

超音波印加塑性加工法の開発

1. 諸言

塑性加工において、被加工材料に超音波振動を印加すると、加工に必要な力が低減する、加工限界が向上するといった効果が得られる。これを Blaha 効果という。この Blaha 効果を塑性加工に利用しようとする試みは実用化が検討されてきたが、超音波を印加することで生じる効果のメカニズムが十分に解明されておらず、超音波の印加方法や装置の取り付け方法の理論的法則が確立されていないなどの理由から、一部の利用例を除いて未だ実用化に至っていないのが現状である。

そこで本研究では、Blaha 効果の特性を理解し、そのメカニズムを解明することを目的とし、その為に、まず Blaha 効果の確認実験として、単純な定変位速度での圧縮試験において超音波を印加する実験と、定荷重での圧縮試験で超音波を印加する実験を行った。そして、エネルギー論を用いて Blaha 効果のメカニズムに関して考察を行った。

2. 実験方法

2.1 超音波振動の発生

まず、発振器で発生させた高周波電力を、増幅器で増幅する。そして、振動子で高周波電力を機械振動に変換し、ホーンでその機械振動を伝送・変換する。振動子・ホーンからなる振動系は、機械共振を利用して大きな振動を発生させる。

2.1 定変位速度超音波圧縮試験

図 1 に定変位速度超音波圧縮試験の実験装置の概略図を示す。実験は引張圧縮試験機を用いて行い、振動子は周波数 28kHz のものを用いた。圧縮速度 0.2mm/min で圧縮し、塑性変形中に超音波を印加した。

2.1.1 発振器電圧(振動振幅)変化実験

試験片は A1070 の直径 10mm、長さ 15mm とし、発振器電圧は 100, 200, 300mV の 3 種類とした。

2.1.2 試験片直径変化実験

試験片は A1070 の直径 10, 12, 14mm、長さ 15mm の 3 種類とし、発振器電圧は 300mV とした。

2.2 定荷重超音波圧縮試験

図 2 に定荷重超音波圧縮試験の実験装置の概略図を示す。実験は手動式のプレス機を用いて行い、試験片は A1070 の直径 10mm、長さ 15mm とし、振動子は周波数 28kHz のものを用いた。発振器電圧は 100, 200, 300mV とし、定荷重を 10kN とし、荷重が 10kN に達してから超音波を印加した。

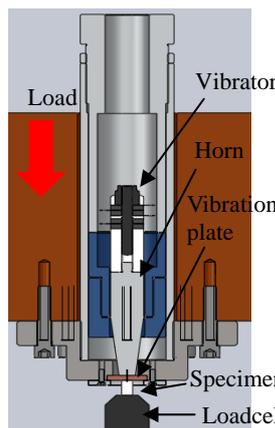


Fig.1 Ultrasonic vibration applied compression testing system in constant crosshead speed

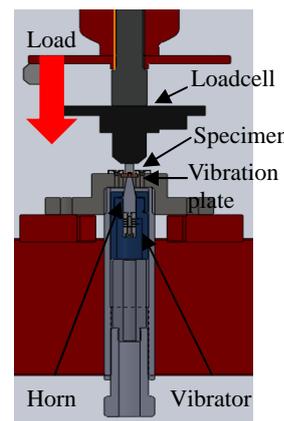


Fig.2 Ultrasonic vibration applied compression testing system in constant load

3. 実験結果及び考察

3.1 Blaha 効果の確認

発振器電圧を変化させての定変位速度超音波圧縮試験の実験結果を図 3 に示す。超音波振動は図 3 において、応力が急激に低減している箇所印加し、応力が元に戻っている箇所印加終了している。塑性変形中に超音波を印加すると図 3 のように応力が低減しており、変形抵抗が減少しているのが確認できた。

次に、定荷重超音波圧縮試験の実験結果を図 4 に示す。図 4 において、 $t=40[s]$ 付近で荷重は 10kN に達しており、そこで、超音波を印加している。超音波を印加すると図 4 のようにひずみが増大し、塑性変形能が向上していることが確認できた。

以上から塑性変形中に被加工材料に超音波振動を印加することで Blaha 効果が現れることが確認できた。そこで次に、発振器電圧ごとにそれぞれ応力低減率、ひずみ増大率を求めた。計算結果を図 5, 6 に示す。電圧、すなわち振動振幅を大きくすると応力低減率・ひずみ増大率も大きくなり、その変化はほぼ直線的となった。従って、印加電圧、振動振幅を大きくすると Blaha 効果が大きくなるのが明らかになった。

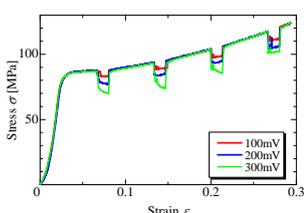


Fig.3 σ - ϵ curve of oscillator voltage 100, 200, and 300mV

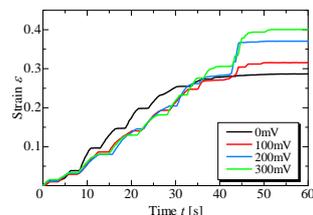


Fig.4 Result of ultrasonic vibration applied compression test in constant load

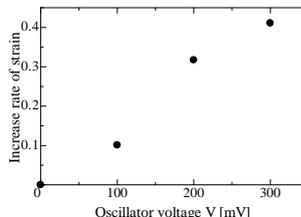


Fig.5 Relationship between increase rate of strain and oscillator voltage

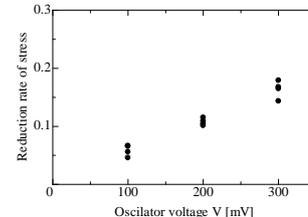


Fig.6 Relationship between reduction rate of stress and oscillator voltage

3.2 応力低減部における応力緩和挙動

図 3 において、超音波を印加した際に応力が大幅に低減した後、徐々に応力が低下する傾向を示す。この現象を応力緩和と仮定する。応力緩和は、

$$\sigma = \sigma_0 - \alpha_\gamma \ln(1 + v_\gamma t) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 σ_0 は初応力、 α_γ と v_γ は時間に無関係の定数である。これより、図3の超音波印加中の応力低下現象と比較すると、図7のようになる。このように、超音波印加中の応力低下現象は応力緩和の式とよく一致しており、この現象は応力緩和であると考えられる。また、発振器電圧が小さくなるほど応力緩和率は小さくなることがわかった。

3.3 試験片直径が Blaha 効果に及ぼす影響

試験片直径を変化させての定変位速度超音波圧縮試験の実験結果を図8に示す。また、試験片直径ごとに応力低減率を求め、図9に示す。このように、試験片直径が大きくなると、応力低減率は小さくなっていく。これは超音波振動による仕事、すなわち超音波エネルギーは試験片直径が変化しても変化はなく、試験片を大きくすることで、Blaha効果は小さくなると考えた。そこで、図8において、応力が低減した部分を簡単に近似し、面積を計算することで超音波エネルギーを求めた。結果を図10に示す。超音波エネルギーは試験片寸歩に関係なくほぼ等しい値となり、大きな試験片で Blaha 効果を得るには、相応の超音波エネルギーが必要ということが明らかとなった。

3.4 Blaha 効果のメカニズムに関するエネルギー論的考察

図11に示すように、材料中に転位などの欠陥が全くない場合を考える。理論せん断強度 τ_{max} は

$$\tau_{max} = \frac{Gb}{2\pi d} \quad (2)$$

で与えられる。また、すべり面のすぐ上の原子が下の結晶から受けるポテンシャルエネルギーは、

$$U = \frac{b\tau_{max}}{2\pi} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{b}\right) \right] \quad (3)$$

となる。超音波によるエネルギーを ΔU とすると、原子がA-B間を振動する。このときのポテンシャルエネルギー U_{us} は、

$$U_{us} = \frac{b\tau_{max-us}}{2\pi} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{b}\right) \right] + \Delta U \quad (4)$$

となる。ここで、 τ_{max-us} は超音波を印加したときの理論せん断応力である。すなわち、図12に示すように、超音波振動によって原子が ΔU だけポテンシャルエネルギーの高い位置に移動させられるということになる。また、式(3)、(4)の U と U_{us} の最大値に変化はないので、 $U(b/2) = U_{us}(b/2)$ とおくと、

$$\tau_{max-us} = \tau_{max} - \frac{\Delta U}{b} \quad (5)$$

となる。式(5)の右辺第二項が超音波印加によって低減したせん断応力となる。

このようにして超音波を印加したときの理論せん断応力を算出できたが、材料中の転位を考慮していないので実際の値よりも大きな値になると考えられる。しかし、Blaha効果のメカニズムについては定性的に説明することができた。

4. 結言

- (1) 印加電圧(振動振幅)を大きくすると Blaha 効果は大きくなることを明らかにした。
- (2) 超音波印加中の応力低下現象は応力緩和であり、発振器電圧が小さくなるほど応力緩和率は小さくなることがわかった。
- (3) 大きな Blaha 効果を得るには大きな超音波エネルギーが必要となることが分かった。
- (4) 超音波を印加したときの理論せん断応力 τ_{max-us} を求め、Blaha効果のメカニズムを定性的に説明した。

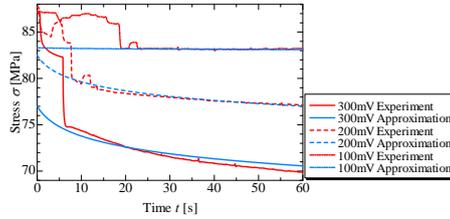


Fig.7 Stress relaxation at area of reduction of stress

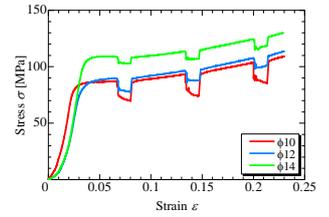


Fig.8 σ - ϵ curve of specimen diameter 10, 12, and 14mm

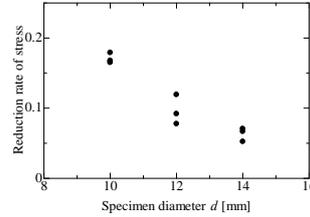


Fig.9 Relationship between reduction rate of stress and specimen diameter

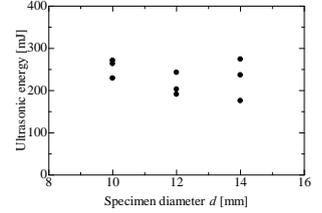


Fig.10 Relationship between ultrasonic energy and specimen diameter

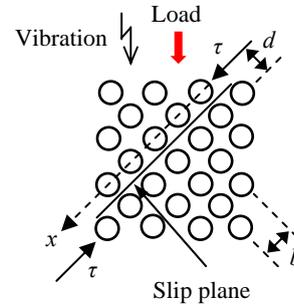


Fig.11 Dislocation-free material

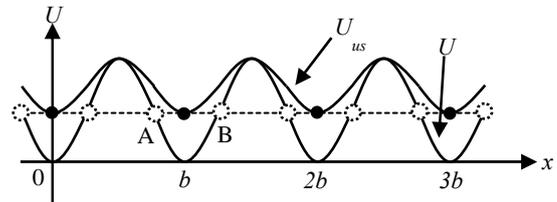


Fig.12 Mechanism of Blaha effect