を行程終期までできる限り維持することが有効である⁽⁷⁾。

Fig. 8 Load-stroke diagram for comparison of load level

図9はクラッド歯車の場合に外向きの材料流動に対する抵抗が少ない理由を、自由表面積の観点から考察するための写真であり、冷間鍛造の加工行程に伴う内外両部材の接触状況を示している。例えば、左から二つめの加工途中(ストローク8.0mm)のテストピースを見ると、内層材と外殻材の間には自由表面としての隙間が残っている。この隙間は以降の行程の進行に伴い次第に減少するが、元来、これらの隙間が全くない単一素材の場合と比較すると、自由表面の観点から、内層材の半径方向外向きの材料流動が容易であると推察される。

5. 結 言

本研究ではクラッド歯車成形の開発を目的として、アルミニウム材料を用いたシミュレーション成形実験を試みた。その結果、以下の点が明らかになった。

(1) 波形状プリフォームに円筒形状の内層材を挿入して、接合と歯車形状成形とを同時に実現する冷間鍛造するタイプの新たな加工工程により、クラッド歯車を成形することができた。

(2) 新たなクラッド歯車成形の冷間鍛造工程について、加工力レベルを検証するため、単一素材の型鍛造との比較を行った。その結果、新たな加工法では加工力が低減された。本実験の範囲では、この低減率は約20kNであった。また、材料の自由表面と塑性流

Fig. 9 Transition of contact free area of material.

動の観点から新加工法における加工力低減の理由が考察され、波形状プリフォームは行程中の自由表面の維持に有利であり、これが加工力低減に寄与しているものと推定された。

文 献

- (1) 川並高雄, 塑性と加工, **32**-360(1991), 3-12.
- (2) 平岩正至・近藤一義, 機論, **40**-336(1974), 2398-2406.
- (3) 平岩正至・近藤一義, 機論, **42**-360(1976), 2625-2631.
- (4) 平岩正至・近藤一義, 機論, **49**-440, C(1983), 695-703.
- (5) 平岩正至・近藤一義, 機論, **50**-455, C(1984), 1298-1305.
- (6) 近藤一義・平岩正至, 塑性と加工, **32**-360(1991), 13-19.
- (7) 近藤一義, 塑性と加工, **24**-271(1983), 801-808.