

技術資料



Technical Data

1500ton鍛造シミュレータを用いたDSALLOY[®]718の自由鍛造形状評価技術開発

大竹拓至*¹, 杉野 敦*¹, 岡島琢磨*², 本橋功会*³, 黒田秀治*³, 御手洗容子*⁴

Development of a Free Forging Shape Evaluation Method Using a 1500-ton Forging Simulator in DSALLOY[®]718

Takuji OTAKE, Atsushi SUGINO, Takuma OKAJIMA, Norie MOTOHASHI, Syuji KURODA and Yoko YAMABE-MITARAI

Synopsis

Free forging is a method of sequential forming by multiple blows using a simply shaped anvil, so it has an advantage over die forging in that the load is lower and large products can be formed with a relatively small press load. On the other hand, it is necessary to specify the forging process in detail in order to stably satisfy the required characteristics of the product. In this study, a free forging evaluation method was developed using a 1500-ton forging simulator, the effects of different height-diameter ratios and forging methods (rotary forging, cross forging, and helical forging) on free forging were investigated, and the following test results were obtained. In the case of rotary forging, the shape becomes oval and necked. In cross forging, the shape becomes octagonal, and the neck is suppressed. Helical forging produces a circular shape with the same necked shape as rotary forging. Using the same forging method, the lower the height-diameter ratio, the more the neck is suppressed.

1. 緒 言

近年、火力発電設備は発電効率向上のために大型化、燃焼温度の上昇が求められており、その心臓部の構成部材であるガスタービンディスクには耐熱性と耐食性に優れる DSALLOY[®]718¹⁾ などの Ni 基超合金が使用される。Ni 基超合金のディスク成形には型鍛造だけでなく、自由鍛造が用いられることがある。自由鍛造は単純形状の金敷を用いて複数の打撃で逐次成形する工法であるため、型鍛造対比で荷重が低く、比較的小さなプレス荷重

でも大型の製品を成形できる利点がある。一方で、製品の要求特性を安定的に満足させるために、鍛造工程を細かく定める必要がある。大同特殊鋼(株)では、鍛造シミュレーションシステム DAINUS^{®2), 3)} を用いてこの鍛造工程を設計してきたが、近年の製品の大型化、品質要求の高難度化に伴い、鍛造工程中の形状変化の過程に注目した、より詳細な鍛造工程設計が必要となってきた。そこで、鍛造シミュレーションシステムに加え、小型試験片で実機の鍛造工程を模擬した評価試験法の必要性が高まった。

2021年9月30日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 工博 (Dr. Eng., Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 3 国立研究開発法人物質・材料研究機構 (National Institute for Materials Science)

* 4 国立研究開発法人物質・材料研究機構, 東京大学, 工博 (Dr. Eng., National Institute for Materials Science, The University of Tokyo)

物質・材料研究機構にて導入された1500トン鍛造シミュレータ^{4), 5)}は熱間恒温雰囲気中で精密な熱間鍛造試験が可能であり、小型試験片であっても抜熱影響を除去できる装置である。鍛造実績データの採取も可能であり、実機材の加工熱履歴を模擬した評価試験機として必要な能力を有している。

そこで、本研究では1500トン鍛造シミュレータを用いた自由鍛造評価手法を開発し^{6), 7)}、DSALLOY[®]718において材料の初期形状である高径比(=材料高さ÷材料径)や鍛造方法(回転押し、十字押し、らせん押し)の違いが、鍛造荷重、鍛造後形状、鍛造後組織におよぼす影響を調査した。また、基礎調査結果から検討した理想的な鍛造方法でミニチュアディスクを作成し、鍛造方案の妥当性について検証した。

2. 実験方法

供試材は、Ni基超合金DSALLOY[®]718の圧延材を固溶化熱処理1050℃×8h/WCにより結晶粒度#2に調整したのち、φ95×70, 100, 140mmの3種類の円柱試験片に機械加工したものを用いた。供試材の化学成分分析値をTable 1に示す。

試験機には1500トン鍛造シミュレータを用いて、ダイセットの回転機構とプレス内加熱炉を利用し、恒温雰囲気中で回転逐次成形が可能な仕組みを構築した。試験機の概要をFig. 1に示す。上金敷により供試材の上面を部分的に打撃し、上金敷を一定量回転させて打撃位置をずらす動作を繰り返し、複数回打撃することで全面を鍛造した。試験方法の概要をFig. 2に示す。本試験では同一下死点のまま回転角一定で鍛造する「回転押し」、同一下死点で回転角を0-90-45-135°と変化させる「十字押し」、回転角一定で下死点を1mmずつ徐々に低下させる「らせん押し」の3種類の鍛造方法を実施し、材料初期形状の高径比を変化させた場合の試験についても実施した。試験条件一覧をTable 2に示す。鍛造方法の影響については高径比1.0の試験片にて比較した。また、高径比の影響についてはらせん押しの試験にて比較した。試験条件と同様の条件でFE(Finite Element)シミュレーションを実施し、ひずみ分布を求めた。シミュレーション条件をTable 3に示す。

試験中にはロードセルにより荷重を測定し、試験後には形状評価および光学顕微鏡を用いた断面のミクロ組織観察を実施した。観察面は鏡面研磨し、10%シュウ酸水溶液を用いてオーステナイト粒界が観察できるように電解腐食を実施した。

Table 1. Chemical composition of DSALLOY[®]718 (mass%).

Ni	Fe	Cr	Mo	Nb	Ti	Al	C
53.8	Bal.	18.2	3.2	5.5	1.0	0.5	0.03

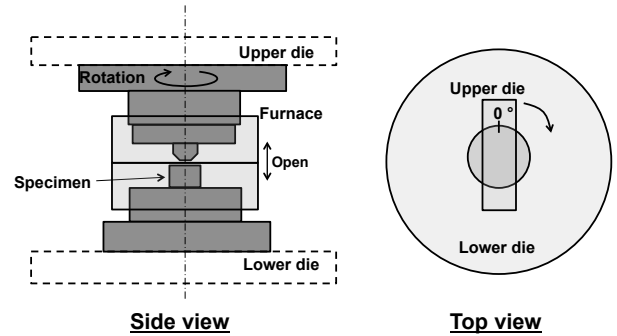


Fig. 1. Overview of isothermal rotary forging test.

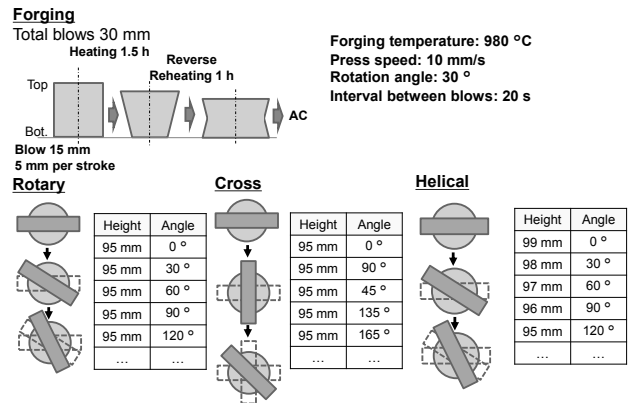


Fig. 2. Overview of forging method.

Table 2. Condition of forging test.

Height diameter ratio	1.0	1.0	1.0	0.7	1.4
Forging method	Rotary	Cross	Helical	Helical	Helical

Table 3. Condition of FE simulation.

Software	Simufact.forming 16.0	
Analyzed model	3D	
Specimen	Plastic-Elastic	
Tools	Rigid	
Contact condition	Coulomb friction 0.4	
Heat conductivity [kW/m ² K]	to air	0.12
	to tools	2.00

実用的な鍛造方案の妥当性を検証するため、Fig. 2の成形方法を組み合わせた多ヒート鍛造によりミニチュアディスクを作成する実証的試験も実施した。試験方法の概要をFig. 3に示す。鍛造前半を十字押し、鍛造後半を

らせん押しで鍛造することで良好な円盤形状への成形方法を目指した。

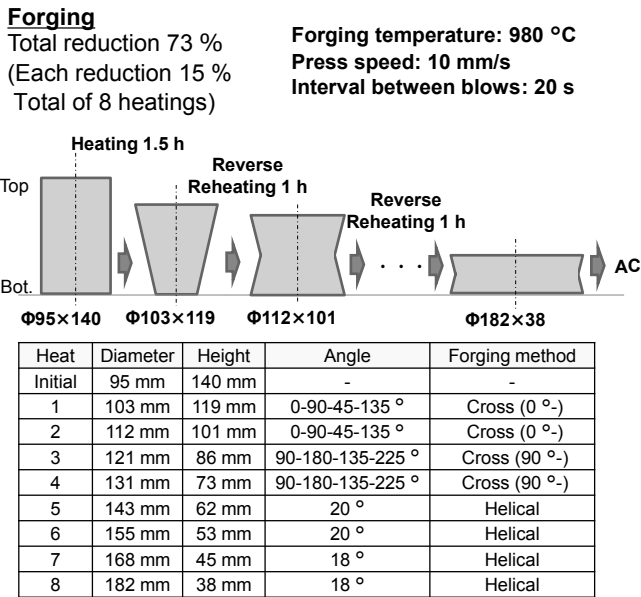


Fig. 3. Overview of forging test for mini disk.

3. 結果および考察

3. 1 鍛造方法が鍛造後形状へおよぼす影響

高径比 1.0 (Height diameter ratio : H/D 1.0) の場合における、鍛造方法による最大荷重の比較を Fig. 4 に示す。らせん押しの最大荷重が最も小さい結果となった。これは、1 打撃あたりの押し込み量が小さく、接触面積が少なかったためと考えられる。鍛造方法による鍛造後外観の比較を Fig. 5 に、打撃ごとの鍛造形状変化の FE シミュレーションを Fig. 6 にそれぞれ示す。十字押しのかびれが最も少なく、らせん押しが最も円形度の高い結果となった。回転押しでは 1 打撃目の接触面積が大きく、2 打撃目以降は鍛造部位が重なり接触面積が小さくなった。また、1 打撃目は接触面積と圧下量が大きいため、拘束が大きく内部までひずみが導入され、2 打撃目以降は接触面積が小さいため、拘束が小さく打撃面付近にひずみが導入された。このことから、1 打撃目の拘束が大きい影響で楕円に近い形状となり、2 打撃目以降は打撃面が集中して変形することで、上下面が拡がりくびれた形状となったと考えられる。十字押しでは回転押し対比、2 打撃目の鍛造部位の重なりが少なく、接触面積が大きくなった。また、2 打撃目までは接触面積と圧下量が大きいため、拘束が大きく内部までひずみが導入された。このことから、2 打撃目までの拘束が大きい影響

で八角形に近い形状となり、回転押し対比、打撃面近傍への変形集中が緩和され、くびれが少なくなったと考えられる。らせん押しでは各打撃で押し込み深さが異なるため、接触面積の変化が少なかった。また、接触面積が大きいものの圧下量が小さいため、特定の方向への拘束が小さく打撃面にひずみが導入された。このことより、各打撃の拘束が小さい影響で円形を保ったまま変形し、打撃面が集中して変形することで、上下面が拡がりくびれた形状となったと考えられる。鍛造方法によるマイクロ組織の比較を Fig. 7 に示す。回転押し、十字押しでは Mid. 部の再結晶面積率が高いのに対し、らせん押しでは Top, Bot. 部の再結晶面積率が高かった。これは、回転押し、十字押しでは 1 打撃あたりの押し込み量が大きく Mid. 部にひずみが導入されやすいのに対し、らせん押しでは 1 打撃あたりの押し込み量が小さく Top, Bot. 部にひずみが導入されやすい影響によるものと考えられる。

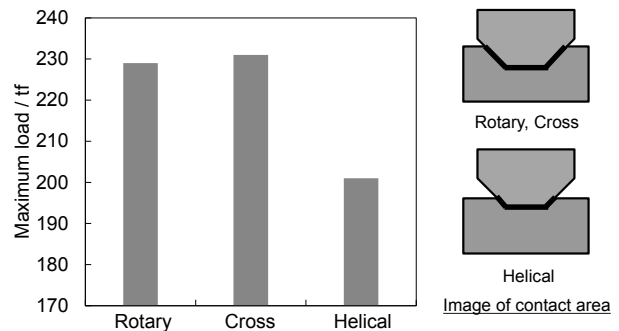


Fig. 4. Comparison of maximum load by each forging methods (H/D 1.0).

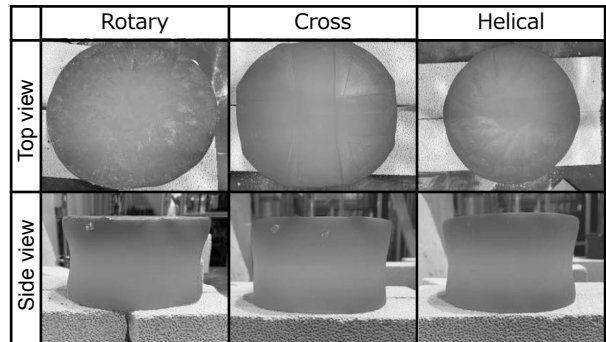


Fig. 5. Comparison of forging shapes by forging method (H/D 1.0).

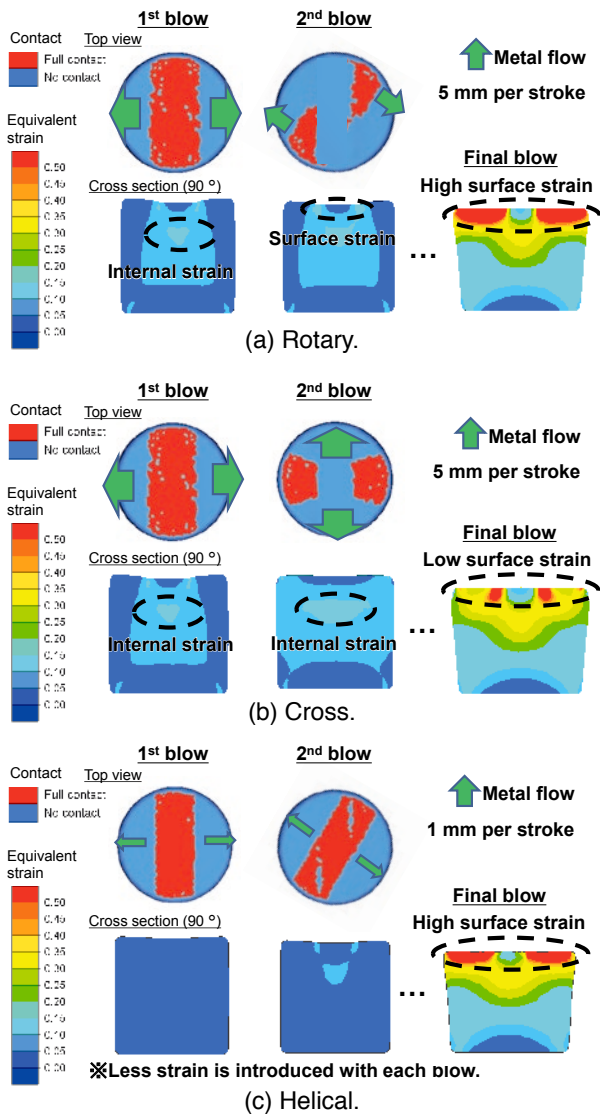


Fig. 6. Changes in forging shape for each blow by forging method in FE simulation (H/D 1.0).

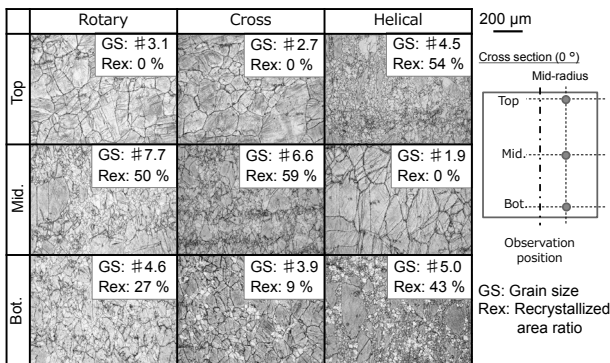


Fig. 7. Comparison of microstructures by forging method (H/D 1.0).

3. 2 高径比が鍛造後形状へおよぼす影響

らせん押し (Rotary) における、高径比による最大荷重の比較を Fig. 8 に示す。高径比が高い条件では最大荷重が小さい結果となった。これは、Mid. 部があまり変形せず、断面積が小さかったためと考えられる。高径比による鍛造後外観の比較を Fig. 9 に、打撃ごとの鍛造形状変化の FE シミュレーションを Fig. 10 にそれぞれ示す。くびれは高径比が高くなるにつれて大きくなり、円形度はどの高径比でも高い結果となった。高径比が低い方が 1 打撃あたりのひずみが大きく、内部までひずみが導入された。また、高径比が低い場合は、ひずみ導入部が材料高さ中心まで到達した。このことより、鍛造方法が同一の場合には高径比が低いほどくびれが抑制されたと考えられる。高径比によるマイクロ組織の比較を Fig. 11 に示す。高径比 0.7 と低い条件では Mid. 部の再結晶面積率が他の高径比と比較して高かった。これは、高径比が高い条件と比べて Mid. 部の変形が大きく、より多くのひずみが導入されたためと考えられる。また、高径比 1.4 と高い条件では Top, Bot. 部の再結晶面積率が高かった。これは、高径比が低い条件と比べて Top, Bot. 部の変形が大きく、より多くのひずみが導入されたためと考えられる。

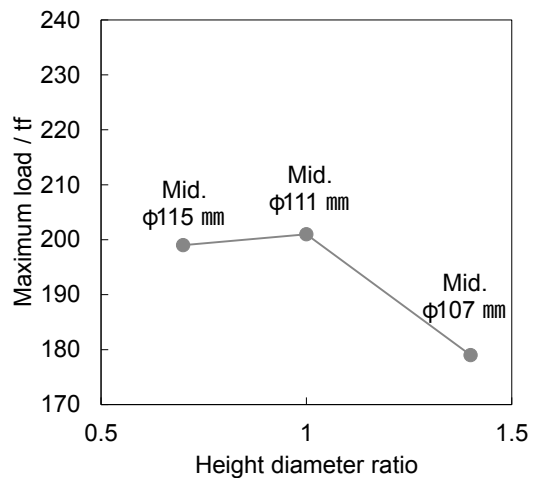


Fig. 8. Comparison of maximum load by height diameter ratio (rotary).

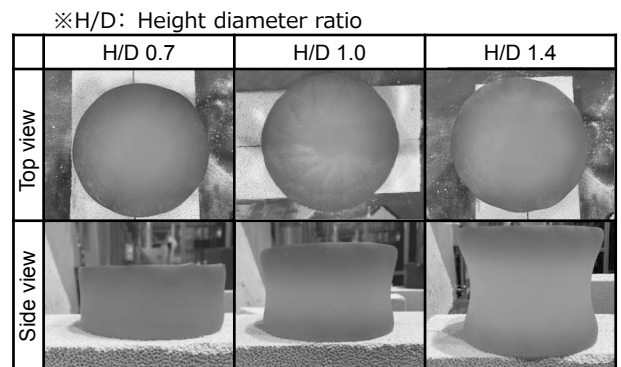


Fig. 9. Comparison of forging shapes by height diameter ratio (rotary).

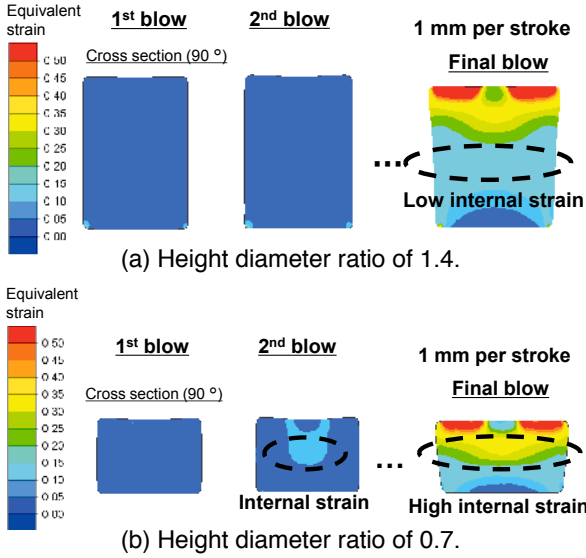


Fig. 10. Changes in forging shape for each blow by height diameter ratio in FE simulation (rotary).

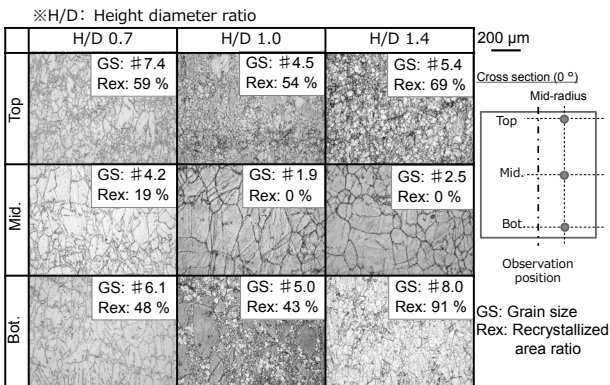


Fig. 11. Comparison of microstructure by height diameter ratio (rotary).

3. 3 鍛造方案設計の実証的鍛造試験

鍛造方案設計の実証的鍛造試験における各ヒートの最大荷重を Fig. 12 に示す。1～4 ヒートおよび5～8 ヒートではヒートが進むにつれて最大荷重が増加する傾向が得られた。これは、圧下が進むにつれて断面積が増加した影響と考えられる。5 ヒート目にて十字押しかららせん押しにすることにより、前項と同様に最大荷重が低下した。これは、十字押しとらせん押しの最大荷重が同程度となり、負荷が分散されるためと考えられる。鍛造後形状を Fig. 13 に示す。円形度が高く、くびれが少ない形状で鍛造された。鍛造前半では十字押しによりくびれが低減し、鍛造後半ではらせん押しにより高い円形度で鍛造されると考えられる。鍛造後の組織を Fig. 14 に示す。Top, Mid., Bot. のすべてにおいて微細組織になることを確認した。以上の結果より、十字押しとらせん押しの組合せにより鍛造荷重、鍛造後形状、鍛造後組織の良好なディスク鍛造が可能となる傾向が得られた。

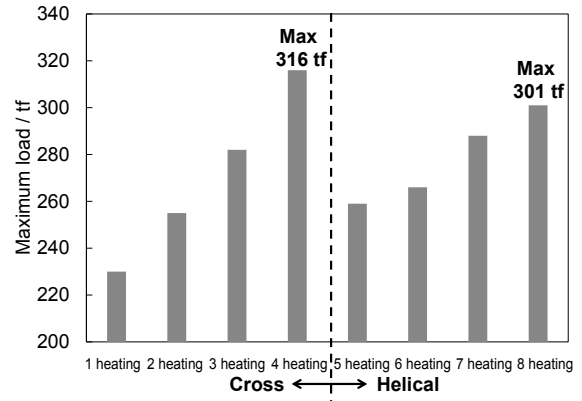


Fig. 12. Maximum load of forging test for mini disk.

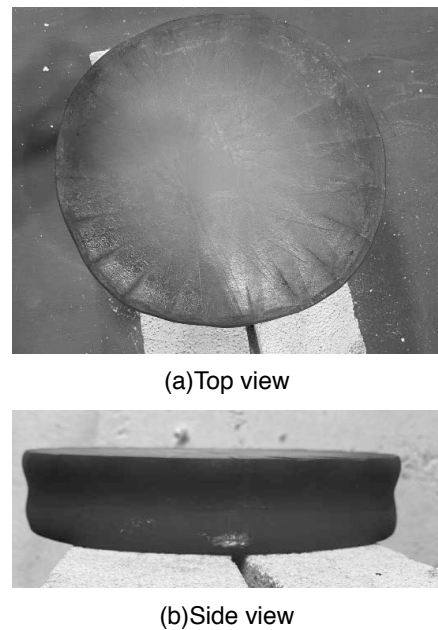


Fig. 13. Forging shape of forging test for mini disk.

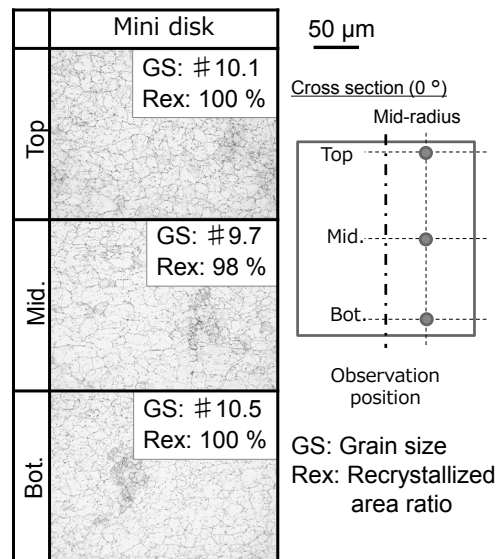


Fig. 14. Microstructure of forging test for mini disk.

4. 結 言

本研究では1500トン鍛造シミュレータを用いた自由鍛造評価手法を開発し、DSALOY[®]718において鍛造方法や高径比の違いが自由鍛造におよぼす影響を調査した。また、多ヒート工程を模擬したミニチュアディスク鍛造も実施し、その結果、以下の知見を得た。

- 1) 自由鍛造によるディスク成形を実施する場合、接触面積と圧下量が大きい場合、拘束が大きく内部までひずみが導入され、どちらかが低い場合は拘束が小さく打撃面付近にひずみが導入される。
- 2) 回転押しでは楕円形となり、くびれた形状となる。十字押しでは八角形となり、回転押し対比くびれが抑制される。らせん押しでは円形となり、回転押し同等のくびれた形状となる。同一の鍛造方法では高径比が低いほどくびれが抑制される。
- 3) ディスク鍛造工程初期ではくびれ低減に有効な十字押し、ディスク鍛造工程後期では円形度の良好ならせん押しにより、くびれが少なく、円形度が高いディスク鍛造が可能となる。

(文 献)

- 1) R. C. Hall: Journal of Basic Engineering, **89**(1967), 511.
- 2) 吉田広明, 岡島琢磨, 八田武士, 藤原正尚, 伊藤樹一: 電気製鋼, **78**(2007), 263.
- 3) 櫻井信吾, 西澤聡, 八田武士, 岡島琢磨, 木村利光: 電気製鋼, **82**(2011), 117.
- 4) 御手洗容子: ふえらむ, **22**(2017), 480.
- 5) 御手洗容子, 黒田秀治, 本橋功会, 松本洋明, 逸見義男, 石外伸也: チタン, **66**(2018), 160.
- 6) 大竹拓至, 杉野敦, 岡島琢磨, 本橋功会, 黒田秀治, 御手洗容子: 塑性加工連合講演会講演論文集, (2020), 17.
- 7) 大竹拓至, 杉野敦, 岡島琢磨, 本橋功会, 黒田秀治, 御手洗容子: 塑性加工春季講演会講演論文集, (2021), 175.



大竹拓至



杉野 敦



岡島琢磨



本橋功会



黒田秀治



御手洗容子